



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft

Dissertation



UAV-gestützte Vermessung im Bergbau -  
Zur Frage der Genauigkeit unter  
Verwendung von Structure from Motion

Dipl.-Ing. Alexander Tscharf, BSc

Januar 2020



## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 20.01.2020

---

Unterschrift Verfasser/in  
Alexander, Tscharf



# Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als Projektmitarbeiter und Universitätsassistent am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft an der Montanuniversität entstanden, weshalb ich mich an erster Stelle bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Peter Moser für die Anerkennung dieser Arbeit und die kooperative Zusammenarbeit auf allen Ebenen bedanken möchte. Mein Dank gilt jedoch auch dem gesamten Team der Bergbaukunde, die mich im Laufe der Jahre begleitet und unterstützt haben, wobei ich an dieser Stelle besonders unseren ehemaligen Kollegen Klaus Manhart hervorheben möchte, der meiner Forschungs idee auch wörtlich Flügel verliehen hat.

Einen großen Dank möchte ich allerdings auch an die TU Graz und stellvertretend für alle aktuellen und ehemaligen Mitarbeiter an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Horst Bischof richten. Ohne die Unterstützung der TUG wäre meine Arbeit wohl gar nicht möglich gewesen und deshalb noch einmal ein herzliches Dankeschön für das zur Verfügung stellen der notwendigen Software und ein aufrichtiger Dank an alle, die mich im Laufe der Jahre in die Untiefen der C++ Programmierung eingeführt haben.

Nicht unerwähnt möchte ich jedoch auch die Unterstützung seitens der Pronat Steinbruch Preg GmbH sowie der Gebrüder Peter und Max Boschi lassen, die mir einerseits ein eigenes Testfeld und andererseits ihre Ausrüstung und ihre fliegerische Erfahrung bei der Durchführung meiner Versuche zur Verfügung gestellt haben. Herzlichen Dank dafür.

In ganz besonderer Weise will ich mich jedoch bei Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard Mayer bedanken. Im Laufe der Jahre hast du mich von einem Studenten zu einem beinahe gleichwertigen Kollegen wachsen lassen, mir neben inhaltlichen Hilfestellungen vor allem organisatorisch immer den Rücken frei gehalten und mich persönlich, menschlich und auch freundschaftlich beraten und unterstützt. Ich bin dir dankbar für dein Gefühl nötige Strenge und wissenschaftliche Freiheit abzuwägen, und auch für die ein oder andere gut gemeinte Kopfwäsche, wenn ich mich wieder einmal Hals über Kopf in "Ablenkungsaufgaben" gestürzt habe.

Einen unendlich großen Dank möchte ich aber auch meiner Partnerin Anja sagen. Du hast mich gepusht und angetrieben und ganz ehrlich hätte ich mich wohl vor allem in der finalen Phase nicht aufgerafft das Ganze zu einem sinnvollen Ende zu bringen. Danke für deine Unterstützung und vor allem auch deine Geduld mit all meinen Launen und Eigenheiten.

Widmen möchte ich diese Arbeit meiner Familie und in ganz besonderer Weise meinem verstorbenen Vater und Großvater. Euer Vorbild hat mich angespornt, und auch wenn ihr leider nicht unmittelbar zum Gelingen meiner Arbeit beitragen konntet, so habt ihr mir zumindest ausreichend Ehrgeiz, Neugier und Detailverliebtheit mit auf meinen wissenschaftlichen Weg gegeben. Mein abschließender Dank richtet sich jedoch an dich liebe Mama. Von dir habe ich gelernt schwierige Situationen und Herausforderungen zu meistern und es ist schön dich immer hinter mir zu wissen. Danke!



# Zusammenfassung

Die regelmäßige Vermessung des Betriebes zur Nachtragung des Bergbaukartenwerks bzw. als Basis der markscheiderischen Sicherheits- und Betriebskontrolle stellt eine der zentralen Aufgaben in der Mineralrohstoffgewinnung dar. Aufgrund immer schneller fortschreitender Betriebe und aufgrund des hohen personellen und zeitlichen Aufwands bei herkömmlichen Vermessungsmethoden bilden UAV-gestützte (unmanned aerial vehicle) photogrammetrische Verfahren schon seit einiger Zeit eine wertvolle Ergänzung, während ihre Verbreitung nach wie vor stark zunehmend ist.

Obwohl vergleichbare Systeme bereits in der täglichen Praxis angekommen sind, sind die erreichbare Genauigkeit und insbesondere die genauigkeitswirksamen Einflussgrößen noch nicht abschließend untersucht, weshalb die vorliegende Dissertation auf genau diese Frage abzielt.

Zur Beantwortung der aufgeworfenen Fragen bilden neben theoretischen Analysen und der numerischen Simulation einzelner Verfahrensschritte vor allem praktische Untersuchungen im Labor- und Realmaßstab den Kern der Forschungsarbeiten. Nach den Grundsätzen der “Statistischen Versuchsplanung“ wurde versucht die realen Anwendungsbedingungen und Einsatzgebiete bestmöglich abzubilden, und basierend auf einer Reihe von Vorversuchen zur Ermittlung der Systemgrenzen wurde insbesondere der Einfluss der Flughöhe, der Bildüberlappung, der räumlichen Konfiguration von Strahlenschnitten sowie der Passpunktanordnung zur Georegistrierung und Skalierung näher untersucht. Die Beurteilung der erreichten Genauigkeit erfolgte einerseits als punktwiser Vergleich zu übergeordnet genauen Referenzpunkten und andererseits wurden, auch um mögliche Begründungen für erkannte Phänomene zu finden, den Auswerteprozess betreffende Größen der “inneren Genauigkeit“ in die Betrachtungen miteinbezogen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen zunächst, dass bei “richtigem“ Einsatz (Systemdesign, Flugplanung und Auswertung) die Genauigkeitsanforderungen der Markscheideverordnung 2013 (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013) eingehalten werden können, und die UAV-gestützte Vermessung somit im Rahmen der Systemgrenzen eine wertvolle Ergänzung zur Erfüllung der markscheiderischen Aufgaben im Tagbau sein kann. Hinsichtlich Parameteridentifikation sind vor allem die signifikanten Einflüsse der Flughöhe, der Bildüberlappung und der Orientierung der Aufnahmeachse relativ zum Objekt zu nennen, wobei insbesondere die den ursprünglichen Erwartungen entgegenstehende Wirkrichtung der Flughöhe hervorstechend ist. Entgegen den aus der klassischen Photogrammetrie erwarteten Zusammenhängen zeigt die Flughöhe einen umgekehrten Einfluss auf die Auswertung bei Structure from Motion, wobei die gesteigerte Genauigkeit in unmittelbarem Zusammenhang zur Stabilität der Bildverknüpfung bzw. der Anzahl an gültigen Verknüpfungspunkten zu stehen scheint.

Zusammenfassend bietet die umfangreiche Datenlage und Analyse der vorliegenden Arbeit eine theoretische wissenschaftliche Grundlage zur Flugplanung bei Auswertung mittels SfM und stellt auf diese Weise auch eine wichtige Handlungsempfehlung für aktuelle und künftige Anwender dar.

# Abstract

The regular surveying of the operation to update the mining map or as basis of safety and operational control is one of the central tasks in the extraction of raw materials. Due to the fact that operations are progressing faster and faster and due to high personnel and time expenditure for conventional surveying methods, UAV-based (unmanned aerial vehicle) photogrammetric methods have been a valuable addition for some time now, while their distribution is still growing rapidly.

Although comparable systems have been well established in practice, the achievable accuracy and, in particular, the accuracy-influencing factors have not yet been finally investigated, which is why this thesis aims at precisely this question.

In addition to theoretical analyzes and the numerical simulation of individual process steps, practical research on laboratory and real-scale forms the core of the research work to answer the questions raised. In accordance with the principles of “Design of Experiments“, different tests were made to map the real conditions and areas of application in the best possible way, and based on a series of preliminary tests to determine the system boundaries, the influence of flight altitude, image overlap, spatial configuration of ray intersections and ground control point arrangement for georegistration and scaling was examined closer. The assessment of the accuracy achieved was carried out on the one hand as a point-by-point comparison to superordinate precise reference points and on the other hand, in order to find possible reasons for recognized phenomena, the “internal accuracy“ relating to the evaluation process was also included in the considerations.

The results of the investigations initially show that the “correct“ use (system design, flight planning and processing) can comply with the accuracy requirements of Markscheideverordnung 2013 (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013), and that the UAV-based surveying can be a valuable addition to fulfil the tasks in open pit mine surveying. With regard to parameter identification, the significant influences of flight altitude, image overlap and orientation of the camera axis relative to the object are to be mentioned, whereby in particular the effective direction of the flight altitude - which is contrary to the original expectations - stands out. In contradiction to the relations expected from conventional photogrammetry, the altitude has an inverse influence on the accuracy when using Structure from Motion, whereby the increased accuracy seems to be directly related to the stability of the image linkage or the number of valid linkage points.

In summary, the extensive dataset and analysis of the present work provides a theoretical and scientific basis for flight planning using SfM and thus represents an important guideline for current and future users.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Untersuchungsgegenstand . . . . .	2
1.3	Zielsetzung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Anwendungsorientierte Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Unmanned Aerial Vehicle (UAV) . . . . .	5
2.1.1	Historischer Abriss . . . . .	5
2.1.2	Charakteristika . . . . .	7
2.1.3	Rechtliche Rahmenbedingungen . . . . .	14
2.2	UAV-Photogrammetrie . . . . .	17
2.2.1	Kategorisierung photogrammetrischer Plattformen . . . . .	17
2.2.2	Anwendungsgebiete . . . . .	18
2.3	Klassische Photogrammetrie . . . . .	22
2.3.1	Photogrammetrische Bildaufnahme . . . . .	22
2.3.2	Photogrammetrische Triangulation . . . . .	27
2.4	Automatisierte Mehrbildauswertung . . . . .	33
2.4.1	Structure from Motion . . . . .	33
2.4.2	Random Sample Conesensus (RANSAC) . . . . .	39
2.4.3	Automatische Georeferenzierung . . . . .	40
2.4.4	Oberflächenrekonstruktion und Texturierung . . . . .	41
2.5	Genauigkeit und Zuverlässigkeit . . . . .	41
2.5.1	Beurteilung von Messgrößen . . . . .	42
2.5.2	Arten von Messfehlern . . . . .	44
2.5.3	Varianz-Fortpflanzung . . . . .	46
2.5.4	Qualitätsbeurteilung in der Photogrammetrie . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Genauigkeit der UAV-Photogrammetrie</b>	<b>51</b>
3.1	Erreichte Genauigkeiten . . . . .	51
3.2	Einflussfaktoren auf die Genauigkeit . . . . .	54
3.2.1	Aufnahmesystem . . . . .	55
3.2.2	Aufnahmekonfiguration und Bildmaßstab . . . . .	62
3.2.3	Bildauswertung . . . . .	64
3.2.4	Maßstabs- und Datumsfestlegung . . . . .	65
3.2.5	Objektbeschaffenheit . . . . .	68
3.3	Zusammenfassung, Analyse und offene Fragen . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Vorversuche und Methodik</b>	<b>72</b>
4.1	Versuchsplanung . . . . .	73

4.1.1	Vorversuche zur Faktorenauswahl . . . . .	74
4.1.2	Parameterauswahl und Festlegung des Versuchsplans . . . . .	82
4.2	Datenakquisition und Versuchsdurchführung . . . . .	87
4.3	Faktorkombination . . . . .	90
4.4	Beurteilung der Genauigkeit . . . . .	90
4.4.1	Innere Genauigkeit . . . . .	90
4.4.2	Äußere Genauigkeit . . . . .	92
<b>5</b>	<b>Untersuchungen im Realmaßstab</b>	<b>93</b>
5.1	Testanordnung . . . . .	93
5.1.1	Testgebiet Pronat Steinbruch Preg GmbH . . . . .	93
5.1.2	Georeferenzierung . . . . .	94
5.2	Bildaufnahme . . . . .	95
5.2.1	Aufnahmesystem . . . . .	96
5.2.2	UAV-Plattform . . . . .	96
5.3	Bildauswertung . . . . .	96
<b>6</b>	<b>Untersuchungen im Modellmaßstab</b>	<b>98</b>
6.1	Testanordnung . . . . .	98
6.1.1	Referenzvermessung . . . . .	98
6.1.2	Georeferenzierung . . . . .	101
6.2	Bildaufnahme . . . . .	101
6.3	Bildauswertung . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Ergebnisse im Realmaßstab</b>	<b>104</b>
7.1	Erreichte Genauigkeiten - Grundlegende Genauigkeitsüberprüfung . . . . .	104
7.2	Güte der Eingangsparameter . . . . .	105
7.3	Ergebnisse aus Einzelfaktoren (DoE) . . . . .	108
7.3.1	Äußere Genauigkeit . . . . .	108
7.3.2	Innere Genauigkeit . . . . .	115
7.4	Ergebnisse aus Faktorkombination . . . . .	123
7.4.1	Äußere Genauigkeit . . . . .	123
7.4.2	Innere Genauigkeit . . . . .	126
<b>8</b>	<b>Ergebnisse im Modellmaßstab</b>	<b>130</b>
8.1	Güte der Eingangsparameter . . . . .	130
8.2	Ergebnisse aus Einzelfaktoren (DoE) . . . . .	131
8.2.1	Äußere Genauigkeit . . . . .	131
8.2.2	Innere Genauigkeit . . . . .	138
8.3	Ergebnisse aus Faktorkombination . . . . .	145
8.3.1	Äußere Genauigkeit . . . . .	145
8.3.2	Innere Genauigkeit . . . . .	147
<b>9</b>	<b>Gegenüberstellung von Real- und Modellmaßstab</b>	<b>151</b>
9.1	Ergebnisse aus Einzelfaktoren (DoE) . . . . .	151
9.1.1	Äußere Genauigkeit . . . . .	151
9.1.2	Innere Genauigkeit . . . . .	152
9.2	Ergebnisse aus Faktorkombination . . . . .	156
9.2.1	Äußere Genauigkeit . . . . .	157
9.2.2	Innere Genauigkeit . . . . .	158

<b>10 Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>161</b>
10.1 Güte der Eingangsparameter . . . . .	161
10.2 Statistische Interpretation . . . . .	162
10.2.1 Haupteffekte . . . . .	165
10.2.2 Wechselwirkungseffekte . . . . .	166
10.3 Inhaltliche Interpretation . . . . .	167
10.3.1 Flughöhe (A) . . . . .	167
10.3.2 Überlapp longitudinal und lateral (B & C) . . . . .	169
10.3.3 Blickwinkel relativ zum Objekt (D) . . . . .	171
10.3.4 Passpunktkonfiguration zur Georeferenzierung (E) . . . . .	172
10.4 Faktorkombination . . . . .	174
<b>11 Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>176</b>
11.1 Genauigkeitsbeurteilung . . . . .	176
11.2 Handlungsempfehlung . . . . .	178
11.3 Ausblick . . . . .	179
<b>A Appendix</b>	<b>i</b>
A.1 Prozessparameter . . . . .	ii
A.2 Ergebnisse . . . . .	ii
A.3 Tabellen . . . . .	iii

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Erste UAVs von Przybilla und Wester-Ebbinghaus . . . . .	6
Abb. 2.2:	Drohnenabsturz hinter Marcel Hirscher . . . . .	15
Abb. 2.3:	Klassifizierung der uLFZ der Klasse 1 . . . . .	16
Abb. 2.4:	Einordnung der UAV-Photogrammetrie nach (Eisenbeiß, 2009) . . . . .	18
Abb. 2.5:	Epipolargeometrie (Luhmann, 2018b) . . . . .	29
Abb. 2.6:	Multi-View-Rekonstruktions-Workflow . . . . .	34
Abb. 2.7:	Kamerakalibrierung . . . . .	35
Abb. 2.8:	Funktionsweise von RANSAC . . . . .	39
Abb. 2.9:	Zufällige und Systematische Messfehler . . . . .	45
Abb. 2.10:	Messtechnische Kenngrößen zur Genauigkeitsanalyse . . . . .	49
Abb. 3.1:	Gängige Sensorformate . . . . .	56
Abb. 3.2:	Funktionsprinzip des Foveon Sensors . . . . .	57
Abb. 3.3:	Rolling-Shutter Effekt (Aldred, 2018) . . . . .	61
Abb. 3.4:	Einfluss der GCP-Anordnung (Sanz-Ablanedo et al., 2018) . . . . .	68
Abb. 4.1:	Wissenschaftliche Herangehensweise . . . . .	72
Abb. 4.2:	Einfluss der Bildanzahl . . . . .	75
Abb. 4.3:	Einfluss der Bildanzahl 2 . . . . .	76
Abb. 4.4:	Einfluss der Flughöhe nach (Tscharf, 2016) . . . . .	77
Abb. 4.5:	Einfluss der Schnittgeometrie . . . . .	78
Abb. 4.6:	Einfluss der Passpunktkonfiguration 1 (Tscharf et al., 2016a) . . . . .	80
Abb. 4.7:	Einfluss der Passpunktkonfiguration 2 (Tscharf et al., 2016a) . . . . .	81
Abb. 4.8:	Gegenüberstellung verschiedener GCP-Markierungen (Tscharf et al., 2019a) . . . . .	81
Abb. 4.9:	Referenzbruchwand am Steirischen Erzberg . . . . .	88
Abb. 5.1:	Testgebiet bei der Pronat Steinbruch Preg GmbH . . . . .	94
Abb. 6.1:	Hansen'sche Aufgabe . . . . .	100
Abb. 6.2:	Passpunktkonfiguration der Modellversuche . . . . .	101
Abb. 6.3:	Bildaufnahme im Modellmaßstab . . . . .	102
Abb. 7.1:	Erreichte Genauigkeiten mit der verwendeten Ausrüstung . . . . .	105
Abb. 7.2:	Bahnhaltigkeit im Realmaßstab . . . . .	106
Abb. 7.3:	Äußere Genauigkeit im Realmaßstab . . . . .	109
Abb. 7.4:	Einfluss der Flughöhe auf die äußere Genauigkeit im Realmaßstab . . . . .	110
Abb. 7.5:	Einfluss des Blickwinkels auf die äußere Genauigkeit im Realmaßstab . . . . .	111
Abb. 7.6:	Einfluss des longitudinalen Überlapps auf die äußere Genauigkeit im Realmaßstab . . . . .	112
Abb. 7.7:	Einfluss des lateralen Überlapps auf die äußere Genauigkeit im Realmaßstab . . . . .	112

Abb. 7.8:	Einfluss der Passpunktconfiguration auf die äußere Genauigkeit im Realmaßstab . . . . .	113
Abb. 7.9:	Einfluss des Aufnahmeblocks auf die äußere Genauigkeit im Realmaßstab . . . . .	114
Abb. 7.10:	Äußere Genauigkeit im Realmaßstab getrennt nach Lage und Höhe . . . . .	115
Abb. 7.11:	Rückprojektionsfehler im Realmaßstab . . . . .	116
Abb. 7.12:	Rückprojektionsfehler im Realmaßstab vs. Faktoren . . . . .	117
Abb. 7.13:	Anzahl gültiger Verknüpfungen im Realmaßstab . . . . .	118
Abb. 7.14:	Anzahl gültiger Verknüpfungen im Realmaßstab 2 . . . . .	119
Abb. 7.15:	Anzahl gültiger Verknüpfungen im Realmaßstab vs. Faktoren . . . . .	120
Abb. 7.16:	Ergebnisse der Simultankalibrierung im Realmaßstab . . . . .	121
Abb. 7.17:	Ergebnisse der Simultankalibrierung im Realmaßstab vs. Faktoren . . . . .	122
Abb. 7.18:	Äußere Genauigkeit der Faktorkombination im Realmaßstab . . . . .	124
Abb. 7.19:	Rückprojektionsfehler der Faktorkombination im Realmaßstab . . . . .	126
Abb. 7.20:	Anzahl gültiger Verknüpfungen der Faktorkombination im Realmaßstab . . . . .	127
Abb. 7.21:	Ergebnisse der Simultankalibrierung aus Faktorkombination im Realmaßstab . . . . .	128
Abb. 8.1:	Bahnhaltigkeit im Modellmaßstab . . . . .	131
Abb. 8.2:	Äußere Genauigkeit im Modellmaßstab . . . . .	132
Abb. 8.3:	Äußere Genauigkeit im Modellmaßstab getrennt nach Lage und Höhe . . . . .	133
Abb. 8.4:	Einfluss der Flughöhe auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab . . . . .	134
Abb. 8.5:	Einfluss des Blickwinkels auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab . . . . .	135
Abb. 8.6:	Einfluss des longitudinalen Überlapps auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab . . . . .	135
Abb. 8.7:	Einfluss des lateralen Überlapps auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab . . . . .	136
Abb. 8.8:	Einfluss der Passpunktconfiguration auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab . . . . .	137
Abb. 8.9:	Einfluss des Aufnahmeblocks auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab . . . . .	137
Abb. 8.10:	Rückprojektionsfehler im Modellmaßstab . . . . .	139
Abb. 8.11:	Rückprojektionsfehler im Modellmaßstab vs. Faktoren . . . . .	140
Abb. 8.12:	Anzahl gültiger Verknüpfungen im Modellmaßstab . . . . .	141
Abb. 8.13:	Anzahl gültiger Verknüpfungen im Modellmaßstab vs. Faktoren . . . . .	142
Abb. 8.14:	Ergebnisse der Simultankalibrierung im Modellmaßstab . . . . .	143
Abb. 8.15:	Ergebnisse der Simultankalibrierung im Modellmaßstab vs. Faktoren . . . . .	144
Abb. 8.16:	Äußere Genauigkeit der Faktorkombination im Modellmaßstab 1 . . . . .	146
Abb. 8.17:	Äußere Genauigkeit der Faktorkombination im Modellmaßstab 2 . . . . .	147
Abb. 8.18:	Rückprojektionsfehler der Faktorkombination im Modellmaßstab . . . . .	148
Abb. 8.19:	Anzahl gültiger Verknüpfungen der Faktorkombination im Modellmaßstab . . . . .	149
Abb. 8.20:	Ergebnisse der Simultankalibrierung aus Faktorkombination im Modellmaßstab . . . . .	150
Abb. 9.1:	Gegenüberstellung der äußeren Genauigkeit . . . . .	152
Abb. 9.2:	Gegenüberstellung der Rückprojektionsfehler . . . . .	153
Abb. 9.3:	Gegenüberstellung der mittl. Verknüpfungspunktzahl . . . . .	154
Abb. 9.4:	Gegenüberstellung der mittl. Verknüpfungspunktzahl bei großer Aufnahmestanz . . . . .	155
Abb. 9.5:	Gegenüberstellung der Verzeichnungsparameter . . . . .	156
Abb. 9.6:	Gegenüberstellung der äußeren Genauigkeit aus Faktorkombination . . . . .	157
Abb. 9.7:	Gegenüberstellung der Rückprojektionsfehler aus Faktorkombination . . . . .	158

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

Abb. 9.8:	Gegenüberstellung der mittl. Verknüpfungspunktzahl aus Faktorkombination . . . . .	159
Abb. 9.9:	Gegenüberstellung der Verzeichnungsparameter aus Faktorkombination . . . . .	160
Abb. 10.1:	Dome-Effekt als Ergebnis der Aufnahme-richtung . . . . .	172
Abb. A.1:	Ordnerstruktur Appendix . . . . .	i

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	UAS-Kategorisierung nach (Barnhart, 2012) . . . . .	8
Tab. 2.2:	UAS-Kategorisierung nach (van Blyenburgh, 2018) . . . . .	9
Tab. 2.3:	Gegenüberstellung von Flächenflugzeugen mit Multirotorsystemen nach (Tscharf, 2016) . . . . .	10
Tab. 4.1:	Gegenüberstellung der Restklaffungen verschiedener Markertypen (Tscharf et al., 2019a) . . . . .	82
Tab. 4.2:	Vollfaktorieller Versuchsplan mit 5 Faktoren auf 2 Stufen und 2 Wiederholungen . . . . .	87
Tab. 7.1:	Geometrische Parameter der Flugplanung im Realmaßstab . . . . .	107
Tab. 10.1:	ANOVA-Tabelle im Modellmaßstab, nach (Tscharf et al., 2019b) . . . . .	164

# Formelverzeichnis

Gl. 2.1	:	Kollinearitätsgleichungen . . . . .	22
Gl. 2.2	:	Verbesserungsgleichungen des räumlichen Rückwärtsschnitts . . . . .	25
Gl. 2.3	:	Transformationsgleichungen der DLT . . . . .	26
Gl. 2.4	:	projektive Abbildung mit homogenen Koordinaten 1 . . . . .	26
Gl. 2.5	:	projektive Abbildung mit homogenen Koordinaten 2 . . . . .	26
Gl. 2.6	:	Perspektive Projektionsmatrix . . . . .	27
Gl. 2.7	:	Koplanaritätsbedingung mithilfe der Fundamentalmatrix $\mathbf{F}$ . . . . .	30
Gl. 2.8	:	Fundamentalmatrix $\mathbf{F}$ . . . . .	30
Gl. 2.9	:	Matrix $\mathbf{S}_b$ zur Linearisierung der Koplanaritätsbedingung . . . . .	30
Gl. 2.10	:	Räumliche Ähnlichkeitstransformation nach Helmert . . . . .	30
Gl. 2.11	:	Verbesserungsgleichungen der Bündeltriangulation . . . . .	31
Gl. 2.12	:	Funktionales Modell der Bündeltriangulation . . . . .	32
Gl. 2.13	:	Normalgleichungssystem der Bündeltriangulation 1 . . . . .	32
Gl. 2.14	:	Normalgleichungssystem der Bündeltriangulation 2 . . . . .	32
Gl. 2.15	:	Lösung der Bündeltriangulation . . . . .	32
Gl. 2.16	:	Euklidische Distanz im Eigenschaftsraum . . . . .	38
Gl. 2.17	:	Arithmetisches Mittel . . . . .	43
Gl. 2.18	:	Geometrisches Mittel . . . . .	43
Gl. 2.19	:	Intervallmittel . . . . .	43
Gl. 2.20	:	Vektor der wahren Residuen $\boldsymbol{\varepsilon}$ . . . . .	43
Gl. 2.21	:	empirische Varianz $s_0^2$ bei bekanntem wahren Wert $\tilde{X}$ . . . . .	44
Gl. 2.22	:	theoretische Varianz $\sigma_0^2$ bei bekanntem wahren Wert $\tilde{X}$ . . . . .	44
Gl. 2.23	:	Vektor der Verbesserungen $\mathbf{v}$ . . . . .	44
Gl. 2.24	:	empirische Varianz $s_0^2$ bei unbekanntem wahren Wert $\tilde{X}$ . . . . .	44
Gl. 2.25	:	durchschnittlicher Fehler . . . . .	44
Gl. 2.26	:	Varianz-Fortpflanzungsgesetz für unkorrelierte Beobachtungen . . . . .	46
Gl. 2.27	:	Elemente der Jacobi-Matrix . . . . .	47
Gl. 2.28	:	Allgemeines Varianz-Fortpflanzungsgesetz . . . . .	47
Gl. 3.1	:	Genauigkeitsvorabschätzung nach (Atkinson, 1996) . . . . .	62
Gl. 10.1	:	Testvariable F bei ANOVA . . . . .	163
Gl. 10.2	:	Anzahl der notwendigen Iterationen bei RANSAC . . . . .	170

# Kapitel 1

## Einleitung

Kaum eine technologische Neuentwicklung der letzten Jahrzehnte hatte auf Anhub einen derart starken Einfluss auf die marktscheiderische und geodätische Praxis wie das Aufkommen unbemannter Fluggeräte (unmanned aerial vehicles, UAVs). Im Gegensatz zu vielen herkömmlichen Messsystemträgern, wie Flugzeugen, Satelliten, Fahrzeugen oder Schiffen, zeichnen sich UAVs vor allem durch die Möglichkeit der schnellen, einfachen, sicheren und kostengünstigen Datenerfassung aus. (Rumpler et al., 2013; Tscharf, 2016)

Als Trägerplattform für verschiedene Sensorik erweitern sie den Raum, wo Vermessungen durchgeführt werden können und schließen die (geometrische) Lücke zwischen klassischer Fernerkundung, Luftbildphotogrammetrie und terrestrischen Anwendungen.

### 1.1 Motivation

Auch in der bergmännischen Vermessung zählen unbemannte Flugsysteme, vor allem zur Nachtragung des Bergbaukartenwerks (§42 Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013), zur Massenermittlung, sowie zur Erhebung des Ist-Zustandes als Planungsgrundlage bereits zum erweiterten Stand der Technik. Der Möglichkeit zur hochauflösenden und vor allem tagesaktuellen Herstellung von optisch realistischen 3D-Modellen kommt, insbesondere vor dem Hintergrund der fortschreitenden Digitalisierung und Automatisierung im Bergbau, besondere Bedeutung zu.

Bedingt durch die Größe und Tragfähigkeit der unbemannten Systeme, eingeschränkt durch die vorherrschenden rechtlichen Rahmenbedingungen, sowie aufgrund der stetigen technologischen Weiterentwicklung und Miniaturisierung moderner Digitalkameras, sind ein Großteil der am Markt befindlichen Systeme heutzutage mit Kameras als "eigentliches Vermessungsinstrument" ausgerüstet.

Es kann somit durchaus, gleichzeitig mit der UAV-Entwicklung und verstärkt durch die Verbesserungen moderner, automatisierter Mehrbildauswertungen aus dem Bereich Computer Vision (Structure from Motion, SfM), von einer Wiederbelebung der Photogrammetrie bzw. bildbasierter Vermessungsmethoden in der Praxis gesprochen werden. Die automatisierten Verfahren stellen jedoch hohe Anforderungen an die Qualität und vor allem an die geometrische Aufnahmekonfiguration der Bilder. Ist die Genauigkeit der klassischen Photogrammetrie hinlänglich untersucht, so gibt es zu den neuen UAV-gestützten Anwendungen keine grundlegenden wissenschaftlichen Untersuchungen welche Parameter in welchem Ausmaß für die erreichte Genauigkeit verantwortlich zeichnen. Im Gegensatz zur analogen und analytischen Photogrammetrie basiert SfM auf einer Vielzahl an automatischen und teilweise fehlerbehafteten Bildmessungen (Beobachtungen), was eine robuste Ausreißerelimination und nichtlineare Optimierung innerhalb

der Auswertung notwendig macht. Entsprechend ist eine deterministische Fehlerbetrachtung im Sinne des Varianzfortpflanzungsgesetzes nur bedingt, bzw. gar nicht, möglich und quantitativ belastbare Aussagen zur erreichbaren Genauigkeit können auf diese Weise nicht wirklich gegeben werden. (Rumpler et al., 2014)

Nichtsdestotrotz und auch obwohl der theoretische Unterbau oft nicht in ausreichendem Maße vorhanden ist, kommen UAVs in nahezu allen Bereichen der Geodatenerfassung immer häufiger zum Einsatz und werden dabei auch sehr oft von fachfremden und nicht vermessungstechnisch geschultem Personal eingesetzt. Neben der gebotenen Sorgfalt zur Vermeidung grober und zufälliger Fehler müssen - ähnlich dem Nivellieren aus der Mitte oder dem Messen in zwei Kreislagen bei klassischen geodätischen Vermessungen - auch unbemannte Flugsysteme bzw. insbesondere die installierten Kameras "richtig" verwendet werden, um die Auswirkung etwaig vorhandener systematischer Fehler zu vermeiden. Die "richtige Verwendung" zielt hier allerdings nicht nur auf die fotografische Güte der Bilder ab, sondern vielmehr auf die geometrische Qualität der dreidimensionalen Ergebnisse bzw. Punktwolken, die signifikant von der Erfahrung und den Fähigkeiten des Piloten beeinflusst wird. Vor diesem Hintergrund muss die Datenaufnahme in engem Zusammenhang mit der nachgeschalteten Auswertung betrachtet werden, was insbesondere bei unerfahrenen und ungeschulten Anwendern nicht immer gegeben ist.

Um eine definierte Genauigkeit und auch Vollständigkeit im Sinne einer markscheiderischen Ergebnisverantwortlichkeit zu gewährleisten, wäre es wahrscheinlich von Vorteil den Faktor Mensch bzw. Anwender durch eine weitestgehend autonome Flugplanung zu eliminieren. Die theoretischen und mathematischen Grundlagen hierfür zu liefern ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, und soll vordergründig durch eine reproduzierbare Identifizierung und Quantifizierung der relevanten Einflussparameter erreicht werden.

## 1.2 Untersuchungsgegenstand

Wie bereits erwähnt dienen unbemannte Fluggeräte heute als Trägerplattformen für verschiedenste Sensorik. Neben den für die Fluglageregelung notwendigen On-Board Sensoren existiert auch eine große Vielzahl an unterschiedlichen "Sensing-Units", die von herkömmlichen RGB (Rot, Grün, Blau) Kameras über Multi- bzw. Hyperspektralkameras bis hin zu RADAR (Radio Detection and Ranging) und LiDAR (Light Detection and Ranging) Sensoren reichen (Briese and Pfeifer, 2013; Gaisecker et al., 2017; Genschow, 2017). Die ständig fortschreitende Miniaturisierung, "Mobilisierung" und Optimierung der angesprochenen Systeme wird diese Breite künftig wohl noch vergrößern, was wiederum zur Erschließung weiterer Anwendungsfelder führen kann und wird.

Kern der gegenständlichen Forschung ist der Einsatz von Drohnen im Bergbau zur Erfüllung bzw. Ergänzung der markscheiderischen Aufgaben und Tätigkeiten. Dabei wird insbesondere auf die markscheiderischen Aufgaben im Tagbau abgestellt, die vom Anfertigen und Führen des Bergbaukartenwerks, über die Beaufsichtigung der Vermessungen im Bergbau und Aufgaben der bergbaulichen Raumordnung und Sicherungspflicht bis hin zu bergschadenkundlichen Aufgaben, vor allem zum Schutz der Oberfläche und zur Sicherung der Oberflächennutzung nach Beendigung der Bergbautätigkeit reichen. (Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat, 1999; Tscharf, 2018)

Unter Berücksichtigung der Verbreitung verfügbarer Sensoren beziehen sich die angestellten Untersuchungen auf "herkömmliche" RGB Bildern unter Verwendung handelsüblicher Digitalkameras. Die Verwendung von Laserscanning Systemen in Kombination mit UAVs wird genauso wenig in die Betrachtung einbezogen, wie etwaige Anwendungen mit Multi- oder Hyperspektralkameras.

Außerdem liegt der Fokus auf der üblicherweise gewählten 3D-Rekonstruktion mittels automatisierter Mehrbildauswertung bzw. "Structure from Motion (SfM)" (Hartley and Zisserman, 2003). SfM ist in der Lage aus einem zunächst ungeordneten Set an Bildern die äußere Orientierung sowie eine punktbasierte Szenenrekonstruktion zu errechnen. Da die Aufnahmepositionen bei der UAV-Befliegung systembedingt unregelmäßig und nicht hochgenau bestimmbar sind fußen nahezu alle Anwendungen auf dieser ursprünglich aus dem Bereich Computer Vision stammenden Algorithmik. Etwaige Einfluss- und Steuerparameter der Datenprozessierung und Bildauswertung werden allerdings nicht in die Betrachtungen miteinbezogen. Die Auswertung mittels SfM erfolgt nach den immer gleichen Mustern und wird in der vorliegenden Arbeit weitestgehend als "Black Box" betrachtet. Vielmehr liegt der Fokus auf einer Analyse aus Sicht des marktscheiderischen bzw. geodätischen Anwenders und zielt entsprechend auf die im Feld steuerbaren Einflussgrößen ab. Durch korrekte Verwendung dieser modernen Vermessungsinstrumente soll es möglich sein geforderte Qualitätskriterien zu erfüllen, ohne zu tief in die zu Grunde liegende Algorithmik und Informatik einzusteigen.

### 1.3 Zielsetzung

Bedingt durch den immer häufigeren Einsatz unbemannter Flugsysteme in den verschiedensten Bereichen der Vermessung gewinnt auch die Frage nach der tatsächlich erreichten Genauigkeit, vor allem vor dem Hintergrund der Ergebnisverantwortlichkeit zusehends an Bedeutung. Die konkrete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist daher eine robuste Identifizierung und vor allem auch Quantifizierung genauigkeitsrelevanter Einflussparameter bei der bildbasierten Vermessung unter Verwendung von Structure from Motion.

Auf Basis realmaßstäblicher, modellhafter und teilweise numerischer Überlegungen sollen die relevanten Parameter - genauigkeitswirksam, allerdings auch vom Anwender unmittelbar beeinflussbar - identifiziert, sowie deren Einfluss und insbesondere auch Wechselwirkung quantifiziert werden. Als Ergebnis soll eine belastbare Beschreibung des absoluten Punktlagefehlers der rekonstruierten 3D Punkte in Abhängigkeit von den Parametern der Bildaufnahme erreicht werden, die in weiterer Folge als Grundlage für eine genauigkeitsoptimierte Flugplanung dienen kann. Konkret soll Antwort auf die folgenden Fragen gegeben werden:

- Welche Parameter der Bildaufnahme beeinflussen die Genauigkeit der rekonstruierten 3D-Objekte bei der Auswertung mittels Structure from Motion?
- In welcher Form äußern sich die Einflüsse an den Ergebnissen? Kommt es zu systematischen Effekten bzw. Deformationen?
- Gibt es Gemeinsamkeiten bzw. Parallelen zur klassischen Photogrammetrie und wo liegen Unterschiede?
- Bestehen Wechselwirkungen bzw. Korrelationen zwischen den Einflussparametern? Und falls ja, in welcher Form?
- Wie muss die Datenaufnahme erfolgen, um reproduzierbare Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit zu gewährleisten?
- Welche Bedeutung kommt den Erkenntnissen bei der marktscheiderischen Vermessung im Bergbau zu?
- Inwieweit ist die UAV-gestützte photogrammetrische Vermessung zur Erfüllung der marktscheiderischen Aufgaben im Tagbau geeignet?

Die vorliegende Dissertation soll jedoch auch als Handreichung und Handlungsempfehlung für Anwender von UAV-Vermessung im Bergbau (und darüber hinaus) dienen. Neben verbalen Empfehlungen und gesammelten Erfahrungswerten von Piloten, sollen etwaige Ratschläge auch mathematisch formuliert werden, wodurch belastbare Zusammenhänge abgeleitet und systematische Fehlereinflüsse minimiert werden können.

Mit der Zielsetzung auch für unerfahrene Leser alle notwendigen Informationen in kompakter und gesammelter Weise zusammen zu fassen, fällt die Beschreibung der theoretischen und praktischen Grundlagen etwas umfassender aus als üblich. Allerdings versteht sich die vorliegende Arbeit auch als Gegenentwurf zu Werbeprospekten und Firmenpräsentationen, will objektiv für einen Wissenszuwachs unter den Anwendern sorgen und auch auf diese Weise zum allgemeinen Stand des Wissens und der Forschung beitragen.

# Kapitel 2

## Anwendungsorientierte Grundlagen

### 2.1 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

*“UAVs are to be understood as uninhabited and reusable motorised aerial vehicles, which are remotely controlled, semi-autonomous, autonomous, or have a combination of these capabilities, and that carry various types of payloads, making them capable of performing specific tasks within the earth’s atmosphere, or beyond, for a duration, which is related to their missions.“*

Auf diese Weise beschreibt Peter van Blyenburgh 1999 (van Blyenburgh, 1999) unbemannte Flugsysteme zum Zwecke der Geodatenerfassung, und erwähnt mit der Kategorie der Micro bzw. Mini UAVs auch als einer der ersten jene Plattformen die heutzutage in der Photogrammetrie, Fernerkundung, Ingenieurgeodäsie und auch in vielen anderen wissenschaftlichen Disziplinen eingesetzt werden.

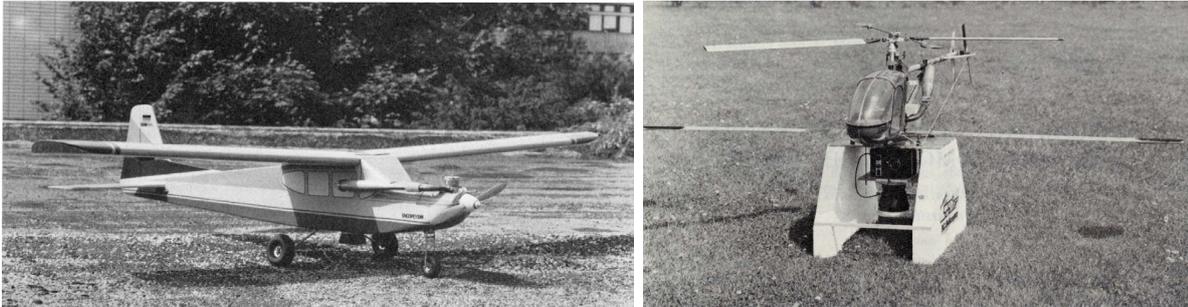
Mit steigender Zahl der Anwender und Anwendungen sind in der Literatur und in den Medien mittlerweile verschiedene Bezeichnungen für vergleichbare Flugobjekte bzw. -systeme (Flugobjekt inklusive Steuerungs- und Datenübertragungseinheit) gebräuchlich. Während umgangssprachlich und im militärischen Bereich von “Drohnen“ gesprochen wird, haben sich im Bereich der zivilen Anwendungen verschiedene Begriffe und Abkürzungen etabliert, welche von unbemanntem oder ferngesteuertem Fluggerät (unmanned or remotely piloted aerial vehicle, UAV oder RPV), bis hin zu unbemanntem bzw. ferngesteuertem Flugsystem (unmanned aerial system, UAS bzw. remotely piloted aircraft system, RPAS) reichen und in den meisten Fällen trotz unterschiedlicher Systemgrenzen nahezu synonym verwendet werden. (Eisenbeiß, 2009)

Nahezu alle aktuellen Entwicklungen fußen auf technologischen Weiterentwicklungen aus dem Modellflugsport, wobei im Gegensatz zum Modellbau, wo auch die Kunst der manuellen Flugsteuerung von Bedeutung ist, bei Systemen zur Geodatenerfassung versucht wird den Piloten durch eine Vielzahl an Assistenzsystemen beim Fliegen zu unterstützen bzw. den Flug weitestgehend zu automatisieren. (Briese and Pfeifer, 2013)

#### 2.1.1 Historischer Abriss

Historisch betrachtet haben unbemannte Flugsysteme ihren Ursprung in militärischen Anwendungen, wobei die ersten modernen und zivilen Nutzungen im Kontext der Geodatenerfassung Przybilla und Wester-Ebbinghaus (Przybilla and Wester-Ebbinghaus, 1979) zugeschrieben werden. Die ersten bekannten Luftaufnahmen überhaupt wurden von Gaspard Tournachon 1858 in Paris von einem bemannten Ballon aus aufgenommen, wobei Ballone entsprechend als die

ersten Plattformen zur Luftbildfotografie betrachtet werden können. Unterstützt durch Weiterentwicklungen im Bereich der Kamertechnologien, wurden in weiterer Folge verschiedenste Trägerplattformen, wie zum Beispiel Drachen, Raketen, Gleitschirme oder sogar Tauben verwendet. Somit kann, von wenigen Ausnahmen abgesehen, durchaus gesagt werden, dass Entwicklung der Luftbildfotografie und auch Photogrammetrie schon seit Beginn eng mit dem Einsatz unbemannter Systeme verknüpft ist. (Colomina and Molina, 2014; Tscharf, 2016)



**Abb. 2.1 – Die Versuche von Przybilla und Wester-Ebbinghaus stellen die ersten zivilen Nutzungen von UAVs zur Geodatenerfassung dar. Als Trägerplattformen kamen Flächenflugzeuge (links (Przybilla and Wester-Ebbinghaus, 1979)) und Modellhelikopter (rechts (Wester-Ebbinghaus, 1980)) zum Einsatz.**

Wie bereits erwähnt stellen die Experimente von Przybilla und Wester-Ebbinghaus den Beginn des “modernen“ UAV- Einsatzes dar. In Ihren ersten Tests kam ein ferngesteuertes Flächenflugzeug mit einer Länge von 3 m, einer Spannweite von 2,6 m und einer Traglast von 3 kg zum Einsatz (siehe Abbildung 2.1 links) Aufgrund der, bei einem Flächenflugzeug dieser Größe notwendigen, hohen Fluggeschwindigkeiten und des damit einhergehenden “Motion Blur Effekts“ (siehe Abschnitt 3.2.1) war die Qualität der aufgenommenen Bilder allerdings nicht ausreichend und überdies betrachteten die Autoren die notwendige Start und Landebahn als starke Einschränkung weswegen sie die Verwendung von Modellhelikoptern propagierten (Przybilla and Wester-Ebbinghaus, 1979). Entsprechend wurden zur Dokumentation der Schwebbahn in Wuppertal 1980 von Wester-Ebbinghaus das erste mal Modellhelikopter für photogrammetrische Zwecke eingesetzt, wobei wie rechts in Abbildung 2.1 ersichtlich, bereits auch der erste Gimbal in Form von Polystyrol-Wangen zur Unterdrückung der vom Fluggerät hervorgerufenen Vibrationen zur Anwendung kam. (Wester-Ebbinghaus, 1980)

In den folgenden Jahren sind eine Vielzahl an Versuchen, Tests und wissenschaftliche Anwendungen dokumentiert, wobei vorangetrieben durch die stetigen technologischen Weiterentwicklungen im Bereich der Navigation und Aufnahmetechnik die Qualität der Ergebnisse zusehends verbessert und das Anwendungsfeld Schritt für Schritt vergrößert werden konnte. Eine detaillierte chronologische Zusammenstellung zur historischen Entwicklung der modernen UAV-Photogrammetrie kann bei (Eisenbeiß, 2009) gefunden werden, wobei die Entwicklungen getrennt nach den verschiedenen Flugplattformen wie Ballonen, Luftschiffen, Drachen, Helikoptern und Flächenflugzeugen, sowie Anwendungsfällen präsentiert werden.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass im Laufe der Jahre die Größe der Systeme bei gleichbleibender Flugzeit signifikant abnimmt, die Qualität der aufgenommenen Bilder (zunächst analog, später digital) trotz kleinerer Sensorik stetig gesteigert werden kann, und dass sich hinsichtlich der eingesetzten Flugplattformen vor allem Multikoptersysteme (Rotary Wing UAVs) und Flächenflugzeuge (Fixed Wing UAVs) durchsetzen. So konnte Vozikis zwar schon 1983 zeigen, dass mittels unbemannter Luftbildphotogrammetrie hohe geometrische Genauigkeiten für kleine Areale erreicht werden können. Bei dem von ihm verwendeten System handelt es sich je-

doch um einen Ballon mit einem Volumen von rund  $15\text{ m}^3$  und als Kamera kam eine kardanisch gelagerte und ferngesteuerte Hasselblad 500 EL/M mit einem Zeiss Distagon Weitwinkelobjektiv ( $f=50\text{ mm}$ ) zum Einsatz. (Vozikis, 1983) Im Gegensatz zu heute üblichen Systemen sticht hier vor allem die Größe des Fluggeräts, die geringe Anzahl der Bilder und natürlich die Art der Datenprozessierung und Auswertung hervor (Tscharf, 2016).

Ungefähr ab der Jahrtausendwende, und spätestens seit der Einrichtung der ISPRS (International Society of Photogrammetry and Remote Sensing) IC Working Group I/V “Autonomous Vehicle Navigation“ im Rahmen des ISPRS Congress in Istanbul 2004, sind UAVs fester Bestandteil der geodätischen Forschung und Entwicklung, und werden als vollwertige Plattform zu Erfassung von Geodaten betrachtet. Diese Entwicklung konnte insbesondere auch auf der INTERGEO<sup>ö</sup>, Fachmesse für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement beobachtet werden. Waren im Jahr 2010 nur vereinzelt Hersteller von UAVs vertreten, so wurden 2014 bereits 70 Aussteller gezählt und seit 2015 wird dem Bereich der “Vermessung mit unbemannten Fluggeräten“ eine ganze Messehalle gewidmet und mit der Themenplattform “Interaerial Solutions“ klar positioniert. (INTERGEO Press, 2015)

Ähnliche Entwicklungen zeigen sich auch auf wissenschaftlichen Konferenzen in Form von stetig steigender Anzahl an Beiträgen im Zusammenhang mit unbemannten Flugsystemen bzw. ganz besonders anhand der 2011 das erste Mal in Zürich abgehaltenen UAV-g Konferenz, wo vor allem die Nutzung unbemannter Fluggeräte im Bereich der Geomatik im Fokus steht und die seither im Zweijahresrhythmus mit großer Nachfrage fortgesetzt wird. Durch die stärkere wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den beschriebenen Technologien wurde vor allem auch versucht Systematiken zu etablieren, die eine objektive Charakterisierung der verschiedenen Systeme zulassen und eine Einteilung in Gruppen ermöglichen sollen. (Colomina and Molina, 2014)

Im Folgenden wird daher versucht die wesentlichen Charakteristika und Komponenten von modernen UAVs aufzuzeigen sowie die in der Vermessung gängigsten Plattformen zu beschreiben und gegenüberzustellen. Außerdem wird auf die aktuell gültige Rechtslage in Österreich bzw. auch auf einheitliche europäische Bestrebungen eingegangen.

### 2.1.2 Charakteristika

Ein unbemanntes Flugsystem (UAS) ist ein System von komplementären Systemen bzw. Komponenten, die zur Erfüllung definierter Aufgaben zusammengeführt werden. Entsprechend existiert eine große Fülle verschiedener Systeme, die auch eine eindeutige Kategorisierung und Abgrenzung nicht immer ganz einfach macht. In den meisten Fällen wird versucht Charakteristika des Flugkörpers, wie Größe und Gewicht, Flugdauer, Aerodynamik oder Traglast zur Einteilung heranzuziehen. Allerdings ist auch eine Kategorisierung nach der Betriebsart üblich, wobei insbesondere zwischen autonomem und ferngesteuerten Betrieb bzw. auch anhand der Größe des Einsatzgebiets oder der zweckmäßigen Flughöhe und Bodenauflösung unterschieden wird. (Colomina and Molina, 2014)

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang die Arbeit von Henri Eisenbeiß (Eisenbeiß, 2009), wo der Versuch unternommen wird gängige Kategorisierungen zusammenzufassen und gegeneinander abzugrenzen bzw. abzuwägen. Konkret werden Einteilungen in “unpowered“ und “powered“ und leichter bzw. schwerer als Luft vorgenommen, sowie ergänzend noch eine Bewertung nach Reichweite, Flugdauer, Witterungsabhängigkeit und Steuerbarkeit durchgeführt.

In (Barnhart, 2012) wird wie in Tabelle 2.1 ersichtlich und dem amerikanischen Verteidigungsministerium folgend, eine Einteilung in fünf Gruppen vorgenommen, wobei nach dem maximalen Abfluggewicht (maximum take off weight, MTOW), der üblichen Flughöhe und der Flugeschwindigkeit unterschieden wird.

Tab. 2.1 – UAS-Kategorisierung nach (Barnhart, 2012)

UAS Category	Maximum Takeoff Weight (pounds)	Normal Operating Altitude (ft)	Airspeed (knots)
Group 1	< 20	< 1200 above ground level (AGL)	< 100
Group 2	21–55	< 3500 AGL	< 250
Group 3	< 1320	< 18,000 mean sea level (MSL)	
Group 4	> 1320		Any airspeed
Group 5		> 18,000 MSL	

Die im Bereich der Geodatenerfassung übliche Klassifizierung unbemannter Flugsysteme stammt von Peter van Blyenburgh (van Blyenburgh, 2018) und wurde im Laufe der Jahre stetig an die technologischen Weiterentwicklungen und das Aufkommen neuer Systeme und Konzepte angepasst. Wie in Tabelle 2.2 ersichtlich erfolgt die Einteilung nach den Kriterien Reichweite, Flughöhe, Flugdauer und maximalem Abfluggewicht (MTOW). Außerdem wird noch eine Gruppierung in “Tactical“, “Strategic“ und “Special Purpose“ vorgenommen, wobei die beiden letzteren nur im militärischen Bereich von Bedeutung sind und mit den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungen in keinerlei Zusammenhang stehen. (van Blyenburgh, 1999, 2018)

Aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen (Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat, 1957; Grenzdörffer, 2016) und der steigenden Komplexität größerer Systeme beschränken sich geodätische Anwendungen in der Regel auf kleinere Flugkörper mit geringem Gewicht und eingeschränkter Reichweite, was auch anhand der beantragten bzw. genehmigten Zulassungen in nahezu allen europäischen Ländern erkannt werden kann (van Blyenburgh, 2018). Konkret kommen hauptsächlich Mini und Micro-UAVs zum Einsatz (siehe farbige Markierung in Tabelle 2.2). Mit Flughöhen von rund 100 m, einer Reichweite von wenigen Kilometern und üblichen Flugzeiten zwischen 10 und 40 Minuten sind diese Systeme ideal für lokal begrenzte Datenerfassung geeignet, und stellen hier eine wertvolle Ergänzung zu konventionellen Vermessungsmethoden dar. Nano-UAVs (wie z.B. DJI Mavic) spielen für photogrammetrische Anwendungen nur eine untergeordnete Rolle, da sie sowohl in Reichweite als auch Nutzlast limitiert, und somit nicht wirklich zur Erfassung hochqualitativer Daten geeignet sind.

Unbemannte Flugsysteme zur Geodatenerfassung sollen es dem Piloten ermöglichen sich auf die eigentliche Mission und die Qualität der Daten zu konzentrieren und umfassen daher neben dem eigentlichen Fluggerät noch eine Reihe andere Komponenten, die den Betrieb erleichtern und automatisieren bzw. ermöglichen sollen. Als wichtigste Systemkomponenten sind hier mit Sicherheit das Fluggerät, die objekterfassende Sensorik, die Bodenstation, Einrichtungen zur Datenübertragung und Kommunikation sowie die Flugplanung zu nennen, wobei diese im Folgenden näher beschrieben werden sollen.

### Fluggerät

Gemeinsam mit der stetig wachsenden Anzahl an Herstellern nimmt auch die Anzahl der unterschiedlichen Fluggerätetypen zu, wobei die Erhöhung der Sicherheit und die Vergrößerung des Einsatzspektrums als Hauptentwicklungsrichtung ausgemacht werden können. Nahezu alle Systeme sind mit einer ganzen Palette von On-Board Sensorik ausgestattet, die eine automatisierte Fluglageregelung und insbesondere auch einen autonomen bzw. zuvor definierten Wegpunktflug ermöglichen sollen. Vordergründig sind hier vor allem GNSS (Global Navigation Satellite System) und INS (Inertial Navigation System) Einheiten zur Positions- und Orientierungsbestim-

Tab. 2.2 – UAS-Kategorisierung nach (van Blyenburgh, 2018)

RPAS Categories	Range (km)	Altitude (m)	Endurance (h)	MTOW (kg)
<b>Tactical</b>				
Nano ( $\eta$ )	< 1	100	< 1	< 0,025
Micro ( $\mu$ )	< 10	250	< 1	< 5
Mini (Mini)	< 10	150-300	< 2	< 30
Close Range (CR)	10 - 25	3.000	2 - 4	150
Short Range (SR)	25 - 70	3.000	30-06	200
Medium Range (MR)	70 - 200	5.000	6 - 10	1.250
Medium Range Endurance (MRE)	> 500	8.000	10 - 18	1.250
Low Altitude Deep Penetration (LADP)	> 250	50 - 9.000	0,5 - 1	350
Low Altitude Long Endurance (LALE)	> 500	3.000	> 24	< 30
Medium Altitude Long Endurance (MALE)	> 500	14.000	24 -48	1.500
<b>Strategic</b>				
High Altitude Long Endurance (HALE)	> 2.000	20.000	24 - 48	12.000
<b>Special Purpose</b>				
Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV)	1.500	10.000	2	10.000
Offensive (OFF)	300	4.000	3 - 4	250
Decoy (DEC)	0 -500	5.000	< 4	250
Stratospheric (STRATO)	> 2.000	> 30.000	> 48	TBD
Exo-Stratspheric (EXO)	TBD	> 30.000	TBD	TBD
Space (SPACE)	TBD	TBD	TBD	TBD

mung zu nennen. Vor allem die GNSS Sensorik unterliegt hier einer stetigen Weiterentwicklung was dazu führt, dass seit einigen Jahren auch RTK (Real time Kinematik)-Systeme am Markt verfügbar sind, die zusammen mit einer Basisstation Positionsgenauigkeiten im Bereich weniger Zentimeter versprechen und entsprechend “direct georeferencing“ ermöglichen sollen. Unabhängige wissenschaftliche Untersuchungen zur Genauigkeit vergleichbarer Systeme fehlen allerdings noch, und für geodätische Anwendungen wird nach wie vor die Verwendung von herkömmlich vermessenen Bodenpasspunkten empfohlen (Eling et al., 2016; Tscharf et al., 2015).

Die Plattformen reichen von dem Prinzip “Leichter als Luft“, wie Luftschiffe und Ballone, über ferngesteuerte Drachen und motorisierte Gleitschirme, Helikopter und Flugzeuge bis in zu den heute gängigen Multikopter- oder “rotary wings“ und weitestgehend autonomen Flächenflugzeugsystemen (“fixed wings“). Insbesondere die beiden letzteren haben sich für geodätische Anwendungen etabliert, wobei auch Hybridformen - sogenannte “Vertical Take Off and Landing“-Systeme - zusehends an Bedeutung gewinnen. (Luhmann, 2018a) Abhängig vom jeweiligen Anwendungsbereich kommen auch im Bergbau beide genannten Fluggerätetypen zum Einsatz, wobei die in Tabelle 2.3 zusammen gefassten Vor- bzw. Nachteile berücksichtigt werden müssen. Während für Nachtragungsvermessung großer Areale aufgrund der größeren Reichweite und Flugdauer häufig auch Flächenflugzeuge zum Einsatz kommen, ist einer der größten Vorteile von Multikoptersystemen die Fähigkeit definierte Positionen in der Luft zu halten, was insbesondere bei Detailaufnahmen bzw. -Vermessungen, oder der Inspektion von Bruchwänden von Bedeutung ist. In diesem Zusammenhang ist auch die unterschiedliche Traglast zu sehen. In der

Tab. 2.3 – Gegenüberstellung von Flächenflugzeugen mit Multirotorsystemen nach (Tscharf, 2016)

Flächenflugzeuge	Multirotorsysteme
<b>Vorteile</b>	
Vermessung größerer Areale in kürzerer Zeit	Flexible Aufnahmegeometrie (Detailaufnahmen möglich)
Längere Flugdauer möglich (> 45 min)	Möglichkeit, die Position zu halten und zu schweben
I.d.R. größere Flughöhen → geringere Datenmengen	Geringer Platzbedarf für Start und Landung
	Größere Lasten können getragen werden → größeres Einsatzspektrum für unterschiedliche Sensorik
<b>Nachteile</b>	
Zumeist sind nur vertikale Aufnahmen möglich (Sichtschatten)	Kürzere Flugdauer (10-15 min) → geringere Reichweite
“Start- und Landebahn“ notwendig	Vermessung ganzer Abbaustätten nur mit mehreren Starts möglich
I.d.R. größere Flughöhen → geringere Auflösung	

Regel können rotary wings größere Lasten und hochwertigere Kameras sowie Sensorik tragen, was - zusammen mit der angesprochenen Fähigkeit “still zu halten“ und der in vielen Fällen dreh- und schwenkbaren Kamera - zumeist zu einer wesentlich besseren Bild- und Datenqualität führt. Insbesondere bei Vermessungen in topographisch schwierigem Gelände mit beengten Platzverhältnissen für Start und Landung und großen Vertikalerstreckungen zeigen Multikopter ihren größten praktischen Nutzen. Der geringe Platzbedarf für Start und Landung gegenüber der - wenn auch kurzen - Start- und Landebahn bei Flächenflugzeugen macht Multikopter insgesamt zu den wohl flexibleren Systemen, was sich auch anhand der eingesetzten Systeme im marktscheidenden Bereich eindeutig erkennen lässt. Wenn es nicht gerade das Ziel ist Flächen von 100 ha und mehr zu erfassen, kommen im Bergbau nach wie vor hauptsächlich rotary wings zum Einsatz. Einerseits begünstigen die üblicherweise großen vertikalen Erstreckungen und schwierig zu erfassenden Geometrien - aufgrund der Möglichkeit die Aufnahmegeometrie besser an das aufzunehmende Objekt anzupassen - ganz klar Multikoptersysteme, andererseits wird rotary wings in der Regel ein größeres “verstecktes Potential“ für über die reine Geometrieerfassung hinausreichende Anwendungen, wie zum Beispiel die geotechnische Beurteilung von Bruchwänden und Böschungen, zugeordnet. (Tscharf, 2016; van Blyenburgh, 2018)

### Objekterfassende Sensorik

Viele heute erhältliche UAV-Systeme sind bereits mit integrierten Kameras ausgerüstet, wobei diese zumeist nur im Sinne von “FPV (first person view)“ Flügen zu verstehen sind, und die Systeme für vermessungstechnische Anwendungen in der Regel vom Anwender gezielt mit objekterfassender Sensorik ausgestattet werden müssen. Als objekterfassende Sensoren zur Vermessung mit UAVs kommen vordergründig Kameras und Laserscanner zum Einsatz, wobei in vielen Fällen zuerst das Fluggerät und erst danach die “Sensing Payload“ definiert wird. Im Sinne der Ergebnisgüte sollte dieser Prozess allerdings genau umgekehrt ablaufen, was wiederum verdeutlicht, dass viele Anwender nicht oder nur bedingt über das theoretische Hintergrundwis-

sen verfügen und ihre Systeme somit nur mit unzureichender Sorgfalt oder gar falsch betreiben. (Colomina and Molina, 2014; Eling et al., 2016)

Hinsichtlich der eingesetzten Kameras wird zwischen drei grundlegenden Typen unterschieden: Kleine und leichte Kompaktkameras zeichnen sich vor allem durch ihr geringes Gewicht aus, sind allerdings gegenüber den beiden anderen Typen sowohl in den radiometrischen als auch geometrischen Eigenschaften beschränkt. Die üblicherweise kleineren Bildsensoren sind oft nicht in der Lage das Objekt mit ausreichender Auflösung und im gewünschten Detailgrad zu erfassen und überdies ist die Abbildungsgeometrie oftmals nicht stabil. Spiegelreflexkameras hingegen liefern - vor allem in Kombination mit kalibrierten Festbrennweitenobjektiven - eine ausgezeichnete Bildqualität, aufgrund des aber doch deutlich höheren Gewichts kommen sie nur selten in Kombination mit unbemannten Flugsystemen zum Einsatz. Eindeutig am häufigsten kommen die seit rund zehn Jahren verfügbaren, digitalen Systemkameras zum Einsatz. Sie stellen den Kompromiss zwischen leichten Kompaktkameras und schweren Spiegelreflexkameras dar, da sie im Vergleich zur Spiegelreflexkamera aufgrund des fehlenden Spiegelkastens wesentlich leichter sind, aber dennoch mit Wechselobjektiven ausgestattet werden können, und mit ihren physisch großen Bildsensoren eine ähnlich hohe Bildqualität aufweisen. (Colomina and Molina, 2014; Eling et al., 2016; Luhmann, 2018a)

Neben der eigentlichen Sensorik kommt auch der Aufhängung der Kamera große Bedeutung zu. Wie bereits erwähnt sind insbesondere bei Multikoptersystemen die Kameras mit frei dreh- und schwenkbaren "Gimbal- Aufhängungen" montiert, die eine optimale Anpassung der Aufnahmegeometrie an das zu erfassende Objekt ermöglichen. Außerdem verfügen vergleichbare Aufhängungen auch über eigene Lageregelungssysteme, wodurch Bewegungen des Flugkörpers automatisch ausgeglichen und eine hohe Bildqualität erreicht werden kann. Der Kamera-Mount arbeitet sozusagen losgelöst vom Fluggerät und kann in den meisten Fällen auch vom Boden aus - oft von einem zweiten Operanden - gesteuert werden.

Wesentlich seltener als Kameras, und deshalb auch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, kommen Laserscanner zur Anwendung. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die meisten verfügbaren Laserscanner nur schwer mit den juristisch gegebenen Nutzlastgrenzen in Einklang gebracht werden können, bzw. dass die Traglasten der üblicherweise eingesetzten UAV-Klassen (siehe Tabelle 2.2) eine Payload von mehreren Kilogramm nicht zulassen (Austro Control, 2019a; Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat, 1957; Grenzdörffer, 2016). Aktuelle Entwicklungen zeigen allerdings, dass sich dies in den nächsten Jahren ändern wird, da Laserscanner insbesondere in Bereichen mit stärkerem Bewuchs, bei schwach texturierten Objekten und bei schlechten Lichtverhältnissen Kameras doch deutlich überlegen sind. (Gaisecker et al., 2017)

Da allerdings weder fehlende Textur noch starke Vegetation im Bergbau häufig Probleme darstellen, werden besonders im Bereich der markscheiderischen Anwendungen im Tagebau auch künftig Kameras die Hauptsensorik bleiben.

## **Bodenstation**

Gemäß der allgemeinen Vorstellung versteht man unter der Bodenstation ein stationäres oder auch mobiles Hardware bzw. Software- System, das die Steuerung und Überwachung des unbemannten Fluges übernimmt. Bei geodätischen Anwendungen kommt der Bodenstation wohl eine wahrscheinlich genauso große Bedeutung zu, wie dem unbemannten Fluggerät selbst. Die Bodenstation stellt die Schnittstelle zwischen dem Fluggerät, der objekterfassenden Sensorik und dem Piloten dar, wobei jede Änderung der Flugroute, jeder eventuell auftretende Fehler sowie die Ergebnisse der Nutzlastsensoren in der Bodenstation gesammelt, visualisiert und größtenteils auch kontrolliert werden können. Ähnlich wie die Fluggeräte selbst wurden auch die Bodenstationen in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. Moderne System reichen

von “Kommandozentralen“, die die simultane Überwachung und Steuerung mehrerer Flugkörper beherrschen, über kleine “Portable PC“-basierte Systeme (Z.B.: Trimble UX5) bis hin zu reinen Software Lösungen, die auf App-Basis für alle gängigen Betriebssysteme angeboten werden (z.B.: Pix4DCapture, oder UGCS). (Colomina and Molina, 2014; Eisenbeiß, 2009; van Blyenburgh, 2018)

### **Datenübertragung und Kommunikation**

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Systemkomponenten kommt natürlich auch der Datenübertragung und Kommunikation zwischen Fluggerät, Bodenstation und insbesondere auch der erfassenden Sensorik eine große Bedeutung zu. Datenübertragung und Kommunikation sind sowohl in Bezug auf die Einsatzanforderungen, d.h. die Kontrolle des Fluggeräts und Visualisierung der Sensordaten, als auch in Bezug auf die Sicherheit entscheidend. So stellt die österreichische Gesetzgebung beispielsweise unterschiedliche Anforderungen an die Kommunikation zwischen Fluggerät und Bodenstation bzw. insbesondere an die Ausfallsredundanz ebendieser (Austro Control, 2019a). Zusätzlich zu den luftfahrtrechtlichen Bestimmungen müssen natürlich auch die fernmelderechtlichen Rahmenbedingungen erfüllt sein, wobei dies insbesondere bei Eigenbauten von Bedeutung ist. Grundsätzlich kommen heutzutage viele unterschiedliche Kommunikationssysteme zum Einsatz, wobei besonders im Bereich der Mini-UAVs Sendefrequenzen um 2,4 GHz dominieren. Sensor- und Kameradaten werden zusätzlich oft über lokale WLAN-Netze übermittelt, was zwar meist mit einer höheren Qualität der übermittelten Daten einhergeht und somit auch Real-Time Prozessierungen ermöglicht, allerdings nur im Nahbereich (<25 m) stabil funktioniert. (Colomina and Molina, 2014; Eisenbeiß, 2009)

### **Flug- und Missionsplanung**

Obwohl in der dargestellten Definition von UAVs (van Blyenburgh, 1999) die Flugvorbereitung und Missionsplanung nicht explizit erwähnt wird, ist dieser Schritt besonders bei der Erfassung von Geodaten von großer Wichtigkeit, was ja auch Motivation für die vorliegende Arbeit ist, die auch Handlungsempfehlung für UAV-Anwender sein soll. Die Erfahrung und wissenschaftliche Untersuchungen zeigen jedoch, dass eine sorgfältige Planung der Flugtrajektorie (Wegpunkte, Geschwindigkeit, relative Orientierung der Kamera zum Objekt) zusammen mit einer flexiblen Möglichkeit die Mission in Echtzeit zu optimieren sich entscheidend auf die Güte der erzielbaren Ergebnisse auswirken (Rumpler et al., 2013, 2016; Tscharf, 2016) . Auch wenn die meisten kommerziellen Systeme Missionsplanungswerkzeuge anbieten, ist nicht immer sichergestellt, dass diese einerseits von den Anwendern richtig verwendet werden (Anpassung der Aufnahmegeometrie an das aufzunehmende Objekt), bzw. andererseits, dass es die äußeren und technischen Umstände (Genauigkeit und Geschwindigkeit der On-Board-Regelungstechnik, Wind aber auch andere “lokale Hindernisse“ wie Leitungen oder Masten) auch zulassen die geplante Route tatsächlich abzufliegen. Üblicherweise werden UAV-Missionen zur Erfassung von Geodaten als regelmäßige Streifenflüge in zuvor definierter Höhe durchgeführt, wobei zumeist der Überlapp innerhalb der Streifen höher (80 - 90%) gewählt wird als zwischen den einzelnen Flugbahnen (60 - 80%). Eine Möglichkeit zur Echtzeitüberprüfung der aufgenommenen Daten bietet zum Beispiel die Entwicklung von (Rumpler et al., 2013) wo die Redundanz der Bildaufnahme farblich auf einem in Echtzeit ermittelten 3D-Modell visualisiert wird, wobei hier insbesondere die Reichweite der Datenkommunikation einen starken limitierenden Faktor darstellt. (Colomina and Molina, 2014; Mayr, 2011)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein UAV zur Geodatenerfassung wesentlich mehr ist, als nur eine Kamera, die an einem ferngelenkten Flugzeug montiert ist. Ein ineinandergreifen aller beschriebenen Systemkomponenten ist zur Erreichung einer guten Datenqualität unerlässlich, und trotz aller technischen Hilfsmittel und des weitestgehend autonomen bzw. automatischen Betriebs bleiben UAVs doch ein vom Piloten und Anwender hoffentlich richtig eingesetztes Werkzeug mit Vor- und Nachteilen sowie technologischen Grenzen, die im Folgenden besonders vor dem Hintergrund der markscheiderischen Anwendung im Bergbau näher beschrieben werden sollen.

### **Vorteile**

Die größten Vorteile von unbemannten Flugsystemen zur Erfassung von Geodaten liegen mit Sicherheit in der signifikanten Verkürzung der Außendienstzeiten und in der Möglichkeit Messungen in Bereichen durchzuführen, die aus Gründen der Sicherheit nicht von einem Menschen betreten werden sollen, oder wo herkömmliche Methoden aufgrund der topographischen Gegebenheiten nur mit sehr großem Aufwand durchführbar wären. Wird die nachgeschaltete Auswertung und die ergebnisorientierte Flugvorbereitung und -Planung ausgeklammert, zeichnen sich UAVs vor allem auch durch ihre einfache Handhabung aus. Die Flugkörper sind innerhalb weniger Minuten einsatzbereit und aufwändige Einschulungen des Personals sind oftmals nicht notwendig. Werden Missionen sorgfältig vorbereitet und geplant grenzen sich UAVs besonders auch in der Vollständigkeit der Ergebnisse von terrestrischen Systemen ab. Im Gegensatz zu herkömmlichen geodätischen Verfahren wie Tachymetrie oder GNSS Vermessung, wo die Objekte durch einige wenige Punkte diskretisiert werden, liefern die auf UAVS verwendeten Sensoren ein hoch aufgelöstes dreidimensionales Abbild der Wirklichkeit dessen Auflösung und Detailgrad besonders bei der Verwendung von Kameras mit dem Objektstand nahezu beliebig hoch gewählt werden kann. Gegenüber terrestrischen flächigen Methoden wie zum Beispiel Laserscanning, aber auch gegenüber der klassischen Luftbildphotogrammetrie mit zumeist vertikaler Aufnahmeachse zeigt sich der größte Vorteil im Fehlen von Abschattungen, was durch eine wesentlich flexiblere Aufnahmegeometrie erreicht wird. Neben den angesprochenen Ersparnissen aufgrund der verkürzten Messzeiten zeichnen sich UAVs auch hinsichtlich der moderaten Anschaffungskosten aus, und der Einsatz erscheint auch bei den in Österreich üblichen kleineren und mittleren Betrieben durchaus sinnvoll, während z.B.: bemannte Luftbildflüge in den meisten Fällen nur bei großen Betrieben wirtschaftlich umzusetzen sind. (Rumpler et al., 2013; Tscharf, 2016, 2018)

### **Nachteile**

Die Kehrseite der sehr schnellen Datenerfassung ist mit Sicherheit die aufwendigere, weil zeit- und vor allem rechenintensive, Auswertung. Während der zeitliche Aufwand zur Vermessung im Feld durch die weitestgehend autonome Datenerfassung reduziert wird, stellt die weitere Verarbeitung der Daten sowie die Integration in gewohnte Arbeitsabläufe (Erzeugung gängiger Produkte aus neuen Datenquellen) eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar. In der vermessungstechnischen Anwendung übliche CAD-Systeme sind zur Bearbeitung von Massendaten nur bedingt geeignet und die Fülle an gewonnener Information ist auch nicht für alle Anwendungsfälle sinnvoll bzw. erforderlich. Bei der Verwendung herkömmlicher Methoden (Tachymeter, GNSS) erfolgt eine selektive Datenerfassung der relevanten Information im Feld, während bei unbemannten Flugsystemen zunächst alles erfasst und die Interpretation und etwaige Reduktion der Daten zur Gänze in den Innendienst verlagert wird. Dies reduziert zwar das Risiko, wichtige Informationen zu übersehen, allerdings ist die Ableitung der tatsächlichen Gegebenheiten

aus der getrennten Betrachtung der vorhandenen Geometrie- und Bildinformation nicht immer eindeutig möglich bzw. zumindest nach derzeitigem Stand der Technik nicht vollständig und nur zum Teil automatisierbar. Ein weiterer Nachteil ergibt sich naturgemäß auch aus der hohen Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen. Neben der Tatsache, dass die Flugkörper natürlich sehr empfindlich auf die herrschenden Witterungs- und vor allem Windverhältnisse reagieren sind insbesondere mit Kameras ausgerüstete UAVs sensibel gegenüber Belichtungsänderungen, Reflexionen, Schattenwurf oder Dunkelheit. So sollten - wie bei allen photogrammetrischen Verfahren - sehr sonnige Bedingungen genauso vermieden werden wie niedriger Sonnenstand mit starker Schlagschattenbildung. Die optimalen Bedingungen herrschen somit bei hoher Bewölkung und diffuser Beleuchtung. Aus Sicht der Strom- bzw. Akkuversorgung sollten auch "Extremtemperaturen" in beiden Richtungen vermieden werden, da einerseits die Leistungsfähigkeit und andererseits die Lebensdauer der Akkus stark unter Temperaturschwankungen leidet bzw. temperaturabhängig ist. (Rumpler et al., 2013; Tscharf, 2016, 2018)

### 2.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Wie schon erwähnt sind die Entwicklungen auf dem Sektor der unbemannten Flugsysteme rasant. Das Wachstum der Branche, sowohl nach Anzahl der Geräte und Nutzer als auch nach Umsätzen ist ungebremst stark, und natürlich ist dies auch der leichteren Verfügbarkeit von Drohnen für jedermann geschuldet. Die Geschwindigkeit mit der sich Entwicklungen vollziehen ist nahezu immer deutlich schneller als die Geschwindigkeit, mit der rechtliche Rahmenbedingungen adaptiert werden. Der Gesetzgeber ist also stets in der Pflicht allgemein gültige Regeln schnell und vorausschauend zu erlassen. Die Rahmenbedingungen müssen das Sicherheitsempfinden der Bevölkerung berücksichtigen, gleichzeitig aber auch den betroffenen Wirtschaftszweig nicht über Gebühr benachteiligen und behindern. (Brandt, 2018; Briese et al., 2013)

Aufgrund der immer leichteren Zugänglichkeit von Privatpersonen zu unbemannten Flugsystemen wird auch der Zugang zum öffentlichen Luftraum durch zivile Nutzer immer einfacher und bedarf daher gesonderter und angepasster Regularien um Ereignisse wie den live im Fernsehen übertragenen Absturz einer Fernsehdrohne am 22.12.2015 beim Nachtslalom in Madonna di Campiglio zu vermeiden (siehe Abbildung 2.2). Die Entwicklungen starten zumeist bei den vorhandenen Luftfahrtgesetzen und gehen in Richtung einer "Straßenverkehrsordnung" für den zivilen und nicht geregelten Luftraum (Kennzeichnungs- und Nachweispflichten für Fluggeräte und Piloten). (Kleine Zeitung, 22.12.2017)

Da die Luftfahrt allerdings in hohem Maße länderübergreifende Angelegenheit ist, ist es auch hier das Ziel einheitliche europäische Regelungen zu erlassen, weshalb im Folgenden auch auf die aktuell gültige österreichische Rechtslage sowie europäische Entwicklungstendenzen eingegangen wird.

### Österreich

Wie in mittlerweile fast allen europäischen Ländern wurde auch in Österreich auf den vermehrten Einsatz unbemannter Flugsysteme reagiert und das Luftfahrtgesetz (Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat, 1957) mit 01.01.2014 novelliert, wodurch sich grundlegende Änderungen für die zivile Nutzung der unbemannten Luftfahrt und somit auch für den Einsatz unbemannter Flugkörper zur Vermessung im Bergbau ergaben. Auf Basis dieser Novelle ist der Betrieb unbemannter Flugkörper zu Vermessungszwecken nun juristisch gesichert möglich, wobei die technischen und betrieblichen Voraussetzungen berücksichtigt werden müssen. Jedes Flugsystem bedarf der Bewilligung durch die Austro Control, wobei die Bewilligung in Bescheidform auf Antrag des Bewilligungswerbers erfolgt. Das Luftfahrtgesetz unterscheidet im 4. Abschnitt



**Abb. 2.2 – Am 22.12.2015 kam es im Rahmen der TV-Übertragung des Slaloms von Madonna di Campiglio vermutlich aufgrund unerwarteter und starker Frequenzstörungen zum Absturz einer TV-Kameradrohne unmittelbar hinter dem österreichischen Skistar Marcel Hirscher. (Kleine Zeitung, 22.12.2017)**

zwischen den Modellflugsport betreffenden Flugmodellen, die bis zu einem Gewicht von 25 kg ohne Bewilligung und nur zum Zwecke des Fluges betrieben werden dürfen, den unbemannten Geräten bis zu 79 J maximaler Bewegungsenergie, sowie den unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1 und 2, wobei Klasse 2 auch einen Betrieb ohne Sichtverbindung zulässt. (Tscharf, 2016) Nahezu alle zur Vermessung eingesetzten Systeme (Mini und Micro UAVs) sind der sogenannten Klasse 1 zugeordnet, wobei diese Systeme nur mit direkter – und ohne technische Hilfsmittel bestehender - Sichtverbindung zum Piloten betrieben werden dürfen und hinsichtlich der Genehmigung unter den Geltungsbereich der LBTH 67 (Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge bis 150 kg (Austro Control, 2019a)) fallen.

Abhängig von Betriebsmasse und Einsatzgebiet werden diese noch weiter kategorisiert (siehe Abbildung 2.3), was wiederum unterschiedliche Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen im Bewilligungsverfahren zur Folge hat - wie zum Beispiel redundante Energie- und Datenversorgung oder spezielle Ausbildungskriterien für Piloten. Während die technische Zulassung der Kategorien A und B noch eher einer Modellbauzulassung entspricht und lediglich eine Haftpflichtversicherung und eine nicht redundante Steuerung fordert, findet in den höheren Kategorien eine strenge technische Überprüfung des Gerätes, all seiner ausfallgefährdeten Komponenten sowie des Piloten statt. (Austro Control, 2019a; Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat, 1957; Tscharf, 2016)

Unabhängig von der jeweiligen Kategorie dürfen Luftfahrzeuge der Klasse 1 allerdings nur bis zu einer Höhe von 150 m und innerhalb des österreichischen Bundesgebiets betrieben werden. Höhere Flüge bzw. Umstände, unter denen mit einem Überfliegen der Bundesgrenzen gerechnet werden muss, bedürfen einer gesonderten Bewilligung durch die Austro Control. (Austro Control, 2019a; Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat, 1957) Zusätzlich zu den luftfahrtrechtlichen Bestimmungen müssen selbstverständlich auch alle übrigen rechtlichen Bestimmungen berücksichtigt werden, wobei hier insbesondere das Datenschutzgesetz und der allgemeine zivilrechtliche Schutz der Privatsphäre, Rechte der Grundeigentümer bei Start und Landung, das Versicherungsrecht sowie auch fernmelderechtliche Regularien zu nennen sind. (Tscharf, 2016)

	Einsatzgebiet			
	I unbebaut	II unbesiedelt	III besiedelt	IV dicht besiedelt
Betriebsmasse bis einschließlich 5kg	A	A	B	C
Betriebsmasse bis einschließlich 25kg	A	B	C	D
Betriebsmasse über 25kg und bis einschließlich 150kg	B	C	D	D

Abb. 2.3 – Die österreichische Rechtslage unterteilt die in der Vermessung hauptsächlich eingesetzten unbemannten Luftfahrzeuge der Klasse 1 abhängig von Betriebsmasse und Einsatzgebiet in vier weitere Kategorien ein. (Austro Control, 2019a)

### Europäische Regelungen bzw. Bestrebungen

Die Thematik der unbemannten Flugsysteme ist auch auf europäischer Ebene als wichtiges Zukunftsfeld mit großem wirtschaftlichen und technologischen Potential erkannt worden, obwohl die nationalen Regelungen in den einzelnen Mitgliedsstaaten nach wie vor sehr stark unterschiedlich sind, und von völliger Offenheit bis zum kategorischen Verbot reichen. (van Blyenburgh, 2018) Bisher ist die EASA (European Union Aviation Safety Agency) aufgrund internationaler Vereinbarungen nur für UAVs mit einer MOTW über 150 kg zuständig, eine einheitliche Regelung für Systeme unter dieser Schwelle ist nach wie vor in Bearbeitung, steht allerdings kurz vor dem Abschluss. Sofern vom EU-Parlament oder vom EU-Rat keine Einwände erhoben werden, werden beide Rechtsakte noch 2020 veröffentlicht und die Verordnung wird innerhalb eines Jahres nach ihrer Veröffentlichung schrittweise in Kraft treten. Bis 2022 soll die Übergangszeit abgeschlossen sein und die Verordnung wird vollständig anwendbar sein. Neben der Regulierung der UAVs soll auch eine neue Luftraumstruktur vorgeschlagen werden, wo Modellflugzonen, eingeschränkte Zonen und Flugverbotszonen festgelegt werden sollen. Überdies soll auch die Ausbildung der Piloten reglementiert werden, wobei hier von Informationsblättern bis hin zu Schulungsprogrammen, die jenen der bemannten Luftfahrt ähneln, unterschiedliche Anforderungen gegeben sein können. Der Betrieb unbemannter Flugsysteme in Europa soll demnach in 3 Hauptkategorien erfolgen, wobei sich der Verordnungsvorschlag auf die beiden Kategorien “offen“ und “spezifisch“ konzentriert (EASA, 2019; Strohmayer, 2017):

- **Offen:** Unter Berücksichtigung der damit verbundenen Risiken bedarf der Betrieb weder eine vorangehende Genehmigung noch ein Erklärung des Betreibers, wobei ähnlich der österreichischen Rechtslage nur Flüge mit Sichtverbindung erlaubt sind.
- **Spezifisch:** Unter Berücksichtigung der damit verbundenen Risiken ist vor dem Betrieb eine Genehmigung der zuständigen Behörde erforderlich, wobei die in einer operationellen Risikobewertung ermittelten Minderungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind. Ausgenommen sind bestimmte Standardszenarien wo eine Erklärung des Betreibers ausreichend ist, oder wo der Betreiber über ein sogenanntes Leicht UAV-Zertifikat mit entsprechenden Rechten verfügt
- **Zertifiziert:** Unter Berücksichtigung der vorhandenen Risiken ist eine Zertifizierung des UAVs, ein lizenziertes Pilot, sowie ein von der zuständigen Behörde anerkannter Betreiber erforderlich um das geforderte Sicherheitsniveau zu gewährleisten.

Nähere Spezifikationen und Klassifizierungskriterien können künftig dem Verordnungsvorschlag entnommen werden, bzw. sind noch in Ausarbeitung, wobei sich aus den vorhandenen Entwürfen schon erkennen lässt, dass versucht wurde bestehende Regelungssysteme zu harmonisieren und vorhandene Rechte in den unterschiedlichen Ländern nur geringfügig zu beschneiden, indem entsprechende Ausnahmen vorgesehen sind. (EASA, 2019)

## 2.2 UAV-Photogrammetrie

Wie bereits erwähnt haben sich UAVs mittlerweile so stark in der Anwendung etabliert, dass wohl zu Recht bereits von einem eigenen “Forschungsfeld“ der “UAV-Photogrammetrie“ gesprochen werden kann. Der Begriff der UAV-Photogrammetrie wurde das erste Mal in der Dissertation von Henri Eisenbeiß im Jahr 2009 (Eisenbeiß, 2009) eingeführt, und beschreibt ein unbemanntes und fliegendes photogrammetrisches Aufnahmesystem, das manuell oder automatisch gesteuert werden kann, bzw. wird auch die photogrammetrische Auswertung unter diesem Begriff subsumiert.

Im Folgenden wird versucht die UAV-Photogrammetrie in bestehenden Systematiken zu verorten, bzw. eine Abgrenzung zur klassischen terrestrischen Nahbereichsphotogrammetrie sowie zur Fernerkundung vorzunehmen. Es soll die Frage nach der Stellung von UAV-Photogrammetrie geklärt, und gleichzeitig aktuelle bzw. zukünftige Anwendungsgebiete sowie technologische Limitationen aufgezeigt werden.

### 2.2.1 Kategorisierung photogrammetrischer Plattformen

Die technologischen Entwicklungen und das verstärkte Aufkommen von UAVs in photogrammetrischen und geodätischen Anwendungen, macht es notwendig auch die Kategorisierung photogrammetrischer Plattformen zu überdenken, bzw. die “neue“ Technologie entsprechend einzuordnen. (Eisenbeiß, 2009) tut dies auf Basis der von (Luhmann, 2018b) vorgenommenen Einteilung der Messverfahren in Abhängigkeit der Objektgröße und Genauigkeit (siehe Abbildung 2.4), wodurch sich die UAV-Photogrammetrie zwischen der Industriephotogrammetrie und der bemannten Luftbildphotogrammetrie, und insbesondere mit großer Überlappung zu Architektur- und Ingenieurphotogrammetrie, terrestrischem Laserscanning, Tachymetrie und GNSS-Vermessung positioniert. UAVs schließen die oft angesprochene Lücke zwischen terrestrischer und Luftbildphotogrammetrie, eröffnen neue Aufnahmeperspektiven im Nahbereich und führen somit zu einer generellen Renaissance der Photogrammetrie in Forschung und Anwendung. Aus der Überlappung mit den anderen Messmethoden ergibt sich naturgemäß auch eine Art Konkurrenzsituation zu bestehenden Technologien wie Laserscanning und Tachymetrie. Vor diesem Hintergrund zeigt die UAV-Photogrammetrie ähnliche Schwächen wie alle bildbasierten Methoden: Empfindlichkeit auf Beleuchtungsunterschiede, Reflexionen und Schattenwurf sowie Vegetation wodurch das Matching korrespondierender Bildausschnitte sowohl radiometrisch als auch geometrisch beeinflusst wird (Eisenbeiß, 2009).

Hinsichtlich Aufnahmeort und Entfernung ist die UAV-Photogrammetrie mit Aufnahmeentfernungen unter 300 m ganz klar der Nahbereichsphotogrammetrie zuzuordnen, vor dem Hintergrund der Aufnahme- und Auswertemethode wird natürlich von Digitaler Photogrammetrie gesprochen und nach Anzahl der auszuwertenden Bilder von Mehrbildphotogrammetrie. Üblicherweise erfolgt die Objektrekonstruktion mittels Structure from Motion - also mit einer Vielzahl an Verknüpfungspunkten aus vielen ungeordneten Bildern - wodurch auch noch einmal eine Abgrenzung zur klassischen Photogrammetrie mit wenigen ausgewählten korrespondierenden Bildpunkten vorgenommen werden kann. (Luhmann, 2018b)

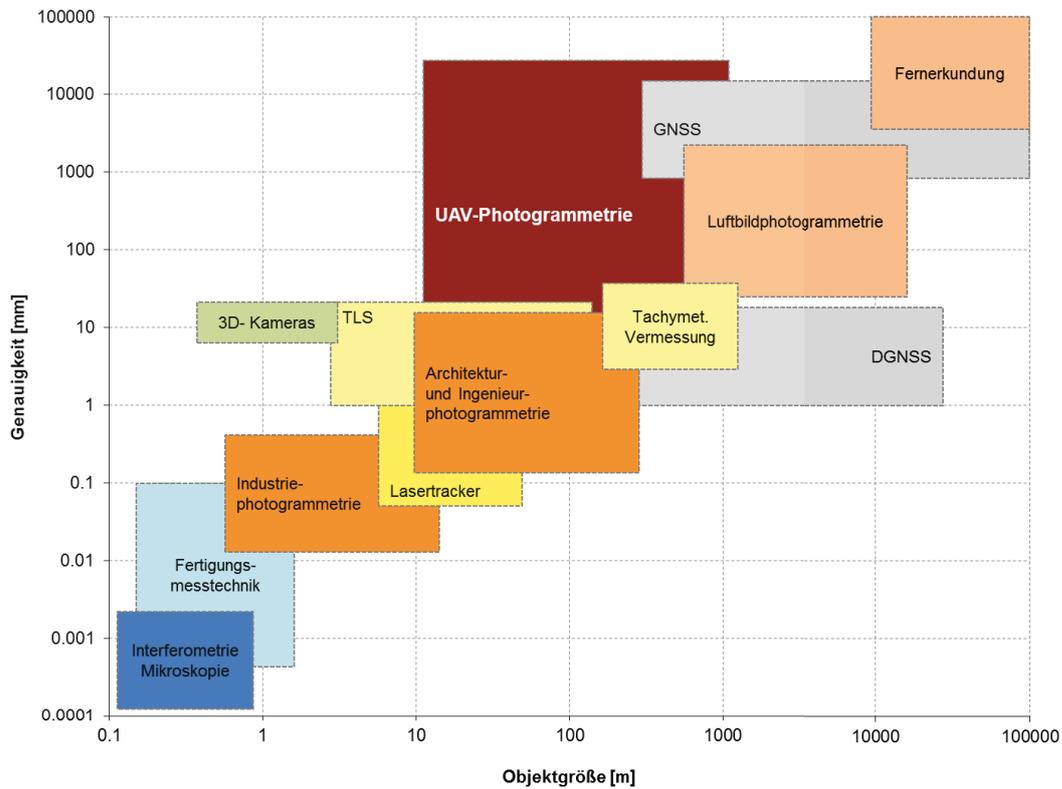


Abb. 2.4 – Die UAV-Photogrammetrie positioniert sich zwischen Industrie- und bemannter Luftbildphotogrammetrie und zeigt somit starke Überschneidung mit Ingenieurphotogrammetrie, terrestrischem Laserscanning, Tachymetrie und GNSS-Vermessung. Nach (Eisenbeiß, 2009) und (Luhmann, 2018b)

UAV-Photogrammetrie fügt sich gut in bestehende Messmethoden ein, schließt vorhandene Lücken und stellt somit eine wertvolle Ergänzung dar. Abhängig vom Anwendungsfall liegen die Aufnahmen näher an der Nahbereichsphotogrammetrie oder eben Fernerkundung, woraus sich auch die Breite der eröffneten Möglichkeiten erkennen lässt. Nichtsdestotrotz muss erwähnt werden, dass es sich bei UAVs und Photogrammetrie im Allgemeinen um eine Technologie zur Erfassung bestehender Objekte handelt und somit nur geometrische Daten gesammelt und erzeugt werden können. Die Übertragung von vorhandener geometrischer Information in die Örtlichkeit (Absteckung) und die Sichtbarmachung einer Planung in der Natur sind grundsätzlich nicht möglich.

### 2.2.2 Anwendungsgebiete

Durch die neu gewonnene Perspektive ergeben sich speziell bei kleineren Gebieten und Objekten breite Anwendungsfelder und vor allem eine einfache und kostengünstige Alternative zu bemannter Luftbildphotogrammetrie. In den nachfolgenden Ausführungen wird der Fokus ganz bewusst auf photogrammetrische Anwendungen gelegt und z.B.: die Gruppe der filmschaffenden UAV-Nutzer ausgeklammert, obwohl ein Großteil der zugelassenen UAVs in diesem Bereich eingesetzt wird (Austro Control, 2019b).

### Aktuelle Einsatzbereiche und -möglichkeiten

Die aktuellen photogrammetrischen Einsatzbereiche reichen von Land- und Forstwirtschaft, über Beobachtungen des Ökosystems (hauptsächlich Boden und Gewässer) und Anwendungen im Bereich der Rohstoffgewinnung und Geologie, bis hin zu Einsatzorganisationen sowie Überwachung und Gewährung der öffentlichen Sicherheit. (Aasen, 2017; Austro Control, 2019b) Die Anwender sind ähnlich vielfältig wie die Anwendungsgebiete, wobei insbesondere Forscher aus den unterschiedlichsten Fachbereichen eine große Gruppe darstellen. (Aasen, 2017)

(Ruffer and Mondry, 2018) berichten zum Beispiel vom Einsatz der UAV-Photogrammetrie in Kombination mit Multispektralanalyse zur Inventur und Schädlingsfrüherkennung in der Forstwirtschaft, (Homainejad and Rizos, 2015) nutzen UAV-Photogrammetrie zur frühzeitigen Erkennung von Busch- und Waldbränden, (Maurer et al., 2018) setzen UAV-basierte Bilddaten zur Inspektion von Hochspannungsleitungen ein und (Dirks, 2018) zeigt das Potential von Echtzeit Lagekarten in der Katastrophenhilfe auf. Im Rahmen des von (Gerke et al., 2018) bearbeiteten Projekts “its4land“ kommen UAVs in der Katastervermessung zum Einsatz, die Deutsche Bahn AG setzt unbemannte Flugsysteme im Bereich der Sicherheit aber auch zu Inspektionszwecken ein (Finkbeiner, 2018) und (Schmechtig, 2017) erläutert Anwendungen, Möglichkeiten und Erfahrungswerte von UAVs in der Ingenieurvermessung. (Grenzdörffer, 2013) nutzt hochaufgelöste UAV-Luftbilder zur Vogelzählung und bei (Bertels, 2016) werden UAV-Bilder zur Bauwerksinspektion und Vermessung eingesetzt. (Burkert and Fraundorfer, 2013) berichten wiederum von Erfahrungen bei der Beobachtung von sich bewegenden Menschenmassen, was insbesondere zur Gewährleistung der Sicherheit bei großen Veranstaltungen ein Thema sein kann. Im Bereich der Rohstoffgewinnung kann die UAV-Photogrammetrie eine wichtige ergänzende Technologie bei der Erfüllung der markscheiderischen Aufgaben (Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat, 1999) sein. UAVs kommen hauptsächlich zur Nachtragung des Bergbaukartenwerks, sowie im Rahmen der markscheiderischen Sicherheits- und Betriebskontrolle zur Volums- und Massenermittlung, sowie auch als Grundlage für Standsicherheitsbeurteilungen zum Einsatz. (Raeva et al., 2016) und (Greiwe et al., 2013) gehen beispielsweise auf den Einsatz der UAV-Photogrammetrie zur Geländemodellierung und Massenermittlung von Halden ein, während (Fischer, 2016) von Erfahrungen mit UAVs zur Befliegung und Auswertung von Haufwerken berichtet. Die Analyse von gesprengtem Material im Tagebau stellt auch an der Montanuniversität Leoben einen Schwerpunkt der Forschungen dar. Der Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft beschäftigt sich gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern mit dem Einsatz von UAVs zur Qualitätssteuerung im Tagebau, bzw. zur Ermittlung der Korngrößenverteilung des gesprengten Hauwerks, wie bei (Tscharf, 2018) näher ausgeführt wird.

Dieser exemplarische Auszug könnte natürlich noch lange weiter geführt werden, und entsprechend wird auch nicht der geringste Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Vielmehr ist es das Ziel die Popularität und Vielseitigkeit der UAV-Photogrammetrie noch einmal zu betonen und zu verdeutlichen, bzw. auch aufzuzeigen, dass eine neue Trägerplattform in der Lage ist die Scheu vor komplexen Auswertungen und Messverfahren abzubauen und die Bereitschaft zur Anwendung neuer Methoden deutlich erhöht. Trotzdem muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass “eine motorisierte Schwalbe noch keinen Sommer macht“ und dass beim Studium von Anwenderberichten durchaus Vorsicht vor überschwänglichem Elan geboten ist. Die theoretischen photogrammetrischen Grundlagen sind in vielen Bereichen nur unzureichend gegeben, die erzeugten Ergebnisse werden ungeprüft übernommen und für die jeweiligen Zwecke mit entsprechend schwerwiegenden Folgen und Fehlern verwertet.

Bei etwas näherer Betrachtung der Anwenderberichte zeigt sich allerdings auch, dass nicht nur die bearbeiteten Felder sehr breit gestreut sind, sondern auch, dass die Ergebnisvielfalt durchaus

groß ist und eine Vielzahl verschiedener Produkte aus einem UAV-Bildflug abgeleitet werden kann.

Neben der direkten Verwendung der Bilder zur fotografischen Dokumentation bzw. zur Inspektion kritischer Bereiche stellen vor allem hochaufgelöste, tagesaktuelle und „richtige“ (vertikale Flächen wie Fassaden dürfen nicht erkennbar sein) Orthofotos eine wichtige Datengrundlage für die Rohstoffgewinnung dar. Im Gegensatz zu einer „herkömmlichen“ Luftbildaufnahme gibt ein Orthofoto – wie eine maßstäbliche Karte – ein verzerrungsfreies und maßstabsgetreues Bild der Erdoberfläche wieder, das basierend auf einem digitalen Geländemodell von der ursprünglichen Zentralprojektion in eine Parallelprojektion umgerechnet wurde. Abgesehen von der Möglichkeit, jederzeit aktuelles Bildmaterial aufnehmen zu können, unterscheiden sich aus UAV-Befliegungen abgeleitete Orthofotos vor allem durch die Qualität des zugrundeliegenden Geländemodells von online verfügbaren Bildern aus Geodatenportalen. Ein hoch aufgelöstes Geländemodell ist unbedingte Voraussetzung für die richtige Umbildung der Luftbilder zu einem Orthofoto, da nur jene Objekte, die auch im Geländemodell erfasst wurden, bei der Orthorektifizierung berücksichtigt werden können. (Tscharf, 2016; Zurhorst and Zurhorst, 2015)

Die hochaufgelösten digitalen Geländemodelle (Bodenauflösung abhängig von der Flughöhe im Bereich weniger Zentimeter), die mittels Structure from Motion weitestgehend automatisiert aus den aufgenommenen Bildern abgeleitet werden, dienen jedoch nicht nur als Grundlage für Orthofotos, sondern liefern auch für sich wertvolle Information über die überflogene Topographie bzw. das Objekt. Insbesondere bei der Verwendung von Multirotorsystemen ist eine lückenlose, dreidimensionale Erfassung des gesamten Gebiets und sogar die Modellierung überhängender Bereiche aus sicherer Entfernung möglich. Die absolute Genauigkeit dieser Modelle beläuft sich bei entsprechender und sorgfältig geplanter Vorgehensweise auf unter 10 cm, womit zumindest bei Anwendungen im Bergbau auch die gesetzlichen Vorgaben bei der Tagebauvermessung (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013) eingehalten werden können. Naturgemäß ist auch eine weitere Verwendung dieser 3D Information zur Ableitung von lückenlosen Schnittdarstellungen und Profilen sowie zur Volums- und Massenermittlung möglich. Durch die einfache und flexible Möglichkeit der Datengewinnung wird eine vollständige Überwachung etwaiger Materialbewegungen bzw. generell Veränderungen ermöglicht. (Tscharf, 2016)

### **Zukünftige Entwicklungen und Einsatzmöglichkeiten**

Unter Berücksichtigung der vorhandenen Trends ist das Ende der Entwicklungen allerdings noch lang nicht erreicht. Aus marktscheiderischer Sicht ist mit Sicherheit die untertägige Anwendung von größtem Interesse (EIT Raw Materials, 2019; Inkonova, 2019). Aufgrund der fehlenden Beleuchtung und der äußeren Umstände ist der alleinige Einsatz von photogrammetrischen Methoden allerdings nicht möglich, und sowohl der autonome Betrieb als auch das angestrebte Mapping wird in Echtzeit wohl nur durch den Einsatz aktiver Sensorik, wie z.B.: Laserscanning möglich werden. Nichtsdestotrotz kann Photogrammetrie eine wertvolle Ergänzung darstellen. Insbesondere für weiterführende automatische Datenverarbeitung kann die vorhandene semantische Bildinformation eine wichtige Datenquelle sein, und außerdem kann die Auflösung und der Detailgrad durch entsprechende Anpassung des Objektabstands nahezu beliebig erhöht werden, was bei Lidar Scans in der Regel nicht so gut möglich ist.

An diesem Beispiel kann aber auch ein grundsätzlicher Entwicklungstrend zur gemeinsamen Nutzung verschiedenartiger Sensorik erkannt werden. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben verfügt ein kameratragendes UAV zwar schon heute über eine umfangreiche Sensorik zur Flugsteuerung und Objekterfassung, künftig werden jedoch Anwendung mit unterschiedlicher objekterfassender Sensorik einen immer größeren Stellenwert einnehmen. Autonom indoor-navigierende, vermessende, erkundende und vor allem fliegende Roboter hätten auf den untertägigen Bergbau wohl

eine ähnlich starke Auswirkung wie aktuelle UAVs auf den Tagebau, obwohl die Fragestellungen untertage um ein vielfaches komplexer und schwieriger zu beantworten sind. (Lösch et al., 2018) Insbesondere in großen bzw. entlegenen Gebieten wird auch die Verbreitung von UAV-Schwärmen mit Sicherheit zunehmen. Was heutzutage hauptsächlich in der Unterhaltungsbranche als eine Art Feuerwerk bekannt ist, wird in Zukunft auch für technische Fragestellungen eingesetzt werden. Innerhalb eines Schwarms können Aufgaben den einzelnen Individuen zugeordnet werden, um so größere Herausforderungen im Kollektiv zu erfüllen. In der vermessungstechnischen Anwendung könnten so größere Gebiete in noch kürzerer Zeit erfasst werden, bzw. könnten Teile des Schwarms auch nur zur Signalverstärkung und Kommunikation eingesetzt werden. (Campion et al., 2018; Pillai et al., 2018)

Ungeachtet der hardwareseitigen Weiterentwicklung ist es unbestritten, dass die größeren technologischen Herausforderungen im Bereich der Datenverarbeitung liegen. Die Möglichkeit zur deutlich schnelleren Datenerfassung bringt die Notwendigkeit einer schnellen und im Idealfall automatisierten Auswertung mit sich. Die anfallenden Datenmengen sind schon heute von einem menschlichen Anwender nicht mehr zu überblicken und sinnvoll aufzubereiten und dieser Trend wird sich in Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit noch verstärken.

### **Technologische Grenzen**

Der vorliegende Abschnitt bzw. die gesamte Arbeit soll jedoch in keiner Weise als „Werbung“ für den Einsatz von UAVs verstanden werden, weshalb neben den dargestellten Möglichkeiten an dieser Stelle auch auf systembedingte Schwachpunkte und technologische Grenzen der UAV-Photogrammetrie eingegangen werden soll.

Neben den bereits beschriebenen Einsatzgrenzen und Nachteilen der eingesetzten Flugkörper (Empfindlichkeit auf äußere Bedingungen wie Wind, Temperatur, Niederschlag und dergleichen) zeigt die UAV-Photogrammetrie im Wesentlichen die selben Schwachpunkte wie alle bildbasierten Verfahren. Die zumeist eingesetzten RGB-Kameras sind passive Sensoren und können nur das von den aufgenommenen Objekten reflektierte Licht detektieren. Die UAV-Photogrammetrie ist somit nachtblind und erfordert eine ausreichende Ausleuchtung des Gebiets. Zeigen die aufgenommenen Objekte außerdem schwache Textur, oder ist diese sehr stark repetitiv, kann dies auch durch eine flexible Aufnahmeplattform nicht wirklich umgangen werden. Liegt eine geringe Anzahl an markanten Merkmalspunkten vor, führt dies naturgemäß auch zu einer geringeren Anzahl an Verknüpfungen worunter einerseits die Punktdichte in den Ergebnissen, andererseits die grundsätzliche Ausrichtung der Bilder zueinander leidet.

Ein Umstand, der mit Sicherheit eine der größten Einschränkung für den Einsatz der UAV-Photogrammetrie darstellt und dennoch von vielen Anwendern weitestgehend nicht beachtet wird, ist etwaig vorhandener Bewuchs. Während klar geometrisch definierte und bewegte Objekte wie zum Beispiel Fahrzeuge in der Auswertung im schlimmsten Fall mehrfach, in den meisten Fällen allerdings gar nicht sichtbar sind, können nur leicht veränderliche Objekte und Oberflächen wie Bäume und Laub die Ergebnisqualität stark negativ beeinflussen. Der Grundsatz, dass das selbe Objekt von verschiedenen Punkten aus aufgenommen wird ist nicht mehr eindeutig erfüllt und die automatisierte Bildzuordnung liefert stark verrauschte Punktwolken bzw. kann die Auswertung mangels ausreichender und qualitative hochwertiger Verknüpfungen und Matches sogar scheitern.

Außerdem ist es mit Kameras nicht möglich durch Baumkronen hindurch auf den Boden „zu sehen“. Es ist somit nur möglich digitale Oberflächenmodelle (DOM) zu erzeugen und für die Ableitung, der in der Regel relevanteren, Digitalen Geländemodelle (DGM) muss auf andere Sensorik wie zum Beispiel LiDAR zurückgegriffen oder händisch nachgebessert werden. Allgemein muss angemerkt werden, dass durchsichtige bzw. netzartige Strukturen ein grundsätzliches

Problem darstellen. In vielen Fällen führen derartige Aufnahmen nur zu einem stark verrauschten Abbild des Hintergrunds und die ‘‘Gitter- bzw. Netzstruktur‘‘ wird nicht geometrisch scharf erfasst.

## 2.3 Klassische Photogrammetrie

(Luhmann, 2018b) definiert den Begriff der Photogrammetrie folgendermaßen:

*‘‘Unter Photogrammetrie versteht man allgemein Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines beliebigen Objektes indirekt dessen Form und Lage durch Bildmessungen sowie dessen inhaltliche Beschreibung durch Bildinterpretation zu gewinnen.’’*

Das Ziel der photogrammetrischen Messung ist somit die exakte dreidimensionale Rekonstruktion des Objektes, wobei die Ergebnisse in digitaler (Koordinaten oder geometrische Abmessungen) oder grafischer Form (Bilder, Pläne, Karten) vorliegen können. Zusätzlich kann die vorhandene Bildinformation als semantischer Informationsspeicher dienen, der zum Zwecke der inhaltlichen Interpretation und Plausibilitätsüberprüfung herangezogen werden kann. (Luhmann, 2018b)

### 2.3.1 Photogrammetrische Bildaufnahme

Die Photogrammetrie ist ein dreidimensionales Messverfahren, wobei das mathematische Modell durch die zentralprojektive Abbildung gegeben ist. Jeder dreidimensionale Objektpunkt  $P(X, Y, Z)$  wird über einen geraden Bildstrahl in die Bildebene abgebildet, wobei sich alle Bildstrahlen eines Bildes im sogenannten Projektionszentrum  $O'(X_0, Y_0, Z_0)$  schneiden. Der in der Bildebene liegende Bildpunkt  $P'(x', y')$  legt zusammen mit dem Projektionszentrum  $O'$  die Raumrichtung des entsprechenden Strahls zum Objektpunkt  $P$  fest, und sind die Lage des Aufnahmesystems im Raum (äußere Orientierung) und die Abbildungsgeometrie der Kamera (innere Orientierung) bekannt, kann jeder Bildstrahl absolut im Raum festgelegt werden. Die Summe aller gemessenen Bildpunkte spannt zusammen mit dem zugehörigen Projektionszentrum ein räumliches Strahlenbündel auf, das zu ein und demselben Zeitpunkt aufgenommen wurde. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

Mathematisch wird dies durch die sogenannten Kollinearitätsgleichungen beschrieben, wobei  $r_{ij}$  Elemente einer räumlichen Drehmatrix  $\mathbf{R}$ ,  $c$  die Kamerakonstante bzw. Brennweite,  $x_0$  und  $y_0$  die Lage des Bildhauptpunkts (Durchstoßpunkt eines lotrechten Bildstrahls durch die Bildebene) im Bildkoordinatensystem und  $\Delta x'$  bzw.  $\Delta y'$  Korrekturterme für die Linsenverzeichnung repräsentieren. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (2.1)$$

Aus den Gleichungen geht eindeutig hervor, dass zu jedem Objektpunkt  $P(X, Y, Z)$  ein Bildpunkt  $P'(x', y')$  gehört, allerdings - durch die als Kamerakonstante  $-c$  ausgedrückte z-Koordinate auf der rechten Seite der Gleichungen - zu jedem Bildpunkt eine unendliche Anzahl von Objektpunkten existiert. Aus einem einzelnen Bild ist es somit nicht möglich ein räumliches Objekt zu rekonstruieren, aus zwei Gleichungen (Gl. 2.1) ist es nicht möglich die drei unbekanntes  $(X, Y, Z)$  zu ermitteln. Man benötigt also zumindest 2 Bilder vom selben Objekt, da durch den Schnitt

von zumindest zwei korrespondierenden (homologen bzw. zum selben Objektpunkt gehörigen), räumlich verschiedenen Bildstrahlen ein dreidimensionaler Objektpunkt festgelegt werden kann. Während in der Stereophotogrammetrie hierzu zwei Bilder verwendet werden, ist die Anzahl der beteiligten Bilder und Bildstrahlen in der Mehrbildphotogrammetrie grundsätzlich nicht begrenzt. (Kraus, 1994)

Da die Photogrammetrie auf der Abbildung eines dreidimensionalen Objekts in eine zweidimensionale Bildebene basiert, und es das Ziel ist das Objekt aus den Bildern wieder zu rekonstruieren kann die Abbildung und Triangulation im Grunde auch als Übergang zwischen verschiedenen Koordinatensystemen verstanden werden. In der Regel werden 3 grundlegende Systeme unterschieden:

- Das kamerafeste Bildkoordinatensystem beschrieben durch die Parameter der inneren Orientierung.
- Das maßstabsfreie Modellkoordinatensystem als Ergebnissystem der relativen Bildzuordnung ohne Berücksichtigung etwaig vorhandener Maßstabsinformationen.
- Das übergeordnete Objektkoordinatensystem, wo das rekonstruierte Objekt im korrekten geodätischen Bezug und Maßstab beschrieben und abgebildet wird.

### **Innere Orientierung und Kalibrierung**

Wie erwähnt wird die Abbildungsgeometrie der Kamera mit den Parametern der inneren Orientierung beschrieben. Basierend auf dem Modell der Lochkamera stellt das Projektionszentrum  $O'$  hier den wichtigsten Bezugspunkt dar, da alle Bildstrahlen geradlinig durch diesen Punkt verlaufen. Die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie etwaige Abbildungsfehler und Abweichungen von der idealen zentralprojektiven Abbildung werden durch die Parameter der inneren Orientierung  $c$ ,  $x_0$  und  $y_0$  sowie  $\Delta x'$  und  $\Delta y'$  beschrieben. In der Regel wird der Ursprung des Bildkoordinatensystems in der Bildebene bzw. genauer in der Bildmitte gewählt. Der Bezug zur Aufnahmekamera wird bei analogen Bildern über sogenannte Rahmenmarken (Réseau marken, die mit abgebildet werden), oder bei Digitalbildern über ein reproduzierbares Pixelkoordinatensystem mit Ursprung im linken oberen Bildelement realisiert. Wie bereits aus den Kollinearitätsgleichungen (Gl. 2.1) entnommen werden kann, spannen die  $x'$ - und  $y'$ -Achse die Bildebene auf, und um die Kamera als dreidimensionales Objekt zu beschreiben wird das zunächst ebene kartesische Koordinatensystem noch um eine senkrecht zur  $x'y'$ -Ebene stehende  $z'$ -Achse erweitert, die näherungsweise in Richtung der optischen Achse weist. Der Ursprung dieses dreidimensionalen kartesischen Systems liegt nun im Projektionszentrum  $O'$ .

Da das Modell der Lochkamera eine idealisierte Vereinfachung darstellt und reale Kameras aufgrund der Verwendung von Objektiven und anderen geometrischen "Herstellungsfehlern" teilweise erhebliche Abweichungen zu diesem Modell zeigen (in Gl. 2.1 im Wesentlichen durch  $x_0$  und  $y_0$  bzw.  $\Delta x'$  und  $\Delta y'$  ausgedrückt), müssen die beschriebenen Parameter für jedes Aufnahmesystem mittels Kalibrierung bestimmt werden. Konkretes Ziel der Kalibrierung ist die Bestimmung der radial-symmetrischen, tangentialen und asymmetrischen Verzeichnung sowie affiner Abweichungen im Bildkoordinatensystem.

Den größten Einfluss zeigt die radial-symmetrische Verzeichnung, die durch Brechungsänderungen an den einzelnen Linsen des Objektivs entsteht und im Wesentlichen von der Wellenlänge, den Blendeneinstellungen sowie der aktuellen Fokussierung und der Objektentfernung abhängig ist. Sie steigt mit zunehmendem Abstand vom Bildhauptpunkt an, und wird üblicherweise in Form einer Reihenentwicklung ausgedrückt und geschätzt. Für gewöhnlich wird das

Polynom nach dem dritten Term abgebrochen, woraus sich die üblichen Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  ergeben.

Die radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung wird vordergründig durch Dezentrierung der Linsen im Objektiv verursacht und wird in der Regel mit 2 Parametern  $p_1$  und  $p_2$  beschrieben. Mit Affinität und Scherung werden Abweichungen in Gleichmaßstäbigkeit und Orthogonalität der Bildkoordinatenachsen bezeichnet, deren Ursachen hauptsächlich in einer ungleichmäßigen Anordnung der Sensorelemente bzw. in nicht quadratischen Pixeln bzw. in sogenannten “Rolling Shutter“- Effekten liegen. Sie treten also erst auf, wenn der Bildstrahl die Bildebene trifft und können bei der Verwendung moderener Digitalkameras oft entfallen. Zur rechnerischen Behandlung werden hier in der Regel die beiden Parameter  $C_1$  und  $C_2$  verwendet, wobei  $C_1$  als Maßstabsfaktor der  $x'$ -Koordinaten wirkt und  $C_2$  als Scherungsparameter.

Üblicherweise wird die innere Orientierung für die Dauer der Bildaufnahme als konstant betrachtet. Kommt es allerdings zu einer Änderung der Aufnahmegeometrie z.B.: durch Umfokussierung oder durch mechanische und thermische Einwirkungen, muss dies im Rahmen der Auswertung durch Anpassung der intrinsischen Kameraparameter berücksichtigt werden. Heutzutage werden hierzu überwiegend rechnerische Kalibrierungen eingesetzt, wobei die Parameter indirekt aus photogrammetrischen Beobachtungen (Bildmessungen bzw. -Koordinaten) geschätzt werden. In der Regel erfolgt die numerische Bestimmung mittels Bündelausgleichung und hinsichtlich Zeitpunkt, Aufnahmeanordnung, aufgenommenem Objekt und notwendiger Genauigkeit wird hauptsächlich zwischen Testfeld- und Simultankalibrierung unterschieden.

Bei der Testfeldkalibrierung werden signalisierte Testfelder oder dreidimensionale Kalibrierobjekte aus verschiedenen Blickrichtungen möglichst formatfüllend aufgenommen. Dabei ist es grundsätzlich nicht notwendig, bzw. teilweise sogar hinderlich Koordinaten der Signalmarken mit übergeordneter Genauigkeit zu bestimmen. Es wird empfohlen in den Bildern möglichst genau messbare Zielmarken zu verwenden und deren 3D-Koordinaten gemeinsam mit den Parametern der äußeren Orientierung sowie den gesuchten intrinsischen Parametern der Kamera im Rahmen der Bündelausgleichung zu schätzen. Da mit Kameras ohnehin nur Richtungsmessungen vorgenommen werden können, ist auch eine Verwendung metrischer Maßstäbe nicht erforderlich und kann insbesondere bei digitalen Anwendungen entfallen. Testfeldkalibrierungen werden in der Regel dann durchgeführt wenn Simultankalibrierungen nicht realisierbar sind oder um ausreichend gute Startwerte für eine spätere Simultankalibrierung zu erhalten. Von besonderer Bedeutung ist hierbei jedoch, dass die Aufnahmeconfiguration der späteren Anwendung möglichst ähnlich ist: Veränderungen an der Kamera, wie z.B.: Objektivwechsel oder Fokussierung sollten entsprechend vermieden werden.

Bei der Simultankalibrierung wird das Testfeld durch das eigentliche Messobjekt ersetzt und die innere Orientierung wird exakt für den Zeitpunkt und Zustand der Objektaufnahme bestimmt. Natürlich ist hier auf eine geeignete Aufnahmeconfiguration zu achten, die von der klassischen photogrammetrischen Objektaufnahme abweichen kann. Um die Aufnahmeachse verdrehte Bilder dienen vor allem der Bestimmbarkeit der Hauptpunktlage und der Affinität, Schrägsichten wirken sich positiv auf die Bestimmung der Kamerakonstante  $c$  aus und überdies ist es von Vorteil wenn nicht alle Bilder das Objekt vollständig erfassen. Auch bei Simultankalibrierung ist eine vermessungstechnische Vorbereitung der Kalibrierobjekte nicht von Nöten. Die innere Orientierung kann ausschließlich aus der Bildinformation und dem Strahlenschnitt an koordinativ unbekanntem Verknüpfungspunkten abgeleitet werden. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

### Äußere Orientierung

Die sogenannte äußere (auch extrinsische) Orientierung beschreibt die absolute Lage der Kamera im übergeordneten Objektkoordinatensystem. Durch drei räumliche Rotationen ( $r_{ij}$  in

Gl. 2.1) und drei Translationen ( $X_0, Y_0, Z_0$  in Gl. 2.1) wird der Bezug zwischen Bildkoordinatensystem und übergeordnetem Objektkoordinatensystem mit dem Projektionszentrum  $O'$  als gemeinsamem Bezugspunkt festgelegt. Die orthogonale Drehmatrix  $\mathbf{R}$  kann aus drei einzelnen Drehungen  $\omega, \varphi$  und  $\kappa$  um die Koordinatenachsen  $X, Y$  und  $Z$  zusammengesetzt werden, wobei die Parameter  $r_{ij}$  entweder durch trigonometrischen Funktionen der Drehwinkel oder aber aus Quaternionen beschrieben werden können.

Die Parameter der äußeren Orientierung werden indirekt durch Bildmessung bekannter Objekt- bzw. Passpunkte bestimmt, wobei jeder gemessene Bildpunkt eine räumliche Richtungsmessung zum Objektpunkt repräsentiert, dessen Entfernung zunächst unbekannt ist. Analog zum Rückwärtseinschnitt in der herkömmlichen Geodäsie (Standpunktbestimmung aus Richtungsbeobachtungen), wird auch bei der Bestimmung der äußeren Orientierung von räumlichem Rückwärtsschnitt gesprochen. Die entsprechenden Rechenverfahren werden dabei in zwei grundlegende Gruppen eingeteilt:

1. Berechnung der äußeren Orientierung auf Basis der Kollinearitätsgleichungen (Gl. 2.1). Hier liegt eine nichtlineare Lösung vor, die zumindest drei nicht kollineare 3D-Vollpasspunkte sowie Näherungswerte der gesuchten Orientierungsunbekannten voraussetzt.
2. Berechnung der äußeren Orientierung mithilfe projektiver Beziehungen. Das bekannteste Verfahren dieser Gruppe ist die "Direkte Linear Transformation (DLT)", die mindestens sechs Passpunkte benötigt, allerdings ohne Näherungswerte auskommt.

**Aus Kollinearitätsgleichungen** Unter der Annahme einer bekannten inneren Orientierung, kann bei der Berechnung auf Basis der Kollinearitätsgleichungen aus den gemessenen Bildkoordinaten (um Verzeichnung und Hauptpunktverschiebung korrigiert) der Passpunkte ein System an Verbesserungsgleichungen (Gl. 2.2) aufgestellt werden, das die sechs Parameter der äußeren Orientierung als Unbekannte (unterstrichen in Gl.2.2) enthält. Durch Taylor-Entwicklung an Näherungswerten der Unbekannten kann das System linearisiert und durch vermittelnde Ausgleichung gelöst werden. Die benötigten Näherungswerte können entweder vor Ort geodätisch gemessen, oder aus den Passpunktkoordinaten geschätzt werden.

$$\begin{aligned} x' + vx' &= F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, z', X, Y, Z) \\ y' + vy' &= F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, z', X, Y, Z) \end{aligned} \tag{2.2}$$

Sind auch die Parameter der inneren Orientierung unbekannt, so erhöht sich die Zahl der Unbekannten von sechs auf neun, und sollen auch die radial-symmetrischen Verzeichnungsparameter geschätzt werden, sind zumindest sechs räumlich verteilte 3D-Vollpasspunkte von Nöten.

Die Güte des hier beschriebenen Rückwärtsschnitts ist neben der Genauigkeit der Bildmessung vordergründig von Anzahl und räumlicher Verteilung der Passpunkte abhängig. Die gemessenen Objektpunkte sollten das Bildformat möglichst vollständig abdecken und nicht auf einer Geraden liegen, wobei nur quantitative Qualitätsbeurteilung üblicherweise die Varianz-Kovarianzmatrix (VKM) der Unbekannten bzw. die Varianz der Gewichtseinheit  $s_0$  herangezogen wird.

**Direkt Lineare Transformation** Wie erwähnt ermöglicht der Ansatz der Direkt Linearen Transformation eine Bestimmung der Orientierungsdaten ohne Näherungswerte in einem linearen Gleichungssystem. Hierzu werden die Kollinearitätsgleichungen um eine Affintransformation der Bildkoordinaten erweitert, wodurch keine Informationen über das kamerafeste Bildkoordinatensystem benötigt werden. Die Transformationsgleichungen für die DLT können wie folgt

beschrieben werden, wobei  $x'$  und  $y'$  die Bildkoordinaten,  $X, Y, Z$  die 3D-Objektkoordinaten und  $L_1$  bis  $L_{11}$  die zu bestimmenden DLT Parameter repräsentieren.

$$\begin{aligned} x' &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y' &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Zur Bestimmung der 12 Unbekannten sind mindestens 6 Passpunkte erforderlich, wobei die Berechnung nach dem üblichen Ansatz  $\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{1}$  erfolgt (Niemeier, 2008). Da der Zusammenhang zwischen Objekt und Bildinformation im Gegensatz zum zuvor präsentierten Ansatz als lineares Problem formuliert werden kann, werden keine Näherungskordinaten benötigt und aus den bestimmten Größen  $L_1$  bis  $L_{11}$  können die Parameter der inneren und äußeren Orientierung unmittelbar abgeleitet werden (vgl. hierzu (Luhmann, 2018b), S.286).

Neben den genannten vorteilen zeigt DLT allerdings auch einige Nachteile: Bei bekannter innerer Orientierung ist die DLT überparametrisiert. Liegen alle Passpunkte in einer Ebene führt dies zu singulären bzw. schlecht konditionierten Gleichungssystemen. Üblicherweise werden Messfehler in den Bild- oder Passpunktkoordinaten nicht erkannt und überdies ist es nicht immer möglich die große Anzahl an sechs oder mehr Passpunkten zu gewährleisten.

**Mithilfe der projektiven Geometrie** Neben den beiden beschriebenen Varianten kommt in letzter Zeit auch die Beschreibung der Abbildung mittels projektiver Geometrie immer häufiger zum Einsatz, wobei diese Herangehensweise vor allem auch bei den modernen Verfahren der automatisierten Bildzuordnung (siehe Abschnitt 2.4) von großer Bedeutung ist. Objekt- und Bildkoordinaten werden als homogene Vektoren ( $\mathbf{x}'$  und  $\mathbf{X}$ ) geschrieben und die Abbildung vom Objekt- in den Bildraum erfolgt über die 3x4-Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  (siehe Gl. 2.4). Wie Gl. 2.5 entnommen werden kann umfasst  $\mathbf{P}$  die Parameter der äußeren Orientierung in Form der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und des homogenen Translationsvektors  $\mathbf{X}_0$ , sowie eine Kalibriermatrix  $\mathbf{K}$ , die fünf Parameter der inneren Orientierung enthält welche Gl. 2.6 entnommen werden können. Neben den durch  $x'_0, y'_0$  und  $c$  dargestellten Bildkoordinaten des Projektionszentrums werden Maßstabsunterschiede und Scherung der Bildkoordinatenachsen durch  $s'$  bzw.  $m'$  beschrieben. Soll auch die Linsenverzeichnung mitberücksichtigt werden, können noch zwei ortsabhängige Korrekturen  $\Delta x'$  und  $\Delta y'$  zu  $x'_0$  und  $y'_0$  addiert werden, wodurch in Summe von sieben Unbekannten der inneren Orientierung gesprochen werden muss

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P} \cdot \mathbf{X} \quad (2.4)$$

mit

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{R} \cdot [\mathbf{I} | -\mathbf{X}_0] \quad (2.5)$$

folgt

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & cs' & x'_0 \\ 0 & c(1+m') & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{array}{l} -X_0 \\ -Y_0 \\ -Z_0 \end{array} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Der Vorteil dieser Methode liegt vor allem in der mathematischen Einfachheit und Stabilität. Alle Unbekannten können in einem linearen Gleichungssystem bestimmt werden und durch den Übergang zu homogenen Koordinaten können alle notwendigen Schritte als einfache Matrizenprodukte beschrieben werden, was vor allem bei einer hohen Anzahl an Verknüpfungs- und Passpunkten von Bedeutung ist.

### 2.3.2 Photogrammetrische Triangulation

Wie bereits erwähnt kann bei bekannter innerer und äußerer Orientierung jeder Abbildungsstrahl eindeutig im Raum festgelegt werden, wobei es nicht möglich ist eine dreidimensionale Objektrekonstruktion aus nur einem Bild zu erreichen und entsprechend zumindest zwei Bildstrahlen unabhängiger Bilder zum Schnitt gebracht werden müssen. Nach Anzahl der beteiligten Bilder wird entweder von Stereo- oder Mehrbildauswertung gesprochen, und insbesondere wenn die äußere Orientierung für jedes Bild unabhängig aus übergeordnet genauen Objektpasspunkten geschätzt werden muss, ist sowohl die vermessungstechnische Vorbereitung als auch die Auswertung sehr aufwendig.

#### Auswertung von Stereobildern

Der Auswertung von Bildpaaren kommt innerhalb der Photogrammetrie eine besondere Bedeutung zu: Zwei überlappende Bilder bilden die Minimalkonfiguration zur 3D-Rekonstruktion, wie es auch sehr plakativ am menschlichen Sehsinn und der dreidimensionalen Wahrnehmung unserer Umgebung deutlich wird. Die mathematische Behandlung und Nachbildung des menschlichen Sehens beruht auf den bereits beschriebenen Kollinearitätsgleichungen (Gl. 2.1) und kann grob mit den folgenden drei Schritten umrissen werden, wobei diese grundsätzlich nacheinander oder aber auch in Kombination oder anderer Reihenfolge durchgeführt werden können:

1. Bestimmung homologer Bildmerkmale
2. Orientierung der Bilder
3. Dreidimensionale Auswertung weitere Objekte und Objektmerkmale

Kernaufgabe der Stereoauswertung, bzw. der photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion generell, ist das Finden von Korrespondenzen bzw. Verknüpfungspunkten. Diese sind durch identische (homologe oder korrespondierende) Objektpunkte gegeben, deren Bildkoordinaten in den einzelnen Bildern gemessen werden können und nur der Verknüpfung der beiden Bilder dienen. Sie müssen also keine übergeordnet bekannten Passpunkte sein, sollten jedoch einen möglichst großen Bildausschnitt abdecken um eine steife Verbindung der beiden Bilder zu gewährleisten. Zentrale Steuergröße ist somit der Bildüberlapp, wobei typischen Werte zwischen mindestens 50% und durchschnittlich 60% liegen. Das Auffinden der Punktkorrespondenzen kann entweder stereoskopisch oder aber auch durch Einzelbildmessung erfolgen, wobei zu diesem Zeitpunkt noch keine Informationen zur äußeren Orientierung der Bilder vorliegen, Fehlzuordnungen somit nahezu unvermeidlich sind und zumeist eine robuste Ausreißerelimination erfordern.

Zum Auffinden und Zuordnen korrespondierender Punkte wird grundsätzlich zwischen flächenbasierten (Bildkorrelation) und merkmalsbasierten (Feature-Korrelation) Methoden unterschieden, wobei in jüngerer Vergangenheit vor allem merkmalsbasierte Verfahren (z.B.: SIFT (Lowe, 2004)) auf dem Vormarsch sind.

Bei der Orientierung eines Stereobildpaares werden die Parameter der äußeren Orientierung für beide Bilder bestimmt, bzw. zumindest deren relative Lage zueinander ermittelt. Dies kann -

bei Vorhandensein entsprechender Passpunkte - getrennt für jedes Bild einzeln, oder aber für beide Bilder gemeinsam erfolgen. Die gemeinsame Lösung kann entweder zweistufig, d.h. die Bilder werden zunächst relativ zueinander ausgerichtet und anschließend in ein übergeordnetes Koordinatensystem überführt, oder einstufig erfolgen, wobei die Auswertung dann als Spezialfall der nachstehende beschriebenen Mehrbildauswertung betrachtet werden kann. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

**Stereonormalfall** Der Stereonormalfall bildet einen Sonderfall der Stereobildanordnung, wobei er durch zwei idente Kameras ohne Abbildungsfehler, deren Aufnahmeachsen parallel und senkrecht zur die beiden Projektionszentren verbindenden Basis stehen, charakterisiert werden kann. Der Stereonormalfall ist besonders bei der manuellen bzw. visuellen Auswertung am Stereokomparator von Bedeutung und kommt vor allem zur einfachen Berechnung von Näherungskoordinaten und zur Abschätzung der Genauigkeit zur Anwendung. Da sie in der Regel nur horizontal gegeneinander verschoben sind, und somit keine vertikale Parallaxe aufweisen, wird die Auswertung stark vereinfacht. Real aufgenommenen Stereobilder, die vom strengen Stereonormalfall abweichen, können bei bekannter relativer Orientierung in diesen umgerechnet werden, wobei dann von Normalbildern bzw. Epipolarbildern gesprochen wird.

**Epipolargeometrie** Wie erwähnt bildet die Korrespondenzanalyse den Kern der Stereoauswertung. Die Epipolargeometrie beschreibt die geometrischen Beziehungen zwischen zwei Kamerabildern und einem Objektpunkt, und entsprechend lässt sich auch die geometrische Abhängigkeit zwischen zwei homologen Bildpunkten beschreiben. Grundlegende Einheiten der Epipolargeometrie sind die in Abb. 2.5 dargestellte Epipolarebene und die sogenannten Epipolarlinien. Als Epipolarebene wird jene Ebene bezeichnet, die von den - vom jeweiligen Projektionszentrum  $O'$  bzw.  $O''$  zum Objektpunkt  $P$  weisenden - Abbildungsstrahlen  $\mathbf{r}'$  und  $\mathbf{r}''$ , sowie von der Basis  $\mathbf{b}$  aufgespannt und räumlich festgelegt wird. Die Schnittgeraden zwischen der Epipolarebene und den beiden Bildebenen werden als Epipolarlinien  $k'$  bzw.  $k''$  bezeichnet und können gleichsam als Bild des Abbildungsstrahls im jeweilig anderen Bild interpretiert werden. Im Falle konvergenter Aufnahmen verlaufen die Epipolarlinien schräg im Bild und schneiden sich einem - in den seltensten Fällen im Bild sichtbaren - Punkt, der Epipol genannt wird und wiederum als das Abbild des Projektionszentrums im jeweilig anderen Bild darstellt. Für den Sonderfall des Stereonormalfalls verlaufen die Epipolarlinien parallel zur  $x'$ -Richtung, und sollte die Basis  $\mathbf{b}$  in Aufnahmerichtung weisen, so schneiden sich alle Epipolarlinien "sternförmig" in der Bildmitte. Der Vorteil der Epipolargeometrie liegt darin, dass - unter der Annahme korrekten Strahlenschnitts - ein zu  $P'$  korrespondierender Bildpunkt  $P''$  ebenfalls in der Epipolarebene und im rechten Bild auf der Epipolarlinie  $k''$  liegen muss. Der Suchraum zum Finden identischer Bildpunkte im zweiten Bild wird dadurch erheblich verkleinert, was einerseits zu einer Beschleunigung des Prozesses und andererseits zu einer Erhöhung der Matching- Genauigkeit führt.

Zur Berechnung der Epipolargeometrie bzw. der korrespondierenden Epipolarlinien muss Kenntnis über die Orientierungsparameter herrschen, bzw. zumindest die relative Lage der Bilder zueinander bekannt sein. Diese wird grundsätzlich als relative Orientierung bezeichnet und bildet den ersten Schritt bei der zweistufigen Orientierung eines Stereobildpaares. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

**Relative Orientierung** Die relative Orientierung eines Stereobildpaares beschreibt die räumliche Translation und Rotation eines Bildes relativ zu seinem Stereopartner. Üblicherweise wird hierbei ein Bild in den Ursprung des räumlichen Modellkoordinatensystems gelegt und das zweite relativ dazu orientiert. Während beim sogenannten Folgebildanschluss das erste Bild vollständig

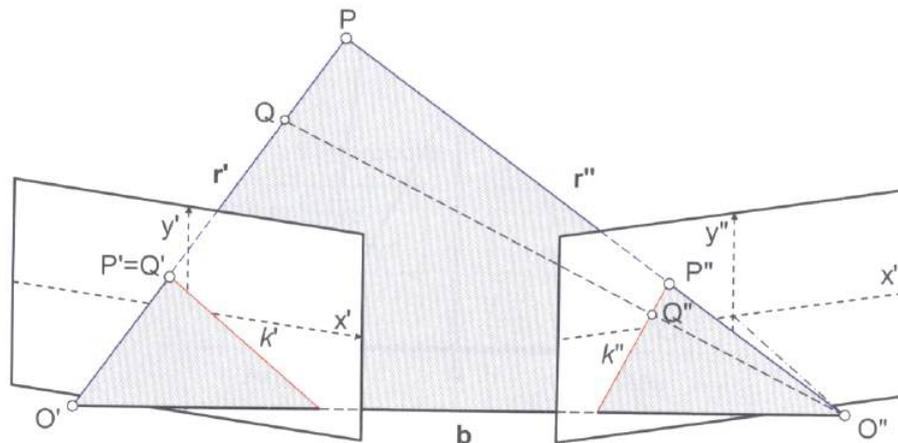


Abb. 2.5 – Die Epipolargeometrie beschreibt den geometrischen Zusammenhang zwischen zwei Bildern des selben Objekts und erleichtert somit die Suche nach korrespondierenden Bildpunkten durch Einschränkung des möglichen Suchbereichs. (Luhmann, 2018b)

orientiert und das zweite mit den üblichen drei Translationen und Rotationen eingepasst wird, wird bei dem Verfahren mittels unabhängigen Bildpaaren die x-Achse des Modellkoordinatensystems in die Verbindung der beiden Projektionszentren - die sogenannte Basislinie ( $bx, by, bz$ ) - gelegt und die verbliebenen Rotationen beider Bilder bestimmt. Der Maßstab des Modellkoordinatensystems wird mehr oder weniger beliebig festgesetzt, wobei in der Regel der x-Abstand  $bx$  zwischen den beiden Bildern auf eins gesetzt wird, was zu außerdem zu einer Reduktion der Anzahl der Unbekannten von sechs zu fünf führt.

Die rechnerische Lösung erfolgt auf Basis der bereits beschriebenen Epipolargeometrie bzw. kann Sie auch wie bereits beschrieben mittels den Kollinearitätsgleichungen (Gl. 2.1) erfolgen. Der Objektpunkt  $P$  und die beiden Projektionszentren  $O'$  und  $O''$  müssen in der von den Bildstrahlen aufgespannten Epipolarebene liegen, wobei diese Bedingung nur erfüllt ist, wenn sich die Raumstrahlen streng im Objektpunkt schneiden. Zur Schätzung der fünf unbekannt Parameter der relativen Orientierung sind fünf Bedingungsgleichungen bzw. fünf homologe Punkte notwendig. Sind mehr als fünf Bildmessungen vorhanden so erfolgt die Schätzung durch vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Neben der Güte der Bildmessung an den homologen Bildpunkten, wird die Genauigkeit der relativen Orientierung vordergründig von der Anzahl und räumlichen Lage der Verknüpfungspunkte bzw. auch vom Höhen-zu-Basis-Verhältnis beeinflusst. Ist die Aufnahmedistanz (Höhe) im Verhältnis zum gewählten Bildabstand (Basis) sehr groß, führt dies zu schleifenden Schnitten der Bildstrahlen und die Tiefeninformation kann nicht mehr eindeutig bestimmt werden. Von einer optimalen Konfiguration kann gesprochen werden, wenn der mittlere Schnittwinkel zwischen den Raumstrahlen bei rund  $90^\circ$  liegt, wobei insbesondere bei automatischen Verfahren das Auffinden korrespondierender Bildpunkte bei dieser Konstellation erschwert wird. (Luhmann, 2018b)

**Fundamentalmatrix** Wie schon die Schätzung der äußeren Orientierung des Einzelbilds, kann auch die relative Orientierung mithilfe der projektiven Geometrie beschrieben werden, was vor allem bei der modernen und automatisierten Mehrbildauswertung von großer Bedeutung ist. Gemäß Gl. 2.5 kann für jedes Bild eine Projektionsmatrix geschrieben werden, wobei der Basisvektor  $\mathbf{b}$  deren Verbindung darstellt. Nach Transformation der gemessenen Bildkoordinaten in ein lokales Kamerakoordinatensystem kann die Koplanaritätsbedingung mittels der

sogenannten Fundamentalmatrix  $\mathbf{F}$  als lineare Beziehung zwischen den homologen Bildpunkten formuliert werden. (Luhmann, 2018b)

$$\mathbf{x}'^T \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}'' = 0 \quad (2.7)$$

mit

$$\mathbf{F} = (\mathbf{K}_1^{-1})^T \cdot \mathbf{S}_b \cdot \mathbf{R}_2^{-1} \cdot \mathbf{K}_2^{-1} \quad (2.8)$$

und

$$\mathbf{S}_b = \begin{bmatrix} 0 & -bz & by \\ bz & 0 & -bx \\ -by & bx & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Die Fundamentalmatrix  $\mathbf{F}$  ist eine homogene 3x3-Matrix, die alle notwendigen Informationen der relativen und inneren Orientierung enthält und durch 9-1=8 Freiheitsgrade beschrieben werden kann. Die Multiplikation der Fundamentalmatrix mit gemessenen Bildkoordinaten liefert die Gleichung der zugehörigen Epipolarlinie im zweiten Bild, zur Bestimmung von  $\mathbf{F}$  sind mindestens acht homologe Punkte erforderlich und die Ermittlung der Parameter erfolgt üblicherweise mittels Singulärwertzerlegung (Single Value Decomposition, SVD). (Luhmann, 2018b)

**Absolute Orientierung** Die absolute Orientierung hat das Ziel die nach der relativen Orientierung in beliebigem Koordinatensystem und Maßstab vorliegenden Ergebnisse ( $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$  in Gl. 2.10) mittels Passpunkten in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem ( $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$  in Gl. 2.10) - zumeist das System der Landesvermessung - zu überführen. Die Passpunkte müssen dabei sowohl im Modell- als auch im Objektkoordinatensystem vorliegen und können entweder bereits zur relativen Orientierung genutzt worden sein, oder nachträglich bestimmt werden. Im üblichen Fall erfolgt die absolute Orientierung als räumliche Ähnlichkeitstransformation (oft auch 7-Parameter oder Helmert- Transformation) mit drei Translationen (Vektor  $\mathbf{X}_0$ ), drei Rotationen (Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$ ) um die Koordinatenachsen und einem globalen Maßstabsfaktor ( $m$ ). (Luhmann, 2018b; Niemeier, 2008)

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Zur Ermittlung der Transformationsparameter sind mindestens drei nicht kollineare 3D-Passpunkte von Nöten, und bei der üblicherweise vorliegenden Überbestimmung erfolgt die Auswertung nach dem Prinzip der vermittelnden Beobachtungen. (Luhmann, 2018b; Niemeier, 2008) Besonderer Bedeutung kommt hier der räumlichen Verteilung der Passpunkte zu: Sie sollen in ihrer räumlichen Verteilung das zu transformierende Gebiet bzw. Objekt möglichst gleichmäßig abdecken und repräsentieren, wobei bei Objekten mit großer vertikaler Erstreckung auch auf Punkte in unterschiedlicher Höhenlage geachtet werden muss. (Kahmen, 2006)

### Mehrbildauswertung

Die Photogrammetrische Triangulation - bzw. oft auch Bündeltriangulation, Bündelblockausgleichung, Mehrbildtriangulation oder Mehrbildorientierung - befreit die Auswertung von der Notwendigkeit sehr vieler Passpunkte, und bietet somit eine Möglichkeit Objektbereiche ohne Festpunkte zu "überbrücken". Die Bündelblockausgleichung betrachtet jedes Bild - bzw. die gemessenen Objektpunkte und das dazugehörige Projektionszentrum - als Strahlenbündel und ist in der Lage beliebig viele im Raum angeordneter Bündel rechnerisch einzupassen. Die einzelnen Bilder werden über korrespondierende Bildpunkte zu einem Modell verknüpft und relativ zueinander ausgerichtet, wobei es nicht notwendig ist die "homologen" Bildpunkte im übergeordneten Objektkoordinatensystem zu kennen, sondern der Bezug zu eben diesem mit einigen wenigen Passpunkten, die auch nicht in allen Bildern sichtbar sein müssen, hergestellt werden kann. Im so entstehenden überbestimmten Gleichungssystem werden die Orientierungsparameter aller beteiligten Bilder, 3D-Objektkoordinaten und weitere Modellparameter, zusammen mit statistischen Aussagen zu Genauigkeit und Zuverlässigkeit, durch Ausgleichsrechnung geschätzt. Alle Beobachtungen (gemessene Bildpunkte, Objektpasspunkte, Planungs- und Kalibrierdaten sowie etwaig notwendige Näherungswerte) und Unbekannten (innere und äußere Orientierungsparameter der Bilder, Objektkoordinaten der rekonstruierten 3D-Punkte) werden in einen Berechnungsvorgang einbezogen und auf Basis bestmöglicher Strahlenschnitte optimiert. Das durch die Strahlenbündel aufgespannte dreidimensionale Netz liefert eine sehr stabile Objektgeometrie, weshalb die Bündeltriangulation das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und photogrammetrischen Punktbestimmung darstellt.

Der historische Ursprung der Bündelgleichung liegt in der Auswertung von Luftbildverbänden (Aerotriangulation), wobei die Stärken des Verfahrens in der Nahbereichsphotogrammetrie noch stärker hervortreten. Unregelmäßige und oft "beliebige" Aufnahmekonfigurationen führen zwar zu einer komplexen Struktur von Normalgleichungssystemen und erschweren die Beschaffung der notwendigen Näherungswerte, die einfache mathematische Formulierung der Gleichungssysteme führte jedoch zu einem deutlich größeren Anwendungsspektrum, weshalb die Bündelblockausgleichung seit Beginn der 1980er-Jahre in nahezu allen Bereichen der Photogrammetrie Anwendung findet.

Die mathematische Grundlage für die Bündeltriangulation bilden die Kollinearitätsgleichungen (Gl. 2.1), wo die  $n$  beobachteten Messgrößen als Funktion der  $u$  gesuchten Unbekannten ausgedrückt werden. Die Beobachtungen sind durch die Bildkoordinaten der homologen Punkte gegeben, und die Unbekannten (unterstrichen in Gl. 2.11) umfassen je 3 Unbekannte für jeden zu bestimmenden Neupunkt  $i$  ( $X_i, Y_i, Z_i$ ), je 6 Unbekannte der äußeren Orientierung für jedes Bild  $j$  ( $X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j$ ) und 3 oder mehrere unbekannte Parameter der inneren Orientierung für jede beteiligte Kamera  $k$  ( $x'_{0k}, y'_{0k}, z'_k, \Delta x'_k, \Delta y'_k$ ). Ähnlich der beschriebenen Vorgehensweise beim räumlichen Rückwärtsschnitt werden die Kollinearitätsgleichungen an Näherungswerten linearisiert und direkt als Verbesserungsgleichungen im Sinne der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten verwendet. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

$$\begin{aligned} x'_i + vx'_i &= F(\underline{X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x'_{0k}, z'_k, \Delta x'_k, z'}, X_i, Y_i, Z_i) \\ y'_i + vy'_i &= F(\underline{X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, y'_{0k}, z'_k, \Delta y'_k, z'}, X_i, Y_i, Z_i) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Mittels Näherungswerten aller Unbekannten und Taylor-Reihenentwicklung können die nichtlinearen Gleichungen (Gl. 2.1) linearisiert, und das linearisierte funktionale Modell anschließend wie üblich gelöst werden, wobei  $\mathbf{l}$  hierbei den Beobachtungsvektor bzw. die Bildmessungen,  $\mathbf{v}$  den Vektor der anzubringenden Verbesserungen,  $\mathbf{A}$  die Designmatrix und  $\hat{\mathbf{x}}$  den Vektor der gesuchten Unbekannten repräsentieren. (Luhmann, 2018b; Niemeier, 2008)

$$\mathbf{l}_{n,1} + \mathbf{v}_{n,1} = \mathbf{A}_{n,u} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{u,1} \quad (2.12)$$

Wie üblich ergibt sich das Normalgleichungssystem entsprechend zu:

$$\mathbf{N}_{u,u} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{u,1} + \mathbf{n}_{u,1} = \mathbf{0}_{u,1} \quad (2.13)$$

mit

$$\mathbf{N}_{u,u} = \mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{A}_{n,u} \quad \mathbf{n}_{u,1} = \mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{l}_{n,1} \quad (2.14)$$

wobei  $\mathbf{P}$  die Gewichtsmatrix der Beobachtungen darstellt. In iterativer Ausgleichung werden anschließend Lösungsvektor und Kovarianzmatrix bestimmt:

$$\hat{\mathbf{x}}_{u,1} = \mathbf{Q}_{u,u} \cdot \mathbf{n}_{u,1} = (\mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{A}_{n,u})^{-1} \cdot \mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{l}_{n,1} \quad (2.15)$$

Aussagen zu Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Parameterschätzung können der Kofaktormatrix  $\mathbf{Q}_{u,u} = \mathbf{N}_{u,u}^{-1}$  bzw. der Varianz-Kovarianzmatrix  $\mathbf{\Sigma}_{u,u} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{u,u}$  entnommen werden.

Die Bündelausgleichung bildet auch die Grundlage der Simultankalibrierung, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben wird. Das Gleichungssystem wird um die Parameter der radial-symmetrischen und tangentialen Verzeichnung erweitert und bei ausreichender Anzahl an Verknüpfungspunkten können diese mitgeschätzt bzw. optimiert werden. Eine zuverlässige Schätzung der genannten Parameter ist jedoch nur dann möglich wenn sowohl die Aufnahme- als auch die Objektpunktanordnung geeignet gewählt werden. Aufgrund der Tatsache, dass jede Bildkoordinate funktional mit den zu schätzenden Verzeichnungsparametern verbunden ist, wird die Normalgleichungsmatrix mit vielen zusätzlichen Nicht-Nullelementen besetzt und die Berechnung entsprechend aufwendiger und ressourcenintensiver.

Das in Gl. 2.11 beschriebene Gleichungssystem beschreibt die beobachteten Bildkoordinaten als Funktion der Unbekannten, wobei auch alle Objektkoordinaten  $X, Y, Z$  zunächst als unbekannt angenommen werden. Das heißt, dass das rein aus photogrammetrischen Beobachtungen aufgebaute Netz zu einem singulären Normalgleichungssystem führt, und das Netz eine Datumsdefekt aufweist bzw. zunächst in einem beliebigen lokalen Koordinatensystem vorliegt. Zur Behebung dieses Defekts sind sieben zusätzliche Informationen (3 Translationen, 3 Rotationen und 1 Maßstabsfaktor) von Nöten. Durch Erweiterung des beschriebenen Gleichungssystems können diese zusätzlichen geodätischen Beobachtungen, wie z.B.: gemessene Längen und Richtungen, oder aber geometrische Bedingungen über das Objekt wie Passpunkte, Geraden oder Ebenen in den Bündelblock miteinbezogen werden. Alle Beobachtungen gehen mit einem ihrer Genauigkeit oder Wichtigkeit proportionalen Gewicht in die Ausgleichung ein und werden stochastisch streng mit ausgeglichen. Der Bündelblock erlaubt somit eine Transformation in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem, allerdings auch eine Deformation des Bildverbandes hin zu den gegebenen Passelementen mit dem Ziel die geometrische Richtigkeit der Bildverknüpfungen und Bildmessungen zu erhöhen. Werden die Gewichte der zusätzlichen Beobachtungen allerdings ungünstig gewählt kommt es zu systematischen Verformungen der gesamten Rekonstruktion und zu lokaler oder regionaler Verschlechterung der Gesamtergebnisse. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

Aus der praktischen Perspektive bleibt, dass die Bündelausgleichung das genaueste Verfahren der photogrammetrischen Triangulation darstellt, etwaige systematische Deformationen und Fehler

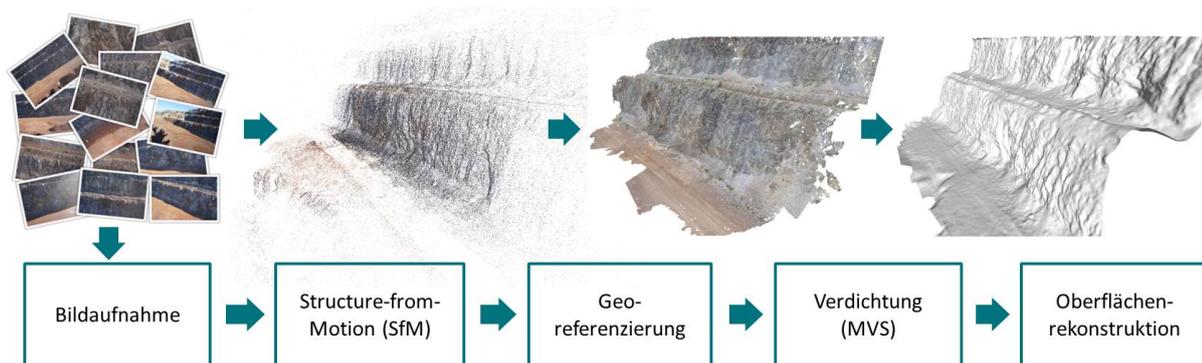
können durch Erweiterung um zusätzliche Beobachtungen mathematische sehr einfach korrigiert werden und vor allem bei der Auswertung unregelmäßiger Bildverbände, wie sie im Nahbereich sehr häufig vorkommen, ist der Bündelblockausgleich eigentlich die einzige Möglichkeit um die 3D-Auswertung überhaupt durchzuführen. Nachteilig ist mit Sicherheit die hohe Ressourcenintensität aufgrund der großen zu behandelnden Gleichungssysteme und die Tatsache, dass es sich um ein nichtlineares Problem handelt und die Beschaffung von Näherungswerten entsprechend nicht immer einfach möglich ist. (Kraus, 1994)

## 2.4 Automatisierte Mehrbildauswertung

Wie bereits erwähnt, erlebt gemeinsam mit dem vermehrten Einsatz unbemannter Flugsysteme auch die Photogrammetrie einen Aufschwung in der vermessungstechnischen Forschung und Anwendung. Hervorgerufen durch die Flexibilität müssen bei der Aufnahme mittels UAV ähnlich der terrestrischen Nahbereichsphotogrammetrie zumeist beliebige Bildkonfigurationen ausgewertet werden, wobei die Bestimmung der relativen bzw. äußeren Orientierung einen der wesentlichsten Schritte darstellt. Obwohl nahezu alle eingesetzten Systeme über entsprechende On-Board Sensorik (GNSS, IMU, etc.) zur Bestimmung der Plattform- bzw. Sensororientierung verfügen, können nicht zuletzt aufgrund der notwendigen Miniaturisierung zumeist keine ausreichenden Genauigkeiten erreicht werden. Mit dem Aufkommen vollautomatischer, bildgestützter 3D-Rekonstruktionen (Hartley and Zisserman, 2003) wurde jedoch die notwendige Schätzung der äußeren Orientierung für den Anwender signifikant vereinfacht und die Auswertung der oftmals unregelmäßigen Bildverbände einer UAV-Befliegung erst ermöglicht. Der entscheidende Unterschied zur zuvor beschriebenen klassischen Photogrammetrie liegt darin, dass moderne Verfahren in der Lage sind die äußere Orientierung der Kameras und eine punkt-basierte Szenenrekonstruktion aus einer Vielzahl an (ungeordneten) Bildern ohne zusätzliche Informationen bzw. näherungsweise bekannte Orientierungsparameter zu errechnen. Durch das vollautomatische Auffinden und Abgleichen unzähliger potentieller Verknüpfungspunkte kann eine Vielzahl an Beobachtungsgleichungen formuliert werden und die Schätzung der unbekannt-ten Orientierungsparameter erfolgt mit sehr hoher Redundanz. Zur besseren Veranschaulichung stellt Abb. 2.6 schematisch den Ablauf bei der automatisierten Mehrbildauswertung dar, wobei der Kern durch "Structure from Motion" bezeichnete Algorithmen gebildet wird, die - vereinfacht ausgedrückt - die Schätzung der äußeren Orientierung übernehmen und nachstehend näher beschrieben werden. Je nach Anwendung können die erhaltenen 3D Rekonstruktionen in weitere Folge noch verdichtet bzw. zu texturierten Oberflächenmodellen vermascht werden, wobei diese Schritte nicht im Zentrum der vorliegenden Forschungsarbeiten liegen und an dieser Stelle entsprechend nur phänomenologisch erwähnt werden. (Tscharf, 2016; Tscharf et al., 2015)

### 2.4.1 Structure from Motion

Spätestens seit es (Agarwal et al., 2011) gelungen ist das bekannte Sprichwort zu widerlegen und "Rom in einem Tag zu erbauen" hat Structure from Motion (SfM) Einzug in die photogrammetrische Forschung genommen und ist trotz vieler Positivbeispiele in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen nach wie vor eine der am stärksten kontrovers diskutierten Methoden in der bildbasierten Forschung (z.B.: (Aleithe, 2016)). SfM bezeichnet eine Kombination von Bildverarbeitungsverfahren, robusten Orientierungsmethoden, Bündelgleichung, Simultankalibrierung, Stereobildmessung und Punktwolkenverarbeitung, wobei die größte Innovation wohl in der automatisierten Auswertung liegt, die vordergründig durch das Aufkommen robuster Interest-Operatoren und Merkmalsextraktion ermöglicht wurde. Dadurch kann eine hohe Anzahl an Beobachtungsgleichungen bzw. Bildmessungen sichergestellt, die Anzahl der Unbekannten



**Abb. 2.6** – Vollautomatische Mehrbildauswertungen sind in der Lage aus einer Vielzahl an ungeordneten Bildern eine punktbasierte Szenenrekonstruktion sowie die äußere Orientierung zu errechnen. (nach (Tscharf et al., 2015))

entsprechend gesteigert werden und eine rein bildbasierte Auswertung bzw. Orientierung ungeordneter Bilder, die teilweise auch mit unterschiedlichen Kameras aufgenommen sein können, wird ermöglicht.

Obwohl mittlerweile eine Vielzahl an unterschiedlichen Softwareprodukten auf dem Markt verfügbar ist (z.B.: Agisoft Photoscan, Pix4Dmapper, MicMac, Bundler, APERO, Microsoft Photosynth, uvm.), laufen die Auswertungen im Grunde bei allen Produkten in den selben Schritten ab, bzw. kommen im Hintergrund häufig sogar die selben verfügbaren Softwarepakete zum Einsatz:

- Üblicherweise werden die Eingabebilder zunächst vorverarbeitet, wobei dies sowohl radiometrische als auch geometrische Korrekturen umfassen kann. (Rauschunterdrückung durch Glättungsfiler, falls möglich initiale Schätzung der inneren Orientierung, Optimierung des globalen Kontrasts, ...)
- Anschließend erfolgt die Merkmalsextraktion wo in den Bildern unabhängig voneinander Punktmuster oder Kanten ermittelt werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in den anderen Bildern gefunden werden können.
- In der merkmalsbasierten Zuordnung bzw. Korrespondenzanalyse werden die gefunden Merkmalspunkte gegeneinander abgeglichen und homologe Bildpunktpaare (sogenannte “Matches“) gespeichert.
- Auf Basis der gefunden Matches wird abschließend die relative Orientierung der Bilder bestimmt und der gesamte Bildverband im Rahmen einer Bündelblockausgleichung optimiert.
- Aufgrund des angestrebten Automatisierungsgrads müssen nahezu alle Schritte robust und mit entsprechender Ausreißerdetektion erfolgen, wobei hier im Wesentlichen RANSAC-Methoden (Random Sample Consensus (Fischler and Bolles, 1981)) zum Einsatz kommen.

### Vorverarbeitung und Kamerakalibrierung

Um Messungen in Bildern durchführen zu können, muss zunächst die Kamera durch ein entsprechendes Modell beschrieben werden. Das heißt die jeweiligen Abbildungsparameter (innere Orientierung) müssen durch Kamerakalibrierung ermittelt und die entsprechenden Korrekturen angebracht werden. Wie in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, wäre es zwar grundsätzlich möglich die

Lage des Bildhauptpunkts, die fokale Länge (Brennweite) sowie die Größen der Linsenverzeichnung vollständig im Rahmen der Bündelausgleichung zu schätzen, jedoch zeigt eine gute initiale Schätzung der inneren Orientierung - insbesondere bei der Verwendung von Consumer-Grade Kameras, wie sie bei den typischen SfM bzw. UAV-Anwendungen üblich sind - einen stark positiven Einfluss auf die Güte der 3D-Rekonstruktion (Irschara et al., 2007; Rumpler et al., 2014). Üblicherweise erfolgt diese initiale Kalibrierung als Testfeldkalibrierung (Aufnahme eines Testfeldes von mehreren Standpunkten mit ausreichender Strahlenschnittgeometrie) und umfasst zwei Schritte: Die Lokalisierung von Punktkorrespondenzen und die anschließende Auflösung nach den gesuchten Parametern. Mittels robuster Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse wird die notwendige Anzahl an Beobachtungen erreicht, wobei die eigentliche Parameterschätzung zumeist durch lineare projektive Verfahren und anschließende Bündelausgleichung erfolgt, was vordergründig der mathematischen Einfachheit in Kombination mit der Ergebnislage geschuldet ist.

Unbedingte Voraussetzung ist, dass ausreichend viele korrespondierende Punktpaare gefunden werden können, und in der Regel kommen ebene schwarz-weiße Kalibriermuster zum Einsatz. (Zhang, 2000) Zur eindeutigen Zuordnung der Korrespondenzen können allerdings auch sogenannte "Fiducial Markers", binär codierte individuell identifizierbare Zielmarken, als planares Kalibriermuster eingesetzt werden. Jeder Marker beinhaltet eine eindeutige Identifikationsnummer als maschinenlesbaren schwarz-weiß-Binärcode, welcher kreisförmig und rotationsinvariant um das Marker-Zentrum angeordnet ist (Daftry et al., 2013). Abbildung 2.7 zeigt ein Beispiel einer markerbasierten Kalibrierung, wobei von links nach rechts die verwendeten Marker, das planare Testfeld und eine Visualisierung der gefundenen Korrespondenzen dargestellt sind.



Abb. 2.7 – Fiducial marker, typisches Kalibriermuster mit ausgedruckten Markern als planares Kalibriermuster am Boden und verlässlich detektierte Marker mit Zentrum und zugeordneter Punktnummer. (Rumpler et al., 2014)

Neben den geometrischen Korrekturen durch Kalibrierung und Bildverzerrung sind jedoch auch Schritte zur Bildverbesserung (z.B.: Aufhellen von Schlagschatten) und Reduktion der Auflösung (Bildpyramiden) üblich. Zur Rauschunterdrückung können übliche Glättungsfilter eingesetzt werden, oder die Optimierung des globalen Kontrastes kann durch Wallis-Filter erfolgen. Abhängig vom vorliegenden Anwendungsfall sind allerdings auch weitere Anpassungen wie die Reduktion des Farbumfanges (z.B.: RGB zu Grauwert) oder globale Farbanpassungen möglich. (Luhmann, 2018b)

### Merkmalsextraktion

Zur Bestimmung der relativen Orientierung zweier Bilder müssen zunächst korrespondierende Punkte in den einzelnen Bildern gefunden werden. Es sollen also möglichst einzigartige Grauwertmuster, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch im korrespondierenden Bild in ähnlicher Weise abgebildet werden, gefunden und lokalisiert werden. Zur Automatisierung dieses Schrittes liegt somit die Verwendung sogenannter Interest-Operatoren nahe. Diese Algorithmen zur Extraktion

markanter Bildbereiche berechnen für jede Bildposition eine oder mehrere Kenngrößen, wobei vor allem die Deutlichkeit, Robustheit, Seltenheit, Interpretierbarkeit und Unempfindlichkeit gegenüber geometrischen und radiometrischen Einflüssen von Bedeutung ist.

**Förstner-Operator** Der Förstner-Operator ((Förstner and Gülch, 1987)) basiert auf der grundlegenden Annahme, dass die Grauwertumgebung eines Punktes eine verschobene und vertauschte Abbildung des ursprünglichen Bildsignals ist. Die Bestimmung der markanten Punkte erfolgt mittels Autokorrelationsmatrix, wobei ausgenutzt wird, dass die inverse der Autokorrelationsmatrix der Varianz-Kovarianzmatrix entspricht, und somit angibt wie genau die Position des Merkmalspunkts bestimmt werden kann. Die Eigenwerte der Varianz-Kovarianzmatrix können als Halbachsen einer Fehlerellipse interpretiert werden und während punktförmige Merkmale durch kleine kreisförmige Ellipsen gekennzeichnet sind, zeigen Kanten langgestreckte Ellipsen mit ausgeprägter Orientierung in Richtung der detektierten Kante. Nachteilig am Förstner-Operator ist seine starke Sensitivität auf Maßstabsänderungen. Nehmen Merkmale unterschiedlich große Bildbereiche ein können die notwendigen Korrespondenzen nicht mehr gefunden werden, weshalb der Förstner-Operator hauptsächlich für parallel ausgerichtete Luftbilder gleichen Maßstabs geeignet ist und bei Bildern mit großen Maßstabsunterschieden oder projektiven Verzerrungen nicht zum Einsatz kommt. (Förstner and Gülch, 1987)

**SUSAN-Operator** SUSAN (smallest univalue segment assimilating nucleus) vergleicht die Intensität von Pixeln innerhalb eines kreisförmigen Suchfensters mit dem Grauwert des zentralen Pixels, der auch “nucleus“ genannt wird. Liegt die Anzahl an ähnlichen Grauwerten unterhalb eines definierten Schwellwerts, wird ein markanter Punkt gespeichert. (Smith and Brady, 1997) Der SUSAN-Operator zeigt starke Abhängigkeit von der Helligkeit der Bilder und ist entsprechend nur bedingt für die Korrespondenzanalyse von UAV-Aufnahmen geeignet wo mitunter starke Blickwinkel und Beleuchtungsunterschiede zwischen den Bildern vorkommen können.

**FAST-Operator** Die grundlegende Funktionsweise des FAST-Operators (features from accelerated segment test) ist ähnlich wie bei SUSAN. Ein markantes Merkmal liegt vor, wenn in einem Ring rund um das Zentrumspixel eine Anzahl zusammenhängender Pixel ähnliche Grauwerte aufweisen. Aufgrund der ringförmigen Analyse zeigt FAST allerdings weitestgehende Maßstabs- und Rotationsinvarianz, wodurch grundsätzlich auch bei Nahbereichsaufnahmen analysiert werden können. (Rosten and Drummond, 2006)

**SIFT-Operator** Die “Scale Invariant Feature Transform“ (Lowe, 2004) hat wohl von allen existierenden Merkmalsoperatoren den größten Impact erreicht und kommt entsprechend in nahezu allen existierenden Lösungen zum Einsatz. SIFT ist robust gegen Maßstabs-, Rotations- und Beleuchtungsänderungen, und invariant gegenüber Blickwinkeländerungen von bis zu 30° (Zeisl et al., 2009), was daher den maximalen Winkel zwischen einem Bildpaar zur automatischen Korrespondenzanalyse darstellt und bei der Aufnahme entsprechend berücksichtigt werden muss. In einem vierstufigen Verfahren werden sowohl markante Punkte (Detektoren) als auch zugehörige Merkmalsvektoren (Deskriptoren) bestimmt (Lowe, 2004):

1. Bestimmung von Kanten in Bildpyramiden und deren Extrema: Nachdem das Bild in eine Bildpyramide (Bildserie, in der das jeweils folgende Bild gegenüber dem Vorgänger verkleinert ist) überführt wird, erfolgt auf jeder Pyramidenstufe eine Glättung unter Verwendung verschiedener Gauß-Filter, was zu einem sogenannten “Multiskalenraum “ führt. Durch Subtraktion zweier Bilder im Multiskalenraum werden Kanten extrahiert und es

entstehen DoG-Bilder (Difference of Gaussians). Aus der Bestimmung lokaler Extrema in benachbarten DoG-Bildern können initiale Merkmale - sogenannten "keypoints" extrahiert werden, die Eingang in die nächste Verarbeitungsstufe finden.

2. Lokalisierung von Merkmalspunkten: Durch Ermittlung der Gradientenbeträge bzw. Krümmungen der Grauwertoberflächen können die gefundenen keypoints aufgedünnt werden und Merkmale, die in Bildbereichen geringen Kontrasts oder an Grauwertkanten liegen werden eliminiert.
3. Bestimmung der Hauptrichtung des Gradienten: In einer definierten Umgebung um den Merkmalspunkt werden für jedes Pixel Gradientenrichtung und -betrag errechnet und in  $10^\circ$ -Schritten in ein Histogramm eingetragen, wobei jene Klasse mit der größten Häufigkeit die Hauptorientierung angibt.
4. Ableitung des Deskriptors: Abschließend wird ein Bereich von  $16 \times 16$  Pixeln in  $4 \times 4$  Blöcke unterteilt, wobei jeweils wieder der Gradientenbetrag und die -richtung - bezogen auf die zuvor ermittelte Hauptrichtung, wodurch Rotationsinvarianz gewährleistet wird - bestimmt werden. Die so ermittelten Richtungen werden in 8 Klassen unterteilt und wiederum in ein Histogramm eingetragen. Die insgesamt 16 Blöcke mit jeweils 8 Klassen ergeben in Summe 128 Merkmale, die im SIFT-Merkmalsvektor bzw. Deskriptor zusammengefasst werden.

Die größte Stärke von SIFT liegt in der hohen Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen und besonders ist auch die hohe Eindeutigkeit durch 128 beschreibende Parameter je Merkmalspunkt hervorzuheben. Dies gewährleistet einen hohen Wiedererkennungswert, was besonders bei der folgenden Korrespondenzanalyse ungeordneter Bildverbände von großer Bedeutung ist.

**SURF-Operator** Der SURF-Operator (speed-up robust features) kann als Weiterentwicklung oder zumindest Anpassung von SIFT betrachtet werden. Er ersetzt die in SIFT verwendeten Gauß-Filter durch Mittelwertfilter, welche durch die Verwendung von Integralbildern mit geringerem und vor allem konstantem Zeitaufwand berechnet werden können. Der Operator berechnet die Hesse-Matrix mit den zweiten Ableitungen einer Grauwertumgebung und in weitere Folge ein lokales Maximum aus deren Determinante. Wie auch SIFT ist SURF besonders gut für punktförmige Merkmale geeignet. Durch verschiedene Stufen der Bildpyramide und unterschiedliche Größen der Filtermasken wird Maßstabsinvarianz erreicht, und mittels verteilungsbasierter Deskriptoren eine hohe Eindeutigkeit sichergestellt. (Bay et al., 2008)

### **Korrespondenzanalyse bzw. Matching**

Die Korrespondenzanalyse oft der schwierigste und zumeist auch rechenintensivste Schritt der Auswertung. Das Matching hängt stark vom Vorhandensein bzw. von der Qualität etwaiger Zusatzinformationen ab und die Güte der Zuordnung wird überdies stark von den geometrischen und radiometrischen Eigenschaften des Objekts beeinflusst. Das Ziel ist die merkmalsbasierte Zuordnung möglichst vieler korrespondierender Punkte. Abhängig von der gewählten Merkmalsextraktion kommen unterschiedliche Abstands- bzw. Ähnlichkeitsmaße zum Einsatz, wobei auch zusätzliche Informationen in Form von Wissen oder Regeln genutzt werden können, um den Suchradius einzugrenzen oder Fehlzuordnungen (Mismatches) zu vermeiden. Sollen jedoch keine näherungsweise bestimmten Positionen der Bilder Eingang in die Auswertung finden, ist ein flächendeckender Vergleich aller Punkte eines Bildes gegen alle Punkte eines zweiten Bildes erforderlich.

Diese vollständige Korrespondenzanalyse zwischen allen Bildern ist notwendig, um ausreichend viele Bildmessungen für die Objektpunkte zu garantieren, obwohl dies besonders viel Rechenzeit erfordert. Der Aufwand für Korrespondenzsuche und -abgleich steigt daher quadratisch mit der Anzahl der abzugleichenden Punkte, was bei Datensätzen mit mehreren tausend Bildern zu nicht mehr wirtschaftlich vertretbaren Zeitspannen führen kann. Um die Korrespondenzanalyse in großen Datensätzen zu beschleunigen, wird die Feature-Extraktion und das Matching üblicherweise auf Grafikprozessor-Hardware (GPUs) durchgeführt, bzw. ist es auch üblich Verfahren einzusetzen die auf sogenannten “Vocabulary Trees“ basieren, um eine grobe Vorauswahl ähnlicher Bilder zu erreichen. (Nistér and Stewenius, 2006; Sivic and Zisserman, 2003)

Das eigentliche Matching, bzw. der Abgleich zwischen den extrahierten Merkmalspunkten unterschiedlicher Bilder, fußt auf mathematischen Ähnlichkeits- bzw. Abstandskriterien. Wird wie üblicherweise SIFT als Merkmals-Operator eingesetzt, so wird die Ähnlichkeit zumeist auf Basis der euklidischen Distanz im  $n$ -dimensionalen Eigenschaftsraum bestimmt. Zwei Deskriptoren  $\mathbf{a}$  und  $\mathbf{b}$  sind sich entsprechend ähnlich, wenn ihr Abstand  $d$  minimal bzw. unter einem definierten Schwellwert liegt.

$$d(\mathbf{a}, \mathbf{b})^2 = (a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + \dots + (a_n - b_n)^2 = (\mathbf{a} - \mathbf{b})^T \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{b}) \quad (2.16)$$

Diese Herangehensweise führt besonders bei eindeutigen Texturen zu guten Ergebnissen, kann allerdings bei stark repetitiven Strukturen und regelmäßigen Mustern sehr schnell zu Fehlzuordnungen führen, sofern in unmittelbarer Nachbarschaft ähnliche Deskriptoren auftreten. In derartigen Fällen kann eine Zuordnung beispielsweise verworfen werden, sofern sich der minimale Abstand zweier Deskriptoren nicht hinreichend vom zweitkleinsten Abstand unterscheidet.

### Relative Orientierung und Bündelblockausgleich

Auf Basis der gefundenen Korrespondenzen können nun durch geometrische Verifikation basierend auf dem Fünf Punkt Algorithmus (Nistér, 2003) die relativen Kameraorientierungen zwischen den Bildpaaren geschätzt und als Epipolar-Graph dargestellt werden, wobei - um Ausreißer und grobe Fehler zu eliminieren - die Schätzung robust innerhalb einer RANSAC-Schleife (Fischler and Bolles, 1981) erfolgt. Der Epipolar-Graph stellt paarweise Rekonstruktionen und relative Orientierungen dar. Die Knoten entsprechen den Bildern und die Kanten den jeweiligen relativen Orientierungen. Abhängig von der Anzahl der gefundenen Korrespondenzen je Bildpaar sind die Kanten entsprechend stark bzw. schwach, was sich im Endergebnis natürlich auch auf die lokale Stabilität des Bildverbandes auswirkt und möglicherweise zu Deformationen der 3D-Rekonstruktion führen kann.

Von einem initialen Bildpaar ausgehend können nun neue Kameras mittels räumlichen Rückwärtsschnitts (siehe Abschnitt 2.3.1 bzw. 2.3.2) hinzugefügt werden, wobei in den meisten Fällen der 3-Punkt-Algorithmus (Haralick et al., 1991) zur Anwendung kommt. Nicht gänzlich unkritisch ist hierbei die Bestimmung des angesprochenen Startmodells. Hierfür wird i.d.R. ein Bildpaar mit kleiner Basis und ähnlichen Orientierungswerten benötigt, was bei den im Bergbau üblichen regelmäßigen UAV-Streifenflügen (aufgrund der großen lateralen Erstreckung) allerdings relativ leicht gefunden werden kann.

Die große Anzahl an “ungeprüften“ Verknüpfungspunkten führt naturgemäß auch zu entsprechend vielen zufälligen Fehlern, die wie in der Geodäsie üblich, rechnerisch ausgeglichen werden müssen. Mittels robustem Bündelblockausgleich (Triggs et al., 2000) werden die Kameraorientierungen und die bestimmten 3D Objektkoordinaten simultan verfeinert und optimiert. (siehe Abschnitt 2.3.2)

### 2.4.2 Random Sample Consensus (RANSAC)

Auch bei sehr großer Sorgfalt können grobe Datenfehler (Ausreißer) bei praktischen Aufgabenstellungen kaum vermieden werden. Während systematische Fehler durch geeignete Messanordnung - ein Ziel der vorliegenden Arbeit - und zufällige Fehler durch mathematische Optimierung verhindert bzw. ausgeglichen werden können, müssen grobe Fehler durch Ausreißerdetektion gefunden und entfernt werden, um die durchgeführte Parameterschätzung nicht gänzlich zu verfälschen. (Niemeier, 2008) Aufgrund der Tatsache, dass bei SfM die einzelnen Berechnungsschritte weitestgehend automatisiert und ohne User-Interaktion ablaufen, soll natürlich auch die Fehleruche automatisiert und robust erfolgen. Vor diesem Hintergrund hat sich RANSAC (Random Sample Consensus, (Fischler and Bolles, 1981)) als zufallsbasierter Such- und Optimierungsprozess für beliebige funktionale Modelle in den letzten Jahrzehnten etabliert, wird entsprechend bei unterschiedlichen Schritten der SfM-Prozessierung eingesetzt (z.B. bei der Ermittlung der relativen Orientierung) und soll an dieser Stelle kurz beschrieben werden.

RANSAC basiert auf der wiederholten Berechnung der Zielfunktion, wobei zur Parameterschätzung die minimal notwendige Anzahl an Beobachtungen  $n - u$  zufällig aus dem Datensatz ausgewählt wird. Jene Zufallsbeobachtungen, die innerhalb definierter Schranken zu einem ähnlichen Ergebnis führen, werden als geeignet betrachtet und einer sogenannten Konsensgruppe hinzugefügt. Nach einer bestimmten Anzahl an Wiederholungen wird jene Konsensgruppe mit den meisten "Stimmen" als bestes und damit gültiges Ergebnis betrachtet, und alle Beobachtungen die nicht zu dieser Gruppe zählen werden als Ausreißer eliminiert. Die endgültige Schätzung der gesuchten Modellparameter erfolgt dann aus den verbleibenden Beobachtungen durch klassische Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate. (Fischler and Bolles, 1981)

Zur besseren Verdeutlichung der einzelnen Schritte, wird der Algorithmus am Beispiel der Schätzung einer linearen Ausgleichsgeraden durch ausreißerbehaftete Datenpunkte in Abbildung 2.8 illustriert.

Dargestellt sind zwei Durchläufe (#1 und #2), wobei jeweils alle notwendigen Berechnungsschritte gezeigt werden. Während das bei Durchlauf #1 geschätzte Modell wohl nicht repräsentativ für die Grundgesamtheit ist, gelingt es bei Durchlauf #2 sehr gut die beiden Ausreißer zu detektieren und die Ausgleichsgerade aus den verbliebenen Datenpunkten zu schätzen.

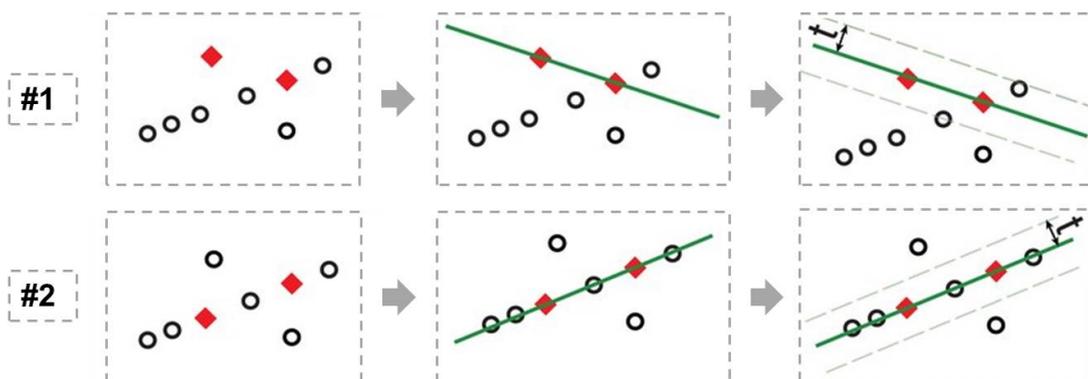


Abb. 2.8 – Die schematische Darstellung von RANSAC zeigt anhand von zwei Durchläufen (#1 und #2) die iterative Auswahl der minimal notwendigen Stützpunkte (Links), die Schätzung der Zielfunktion auf Basis der zuvor getroffenen Auswahl (Mitte), sowie die Ermittlung der Konsensgruppe bzw. die finale Modellschätzung (Rechts). (nach (Martinez-Camara et al., 2014))

Aufgrund der beschriebenen Vorgehensweise ist RANSAC besonders robust gegenüber Ausreißern, die teilweise bis zu 80% eines Datensatzes betragen können, obwohl der Erfolg der be-

schriebenen Methode stark von der Wahl der Toleranzparameter und der Anzahl an Iterationen bzw. dem allgemeinen Abbruchkriterium abhängt.

### 2.4.3 Automatische Georeferenzierung

Wie bei rein bildbasierten Auswertungen üblich, befinden sich die dreidimensionalen Rekonstruktionen, die durch das bis hierhin beschriebene Mehrbildverfahren erstellt wurden, zunächst nicht in einer metrischen Skalierung. Das lokale Modellkoordinatensystem, der rekonstruierten Kameras und Objektpunkte wird - wie auch bei klassisch photogrammetrischen Auswertungen - anfänglich durch eines der gefundenen Kamerapaare festgelegt. Eine metrische Skalierung der rekonstruierten Punktwolke kann erreicht werden, indem zumindest eine bekannte Distanz in die Auswertung integriert wird (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Dies kann wiederum durch einen in der Szene und in der Rekonstruktion eindeutig zuzuordnenden Maßstab, beispielsweise einem bekannten Abstand zwischen zwei Kamerapositionen oder der Distanz zwischen zwei markanten Punkten erfolgen. Bei vermessungstechnischen Anwendungen ist jedoch in der Regel die absolute Position (absolute Orientierung) der Objektpunkte von Bedeutung, wozu das Modell mittels räumlicher Ähnlichkeitstransformation (3D-Helmert Transformation, 7-Parameter Transformation, bzw. „Similarity Transform“) unter der Verwendung von zumindest 3 Vollpasspunkten vom Modellsystem in das übergeordnete Referenzsystem transformiert wird. Eine größere Anzahl an Punkten und eine robuste Schätzung (zumeist RANSAC) der zur Registrierung nötigen Transformationsparameter (Rotation, Translation und Skalierung) mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erhöhen die Genauigkeit der Ausrichtung des Modells jedoch deutlich. (Rumpler et al., 2014; Tscharf et al., 2015)

Bei den angesprochenen Passpunkten bzw. Passelementen kann es sich einerseits um speziell signalisierte oder natürliche Bodenpasspunkte übergeordneter Genauigkeit handeln, andererseits können aber auch vorhandene Aufnahmepositionen zur Skalierung und Georegistrierung herangezogen werden. Insbesondere bei UAV-Anwendungen stehen neben Positionsdaten vielfach auch Aufzeichnungen der Inertialsensoren zur Verfügung, die zusätzlich Aufschluss über die Rotations- und Neigungswinkel des Fluggeräts geben. In den meisten Fällen ist die Qualität und Genauigkeit der On-Board Positionsdaten jedoch nicht ausreichend, um eine genaue dreidimensionale Rekonstruktion und Vermessung der Szene zu ermöglichen. Aufgrund von Gewichtsbeschränkungen und der maximalen Tragfähigkeit, abhängig vom verwendeten Fluggerät, werden meist sehr kleine Empfänger verwendet, welche dann nur eine beschränkte Genauigkeit erlauben, die im Bereich von 1-2 Metern liegen kann (Pfeifer et al., 2012). Für eine grobe Positionierung und metrische Skalierung reicht das allerdings schon aus, da je nach Anzahl an aufgenommenen Bildern eine große Anzahl an Positionsmessungen vorliegt, die für eine robuste Schätzung der Transformationsparameter verwendet werden kann. Vermessungstechnische Absolut-Genauigkeiten können - zumindest aus heutiger Sicht - auf diese Weise allerdings nicht erreicht werden. (Tscharf et al., 2015)

Bei rein bildbasierter Rekonstruktion, und ganz besonders bei SfM Auswertung ohne Verwendung von Pass- bzw. Kontrollpunkten oder GPS-Daten ist zu beobachten, dass der Fehler zu den Rändern hin zunimmt. Es kommt im Bündelblockausgleich zu einer Verformung des Bildblocks, was zunächst durch die geringere Szenenabdeckung an den Rändern erklärt werden kann. Weniger Bildüberlappung führt zu weniger Bildmessungen pro Objektpunkt wodurch sich das Optimierungsergebnis des Bündelblockausgleichs stärker verändern darf, und sich die 3D Positionen der Punkte und Kameras damit stärker verändern können. (Tscharf et al., 2015)

Erfolgt die Bildausrichtung mittels SfM kommt der Integration externer Constraints in den Bündelblockausgleich daher besondere Bedeutung zu (vgl. Abschnitt 2.3.2). SfM neigt - speziell bei der Rekonstruktion von weit erstreckten Objekten - besonders stark zu systematischen Verzer-

rungen des Bildverbandes, weshalb eigentlich alle existierenden Softwarelösungen eine derartige zusätzliche Optimierungsschleife beinhalten. In der Regel werden im Zuge dessen auch die Parameter der inneren Orientierung nochmals mitoptimiert, wobei dieser Schritt nur mit Vorsicht durchgeführt werden darf. Eine Veränderung der inneren Orientierung hat massive Auswirkungen auf die Objektgeometrie und Richtigkeit der Ergebnisse. Vor allem wenn die übergeordnete Genauigkeit der verwendeten Passelemente nicht sichergestellt werden kann, führt dieser Schritt zwar zu einer Minimierung der Rückprojektionsfehler, allerdings ist dies oftmals nur einer mathematischen Optimierung geschuldet, die mit der Realität nur mehr bedingt korreliert.

#### 2.4.4 Oberflächenrekonstruktion und Texturierung

Die Ergebnisse der bisherigen Schritte sind die äußere Orientierung der Kameras, optimierte intrinsische Kameraparameter bzw. ein optimiertes Kameramodell, und eine 3D-Objektpunktwolke aus triangulierten Merkmalspunkten - in der Regel als "sparse" oder grobe Punktwolke bezeichnet. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl triangulierter Objektmerkmale (ca. 5000 Merkmale pro Bild, je nach Textur) und deren ungleichmäßiger Verteilung auf der Oberfläche im Vergleich zur dichten Anzahl von Pixeln in einem Bild (Millionen von Pixeln) stellt die Modellierung der Oberfläche zu diesem Zeitpunkt nur eine grobe Annäherung der Realität dar. Um die Anzahl der 3D-Punkte zu erhöhen, werden daher Stereo- (Hirschmueller, 2005) oder Multiview-Verfahren (Furukawa and Ponce, 2009; Irschara et al., 2012) für pixelweises Bildmatching eingesetzt.

Zur besseren Visualisierung und zur weiteren Verwendung als Digitales Oberflächenmodell (DOM) für Vermessungsaufgaben wird zumeist eine geschlossene Oberfläche aus der Punktwolke abgeleitet, wobei die eingesetzten Verfahren im Grunde auf 3D-Delaunay Triangulations- und Graphenschnitten beruhen. (Labatut et al., 2007) Das Verfahren erzeugt wasserdichte Dreiecksnetze aus unregelmäßigen Punktwolken und funktioniert auch bei Rauschen und groben Ausreißern sehr robust (vgl. Abbildung 2.6 ganz rechts). Zur besseren graphischen Repräsentation können die Modelle unter Verwendung der Eingangsbilder abschließend noch texturiert werden, wodurch ein fotorealistischer Eindruck entsteht.

## 2.5 Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Die Beurteilung eigener und fremder Messgrößen, sowie die verständliche Angabe akzeptierter Qualitätsmerkmale gehören seit jeher zu den wesentlichsten Problemen der Geodäsie und Geoinformation. Zur Lösung dieses Problems müssen mathematisch statistische Konzepte auf anwendungsorientierte Fragestellungen übertragen werden, wobei neben gründlicher Kenntnis der eingesetzten Instrumente sowie Beherrschung der Messverfahren, vor allem auch fundiertes Verständnis über mögliche Einflussfaktoren und deren Auswirkungen notwendig ist.

Grundsätzlich ist der Begriff der Genauigkeit nicht normiert und wird im Sprachgebrauch daher vielfältig für unterschiedliche Qualitätsangaben verwendet. Streng genommen - und so wird es auch in der gegenständlichen Forschung ausgelegt - bedeutet Genauigkeit die Abweichung eines Messwerts von einem definierten Referenzmaßstab (äußere Genauigkeit). Hingegen werden Aussagen, die sich aus Standardabweichungen bzw. mittleren quadratischen Abweichungen ableiten lassen, als Präzision (innere Genauigkeit) bezeichnet.

Der Begriff der Zuverlässigkeit einer Ausgleichung bzw. Messung beschreibt die Kontrollierbarkeit der beteiligten Beobachtungen, und hängt unmittelbar von der Anzahl an überschüssigen Beobachtungen, der a priori Standardabweichung und der Aufnahmekonfiguration ab. Sie stellt ein Maß für die Erkennbarkeit grober Fehler dar, und beschreibt jenen Anteil an der Varianz, der durch tatsächliche Unterschiede im zu messenden Objekt und nicht durch Messfehler erklärt

werden kann. Die Zuverlässigkeit gibt somit auch direkt Auskunft über die Wiederholbarkeit von Experimenten und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

### 2.5.1 Beurteilung von Messgrößen

Das Deutsche Institut für Normung definiert den Begriff der Messung bzw. der Messgröße folgendermaßen (Deutsches Institut für Normung, 1995):

*“Eine Messung ist das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zu einer quantitativen Aussage über eine Messgröße durch Vergleich mit einer Einheit. Dabei ist die Messgröße jene physikalische Größe, der die Messung gilt.“*

Das Ziel einer Messung ist es, ein Ergebnis als verlässliche Aussage über eine unbekannte Größe abzuleiten. Das Ergebnis der Messung ist im ersten Schritt ein Messwert, der allerdings eine Messabweichung enthält, und von seinem wahren Wert abweicht. Da die Messung sozusagen nur eine einmalige Schätzung des gesuchten wahren Werts darstellt, ist die Qualitätsbeurteilung und Interpretation der erfassten Messgrößen üblicherweise von wesentlich größerer Bedeutung als der eigentliche Messvorgang selbst.

#### Zufallsvariable

Besonders gut zur Beschreibung und Beurteilung von Messgrößen geeignet, ist das Konzept der Zufallsvariablen. Eine Zufallsvariable ist eine definierte Größe  $X$ , der durch Ausführung eines bestimmten Experiments Beobachtungsergebnisse  $x_i$  - sogenannte Realisierungen bzw. oft auch Beobachtungen  $l_i$  zusammengefasst im Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  - zugewiesen werden können. Jeder Realisierung  $x_i$  kann überdies noch eine Wahrscheinlichkeit  $P(x_i)$  zugewiesen werden, woraus deutlich wird, dass die Messwerte zwar variieren, allerdings nur in dem ihnen durch die statistisch definierte Wahrscheinlichkeitsverteilung vorgegebenen Bereich.

Wird eine Messung mehrmals durchgeführt so ist das Ergebnis einer Messung grundsätzlich durch zwei Kenngrößen charakterisiert: Einerseits über den aus den Einzelmessungen zu schätzenden Mittelwert, und andererseits über eine Angabe zur Streuung der Messwerte um den Mittelwert, als erste Aussage zur Qualität der durchgeführten Schätzung. (Niemeier, 2008)

#### Mittelwert-Parameter

Zur bestmöglichen Approximation des wahren Werts der Zufallsvariable (Erwartungswert) existieren eine Reihe von Mittelwert-Operatoren, die abhängig vom konkreten Anwendungsfall systembedingte Stärken und Schwächen zeigen. Die hier dargestellten Operatoren stellen jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit und zeigen lediglich, die in der Geodäsie üblicherweise angewandten Varianten.

**Arithmetisches Mittel:** Das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  berechnet sich bekanntermaßen als Summe aller durchgeführten Beobachtungen geteilt durch deren Anzahl. Es ist der am häufigsten angewandte Schätzer, was vermutlich in der Tatsache begründet liegt, dass es, sofern nur zufällige Abweichungen vorliegen, als optimale Schätzung betrachtet werden kann. Der größte Nachteil des arithmetischen Mittels liegt mit Sicherheit in seiner Empfindlichkeit gegenüber Ausreißern. Liegt bei einer Beobachtung einer Messreihe ein Ausreißer vor, wird der berechnete Mittelwert stark verfälscht und ist nicht repräsentativ für die zu Grunde liegende Grundgesamtheit. (Niemeier, 2008)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(l_1 + l_2 + \dots + l_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i \quad (2.17)$$

**Median:** Wesentlich unempfindlicher gegenüber Ausreißern ist der Median  $x_m$ . Er stellt den “in der Mitte stehenden Wert“ des geordneten Beobachtungsvektors dar und wird entsprechend auch oft als “mittlerer Wert“ bezeichnet. Der Median ist somit ein robuster Schätzer und sollte durchaus für bestimmte Fragestellungen als Alternative zum arithmetischen Mittel herangezogen werden. (Niemeier, 2008)

**Geometrisches Mittel:** Das Geometrische Mittel  $\bar{x}_{geom}$  - oft auch geometrische Proportionale - ergibt sich als die  $n$ -te Wurzel aus dem Produkt der Messgrößen und ist eigentlich nur für positive reelle Zahlen sinnvoll, da mit einem Messwert von null das gesamte Produkt gleich null wäre. (Kahmen, 2006)

$$\bar{x}_{geom} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (2.18)$$

**Intervallmittel:** Beim Intervall- bzw. Minimax-Mittel  $x_I$  wird wie beim Median vom geordneten Beobachtungsvektor ausgegangen. Der berechnete Mittelwert ergibt sich als arithmetisches Mittel aus dem größten und dem kleinsten Wert und ist besonders zur Abschätzung der Spannweite der Messgrößen von Bedeutung. Hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber Ausreißern ist das Intervallmittel allerdings auf keinen Fall als robust anzusehen, da es extrem von Ausreißern beeinflusst wird. (Niemeier, 2008)

$$x_I = \frac{1}{2}(l_{min} + l_{max}) \quad (2.19)$$

### Genauigkeitsmaße

Neben dem eigentlichen Schätzwert muss unbedingt auch die Genauigkeit bzw. Präzision der Schätzung in die Betrachtung miteinbezogen werden, wobei hier zu unterscheiden ist, ob der wahre Wert  $\tilde{X}$  der zu bestimmenden Zufallsvariable bekannt ist oder nicht. Üblicherweise wird von der Varianz als Streuungsmaß gesprochen, bzw. wird oft auch die positive Wurzel aus der Varianz - die sogenannte Standardabweichung - verwendet.

**Wahrer Wert bekannt:** Ist der wahre Wert  $\tilde{X}$  bekannt, so kann aus dem Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  und dem wahren Wert  $\tilde{X}$  der Vektor der wahren Abweichungen bzw. der wahren Residuen  $\boldsymbol{\varepsilon}$  berechnet werden.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 - \tilde{X} \\ l_2 - \tilde{X} \\ \vdots \\ l_n - \tilde{X} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Als eigentliches Genauigkeitsmaß wird die empirische Varianz  $s_0^2$  herangezogen (Gl. 2.21), die sich als mittlere quadratische Abweichung errechnet und für  $n \rightarrow \infty$  zur idealen, und statistisch unverzerrten theoretischen Varianz  $\sigma_0^2$  wird (Gl. 2.22), die insbesondere bei Herstellerangaben von Instrumentengenauigkeiten und als zentrale Bezugsgröße bei Konfidenzbereichen und Tests von Bedeutung ist.

$$s_0^2 = \frac{1}{n} \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2.21)$$

$$\sigma_0^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (2.22)$$

**Wahrer Wert unbekannt:** Ist der wahre Wert  $\tilde{X}$  unbekannt, so wird der Vektor der wahren Residuen  $\boldsymbol{\varepsilon}$  durch den Vektor der Verbesserungen  $\mathbf{v}$  ersetzt und  $\tilde{X}$  wird üblicherweise durch das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  angenähert. Analog zu Gl. 2.20 wird  $\mathbf{v}$  berechnet als:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x} - l_1 \\ \bar{x} - l_2 \\ \vdots \\ \bar{x} - l_n \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Die Berechnung der empirischen Varianz einer Messung  $s_0^2$  erfolgt wiederum analog zu Gl. 2.21. Unabhängig davon, ob der wahre Wert  $\tilde{X}$  nun bekannt oder unbekannt ist, kann dasselbe Berechnungsprinzip erkannt werden. Allerdings wird in Gl. 2.24 durch  $n-1$  und nicht wie in Gl. 2.21 durch  $n$  dividiert. Anschaulich kann dies damit begründet werden, dass eine der insgesamt  $n$  Beobachtungen bereits "verbraucht" wurde um das arithmetische Mittel zu schätzen, und somit nur noch  $n-1$  Beobachtungen -  $n-1$  Freiheitsgrade - zur Schätzung der Varianz übrig sind.

$$s_0^2 = \frac{1}{n-1} \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{v} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2 \quad (2.24)$$

Zusätzlich zu den vorgestellten Varianzen und Standardabweichungen sind in der Literatur noch weitere Genauigkeitsmaße üblich, die allerdings nur teilweise statistisch begründet sind. Zu den bekanntesten zählt der durchschnittliche Fehler  $t$ , der sich als Mittelwert der wahren Absolutabweichungen  $\varepsilon_i$  errechnet (Gl. 2.25) und vom Konzept her dem Median  $x_m$  zugerechnet werden kann, da es sich ebenfalls um einen robusten Schätzer handelt.

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i| \quad (2.25)$$

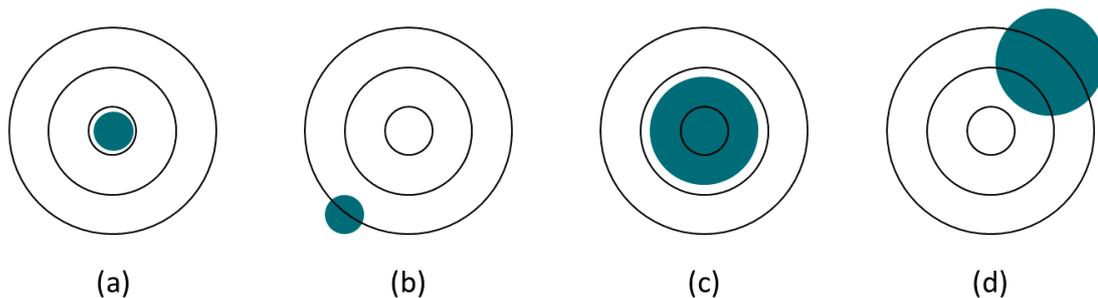
### 2.5.2 Arten von Messfehlern

Wird von möglichen Fehlern gesprochen, so kann grundsätzlich zwischen groben, zufälligen und systematischen Fehlern unterschieden werden. (Niemeier, 2008)

In der Gruppe der groben Fehler werden Zuordnungsfehler (z.B.: falsche Anfangs- bzw. Endpunkte bei der Streckenmessung), Aufschreib- und Ablesefehler, Ausreißer oder auch Fehler durch Rundung oder begrenzte Stellenzahl zusammengefasst. All diesen Fehlern gemein ist, dass sie durch gebotene Sorgfalt und “richtige Anwendung“ der gewählten Methoden vermieden werden können, und dass Beobachtungen, die mit groben Fehlern behaftet sind, nach Möglichkeit von der weiteren Berechnung und Verarbeitung auszuschließen sind, wobei hierzu natürlich eine geeignete Methode zur Ausreißerdetektion und Erkennung benötigt wird.

Zufällige Messunsicherheiten bzw. Fehler sind unvermeidbare, durch Zusammenwirken vieler Einzeleinflüsse hervorgerufene Fehler, die in jeder Beobachtung enthalten sind und durch statistische Methoden rechnerisch ausgeglichen werden können. Sie bilden die Grundlage für die statistische Behandlung von Messgrößen als Zufallsvariable, und als Kenngröße wird i.d.R. die Varianz bzw. Streuung einer Messung angegeben. Sie gehorchen einer statistischen Verteilung, wobei das immer noch akzeptierte Modell die von Carl Friedrich Gauß bereits 1797 entwickelte Normalverteilung ist (Gauß, 1809). Zufällige Fehler werden von messtechnisch nicht erfassbaren Änderungen der Messgeräte, des Messgegenstandes, der Umwelt oder der Beobachter hervorgerufen, sind üblicherweise durch wechselndes Vorzeichen gekennzeichnet und können bei Einzelmessung weder nach ihrem Betrag noch nach ihrem Vorzeichen bestimmt werden.

Systematische Messabweichungen entstehen durch nicht beherrschte oder nicht bekannte Einflüsse auf die Messergebnisse. Sie werden hauptsächlich durch Unvollkommenheiten der Messgeräte, der Messverfahren und des Messgegenstandes sowie von messtechnisch, erfassbaren Einflüssen der Umwelt und persönlichen Einflüssen der Beobachter hervorgerufen. Sie haben ein bestimmtes Vorzeichen und unter gleichen Bedingungen auch den gleichen Betrag. Ein Beherrschen und zumindest teilweises Eliminieren systematischer Effekte setzt eine sorgfältige Analyse des Messprozesses und aller beeinflussenden Faktoren voraus. Sind die Einflussfaktoren bekannt, so können systematische Fehler i.d.R durch geeignete Messanordnung vermieden (z.B.: Nivellieren aus der Mitte) oder durch rechnerische Korrektur berücksichtigt werden (z.B.: atmosphärische Korrektur bei elektrooptischer Entfernungsmessung). Durch bloße Wiederholung der Messung unter gleichbleibenden Bedingungen können systematische Abweichungen jedoch nicht festgestellt werden. (Niemeier, 2008)



**Abb. 2.9** – Während zufällige Messunsicherheiten die Streuung wiederholter Messungen beeinflussen ((c) und (d)), führen systematische Messfehler auch bei sehr häufiger Durchführung zu deutlichen Abweichungen vom wahren Wert ((b) und (d)). Die weitestgehend fehlerfreie Messung ist bei (a) dargestellt.

In Abbildung 2.9 ist der Einfluss verschiedener Messabweichungen am Beispiel der Punktlage dargestellt. Während eine weitestgehend fehlerfreie Messung (a) die gesuchte Punktlage (Zentrum) mit hoher Wiederholbarkeit (Durchmesser des farbigen Kreises) liefert, sind die übrigen Messungen mit verschiedenen Fehlern behaftet. Die systematischen Fehler in (b) führen zu einer falschen Punktlage, wobei die Reproduzierbarkeit dieser Messung durchaus gegeben ist. Der große Anteil an zufälliger Messunsicherheit in (c) beeinflusst die Präzision der Messung. Im Mit-

tel kann die gesuchte Punktlage zwar bestimmt werden, jedoch muss die Streuung der einzelnen Messungen als Messunsicherheit berücksichtigt werden, und das Heranziehen einer Einzelmessung zur Ableitung genereller Aussagen wäre fatal. In (d) liegt eine Kombination von zufälligen und systematischen Fehlern vor. Die Messungen liefern also ein falsches Ergebnis, das überdies noch mit großer Unsicherheit behaftet ist.

Aus anwendungsorientierter Sicht sind mit Sicherheit die systematischen Fehlereinflüsse von größter Bedeutung. Insbesondere wenn neue Messverfahren und Methoden aufkommen sind die relevanten Einflussparameter zumeist nicht bekannt, und schon gar nicht ist es möglich die dahinter liegenden funktionalen Zusammenhänge zu formulieren.

### 2.5.3 Varianz-Fortpflanzung

Bei vielen praktischen Fragestellungen ist es nicht möglich die gesuchte Größe direkt messtechnisch zu erfassen, sondern sie muss indirekt aus mehreren gemessenen Größen abgeleitet bzw. errechnet werden. So werden in der Photogrammetrie üblicherweise Winkelmessungen zwischen den Bildstrahlen vorgenommen, um durch Triangulation in den entstehenden Dreiecken dreidimensionale Objektkoordinaten zu bestimmen. Da bekanntermaßen jede Messung  $x_i$  bzw.  $l_i$  von ihrem wahren Wert  $\bar{X}$  abweicht, muss naturgemäß auch das Ergebnis, das aus fehlerbehafteten Größen abgeleitet wurde, von seinem wahren Wert abweichen. Die mathematischen Grundlagen zur Bestimmung der ‘‘Ergebnisfehler‘‘ liefert die Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung bzw. das Varianz-Kovarianz-Fortpflanzungsgesetz (oft auch nur Varianz-Fortpflanzungsgesetz (VFG) bzw. veraltet Fehlerfortpflanzungsgesetz).

Formal wird hierzu die messbare Zufallsvariable  $L$  eingeführt, die wiederum in einen Näherungswert  $L^0$  und eine verkürzte Beobachtungsvariable  $l$  zerlegt werden kann ( $L = L^0 + l$ ). Die Näherungswerte  $L$  werden dabei als nicht stochastisch betrachtet, weshalb die Kovarianzmatrix von  $\mathbf{L}$  ident zu jener von  $\mathbf{l}$  ist ( $\Sigma_{\mathbf{L}\mathbf{L}} = \Sigma_{\mathbf{l}\mathbf{l}}$ ).

Die klassische Varianz-Fortpflanzung geht von linearen Zusammenhängen zwischen fehlerbehafteten Eingangs- und Ergebnisgrößen aus. Ist diese Voraussetzung - wie bei nahezu allen praktisch relevanten Fällen - nicht gegeben, so muss die Funktionsgleichung durch Taylorreihenentwicklung, die nach dem ersten Term (1. Ableitung) abgebrochen wird, an den Näherungswerten  $L^0$  linearisiert werden. Für den einfachsten Fall nicht korrelierter Einflussgrößen bzw. Beobachtungen kann das Varianzfortpflanzungsgesetz in der nachfolgenden Form (Gl. 2.26) geschrieben werden. (Kahmen, 2006; Niemeier, 2008)

$$\sigma_F^2 = \left( \frac{\partial F}{\partial L_1} \right)_{L^0}^2 \sigma_1^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial L_2} \right)_{L^0}^2 \sigma_2^2 + \dots + \left( \frac{\partial F}{\partial L_n} \right)_{L^0}^2 \sigma_n^2 \quad (2.26)$$

Die Varianz der Ergebnisgröße  $\sigma_F^2$  ergibt sich somit als Summe der Einzelvarianzen  $\sigma_i^2$  der Einflussgrößen, wobei als Faktor vor jede Einzelvarianz die partielle Ableitung des funktionalen Zusammenhangs nach der jeweiligen Beobachtung gestellt wird.

Da die Näherungswerte  $\mathbf{L}^0$  als nicht stochastisch betrachtet werden können, sind auch die partiellen Ableitungen an diesen Stellen nicht stochastisch und können entsprechend bei  $m$  Funktionen  $f_i$  (mehrere Ergebnisgrößen) und  $n$  Zufallsvariablen zur  $(m, n)$ -Matrix  $\mathbf{A}$  zusammengefasst werden, die als Jacobi-Matrix bezeichnet wird, deren Elemente  $a_{i,j}$  die partiellen Ableitungen der  $i$ -ten Funktion nach  $j$ -ten Beobachtungsvariable darstellen und wie folgt geschrieben werden können:

$$a_{i,j} = \left( \frac{\partial f_i}{\partial L_j} \right)_{L^0} \quad (2.27)$$

Für eine vektorwertige, nichtlineare Funktion  $\mathbf{f}(\mathbf{L})$  gilt damit das allgemeine Varianz-Fortpflanzungsgesetz (Gl. 2.28), wobei durch die Varianz-Kovarianz-Matrix der Beobachtungen  $\Sigma_{\mathbf{ll}}$  zum Ausdruck kommt, dass auch Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen berücksichtigt werden können.

$$\Sigma_{\mathbf{ff}} = \mathbf{A} \cdot \Sigma_{\mathbf{ll}} \cdot \mathbf{A}^T \quad (2.28)$$

#### 2.5.4 Qualitätsbeurteilung in der Photogrammetrie

Die Qualitätsbeurteilung von Messungen kann entweder vorab zur Planung und Optimierung einer Messaufgabe (Genauigkeitsvoranschlag) oder zum Nachweis der erreichten Genauigkeit dienen und grundsätzlich muss zwischen zwei Gruppen von Kenngrößen unterschieden werden: Den statistischen, die sich aus dem Berechnungsprozess ergeben, und den messtechnischen, die auf standardisierten und genormten Prüfverfahren beruhen.

##### Statistische Kenngrößen

**Innere Genauigkeit:** Die Güte, mit der die Beobachtungen unter Berücksichtigung der Aufnahme- bzw. Messkonfiguration zum gewählten funktionalen Modell passen, kann anhand der statistischen Größen der Ausgleichsrechnung bestimmt werden. Liegen keine systematischen Abweichungen vor, beschreiben die Kenngrößen der inneren Genauigkeit die zufälligen Abweichungen der Beobachtungen und lassen entsprechend auch Rückschlüsse auf die äußere Genauigkeit zu. Übliche Kenngrößen der inneren Genauigkeit sind:

- Standardabweichung der Gewichtseinheit: Die Varianz oder Standardabweichung a posteriori (nach der Ausgleichung) wird aus den Residuen (Verbesserungen  $\mathbf{v}$ ) der Beobachtungen, der Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  und der Redundanz  $n - u$  gemäß  $s_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}$  errechnet, und ließe sich theoretisch durch Erhöhung der Redundanz unendlich verkleinern. Auf diesen Umstand ist besonders bei sehr großen und stark überbestimmten Gleichungssystemen zu achten.
- Mittlere Verbesserungen (Residuen) der Bildkoordinaten: Die mittleren Verbesserungen der Bildkoordinaten bzw. auch die mittleren Rückprojektionsfehler repräsentieren die Güte der Bildmessung. Neben der Qualität der Punkterkennung beinhalten sie jedoch auch die Güte der inneren und äußeren Orientierung.
- Standardabweichungen der Objektkoordinaten: Aus der Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten, kann für jede Unbekannte eine Standardabweichung errechnet werden. Handelt es sich hierbei um 3D-Objektkoordinaten so kann der mittlere Punktlagefehler nach Helmert aus  $\hat{s}_{XYZ} = \sqrt{\hat{s}_X^2 + \hat{s}_Y^2 + \hat{s}_Z^2}$  angegeben werden.
- Restklaffungen bei der Triangulation (Vorwärtsschnitt): Die verbleibende Restklaffung beim räumlichen Geradenschnitt ist ein Maß für die Präzision der Punktbestimmung, wobei wiederum sowohl die Güte der inneren und äußeren Orientierung als auch der Bildmessgenauigkeit enthalten sind.

**Äußere Genauigkeit:** Die Ermittlung der äußeren Genauigkeit ist ausschließlich durch Referenzmaße möglich, die durch unabhängige Beobachtungen mit übergeordneter Genauigkeit sichergestellt werden müssen. Sie enthält sowohl zufällige als auch systematische Fehlereinflüsse und stellt somit den objektivsten Qualitätsmaßstab dar. In der industriellen photogrammetrischen Praxis werden erreichbare Messgenauigkeiten oftmals als Kombination eines absoluten und eines maßstabsabhängigen Fehleranteils angegeben, wobei üblicherweise folgende Methoden zum Einsatz kommen:

- Überprüfung unabhängiger Referenzlängen: Unabhängige Längen, die nicht als Bedingung im Bündelblockausgleich verwendet wurden werden hierbei kalibrierten bzw. bekannten Referenzlängen gegenübergestellt. In der Regel ist dies verhältnismäßig einfach zu bewerkstelligen, obwohl die 3D-Rekonstruktion natürlich zumindest metrisch skaliert sein muss.
- Vergleich mit Referenzpunkten: Liegen übergeordnet bekannte Objektpunkte vor, die nicht Eingang in den Bündelblock fanden, so können diese als "Check-Points" bzw. Kontrollpunkte verwendet werden. Voraussetzung hierzu ist einerseits eine eindeutige Zuordnung der Kontrollpunkte, und andererseits muss die übergeordnete Genauigkeit sichergestellt sein. Beides ist besonders im Nahbereich nicht immer einfach zu erreichen, vor allem da zur objektiven Beurteilung der Ergebnisse auch keine Korrelation zwischen notwendigen Passpunkten und Kontrollpunkten bestehen darf und entsprechend auf eine unabhängige Methode der Pass- und Kontrollpunktbestimmung zurückgegriffen werden muss.
- Vergleich mit unabhängigen Vorwärtsschnitten: Konsistenter ist die unabhängige Messung weiterer Bildpunkte, die nicht an der Bündelausgleichung beteiligt waren. Aus den so ermittelten Bildmessungen können zusammen mit den zuvor errechneten Parametern der inneren Orientierung neue Vergleichspunkte oder Längen bestimmt werden. Überdies schließt diese Vorgehensweise auch alle Unsicherheiten der Bündelblockausgleichung mit ein.

**Relative Genauigkeit:** zur Darstellung der Leistungsfähigkeit des Messsystems unabhängig von der Größe des Messvolumens können relative Genauigkeitsmaße herangezogen werden. Üblicherweise wird die erreichte Genauigkeit ins Verhältnis zur Objektausdehnung gesetzt und in ppm angegeben. Außerdem kann die erreichte Genauigkeit ins Verhältnis zu einer theoretisch möglichen gesetzt werden, was z.B. bei der Angabe als Vielfaches der Bodenauflösung der Fall wäre.

### Messtechnische Kenngrößen

**Messunsicherheit:** Nach DIN 1319-1 (Deutsches Institut für Normung, 1995) beschreibt die Messunsicherheit jenen Wertebereich wo der wahre Wert der Messgröße liegt. Sie wird -wie die Messgröße selbst - aus Messungen gewonnen und beinhaltet entsprechend alle äußeren systematischen und anwendungsspezifischen Einflüsse. Die Messunsicherheit wird i.d.R. zusammen mit der Messgröße als "Plus-Minus" Bereich angegeben und muss.

**Messabweichung:** Unter der Messabweichung wird im allgemeinen die Abweichung eines aus Messungen gewonnenen Werts von einem Referenzwert verstanden. Messabweichungen umfassen systematische und zufällige Anteile, wobei die systematischen - sofern bekannt - durch Kalibrierung korrigiert werden können, sodass nur mehr die zufälligen und die unbekannt systematischen Anteile verbleiben.

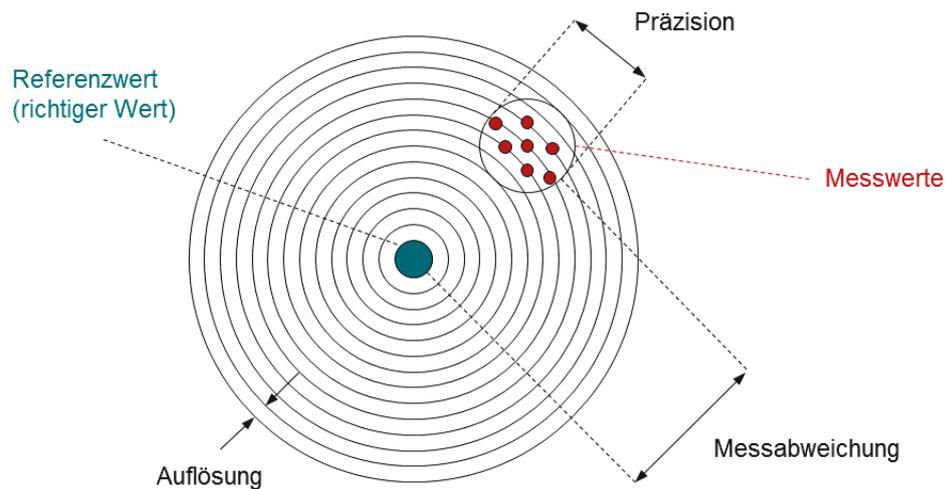


Abb. 2.10 – Die mit der möglichen Auflösung erfassten Messwerte streuen innerhalb der Präzision und weisen - hauptsächlich aufgrund systematischer Fehlereinflüsse - eine Messabweichung zum Referenzwert auf. (nach (Hennes, 2007))

**Referenzwert bzw. Richtigkeit:** Der Referenzwert (oft auch richtiger Wert) bezeichnet einen aus praktischen Erfahrungen und Vorgaben abgeleiteten Wert, dessen Abweichungen zum wahren Wert als vernachlässigbar klein betrachtet werden können. (z.B. Kalibrierdaten oder übergeordnet genau gemessene Referenzpunkte)

**Genauigkeit:** Die Genauigkeit beschreibt die Übereinstimmung des Messergebnisses mit einer Referenz. Sie kann also erst nach dem Vergleich mit der übergeordneten Referenz ermittelt werden. Oft wird Genauigkeit auch synonym für Präzision oder Messunsicherheit verwendet, wobei dann zwischen innerer und äußerer Genauigkeit unterscheiden werden muss. (vgl. Abschnitt 2.5.4)

**Präzision:** Präzision meint die statistische Streuung eines Messwerts und wird üblicherweise als Standardabweichung angegeben. Sie ist ein inneres Genauigkeitsmaß und gibt die Wiederholgenauigkeit einer Messung wieder. Dominieren jedoch systematische Fehlereinflüsse können diese durch die Präzision allein nicht aufgedeckt werden, da i.d.R. trotzdem ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit gegeben ist.

**Toleranz:** Die Toleranz bezeichnet die zulässige Abweichung von einer definierten Zielgröße. Von besonderer Bedeutung ist sie z.B. bei Fertigungsprozessen und damit verbundenen konstruktionsbedingten Abweichungen. Bei der Beurteilung von Messinstrumenten ist hingegen der Begriff der Prüfmittleignung üblich, womit die Fähigkeit eines Systems zur Erfüllung einer gestellten Aufgabe gemeint ist. (z.B. die Eignung von GNSS zur Beobachtungsmessung im alpinen Bereich)

**Auflösung:** Die Auflösung repräsentiert den kleinsten anzeigbaren Messschritt - die kleinste Änderung die im Messsignal eine signifikante Änderung herbeiführt. Das kann beim Abschriften einer Länge tatsächlich eine Schrittlänge sein, oder aber bei der Luftbildphotogrammetrie die Bodenauflösung, die eine natürliche Genauigkeitsschranke darstellt.

Zum besseren Verständnis und zur Illustration der genannten Begrifflichkeiten versucht Abbildung 2.10 die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen darzustellen. Die gemessenen Werte streuen im Rahmen der Präzision, wobei sie nur mit der möglichen Auflösung erfasst werden können. Das Zentrum stellt den Referenzwert dar und die Messabweichung verdeutlicht vorhandene systematische Einflüsse, die zur gezeigten Abweichung führen.

## Kapitel 3

# Genauigkeit der UAV-Photogrammetrie

Vor allem vor dem Hintergrund der Ergebnisverantwortlichkeit bestimmt die Frage nach der tatsächlich erreichten bzw. erreichbaren Genauigkeit schon seit dem Aufkommen von UAVs die Diskussion. Trotz der hohen Verbreitung der Systeme und einer großen Zahl an Anwendern ist nicht abschließend geklärt welche messtechnische Genauigkeit mit derartigen Ansätzen erreicht werden kann, und überdies ist vielen Anwendern nicht bewusst welche Auswirkungen die Aufnahmesituation auf Kamerakalibrierung bzw. Güte der Ergebnisse haben.

Hervorgerufen durch die weite Verbreitung UAV-basierte Messsysteme, existieren natürlich auch die verschiedensten Meinungen zu Güte und vor allem Genauigkeit der Ergebnisse. Während kritische Stimmen an der grundsätzlichen Eignung vergleichbarer Systeme für Vermessungsanwendungen zweifeln, sehen andere alle herkömmlichen Methoden als abgelöst an. Aufgrund der Tatsache, dass transportierte Informationen oft auch von einem starken Kommerzialisierungsgedanken getragen werden, müssen getätigte Aussagen jedoch sorgfältig geprüft und wissenschaftlich bewertet werden. Zur besseren Vermarktung einer neuen Technologie lassen sich viele Anbieter zu Versprechungen hinreißen, die in der Regel nicht gehalten werden können, ohne wissenschaftliche Grundlage zu Stande gekommen sind, und vor allem auch eine falsche Erwartungshaltung bei zukünftigen Anwendern generieren.

### 3.1 Erreichte Genauigkeiten

Natürlich führt das Aufkommen einer neuen Messmethode bzw. Technologie jedoch nicht nur zu Veränderungen der Marktsituation, sondern steigt vor allem auch das Interesse der Wissenschaft stark an. Außerhalb der geodätischen Anwendungen wird die Genauigkeit sehr häufig im "Bildraum" und mittels aus der Bündelausgleichung abgeleiteten statistischen Größen beschrieben. Für den vermessungstechnischen Einsatz ist jedoch vielmehr die erreichbare Genauigkeit im Objektraum bzw. dem übergeordneten Koordinatensystem von Bedeutung, weshalb entsprechende Analysen nahezu immer auf dem Vergleich zu alternativen Messmethoden wie Tachymetrie, GNSS oder terrestrischem Laserscan beruhen. Vor diesem Hintergrund wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl unabhängiger Untersuchungen angestellt, und auch die gegenständlich Forschung beschäftigt sich vordergründig mit Fragen der Genauigkeit. Neben grundlegenden Fragen welche Parameter wie und in welcher Form Einfluss auf die Ergebnisse haben, sind für praktische Anwendungen zumeist die Systemgrenzen von Bedeutung bzw. steht oft auch das Einhalten gesetzlicher Vorgaben (wie zum Beispiel (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013)) im Vordergrund.

So zeigen (Rumpler et al., 2014) am Beispiel einer Bruchwand am Steirischen Erzberg, dass bei geeigneter Aufnahmekonfiguration und entsprechend sorgfältiger Auswertung eine absolute Positionsgenauigkeit von rund 2,5 cm bzw. 1,5 GSD im gesamten Gebiet möglich ist, womit die gesetzlichen Vorgaben der Markscheideverordnung (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013) eingehalten, und insbesondere auch systematische Deformationen des Objekts bzw. des Bildverbands korrigiert werden konnten.

(Küng et al., 2011) erwähnen bereits 2011 den starken Einfluss der Flughöhe auf die Güte der 3D-Rekonstruktion und setzten die erreichbare Genauigkeit zwischen 2 und 20 cm fest. Sie weisen allerdings auch deutlich darauf hin, dass die Schwankungen in der Größenordnung einer Zehnerpotenz auch innerhalb eines Datensatzes auftreten können und entweder durch das Objekt und die vorhandene Textur, oder aber durch "äußere" Parameter wie Kamera und Aufnahmekonfiguration hervorgerufen werden können.

Mit dem Ziel einen UAV- und bildbasierten Monitoring-Workflow für Steinbrüche zu entwickeln, stellen (González-Aguilera et al., 2012) Ergebnisse von UAV-Befliegungen mit jenen terrestrischer Laserscans (TLS) gegenüber, wobei der koordinative Referenzrahmen mit herkömmlichen geodätischen Methoden geschaffen wurde. Die Quantifizierung der Fehler bzw. Differenzen erfolgte aus dem Vergleich der beiden Punktwolken, wodurch eine eindeutige Zuordnung identer Objektpunkte nicht möglich ist und die Ergebnisse somit eine diesbezüglich Unschärfe aufweisen. Aufgrund der sehr hohen Punktdichte, wurden diese Unschärfen jedoch in Kauf genommen bzw. als vernachlässigbar betrachtet und mittlere Abweichungen von rund 4,5 cm ausgewiesen. Auffallend sind jedoch wiederum die großen Streuungen bzw. die Standardabweichungen innerhalb des Gebiets, die ähnlich große Werte wie die mittleren Fehler zeigen. Die räumliche Verteilung der Differenzen deutet auf eine Durchbiegung der UAV-basierten Rekonstruktion hin, was sich mit den Ergebnissen von (Küng et al., 2011) deckt, und den Schluss zulässt, dass die Ursachen wohl nicht nur zufällige Artefakte sondern vor allem auch systematischer Natur sind.

(Harwin and Lucieer, 2012) wiederum untersuchen die Genauigkeit der UAV-Photogrammetrie am Beispiel des Monitorings von Küstenlandschaften. Sie kommen zum Schluss, dass Genauigkeiten im Subdezimeterbereich möglich sind, wodurch UAVs die Genauigkeiten der üblicherweise angewandten RTK (Real Time Kinematic)-GNSS-Methoden halten können, allerdings durch das flächige Messprinzip einen wesentlich höheren Informationsgehalt zur Beurteilung etwaiger Veränderungen liefern.

Im Rahmen einer umfassenden Messkampagne konnten auch (Barry and Coakley, 2013) zeigen, dass die erreichbare Genauigkeit der UAV-Photogrammetrie mit jener von RTK-GNSS vergleichbar ist. Die zu Tage getretenen Differenzen zwischen den photogrammetrisch bestimmten Punkten und der Referenzvermessung mittels RTK-GNSS beliefen sich im Mittel zu 41 mm in der Lage und 68 mm in der Höhe, wobei die Befliegung des rund 2 ha großen Untersuchungsgebiets aus 90 m und die Auswertung mit Agisoft PhotoScan erfolgte.

Zur Erstellung hochgenauer 2D-Pläne einer archäologischen Ausgrabungsstätte in Ligurien führten (Nocerino et al., 2013) eine kombinierte photogrammetrische Detailaufnahme durch, wobei sowohl UAV-Aufnahmen (vertikal und geneigt) als auch terrestrische Bilder zum Einsatz kamen. Aufgrund des geforderten Detailgrads der abgeleiteten Pläne ( $< 4$  mm) kam der Genauigkeit der Ergebnisse besonders hohe Bedeutung zu, weshalb die Autoren verschiedene Netzkonfigurationen getestet und analysiert haben. Aufgrund der geringen Flughöhe (18 bzw. 25 m) und der damit verbundenen GSD von rund 3 mm gelang es die geforderten Genauigkeiten einzuhalten, wobei die erreichten 3D-Genauigkeiten wiederum bei rund 1,5 bis 2 GSD lagen (vgl. (Rumpler et al., 2014)). Bei näherer Analyse der Ergebnisse zeigt sich überdies deutlich, dass der Bildverband durch die Hinzunahme von Schrägsichten stabilisiert wird, und dies sogar einen stärkeren Einfluss auf die Genauigkeit zu haben scheint als die Integration von Passpunkten in den Bündelblockausgleich.

(Caroti et al., 2015) streichen in Ihrem Beitrag zur UAV-g den Mehrwert der gemeinsamen Nutzung von UAV-Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning hervor, bzw. beurteilen sie die Qualität der photogrammetrischen Modelle auf mehreren unabhängigen Wegen. Einerseits erfolgt eine Gegenüberstellung der Modelle mit Ergebnissen von terrestrischen Laserscans, und andererseits wurde das Testobjekt - ein kleine Kirche in der Nähe von Pisa - mit einem dichten Netzwerk von tachymetrisch vermessenen Kontrollpunkten versehen, die teilweise auch zur Schaffung eines einheitlichen Koordinatenbezugs verwendet wurden. Neben einer umfassenden Analyse der Simultankalibrierung konnten RMSE-Werte im Bereich einzelner Zentimeter erreicht werden, wobei die Abweichungen an den Fassaden geringer als am Dach waren, und wie bei (Rumpler et al., 2014) die Genauigkeit des Gesamtmodells durch die Hinzunahme von Passpunkten in den Bündelblockausgleich deutlich gesteigert werden konnte.

Auch (Przybilla, 2016) bzw. (Gerke and Przybilla, 2016) beschäftigen sich mit der erreichbaren Genauigkeit der UAV-basierten Nahbereichsphotogrammetrie. Konkret analysieren sie inwieweit sich Kreuzbefliegungen, die Anzahl und Verteilung von Passpunkten sowie eine etwaige Integration von mittels Onboard RTK-GNSS erfassten Orientierungsparametern auf die Ergebnisse auswirken. Abhängig von der gewählten Anordnung und Art der Georeferenzierung schwanken die erreichten Genauigkeiten zwischen 3 und 20 cm, wobei insbesondere der positive Einfluss der RTK-Option hervorzuheben ist. Dadurch wird nicht nur die absolute Blockorientierung signifikant verbessert, sondern es werden vor allem auch Blockdeformationen reduziert, wodurch die maximalen Fehler auch bei ungünstiger Aufnahmeanordnung und ohne zusätzliche Passpunkte im einstelligen Zentimeterbereich gehalten werden kann.

Die Ableitung hochgenauer, vollständiger und in ausreichendem Detailgrad vorliegender Geländemodelle (Digital Terrain Model, DTM) steht im Vordergrund der Arbeiten von (Kosmatin Fras et al., 2016). Die Qualitätsbeurteilung erfolgte anhand ausgewählter Check-Points, wobei deren Referenzkoordinaten mittels GNSS ermittelt wurden und die Ableitung der Positionen aus dem DTM manuell erfolgte. Hinsichtlich der Positionsgenauigkeit zeigten die aus UAV-Befliegungen abgeleiteten Geländemodelle Abweichungen zwischen 4,2 und 6,4 cm, wobei hervorgehoben werden muss, dass die Genauigkeit in der Lage untypischerweise geringer ist als in der Höhe. Aufgrund fehlender Angaben zu den durchgeführten Flügen kann dieser Umstand leider nicht näher untersucht werden, allerdings liegt die Vermutung nahe, dass es sich nicht um einen reinen Nadirflug handeln dürfte.

(Peppas et al., 2016) berichten vom Einsatz von UAVs zur Beobachtung von Hangrutschungen und analysieren hier vordergründig die vertikale Genauigkeit der abgeleiteten Modelle. Durch Anwendung der Fehlerfortpflanzung wird die "Höhenempfindlichkeit" bzw. die Detektionsschranke für vertikale Bodenbewegungen bei  $\pm 9$  cm festgelegt, was im präsentierten Anwendungsfall zwar ausreichend zu sein scheint, jedoch mit Sicherheit nicht als generelle Eignung der UAV-Photogrammetrie zum Böschungsmonitoring betrachtet werden darf.

Am Beispiel einer archäologischen Ausgrabungsstätte in Griechenland analysiert (Strecha, 2017) die erreichbare Genauigkeit bei der Aufnahme mit verschiedenen Hobbydrohnen, wobei die Quantifizierung - wie auch schon bei anderen Beispielen berichtet - über, im Gebiet verteilte und geeignet signalisierte Kontrollpunkte erfolgte. Es kann gezeigt werden, dass auch beim Einsatz von Hobbydrohnen, mit üblicherweise kleineren Sensorchips und entsprechend geringerem Auflösungsvermögen, Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich möglich sind, allerdings muss der einfacheren Hardware in der Auswertung Rechnung getragen werden. Die größte Herausforderung zeigte sich in der Modellierung des Rolling Shutter Effekts, der bei den meisten Hobbykameras auftritt. (Strecha, 2017) zeigt klar, dass ohne Berücksichtigung dieser Effekte die erreichten Genauigkeiten signifikant abnehmen und somit für Vermessungsanwendungen ungeeignet werden. Während mit entsprechender Modellierung mittlere Genauigkeiten von rund 5 cm möglich sind, fallen diese ohne geeigneten Modellierungsansatz auf über 20 cm ab.

Von einem umfassenden Vergleich zwischen Punktwolken, die aus UAV-Bildern abgeleitet wurden und jenen, die aus terrestrischem Laserscan stammen, berichten (Peterson et al., 2019), wobei ihre Analysen in einem rund  $320\text{ m} \times 320\text{ m}$  großen Testgebiet durchgeführt wurden, das mit insgesamt 80 Bodenkontrollpunkten (GCPs) ausgestattet war. Die Gegenüberstellung erfolgte auf zwei unabhängige Arten: Einerseits wurden gefittete Dachflächenebenen verglichen und andererseits erfolgte der Vergleich anhand eines Profils entlang der Mittellinie einer vorhandenen Fahrbahn. Nachdem beide Punktwolken über die erwähnten GCPs in einen gemeinsamen Koordinatenbezug gebracht wurden, zeigten sich sowohl anhand der Gebäude als auch an der Straße mittlere Differenzen von rund 8 cm, insbesondere in der Höhe. Außerdem muss angemerkt werden, dass die UAV-Punktwolke wesentlich stärkeres Rauschen aufweist was vor allem anhand der angepassten Dachflächenebenen deutlich wird.

Obwohl sich diese Liste noch lange fortsetzen ließe, kann zusammenfassend gesagt werden, dass es ausreichend Beispiele für "das Funktionieren" der UAV-Photogrammetrie gibt und, dass die erreichbaren Genauigkeiten unter realen Einsatzbedingungen in der Größenordnung weniger Zentimeter und entsprechend im selben Bereich wie bei RTK-GNSS liegen. Theoretische Überlegungen sowie praktische Versuchsergebnisse zeigen allerdings deutlich, dass ein unkontrolliertes und völlig freies Fotografieren trotz hoher Redundanz nicht zwingend zu einer hohen Genauigkeit der 3D Objektpunkte führt und eine sorgfältige Flug- und Aufnahmeplanung somit genauso wichtig ist wie die richtige Auswahl einer geeigneten Kamera. Überdies steht die erreichte Genauigkeit - wie bei allen photogrammetrischen Verfahren - in unmittelbarem Zusammenhang mit der Bodenauflösung (Ground Sampling Distance, GSD) bzw. dem Aufnahmeabstand. Objekte die kleiner sind, als die Bildauflösung können nicht erfasst werden, und entsprechend ist die erreichbare Genauigkeit in dieser Hinsicht klar begrenzt.

Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass die erreichbaren absoluten Genauigkeiten der dreidimensionalen Objektpunkte bei der üblichen Anwendung in der Größenordnung von rund 1,5 GSD liegen, wobei unter üblichen im Bergbau herrschenden Bedingungen von einer Grenze von rund 2,5 bis 3 cm gesprochen werden muss.

Vor diesem Hintergrund kann die Frage nach der grundsätzlichen Eignung der UAV-Photogrammetrie für geodätische Zwecke klar positiv beantwortet werden, wobei dies natürlich nicht für alle Anwendungen behauptet werden darf. Messungen zur Erfassung von Bodenbewegungen (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013) oder generell Deformationsbeobachtungen können zum jetzigen Stand wohl nicht, oder nur mit sehr großem Aufwand durchgeführt werden, und in Anbetracht der Tatsache, dass in den letzten Jahren - es wurden Beispiele im Zeitraum 2011 bis 2019 präsentiert - auch keine signifikanten "Sprünge" in der Genauigkeit beobachtet werden konnten, wird dies wohl auch in naher Zukunft noch so bleiben.

Zur Steigerung der Ergebnismenge bedarf es eines besseren Verständnisses der Wirkmechanismen innerhalb von Structure from Motion und vor allem einer fundierten Analyse der relevanten Einflussfaktoren. Nur mit einer klaren Vorstellung welche Parameter sich in welcher Form auswirken, können Maxima bzw. "Optima" in der "Zielfunktion Genauigkeit" gefunden werden.

## 3.2 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit

Während bislang versucht wurde die Grenzen der UAV-Photogrammetrie und der Auswertung mittels Structure from Motion auszuloten bzw. die Eignung für bestimmte Anwendungen zu überprüfen, müssen - vor allem zur bewussten "Beeinflussung" der Ergebnismenge - relevante Einflussfaktoren identifiziert und analysiert werden.

Wie erwähnt handelt sich bei Structure from Motion im Wesentlichen um eine Kombination photogrammetrischer Bildverarbeitungsmethoden, die durch das Aufkommen robuster Interest-

Operatoren und Merkmalsextraktion weitestgehend automatisiert ablaufen. Entsprechend ist es augenscheinlich, dass sich die photogrammetrische Objektgenauigkeit bei UAV-Befliegungen grundsätzlich ähnlich verhält, wie es bei der klassischen Photogrammetrie bereits seit Jahrzehnten bekannt ist. Wesentliche Einflussgrößen wie Bildmaßstab, Bildmess- und Matching Genauigkeit sowie Konfigurationen von Strahlenschnitten sind nach wie vor gültig, wenn auch deren Auswirkung nicht eindeutig deterministisch beschrieben werden kann, und die Relationen zwischen den Parametern teilweise “neu gedacht“ werden müssen. (Luhmann, 2018a)

Aus anwendungsorientierter Sicht stehen allerdings häufig die im Feld bzw. Vorfeld beeinflussbaren Parameter im Zentrum der Überlegungen, weshalb in der Regel die folgenden Haupteinflussgruppen diskutiert werden:

- Aufnahmesystem (Kamera)
- Aufnahmekonfiguration und Bildmaßstab
- Bildauswertung
- Maßstabs- und Datumsfestlegung
- Objektbeschaffenheit

Inwieweit, welche der genannten Größen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen, ist die zentrale Frage der gegenständlichen Forschung, weshalb im Folgenden bestehende wissenschaftliche Untersuchungen diskutiert und darauf aufbauend eigene Analysen präsentiert werden.

### 3.2.1 Aufnahmesystem

Mit Sicherheit den größten Einfluss auf die Güte der Ergebnisse zeigt die eingesetzte Messsensorik bzw. Kamera. Die Bildqualität ist eine der bestimmenden Größen für die erreichbare Genauigkeit, und das Vorliegen scharfer und kontrastreicher Bilder ist unbedingte Voraussetzung für vermessungstechnische Anwendung von SfM.

Während bei klassischen photogrammetrischen Anwendungen “metrische“ Luftbildkameras hoher geometrischer und radiometrischer Stabilität eingesetzt werden, so kommen bei UAV-Anwendungen - bedingt durch die Traglast der unbemannten Plattformen - üblicherweise Kameras aus dem Consumer-Segment zum Einsatz, die in der Regel nicht kalibriert und auch nicht über einen längeren Zeitraum stabil sind. Klassische Luftbildkameras erlauben aufgrund der großen Bildformate sehr effiziente Datenerfassung auch bei größeren Aufnahmeentfernungen, liefern zu meist auch die Farbwerte mit separaten Farbkanälen, wodurch Analysen aus dem Bereich der Fernerkundung ermöglicht werden, und verfügen über verschiedene Verfahren der Bildwandelungskompensation, um eine hohe Bildqualität auch bei bewegter Aufnahme sicherzustellen. Überdies ist bei metrischen Messkameras auch eine exakte Zeitsynchronisation realisiert. Dies dient nicht nur der definierten Auslösung im Zusammenspiel mit der Flugnavigation, sondern insbesondere auch der direkten Einbindung gemessener Orientierungsparameter in die spätere Aerotriangulation, wofür eine exakte zeitliche Synchronisation im Bereich einer Millisekunde und besser erforderlich ist. (Cramer and Leinss, 2016; Przybilla, 2017)

Die genannten Spezifikationen einer Messkamera können grundsätzlich auch auf UAV-Anwendungen übertragen werden, und es wäre somit auch denkbar terrestrische Messkameras in Kombination mit UAVs einzusetzen. Aufgrund der bekannten Einschränkungen hinsichtlich Traglast wird allerdings bei den meisten kommerziellen Systemen ein anderer Weg beschritten, und es kommen gängige Großserienkameras - Proprietäre Kameras wie DJI Zenmuse, Kompaktkameras, Systemkameras, oder Spiegelreflexkameras - zum Einsatz, die unterschiedlich stark in die

Flugplattform integriert werden. Nichtsdestotrotz sollte die Kamera - unter Berücksichtigung der genannten Eigenschaften von Messkameras - die folgenden Anforderungen bestmöglich erfüllen, wiewohl dies mit Sicherheit nicht immer zu Hundert Prozent möglich ist: (Cramer and Leinss, 2016; Przybilla, 2017)

- Geringes Gesamtgewicht
- Möglichst große Fläche des Bildsensors und vor allem ausreichende Größe des Einzelpixels, um einen großen Dynamikumfang und niedriges Rauschmaß zu gewährleisten
- Stabile Verarbeitung des Objektivs und keine beweglichen Teile in der Optik oder am Sensor, was auch mechanische Bildstabilisatoren mit einschließt
- Festbrennweiten-Weitwinkelobjektiv, zur Gewährleistung geringer Linsenverzeichnungen und hoher Bildschärfe im gesamten Bildbereich

**Sensortechnologie**

Neben der rein praktischen Anforderung des geringen Gesamtgewichts ist der Sensor, bzw. das Sensorformat mit Sicherheit einer der wesentlichsten Parameter für die Qualität des zu erfassenden Bildes. Abbildung 3.1 zeigt typische Sensorformate und es kann deutlich erkannt werden, dass das Größenspektrum ein weites ist. Die Größe des Sensors, oder vielmehr die Größe des einzelnen Pixels ist der bestimmende Faktor für den Dynamikumfang und das Rauschverhalten des Sensors. Während bei Kompaktkameras üblicherweise nur Kleinformat verbaut sind (maximal Four-Thirds), besitzen Systemkameras oftmals APS-C Sensoren und Spiegelreflexkameras verfügen über Klein- und Mittelformat. (Verhoeven, 2010)

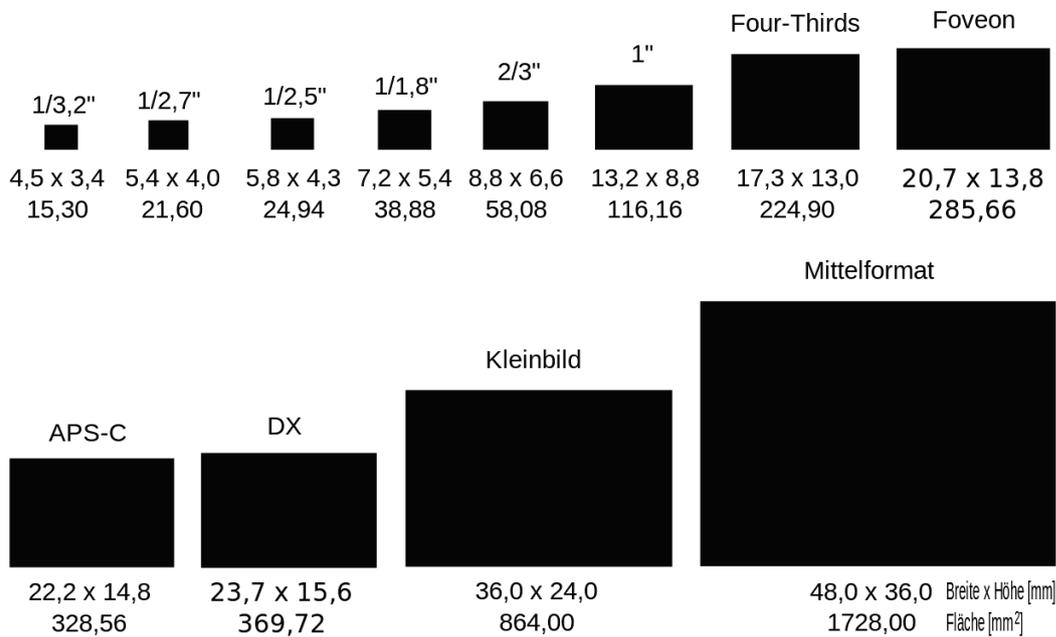
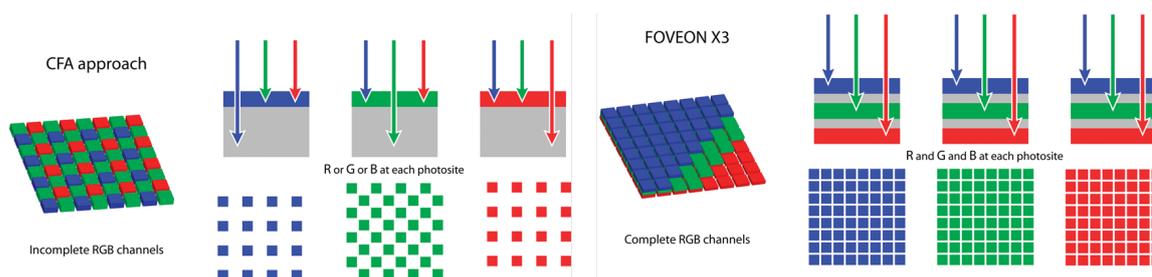


Abb. 3.1 – Je größer die physische Fläche des Sensors, desto größer ist naturgemäß auch das einzelne Pixel, was sich positiv auf Bildschärfe und Qualität auswirkt. (Wikipedia, 2019)

Aktuelle Digitalkameras verwenden vorrangig sogenannte CMOS-Sensoren, wobei CMOS für "Complementary Metal Oxide Semiconductor" steht und die Art der elektrischen Schaltung beschreibt. Im Gegensatz zum billigeren CCD-Chip wird das einfallende Licht direkt durch einen

in jedem Pixel integrierten Verstärker und Digitalisierbaustein verarbeitet, wodurch kein sequenzieller Ladungstransport stattfindet und jeder Pixel einzeln ausgelesen werden kann. Außerdem sind CMOS-Sensoren wesentlich stromsparender und zeigen deutlich geringere Störanfälligkeit gegenüber Blooming (Ausblühen von Lichtquellen bzw. hellen Flächen). Nachteilig ist jedoch, dass es durch das zeilen- bzw. spaltenweise Auslesen des Bildes häufig zu sogenannten Rolling Shutter Effekten kommt, die an späterer Stelle noch im Detail beschrieben werden. (Verhoeven, 2010)

(Greiwe et al., 2013) bzw. (Greiwe et al., 2017) propagieren den Einsatz einer gänzlich anderen Sensortechnologie für den Einsatz auf UAVs, wobei der Unterschied im System zur Aufnahme der Farbinformation zu finden ist. Am weitesten verbreitet ist hierbei das sogenannte “Bayer-Pattern“, wo durch vorgeschaltete Farbfilter die zugeordnete Farbe durch eine Detektorelement aufgenommen wird. Die beiden übrigen Farben werden durch Interpolation aus den benachbarten Detektorelementen künstlich ermittelt bzw. erzeugt. Somit ist es, wie in Abbildung 3.2 erkennbar, nicht möglich die volle Farbinformation an jedem Pixel simultan aufzuzeichnen und die Bildaufnahme geht somit mit einem starken Informationsverlust einher. Das Prinzip des Foveon-Sensors hingegen folgt der Funktionsweise des analogen Farbfilms. Durch Nutzung der wellenlängenabhängigen Eindringtiefe der elektromagnetischen Lichtwellen in den CMOS-Chip kann die Messung der Farbanteile an jedem einzelnen Pixel erfolgen. Die Farbsensoren liegen über- und nicht wie im Bayer-Pattern nebeneinander, und somit kann im oberen Bereich mit der geringsten Eindringtiefe Blau, danach Grün und schließlich Rot detektiert werden. (Gilblom et al., 2003; Verhoeven, 2010)



**Abb. 3.2** – Im Gegensatz zum üblicherweise eingesetzten Bayer-Pattern (links), folgen Foveon-Kameras der Funktionsweise eines analogen Farbfilms und sind in der Lage jede der drei Farbkomponenten für jedes einzelne Pixel zu detektieren und zu speichern. (Verhoeven, 2010)

Im Ergebnis führt diese Sensoranordnung zu scharfen Kanten, einer hohen Farbgenauigkeit sowie wenigen Bildartefakten. Außerdem zeigen Foveon Sensoren eine wesentlich höhere Lichtempfindlichkeit als CCD oder CMOS. Zwei Blendenstufen entsprechen der bis zu vierfachen Lichtempfindlichkeit, was wiederum bedeutet, dass mit kleinerer Blende und kürzerer Belichtungszeit aufgenommen werden kann, was besonders bei der dynamischen Aufnahme mittels UAV von großer Wichtigkeit ist. (Gilblom et al., 2003)

Dass die beschriebenen Vorteile hinsichtlich Bildqualität auch positive Auswirkungen auf die Genauigkeit eines mittels SfM erzeugten Geländemodells haben, kann den Ausführungen von (Greiwe et al., 2017) entnommen werden. Anhand ausgewählter Geländeprofile zeigen sie deutlich, dass Punktwolken, die aus Foveon Bildern abgeleitet wurden, wesentlich “glatter“ sind, den realen Geländeverlauf klarer und richtiger wiedergeben und vor allem auch weniger Rauschen zeigen. Außerdem kann aus dem Vergleich mit terrestrischem Laserscan erkannt werden, dass die erreichbare Höhengenaugkeit bei Foveon höher liegt als bei CMOS. So zeigen zwar alle aus UAV-Befliegungen abgeleiteten Punktwolken einen systematischen Höhen-Offset zur TLS-Referenz, allerdings ist dieser bei Foveon Kameras um bis zum Faktor fünf geringer.

Der Nachteil der beschriebenen Foveon Sensoren ist neben dem hohen Preis vor allem die geringe Verbreitung. Derzeit ist mit Sigma lediglich ein Anbieter im Consumer-Sektor vertreten und zusätzlich gibt es noch einige Realisierungen im Bereich der Industriekameras. Ein weiterer - vor allem bei der Aufnahme mittels UAV relevanter - Nachteil ergibt sich aus der hohen Bildfolgezeit, da es schlichtweg länger dauert die größerer Informationsfülle in den Speicher zu schreiben. Um bei einer UAV-Mission trotzdem die geforderte Längsüberdeckung einzuhalten muss die Fluggeschwindigkeit reduziert werden, wodurch sich die Flächenleistung natürlich erheblich verringert. (Gilblom et al., 2003; Greiwe et al., 2017)

Die Beurteilung der Qualität eines Sensors erfolgt häufig anhand seiner Auflösung bzw. seines Auflösungsvermögens. Die Auflösung beschreibt hierbei die Fähigkeit eines optischen Systems zwei benachbarte Objektpunkte zu erfassen und eindeutig voneinander unterscheidbar abzubilden. Möglichkeiten zur Beurteilung der Auflösung bilden Punktantwortfunktion (point spread function, PSF) und Modulationstransferfunktion (MTF), die im Wesentlichen den Kontrastverlust zwischen Realität und Bild widerspiegeln und auf Basis von Laboruntersuchungen bestimmt werden können. Derartige Laboruntersuchungen haben (Cramer et al., 2017) für eine exemplarische Auswahl an UAV-Kameras durchgeführt, wobei je ein Vertreter von Proprietär-, System-, und Spiegelreflexkamera getestet wurde. Sie konnten zeigen, dass das proprietäre System der DJI Phantom 3 überraschend gute Ergebnisse erzielt und sich insbesondere durch hohe Gleichmäßigkeit im gesamten Bildbereich auszeichnet. Im Gegensatz dazu zeigte die untersuchte Systemkamera Sony-Alpha 7R zwar für die Bildmitte die besten Ergebnisse, allerdings musste - in Kombination mit dem eingesetzten Objektiv - ein sehr starker Abfall hin zu den Bildrändern festgestellt werden. Die generelle Anmerkung, dass das geometrische Auflösungspotential nicht nur vom Sensor sondern insbesondere auch von der eingesetzten Optik bzw. dem Objektiv abhängig ist, muss hier aber auf jeden Fall mitberücksichtigt werden. Die Auflösung beschreibt immer das Gesamtsystem was vor allem bei etwaig eingesetzten Wechselobjektiven von Bedeutung ist.

Vor dem Hintergrund, dass die beschriebenen Kameras in Kombination mit UAVs und SfM für vermessungstechnische Anwendungen eingesetzt werden sollen, müssen die erkannten Ergebnisse einer gesonderten Betrachtung zugeführt werden. Unbedingte Voraussetzung für das Funktionieren von Structure from Motion ist ein ausreichender Bildüberlapp bzw. auch das automatische Finden von Punktkorrespondenzen zwischen benachbarten Bildern. Ist nun die Auflösung und damit die Bildschärfe über den Bildbereich nicht konstant oder grundsätzlich gering, so führt dies zu schwacher oder fehlerhafter Verknüpfung zwischen den Bildern bzw. muss die geringe Bildmessgenauigkeit in der Optimierung korrigiert werden, was wiederum zu systematischen Effekten an der abgeleiteten 3D-Geometrie führen kann.

### Speicherformat

Eher wenig Beachtung wird der Frage des geeigneten Speicherformats geschenkt. In den meisten Fällen ist das voreingestellte Standardformat das speichersparende JPG-Format, wobei oftmals nicht bedacht oder berücksichtigt wird, dass abhängig vom verwendeten Kompressionsfaktor eine erheblicher Informationsverlust auftreten kann. Die meisten modernen Digitalkameras bieten allerdings die Möglichkeit Daten auch im sogenannten RAW-Format abzuspeichern. Das oft auch als "digitales Negativ" bezeichnete Format bietet dem Anwender alle Möglichkeiten zur weiteren Bildvorverarbeitung, sowie gegebenenfalls zu einer selbstständig durchgeführten und verlustfreien Bildkompression. So berichten (Boschi and Boschi, 2017), dass durch nachträgliche Bildkorrekturen - z.B.: in schattigen Bereichen - die Genauigkeit und auch Vollständigkeit der abgeleiteten 3D-Rekonstruktion deutlich gesteigert werden kann. Und (Greiwe et al., 2017) betonen den Wert der verlustfreien Bildkompression, die auch eine SfM-Auswertung mit höchst-

möglicher Auflösung und Qualitätseinstellung zulässt, was bei der Verwendung von JPGs nicht sinnvoll ist.

### Geometrische Qualität und Stabilität

Wie bereits in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, wird die geometrische Qualität der photogrammetrischen Abbildung durch die Parameter der inneren Orientierung beschreiben bzw. beeinflusst. Diese umfassen einerseits Parameter, die den Sensor selbst betreffen (Affinität und Scherung) und andererseits ist die innere Orientierung auch stark vom gewählten Objektiv abhängig.

(Przybilla, 2017) und (Cramer et al., 2017) empfehlen den Einsatz von Weitwinkelobjektiven. Diese zeigen bei geringerer Flughöhe einen größeren Bildausschnitt wodurch höhere Überlappungen möglich sind, und außerdem werden Strahlenschnittbedingungen nahe  $90^\circ$  begünstigt. Obwohl im Zuge der SfM-Auswertung eine simultane Optimierung der inneren Orientierung erfolgt, sollen die Parameter der inneren Orientierung während der Bildaufnahme möglichst konstant gehalten werden, weshalb die Verwendung von Festbrennweitenobjektiven empfohlen, und von der Nutzung des Autofokus und mechanischer Bildstabilisierung abgeraten wird.

Den Kern der SfM Auswertung bildet neben der Merkmalsextraktion und dem Matching der Bündelblockausgleich. Die innere Orientierung definiert die Form der Strahlenbündel, bietet somit einen "starken Hebel" in der Optimierung und entsprechend kommt der Stabilität des Kamerasystems bei der Beurteilung der Genauigkeit große Bedeutung zu. Die in der Photogrammetrie herrschende Skepsis gegenüber dem Einsatz von Nicht-Messkameras ist wohl begründet, insbesondere da vielen Anwendern nicht bewusst ist welche Auswirkung die Aufnahmekonfiguration auf die simultan geschätzte Kamerakalibrierung hat. Eine zuverlässige Kalibrierung ist nur bei geeigneter Aufnahmekonfiguration möglich, wobei zuverlässig hier auf die physikalische Richtigkeit und nicht auf ein mathematisches Optimum abstellt. (Kemper et al., 2016; Przybilla et al., 2015)

Die Problematik einer (in)stabilen Kalibrierung konnte sehr augenscheinlich von (Cramer et al., 2017) gezeigt werden. Im Zuge der vorgestellten Untersuchungen wurden sowohl Testfeldkalibrierungen im Labor als auch Simultankalibrierungen anhand von UAV-Bildflügen durchgeführt, wobei die geschätzten Parameter der inneren Orientierung (Kamerakonstante und Hauptpunkt-lage) in beiden Fällen völlig unterschiedlich waren. Aufgrund vorhandener Korrelationen der inneren mit der äußeren Orientierung waren diese Unterscheide allerdings zu erwarten und bestätigen nur einmal mehr den herrschenden Grundsatz, dass die Kalibrierung immer im selben Maßstab und in ähnlicher Anordnung erfolgen soll, wie der eigentliche Messeinsatz. Die Autoren gehen in ihrer Argumentation sogar so weit, dass sie Notwendigkeit einer Vorabkalibrierung gänzlich in Frage stellen und bei geeigneter Blockanordnung im Vermessungsflug sogar davon abraten. Hinsichtlich der "optimalen" Anordnung für in-situ Simultankalibrierung empfehlen sie die gemeinsame Auswertung zweier kreuzweise zueinander angeordneter Flüge in unterschiedlichen Höhen, wobei die Ergebnisse interessanterweise auch zeigen, dass eine veränderte Kalibrierung sich vordergründig auf die Genauigkeit der Lage auszuwirken scheint, und die Höhengenaugkeit weitestgehend konstant bleibt (siehe Abbildung 9 bei (Cramer et al., 2017)). Trotzdem erwähnenswert ist allerdings, dass auch die unter gleichbleibenden Bedingungen im Labor durchgeführte Kalibrierung starke Variabilität zeigt (siehe Abbildung 7 bei (Cramer et al., 2017)). Dies deutet auf eine optisch mechanische Instabilität der getesteten DJI Zenmuse X5 hin und unterstreicht die Notwendigkeit einer entsprechenden Voruntersuchung der eingesetzten Kamera, bevor diese fälschlicherweise als stabil betrachtet wird.

Ähnlich Erkenntnisse wurden auch bereits von (Przybilla et al., 2015) erzielt, wo ebenfalls der Einfluss der Aufnahmeanordnung auf die Parameter der inneren Orientierung untersucht wurde. Während die Hauptpunktlage über alle untersuchten Bild- und Passpunktblöcke weitestgehend

stabil blieb, zeigten sich in der Kamerakonstante Unterschiede von bis zu 10 Pixeln (ca.  $35\ \mu\text{m}$ ), wobei dieser Umstand bei flachen Objekten bzw. Kalibriermustern noch deutlich stärker auftritt, als bei Objekten mit stärkerer topographischer Variation.

(Zhou et al., 2019) nähern sich der Problematik der Kalibrierung bei der Auswertung von UAV-Befliegungen mit einem simulationsbasierten Ansatz. Auf systematische Art und Weise werden die Auswirkungen verschiedener Fehler in der inneren Orientierung studiert bzw. wird auch analysiert inwieweit vorhandene Fehler durch die Optimierung im Bündelblockausgleich wieder korrigiert werden können. So führt zum Beispiel eine falsch geschätzte Kamerakonstante zu deutlichen Höhenfehlern der 3D-Rekonstruktion, wobei das Vorhandensein von Schrägaufnahmen die Höhe auf Kosten der 3D-Genauigkeit stabilisiert. Wird eine Optimierung der ursprünglich fehlerbehafteten Kamerakonstante im Bündelblock zugelassen, können die Fehler im Zuge der Simultankalibrierung nahezu gänzlich korrigiert werden, sofern die Befliegung zumindest in mehreren Höhen, idealerweise auch aus verschiedenen Blickwinkeln erfolgt. Wird die Kamerakonstante während der Bildaufnahme verändert, wie es in der Realität zum Beispiel durch den Einfluss des Sonnenlichts bzw. der Umgebungstemperatur passieren könnte, so führt dies laut (Zhou et al., 2019) zur "Durchbiegung" der Rekonstruktion, was vor allem bei großen und langgestreckten Objekten berücksichtigt werden sollte.

Dies fügt sich nahtlos in frühere Simulationsergebnisse von (James and Robson, 2014) und reale Untersuchungen von (Rosnell and Honkavaara, 2012) ein, die den Einfluss einer fehlerhaft geschätzten radialen Verzeichnung studiert haben. (James and Robson, 2014) waren in der Lage mittels SfM den in der Stereophotogrammetrie bekannten, und durch fehlerhafte Radialverzeichnung hervorgerufenen "Doming Effekt" (Wackrow and Chandler, 2008, 2011) zu reproduzieren und zeigten überdies, dass zumindest für den Stereonormalfall diese Effekte durch Simultankalibrierung deutlich reduziert werden können. Von wesentlich höherer Relevanz für die UAV-Photogrammetrie sind jedoch ihre Arbeiten zu Bildbahnen (zehn überlappende Bilder in einer Reihe) bzw. Bildblöcken, wo mehrere überlappende Bahnen untersucht wurden. Im Gegensatz zur Auswertung einzelner Bildpaare, führt hier die Simultankalibrierung nämlich zu einer zusätzlichen Verstärkung der "Schüssel- bzw. Dombildung", was den Schluss nahe legt, dass eine fehlerhafte Radialverzeichnung im Bundle-Adjustment besser fixiert werden sollte, da die durchgeführte numerische Optimierung höchstwahrscheinlich nicht zu einem physikalisch-realistischen Optimum führt. Bessere Ergebnisse konnten durch die Hinzunahme von geneigten und konvergenten Aufnahmen erreicht werden, wobei auf diese Ergebnisse an späterer Stelle noch einmal im Detail eingegangen wird.

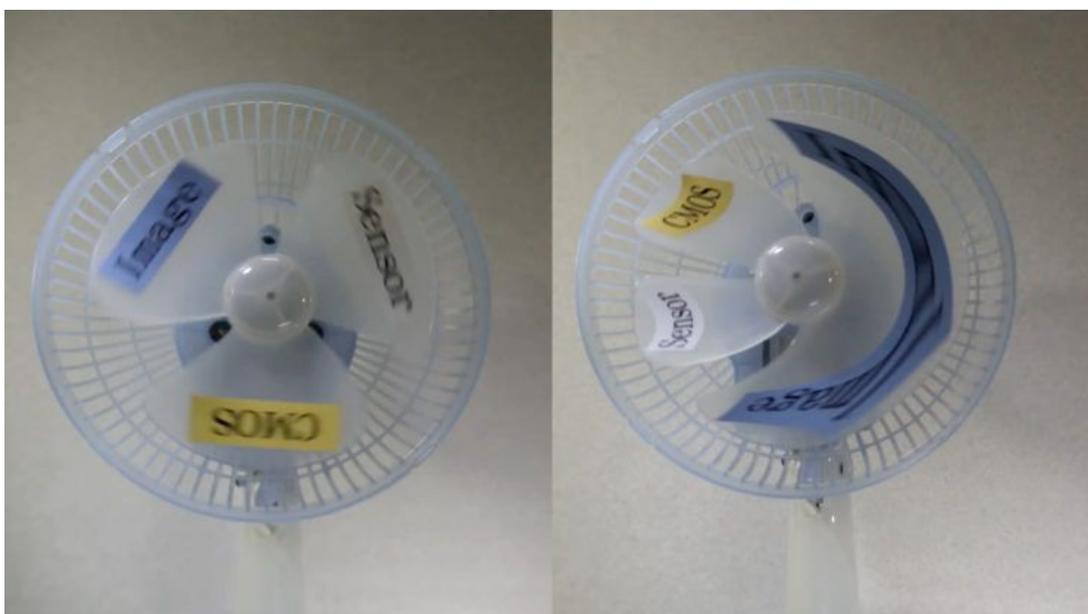
Zusammenfassend kann jedoch gesagt werden, dass die geometrische Qualität und Stabilität der Kamera einen signifikanten, wenn nicht den stärksten Einfluss auf die Qualität der 3D-Rekonstruktion hat, und sich derartige Einflüsse vor allem in einer systematischen Deformation und Krümmung des Bildverbands bzw. der Rekonstruktion äußern. Genauso vielfältig wie die Ursachen - fehlerhafte Brennweite und Radialverzeichnung führen im Ergebnis zumindest zu ähnlichen Effekten - sind aber wohl auch die Möglichkeiten zur Korrektur der beschriebenen Effekte und reichen von "optimierten" Aufnahmeconfigurationen, über vorab durchgeführte und dann fixierte Kalibrierung, bis hin zur Integration entsprechend gewichteter äußerer Bedingungen in den Bündelblockausgleich.

### **Motion-Blur und Rolling-Shutter Effekt**

Zwar spielt bei üblichen Vermessungsflügen die Aufnahme bewegter Objekte nur eine untergeordnete Rolle, allerdings ist die Kamera während der Aufnahme nahezu permanent in Bewegung. Einerseits ist hier die translatorische Bewegung des Flugkörpers während der Aufnahme zu nennen, und andererseits dürfen trotz vorhandener Kamerastabilisierungen durch Gimbal

auch auftretende Vibrationen nicht vernachlässigt werden. Entsprechend muss neben den bereits diskutierten Kenngrößen des Aufnahmesystems vor allem auch der Umgang mit Bewegungsunschärfen diskutiert werden. Die Schwierigkeit hierbei liegt vor allem darin, dass ein menschlicher Anwender nicht wirklich in der Lage ist die Schärfe eines Bildes objektiv zu beurteilen bzw. auch der Einfluss der Bildschärfe auf die weitere Auswertung nur schwer abgeschätzt werden kann. (Sieberth et al., 2015; Strecha, 2017)

Unter dem Begriff der Bewegungsunschärfe werden zumeist mehrere Phänomene subsumiert. Einerseits wird vom sogenannten Motion-Blur, einer auf bestimmte Zonen begrenzte Unschärfe in einem bewegten Bild (Rotor in Abbildung 3.3 links), gesprochen, und andererseits kommt es insbesondere bei CMOS-Sensoren (nahezu alle Consumer-Kameras ohne Wechselobjektiv), die die Bilder zeilenweise speichern, und gängigen Spiegelreflexkameras mit mechanischem Rolling-Shutter zum sogenannten Rolling-Shutter Effekt. Wie in Abbildung 3.3 rechts ersichtlich werden bewegte Objekt nicht lagerichtig sondern an ihrem momentanen Ort abgebildet, gerade Linien werden entsprechend krumm oder verzerrt dargestellt, Kreise werden zu Ellipsen und bewegte Objekt erscheinen "verwischt". (Vautherin et al., 2016; Verhoeven, 2010)



**Abb. 3.3 – Während in der linken Aufnahme mit Global Shutter aufgrund des rotierenden Bauteils lediglich Motion-Blur erkannt werden kann, führt der verwendete Rolling-Shutter in der rechten Abbildung zu einer vollkommen fehlerhaften Abbildung. (Aldred, 2018)**

Motion-Blur kann durch entsprechende Wahl der Fluggeschwindigkeit bzw. möglichst kurze Belichtungszeit vermieden werden, bzw. ist es auch vorteilhaft wenn Kameraachse und Kopterachse in die selbe Richtung weisen.

Rolling-Shutter Effekte wiederum können durch sogenannte Global-Shutter Technologie vermieden werden. Hierbei kommen Sensoren zum Einsatz die das Bild nicht zeilen- und spaltenweise sondern, wie in der analogen Fotografie, auf einmal und als Ganzes aufnehmen. Dies könnten einerseits CCD-Sensoren sein, die die beschriebenen Effekte nicht zeigen, oder aber sind mittlerweile auch eine Reihe an elektronischen Global-Shutter-CMOS-Sensoren am Markt verfügbar. Zum Beispiel verfügen sogar die proprietären DJI-Kameras der Phantom Serie (ab Serie 4) über vergleichbare Technologie. (Greiwe et al., 2013; Greiwe et al., 2017; Wenninger and Wenninger, 2019)

Vor dem Hintergrund der automatisierten Mehrbildauswertung und der notwendigen Güte der Merkmalsextraktion zeigen (Sieberth et al., 2015), dass die Anzahl der detektierten und insbesondere auch die Anzahl der richtig detektierten Bildmerkmale signifikant mit zunehmender Kamerabewegung abnimmt, wobei die Bewegung der Kamera mittels Rütteltisch genau definiert erfolgte. Die Auswirkung auf die weitere 3D Rekonstruktion ist inhärent, wie auch bereits bei (Shah and Schickler, 2012), (Gülch, 2012) und (Lelégard et al., 2012) gezeigt werden konnte. (Wenninger and Wenninger, 2019) berichten vom positiven Einfluss der Global-Shutter Technologie, vor allem bei der Befliegung größerer Areale wo aus zeitökonomischen Gründen höhere Fluggeschwindigkeiten angestrebt werden.

Mit der detaillierten Modellierung des Rolling-Shutter Effekts in der Auswertung beschäftigen sich (Vautherin et al., 2016). Zu diesem Zweck führen sie eine zeitabhängige Position und Orientierung in die Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  (siehe Gl. 2.5 bzw. 2.6) ein, und berücksichtigen somit die Bewegung des Flugkörpers während des Auslesens der Bildinformation. Der gewählte Modellierungsansatz ist zwar nur in der Lage geradlinige translatorische Bewegungen zu berücksichtigen, anhand empirischer Untersuchungen kann jedoch gezeigt werden, dass durch die angewandte Modellierung auch mit doppelter Fluggeschwindigkeit durchgeführte Aufnahmen mit hoher Genauigkeit ausgewertet werden können bzw. zeigt sich auch bei geringer Fluggeschwindigkeit bereits der positive Effekt der nachträglichen Anpassung. Die Autoren versprechen, dass mit der gewählten Modellierung auch Kleinst-UAVs (z.B.: DJI Mavic) für Vermessungszwecke eingesetzt werden können, wobei dies unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Eigenschaften und Auswirkungen des Aufnahmesystems als unrealistisch beurteilt werden darf. (Strecha, 2017)

### 3.2.2 Aufnahmekonfiguration und Bildmaßstab

Neben der zur Aufnahme verwendeten Kamera stellt mit Sicherheit die Aufnahmekonfiguration bzw. die photogrammetrische Netzwerkplanung die wichtigste Einflussgröße auf die erreichte Genauigkeit dar. Die ideale Konfiguration von Strahlenschnitten und die geeignete Wahl des Aufnahmeabstands bzw. Bildmaßstabs hat schon seit jeher einen hohen Stellenwert innerhalb der photogrammetrischen Forschung und wird jetzt im Zusammenhang mit der automatisierten Auswertung mittels Structure from Motion noch einmal kritisch hinterfragt.

Nach (Fraser, 1984) bzw. (Atkinson, 1996) kann die folgende Gleichung zur Abschätzung der Genauigkeit im Objektkoordinatensystem verwendet werden, wobei die 3D-Objektgenauigkeit  $S_{XYZ}$  als Funktion der Bildmessgenauigkeit  $s_{x'y'}$ , des Bildmaßstabs  $m$ , des Design Faktors  $q$  und des Faktors  $k$ , der der Anzahl der beteiligten Stereobildpaare entspricht, geschrieben werden kann:

$$S_{XYZ} = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot m \cdot s_{x'y'} \quad (3.1)$$

Die Bildmessgenauigkeit  $s_{x'y'}$  beschreibt die Unsicherheit der Bildpunktmessung und reicht von 0,05 Pixel für signalisierte Punkte bis zu ca. ein bis zwei Pixel für natürliche und mittels Interest Operator bestimmte Merkmalspunkte. Über die Bildmaßstabszahl  $m$ , die sich als Quotient aus der Aufnahmedistanz (Objektabstand) und der Brennweite (Kamerakonstante) errechnet, wird die Bildmessgenauigkeit  $s_{x'y'}$  in den Objektraum übertragen. Während die beiden bisher genannten Parameter mit Sicherheit auch auf die automatisierte SfM Auswertung übertragen werden können, gestaltet sich diese Überlegung beim Designfaktor  $q$  schon etwas komplexer.  $q$  beschreibt den Einfluss der Aufnahmekonfiguration sowie der äußeren Umstände und nimmt in der Regel Werte zwischen 0,4 und 0,7 an, wobei 0,7 einer Mehrbildkonfiguration mit guten Schnittbedingungen entspricht. Dass durch die Annahme von  $q < 1$  Genauigkeiten möglich sind, die, die

durch den Bildmaßstab gesetzte Grenze sogar noch unterschreiten, muss allerdings mindestens genauso kritisch diskutiert werden, wie der Umstand, dass Designfaktor und Bildmessgenauigkeit als unkorreliert betrachtet werden, was bei automatisierter Korrespondenzanalyse mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht der Fall ist (vgl. Matching Genauigkeit von SIFT bei (Zeisl et al., 2009) bzw. Abschnitt 2.4.1). Der Faktor  $k$  bezeichnet streng genommen die Anzahl der Bilder, die von einem Standpunkt aus aufgenommen wurden. Für typische UAV- Anwendungen wäre hier somit zunächst 1 einzusetzen, für Multi-View-Stereo Auswertungen ist jedoch auch die Anzahl der beteiligten Stereobildpaare üblich. (Atkinson, 1996; Luhmann, 2018a)

Wie bereits angedeutet deuten mehrere Umstände in Gl. 3.1 darauf hin, dass der doch sehr einfache formale Zusammenhang für Structure from Motion nur bedingt geeignet ist. Grundlegende Effekte, wie die Steigerung der Genauigkeit durch kleinere Bildmaßstabszahl bzw. Aufnahmedistanz, oder die Erhöhung der Genauigkeit durch eine größere Anzahl an beteiligten Bildern werden zwar reproduziert, die Vielzahl an möglichen UAV- Aufnahmesituationen bzw. deren Auswirkung auf die Genauigkeit, kann mit diesem einfachen Ansatz jedoch nicht vollständig abgebildet werden. Entsprechend ist es nicht verwunderlich, dass die Suche nach der optimalen Aufnahmeanordnung bzw. das Studium positiver und negativer systematischer Einflüsse sowohl von wissenschaftlicher als auch von praktischer Seite mit großem Einsatz betrieben wird.

Der positive Einfluss geneigter Bilder bzw. konvergenter Schnittgeometrie wird bei (Wackrow and Chandler, 2008) bzw. (Wackrow and Chandler, 2011) diskutiert. Einerseits ist die Genauigkeit der photogrammetrischen Triangulation bei Schnittwinkeln nahe  $90^\circ$  am höchsten (vgl. Vorwärtseinschnitt in der klassischen Geodäsie), andererseits zeigen die Autoren, dass vor allem die Schätzung der inneren Orientierung stabilisiert wird, was bei SfM naturgemäß von noch größerer Relevanz ist als beim Einsatz von photogrammetrischen Messkameras.

Auch (Fraser, 2013) und (James and Robson, 2014) streichen den positiven Einfluss konvergenter Bildverbände für die Simultankalibrierung hervor. Sie zeigen, dass der typischerweise durch falsch geschätzte Brennweite hervorgerufene "Dome-Effekt" durch geneigte Aufnahmen im Bündelblockausgleich weitestgehend korrigiert werden kann. Besonders deutlich wird dieser Umstand anhand der Gegenüberstellung eines vertikalen Streifenflugs mit einem geneigten "Ringflug". Beim konvergenten Ringflug liegen die auftretenden Fehler um eine Zehnerpotenz unter jenen des Streifenflugs und zusätzlich ist die systematische Krümmung nahezu gänzlich verschwunden.

Die Untersuchungen von (Rosnell and Honkavaara, 2012) identifizieren die Überlappung zwischen den Bildern als kritischen Parameter. Während in vielen aus der klassischen Photogrammetrie kommenden Beiträgen von Längs und Querüberlappungen von 65 % bis 80 % gesprochen wird, empfehlen (Rosnell and Honkavaara, 2012) Vorwärtsüberlappungen von mindestens 80 % bzw. besser 90 %. Dadurch wird ausreichende Redundanz der Beobachtungen sichergestellt, die Vollständigkeit der Rekonstruktion gewährleistet und überdies führt die hohe Überlappung zu kurzen Basislinien zwischen benachbarten Bildern, was sich positiv auf die Bildmess- und Matching- Genauigkeit auswirkt bzw. eine automatisierte Korrespondenzanalyse erst ermöglicht.

Die positiven Effekte eines "Kreuzflugs" bzw. der Aufnahme aus unterschiedlichen Entfernungen (Flughöhen) stehen im Zentrum der Arbeiten von (Nocerino et al., 2013), (Przybilla et al., 2015) und (Przybilla, 2016), wobei (Przybilla, 2016) zeigen konnten, dass der positive Einfluss einer Kreuzbefliegung von größerer Relevanz ist als die Integration von RTK-GNSS Beobachtungen in den Bündelblockausgleich. Neben der Tatsache, dass durch die Befliegung aus einer anderen Richtung die Auswirkungen von Abschattungen minimiert werden können, wird durch die Bildaufnahme mit einem anderen Bildmaßstab der gesamte Bildverband stabilisiert. Während Aufnahmen aus geringer Höhe den nötigen Detailgrad liefern, wird das Gesamtsystem durch Aufnahmen aus größeren Höhen stärker verspannt und systematische Deformationen können -

ähnlich wie durch die Hinzunahme von Passpunkten - ausgeglichen und korrigiert werden. Dieser Umstand deckt sich vollumfänglich mit bekannten Grundsätzen der klassischen Photogrammetrie und wird auch bereits bei (Kraus, 1994) diskutiert.

Am Beispiel der Baustellenüberwachung analysieren (Tuttas et al., 2016) verschiedene photogrammetrische Aufnahmestrategien, wobei sowohl terrestrische als auch UAV- Anwendungen gegenübergestellt werden. Die UAV- Photogrammetrie besticht hier vor allem durch Flexibilität und Vollständigkeit, und die erreichten Genauigkeiten liegen wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt in der Größenordnung von rund 1,5 GSD. Sowohl für die terrestrische als auch für die UAV- Anwendung zeigt sich allerdings deutlich, dass die besten Ergebnisse durch eine Kombination verschiedener Flughöhen und Blickrichtungen erzielt werden können. Dies illustriert, dass es nicht möglich ist die Genauigkeit der Nahbereichs- und UAV- Photogrammetrie explizit an einem Einflussparameter festzumachen, sondern dass einerseits mehrere Einflussgrößen gleichzeitig berücksichtigt werden müssen und außerdem die Korrelationen zwischen den Steuerparametern einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am Ergebnis haben. Diese Aussage wird auch von (Rumpler et al., 2014), (Tscharf, 2016), (Kosmatin Fras et al., 2016), (Strecha, 2017), (Luhmann, 2018b), (Salach et al., 2018), (Shay Hostens, 2019) uvm. unterstützt, wobei in keiner der genannten Publikationen versucht wird die funktionalen Zusammenhänge zu erfassen, sondern lediglich der Einfluss und die vorhandene positive Wechselwirkung aufgezeigt und praktisch verifiziert wird.

Im Zuge der Entwicklung von automatisierten Planungstools für die photogrammetrische Bildaufnahme wird oftmals versucht den Einfluss aller Aufnahmeparameter mittels Varianzfortpflanzung zu beschreiben (Aufnahmeentfernung und Höhe relativ zum Objekt sowie Rotation der Kamera um drei Raumachsen). Basierend auf der Minimierung der Fehler an den 3D Punkten werden virtuelle Aufnahmepositionen gesetzt und anschließend deren Beitrag zur Qualität des Modells evaluiert. Dabei wird jedoch zumeist von gleichgewichteten Beobachtungen ausgegangen und der tatsächliche Einfluss der unterschiedlichen Parameter sowie etwaig bekannte a priori Genauigkeiten werden in der Regel nicht berücksichtigt. Überdies wird nur der räumliche Vorwärtsschnitt betrachtet und die Ungenauigkeit bei der automatisierten Bestimmung der äußeren Orientierung findet genauso wenig Eingang in die Ergebnisse wie die Korrelation zwischen innerer und äußerer Orientierung im Zuge der Bündelblockausgleichung. (Alsadik et al., 2012; Atkinson, 1996; Barazzetti, 2017) Für SfM Auswertungen muss die Relevanz vergleichbarer Ansätze somit kritisch hinterfragt werden. Auch wenn Structure from Motion im Grunde nur eine Kombination von bereits bekannten photogrammetrischen Konzepten ist, so muss die Korrelation zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten unbedingt mitberücksichtigt werden. (Luhmann, 2018a)

Zusammenfassend bleibt, dass die grundlegenden Parameter der Bildaufnahme, wie Objektstand, Bildüberlappung und Blickrichtung auch bei der Auswertung mittels SfM genauigkeitswirksam sind und dies sowohl theoretisch als auch empirisch nachgewiesen werden kann. Die Art und Weise des Einflusses ist aber insbesondere aufgrund der starken Korrelation zwischen innerer und äußerer Orientierung, sowie wegen der Abhängigkeit der Bildmessgenauigkeit von der Aufnahmekonfiguration nicht unmittelbar beschreibbar und zum jetzigen Zeitpunkt auch noch nicht wissenschaftlich beschrieben worden.

### 3.2.3 Bildauswertung

Zusätzlich zur eingesetzten Kamera und der Aufnahmekonfiguration kommt naturgemäß auch der Auswertung bzw. der verwendeten Software eine große Bedeutung zu. Während vor allem im wissenschaftlichen Anwendungsbereich auch eine Reihe von frei verfügbaren Programmibliotheken zum Einsatz kommt, haben sich auf dem kommerziellen Markt in den letzten Jahren

vor allem zwei Anbieter behauptet: Agisoft Photoscan bzw. seit 2019 Metashape (Agisoft LLC, 2019) und Pix4Dmapper (Pix4D S.A., 2019).

Im Laufe der letzten Jahre hat Agisoft scheinbar eine gewisse Vormachtstellung eingenommen, was aber eher dem geringeren Preis und nicht so sehr der Ergebnisgüte geschuldet ist. So haben zum Beispiel (Przybilla et al., 2015) Auswertungen je einmal mit Pix4Dmapper und einmal mit Agisoft Photoscan durchgeführt, kamen aber im Zuge der Analyse zu keinen nennenswerten Differenzen in der erreichten Objektgenauigkeit. Auch im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden die beiden Lösungen einmal anhand eines Datensatzes gegenübergestellt, allerdings zeigten sich auch hier keine signifikanten Unterschiede.

Einen größeren Einfluss als die Wahl des Software Anbieters haben natürlich die innerhalb der Auswertung definierten Parameter, wie z.B. die Anzahl der zu prüfenden Features, die Art und Weise der Korrespondenzanalyse (jeder gegen jeden oder unter Einsatz von Vocabulary Trees?), die zulässigen Unterschiede zwischen korrespondierenden Punkten, die Anzahl der Iterationen in der RANSAC-Optimierung, uvm. Im Gegensatz zu den frei verfügbaren Lösungen sind die kommerziellen Anbieter natürlich restriktiver was steuerbare Parameter bzw. allgemein Einflussnahme durch den User betrifft, allerdings kann wohl durchaus gesagt werden, dass Agisoft hier eine etwas liberalere Politik als viele Mitbewerber verfolgt. Wie in Abschnitt 1.2 erwähnt bildet die Auswerteroutine bzw. auch dort wählbare Steuergrößen allerdings nicht den Kern der vorliegenden Forschung. Entsprechend soll diese Thematik an dieser Stelle auch nicht zu viel Raum einnehmen, sondern es wird auf einschlägige Literatur aus dem Bereich Computer Vision wie z.B. (Hartley and Zisserman, 2003) verwiesen.

### 3.2.4 Maßstabs-und Datumsfestlegung

Rein bildbasierte 3D-Rekonstruktionen sind zunächst maßstabsfrei und liegen in einem zufälligen euklidischen Koordinatensystem vor. Sollen die erzeugten Modelle für geodätische Zwecke eingesetzt werden, so ist einer der wesentlichsten Teile der Auswertung durch die Georeferenzierung gegeben, wobei hier grundsätzlich von zwei Methoden gesprochen werden kann.

Bei der indirekten Georeferenzierung erfolgt die Schätzung der Orientierung der einzelnen Bilder über im Objektraum befindliche, sowohl im Objekt- als auch im Modellkoordinatensystem bekannte Passpunkte, die mit entsprechenden photogrammetrischen Methoden (Aerotriangulation bzw. Bündelblockausgleich) in die Auswertung integriert werden. Im Gegensatz dazu werden bei der direkten Georeferenzierung die vom Flugsystem ermittelten Orientierungsparameter (GNSS, IMU, ...) zur Orientierung der Bilder verwendet. Eine kompakte Übersicht zu verfügbaren Systemen und Herausforderungen kann bei (Klingbeil et al., 2016) gefunden werden, wobei auch hier auf bestehenden Forschungsbedarf verwiesen und trotz kommerziell verfügbarer Lösungen noch nicht von marktreife gesprochen wird. Sowohl der indirekten als auch der direkten Methode liegen somit "externe Messungen" zu Grunde, deren innere Genauigkeit unabhängig von der gewählten Methode bei der Genauigkeitsbetrachtung nach Varianzfortpflanzungsgesetz mitberücksichtigt werden muss. Eine über GNSS Messungen registrierte UAV-Befliegung ist in ihrer absoluten Positionsgenauigkeit somit immer durch das eingesetzte GNSS bzw. die gewählte Messanordnung begrenzt, weshalb die Frage nach geeigneten Verfahren und Anordnungen zur Georeferenzierung die wissenschaftliche Diskussion stark mitprägt. (Klingbeil et al., 2016; Kraus, 1994)

Zur direkten Georeferenzierung kann gesagt werden, dass entsprechende Ansätze wohl noch keine vollständige Marktreife erreicht haben. Wenn auch bereits positive Erfahrungsberichte und Anwendungen bekannt sind, ist in vermessungstechnischen bzw. markscheiderischen Anwenderkreisen zurecht noch Skepsis gegeben. So konnte zwar in (Tscharf et al., 2015) gezeigt werden, dass die Integration von On-Board GNSS Information in die Bündelausgleichung bei gleichzeitiger Optimierung der inneren Orientierung in der Lage ist, systematische Deformationen des

Bildverbands zu korrigieren und dass durch die Vielzahl an GNSS Beobachtungen auch sehr hohe relative Genauigkeiten innerhalb der Szene erreicht werden können, eine absolute Orientierung im übergeordneten Objektkoordinatensystem war jedoch nur in der gegebenen GNSS Genauigkeit möglich und die Modelle zeigten absolute Lagefehler in der Größenordnung weniger Meter. Ähnliche Ergebnisse konnten auch bei (Cramer, 2001) erzielt werden, obwohl der Fokus dieser Arbeiten noch lange nicht auf den Einsatz von UAVs und Structure from Motion gelegt wurde.

(Przybilla et al., 2015) berichten über den Einsatz von RTK-GNSS in Kombination mit UAVs bzw. einem Flächenflugzeug für Mapping Applikationen. Es kann gezeigt werden, dass durch überlegte Hinzunahme der RTK-GNSS Positionen in die Auswertung die Genauigkeit gesteigert werden kann, wiewohl nach wie vor Passpunkte zur Lagerung des Bildverbands benötigt werden, Der Haupteinfluss von RTK-GNSS zeigt sich allerdings in einer wesentlich geringeren Anzahl an notwendigen Passpunkten: Mit vier Passpunkten zuzüglich RTK-GNSS kann eine ähnliche Genauigkeit erreicht werden, wie mit 18 Vollpasspunkten ohne GNSS Integration.

Die Entwicklung einer schnellen Mapping-Plattform zum Einsatz bei Unfallszenarien ist das verfolgte Ziel von (Fazeli et al., 2016). Den Schlüssel zum schnellen Einsatz sehen die Autoren in der direkten Georeferenzierung mittels RTK-GNSS. Die erreichten Genauigkeiten belaufen sich in die Größenordnung weniger Dezimeter wie sie anhand von 32 unabhängigen und im Gebiet verteilten Kontrollpunkten zeigen konnten.

Durch die präsentierten Beispiele konnte unterstrichen werden, dass zum heutigen Stand für vermessungstechnische Anwendungen höherer Genauigkeitsanforderung der Einsatz von Passpunkten unumgänglich ist. Dennoch stellt auch der Einsatz von Passpunkten nicht automatisch eine hohe Genauigkeit sicher, sondern das Hauptaugenmerk muss vielmehr auf die Konfiguration und räumliche Verteilung der Punkte, sowie auf die Art und Güte der übergeordneten Einmessung im Objekt- bzw. Zielkoordinatensystem gelegt werden. (Agüera-Vega et al., 2017; Lobnig et al., 2015)

Gewissermaßen im Widerspruch zu den Untersuchungen von (Przybilla et al., 2015) konnte im Zuge der Untersuchungen von (Lobnig et al., 2015) am Beispiel einer Bruchwand am Steirischen Erzberg gezeigt werden, dass die Anzahl der Passpunkte nicht zwingendermaßen der Haupteinflussfaktor auf die Güte der Georeferenzierung ist - die besten Genauigkeiten konnten mit fünf bis acht Punkten erreicht werden. Zur Gewährleistung definierter Genauigkeiten sollte vielmehr auf eine gleichmäßige Verteilung der Punkte in der gesamten Szene geachtet werden. Bekanntermaßen führt Kollinearität der Passpunkte ohnehin zum Scheitern der Parameterschätzung, aber vor allem bei dem untersuchten "Bruchwandobjekt" kann es schnell zum Kippen der Rekonstruktion um eine scheinbare Passpunktachse kommen, wenn die Punkte zu stark entlang einer Linie liegen. Eine gleichmäßige Verteilung von Passpunkten sowohl auf Kopf- als auch Fußetage zeigte sich als unerlässlich und außerdem konnte die Güte durch Hinzunahme von in der Bruchwand befindlichen Punkten nochmals gesteigert werden.

Auch (Caroti et al., 2015) betonen, dass die Anzahl der Passpunkte nicht allein ausschlaggebend für die erreichte Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion ist. Vielmehr können auch sie am Objekt einer kleinen Kirche zeigen, dass eine gleichmäßige Verteilung der Punkte über das gesamte Objekt zu den besten Gesamtergebnissen führt. Werden z.B. nur Punkte auf der umliegenden Grundebene verwendet, nehmen die Fehler mit zunehmender Höhe am Objekt systematisch zu. Entgegen der ersten Idee, dass die Ursache der erkannten Systematik in einer fehlerhaften Georeferenzierung als Folge der schlecht gewählten Passpunkt Konfiguration liegt, deuten die stark unterschiedlichen Ergebnisse der ebenfalls durchgeführten Simultankalibrierung darauf hin, dass neben Fehlern in der Transformation vor allem auch Ungereimtheiten bei der Optimierung der inneren Orientierung auftreten, da die gewählte Passelementanordnung nicht für die angewandte numerische Optimierung geeignet ist. Wird also die Thematik der Georeferenzierung diskutiert,

so muss dies unbedingt auch mit dem notwendigen photogrammetrischen Hintergrundwissen getan werden. Durch die in vielen kommerziellen SfM Anwendungen standardmäßig durchgeführte Simultankalibrierung - die bei "richtiger" Anwendung zugegebenermaßen in der Lage ist die Genauigkeit deutlich zu steigern - werden negative Einflüsse einer ungünstigen Passpunktverteilung noch einmal potenziert, weshalb der Passpunktconfiguration vor allem bei SfM-Anwendungen besonders große Bedeutung beizumessen ist.

(Lindstaedt and Kersten, 2018) beschäftigen sich intensiv mit dem Einfluss der Passpunktconfiguration auf die photogrammetrische Auswertung mittels SfM. Aus der klassischen Aerotriangulation empfehlen sie eine an das Gebiet angepasste Passpunktanordnung, wobei der Passpunktabstand rund sechs bis acht Bildbasen betragen soll, sofern keine weiteren Informationen zur Bildorientierung zur Verfügung stehen. Werden allerdings zusätzlich RTK-GNSS Beobachtungen der Flugtrajektorie in die Auswertung miteinbezogen so sind Passpunkte hauptsächlich zur Kontrolle der geschätzten Orientierungsparameter bzw. zur Lagerung des gesamten Bildverbands von Nöten, weshalb ein Passpunktabstand von 20 bis 30 Basislängen empfohlen wird. Zum empirischen Studium des Einflusses der Passpunktconfiguration berichten die Autoren von mehreren Befliegungen, wobei in jedem Fall eine Auswertung unter Nutzung aller verfügbaren und eine Auswertung mit einer "minimalen" Passpunktconfiguration erfolgte. Aus der Gegenüberstellung der beiden beschriebenen Auswertungen kann deutlich gezeigt werden, dass die 3D-Rekonstruktion bzw. der Bildverband auf die gewählten Passpunkte "hin gespannt" wird, und es zwischen den Punkten zu systematischen Biegungen in der Größenordnung mehrerer Meter kommen kann. Besonders augenscheinlich werden diese Effekte sobald einzelne Punkte entfernt oder hinzugefügt werden (siehe Abb. 19 und 20 (Lindstaedt and Kersten, 2018)). Als kritischen Passpunktabstand nennen (Lindstaedt and Kersten, 2018) zehn Bildbasen, wobei hier insbesondere berücksichtigt werden muss, dass die Bildbasis starke Korrelation mit der gewählten Flughöhe und der definierten Überlappung zeigt.

(Sanz-Ablanedo et al., 2018) entwickeln einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Anzahl und Konfiguration von Passpunkten und der erreichten Genauigkeit bei der Auswertung mittels SfM. Auf Basis von realen Befliegungs- und Bilddaten wurden insgesamt beinahe 3500 verschiedene Pass- und Kontrollpunktanordnungen getestet, wobei aus einer Menge von 101 verfügbaren Punkten jeweils eine unterschiedliche Anzahl als Passpunkt ausgewählt, und die restlichen als Check-Points verwendet wurden. Beginnend bei drei Pass- und 98 Kontrollpunkten, bis hin zu 100 Pass- und lediglich einem Kontrollpunkt wurden für jede definierte Anzahl 35 Iterationen getestet und die Ergebnisse analysiert. Die Ergebnisse (vgl. Abbildung 3.4 links) zeigen deutlich, dass die Restklaffungen an den Passpunkten (Ground Control Points) signifikant geringer sind als die detektierten Differenzen an den Kontrollpunkten (Check Points), diese Unterscheide allerdings mit zunehmender Passpunktanzahl abnehmen und sich die roten und die grünen Punkte in Abbildung 3.4 einander annähern. Dieser Effekt ist zwar mit Sicherheit auch der besseren Stabilisierung durch eine höhere Passpunktanzahl geschuldet, allerdings darf auch der Umstand nicht außer Acht gelassen werden, dass bei höherer Passpunktanzahl schlichtweg weniger Kontrollpunkte im Modell verbleiben und die Wahrscheinlichkeit für Fehler abnimmt. Noch einmal stärker verdeutlicht wird dieser Effekt in Abbildung 3.4 rechts, wo das Verhältnis der mittleren Fehler an den Kontroll- und Passpunkten gegen die Passpunktanzahl pro 100 Bilder im Bildverband aufgetragen ist. Sind die Fehler an den Kontrollpunkten zu Beginn beinahe zehnmal so groß wie die Klaffungen an den Passpunkten, so sinkt das Verhältnis auf den Faktor 3 ab, wenn rund 4 Passpunkte pro 100 Bildern verwendet werden.

Zur Beurteilung der räumlichen Verteilung der gewählten Passpunkte ermitteln (Sanz-Ablanedo et al., 2018) den mittleren Abstand zwischen den Passpunkten sowie die entsprechende Standardabweichung. Ein geringer mittlerer Abstand mit geringer Standardabweichung deutet auf eine schlechte Verteilung bzw. ungünstige Gruppierung der Passpunkte hin. Große Abstände mit

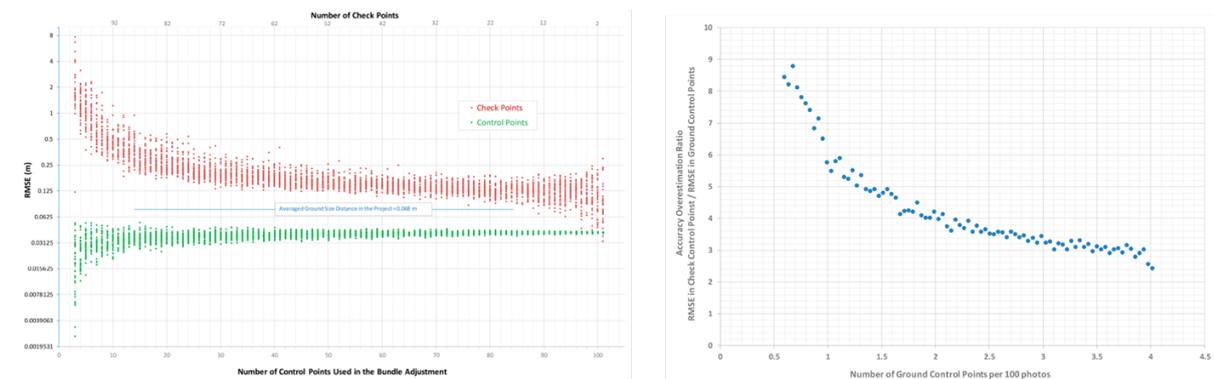


Abb. 3.4 – Links: Die Restklaffungen an den Passpunkten (Control Points) sind deutlich geringer als die Fehler an den Kontrollpunkten (Check Points), wobei (rechts) ein systematischer Zusammenhang zwischen der Anzahl an Passpunkten und der Genauigkeitsdifferenz erkannt werden kann. (Sanz-Ablanedo et al., 2018)

kleiner Streuung implizieren wiederum, dass die Punkte zwar weit verteilt sind, es aber auch große Lücken ohne Passpunkte gibt. Die besten Ergebnisse konnten bei mittleren Distanzen von rund 1800 m und Standardabweichungen von  $\pm 950$  m erreicht werden. Obwohl die konkreten Zahlenwerte natürlich ein Spezifikum des Untersuchungsgebiets und der untersuchten Messanordnung sind, zeigt sich abermals deutlich, dass eine gleichmäßige Verteilung der Passpunkte über das gesamte Gebiet und nicht nur an den Rändern des Bildblocks anzustreben ist (Agüera-Vega et al., 2017).

Zusammenfassend bleibt, dass die Art und Weise der Georeferenzierung natürlich einen sehr starken Einfluss auf die Güte und vor allem absolute Orientierung der photogrammetrische 3D-Rekonstruktion mittels Structure from Motion hat. Allerdings dürfen diese Einflüsse nicht isoliert sondern nur in engem Wechsel mit den übrigen Einflussparametern betrachtet werden. So kann die Integration einer guten Passpunktanordnung in den Bündelblockausgleich zwar etwaige Fehler in der Kamerakalibrierung ausgleichen, gleichzeitig kann aber durch ungünstige Konfiguration auch eine fehlerhafte Schätzung der inneren Orientierung im Zuge der Simultankalibrierung begünstigt werden, und die Ergebnisse verschlechtern. Worin sich wiederum eine günstige von einer ungünstigen Passpunktanordnung unterscheidet wird zwar von allen Anwendern und Forschern verbal auf ähnliche Art beschrieben (gleichmäßige Verteilung im gesamten Gebiet unter Berücksichtigung der Höhenunterschiede und Redundanz in der Aufnahme), eine einheitliche Metrik, die eine objektiv quantitative Beurteilung der Punkteanordnung zulässt fehlt allerdings nach wie vor.

### 3.2.5 Objektbeschaffenheit

Wie in Abschnitt 2.4 im Detail beschrieben basiert die automatisierte Mehrbildauswertung auf dem automatischen Suchen hervorstechender Bildmerkmale bzw. auf dem Finden von Korrespondenzen zwischen diesen. Naturgemäß setzt dies voraus, dass entsprechende Merkmalspunkte auch in der Szene vorhanden sind und die äußeren Bedingungen auch eine Abbildung in ausreichender Qualität zulassen. Die äußere Beschaffenheit des aufzunehmenden Objekts muss im Sinne der Vollständigkeit also auch als entscheidende Einflussgröße genannt werden. Nicht alle Objekte sind unmittelbar für photogrammetrische Vermessung geeignet, wobei in den meisten Fällen die Zugänglichkeit bzw. eindeutige Sichtbarkeit den limitierenden Faktor darstellt. (Luhmann, 2018b)

Das Funktionieren von SfM bzw. von Photogrammetrie allgemein setzt somit das Vorhandensein ausreichend texturierter Objekte voraus (Rumpler et al., 2014) und überdies sollten stark sonnige Tage mit etwaigen Reflexionen sowie ausgeprägtem Schattenwurf vermieden werden (Tscharf, 2016). In schattigen Bereichen ist es aufgrund der Dunkelheit oft nicht möglich eine ausreichende Anzahl an korrespondierenden Objektpunkten zu finden und eine Rekonstruktion der Objektgeometrie ist entsprechend nicht möglich. Bei stark reflektierenden und glänzenden Flächen ist die Korrespondenzanalyse auch erschwert und außerdem ist es schwierig die geeigneten Aufnahmeparameter festzulegen, da sehr stark überstrahlte und eventuell dunkle Oberflächen im selben oder zumindest benachbarten Bild vorkommen. (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b)

Der natürliche Feind jeder flächigen Vermessungsmethode und insbesondere aller bildbasierten Verfahren ist Bewuchs. Bewachsene Oberflächen reagieren sehr empfindlich auf äußere Einflüsse wie Wind und können daher in benachbarten und zeitlich unterschiedlichen Bildern völlig anders abgebildet werden. Im Ergebnis führt dies zu stark verrauschten Rekonstruktionsergebnissen und geringer Objektgenauigkeit. (Tscharf, 2016)

Bei der hier im Fokus stehenden Anwendung im Bergbau spielt Bewuchs und generell die Problematik der Texturierung allerdings nur eine untergeordnete Rolle. Typische Steinbrüche und Tagebaubetriebe zeigen üblicherweise keinen Bewuchs und die freigelegten Gesteinsoberflächen weisen in der Regel auch sehr gute Texturierung auf. Von größerer Bedeutung ist hier mit Sicherheit die Aufnahmesituation und vor allem der gewählte Objektabstand. Bei geringer Flughöhe erweisen sich Gesteinsoberflächen mit Sicherheit eher repetitiv, was die Korrespondenzanalyse erschwert und womöglich zu Mismatches führt. Bei zu großer Objektentfernung kann die lokale Textur von der Kamera nicht mehr aufgelöst werden und die grundsätzlich vorteilhafte Objektbeschaffenheit wird nicht zur Auswertung genutzt.

### **3.3 Zusammenfassung, Analyse und offene Fragen**

Anhand der vorliegenden Literaturanalyse wird einmal mehr deutlich, dass die UAV- Photogrammetrie in den letzten Jahren einen wichtigen Platz in der markscheiderischen und geodätischen Anwendung aber insbesondere auch in der Wissenschaft und Forschung eingenommen hat. Vor dem Hintergrund der Ergebnisverantwortlichkeit kommt hierbei vor allem der erreichten bzw. erreichbaren Genauigkeit eine große Bedeutung zu, was auch im Zentrum der gegenständlichen Forschung steht.

Es zeigt sich, dass mit Kameras ausgerüstete UAVs eine wertvolle Ergänzung zu herkömmlichen Methoden darstellen können, und dass sie durchaus in der Lage sind einen Teil der markscheiderischen Aufgaben (hauptsächlich Nachtragsvermessung und Massenermittlung) unter Einhaltung der gesetzlichen Schranken zu übernehmen. Die erreichte 3D Genauigkeit liegt in der Größenordnung von rund 1,5 GSD, bzw. unter realen Einsatzbedingungen im Bereich weniger Zentimeter (2,5 bis 3 cm) und somit in der selben Größenordnung wie bei RTK-GNSS. Daraus ergeben sich allerdings auch ganz klare Anwendungsgrenzen, sodass gesagt werden muss, dass z.B. Messungen zur Erfassung von Bodenbewegungen in der Größenordnung weniger Millimeter aktuell nicht durchführbar sind.

Nahezu alle wissenschaftlichen Untersuchungen zeigen deutlich, dass ein unkontrolliertes und völlig freies Fotografieren trotz hoher Redundanz nicht zwingendermaßen zu einer hohen Objektgenauigkeit führt, und eine mit Sachverstand durchgeführte Aufnahmeplanung somit genauso wichtig ist wie die Auswahl einer geeignete Kamera. Die besten Ergebnisse können üblicherweise durch eine Kombination verschiedener Aufnahmeentfernungen und Blickrichtungen erzielt werden: Nahe Aufnahmen liefern dabei den nötigen Detailgrad, aus größerer Entfernung aufgenommene Überblicksbilder stabilisieren den Bildverband und vermindern den durch

die Fehlerfortpflanzung im Folgebildanschluss entstehenden Drift, konvergente und verkantete Aufnahmen haben positive Auswirkung auf die Schnittgeometrie und die in-situ Schätzung der radialen Verzeichnungsparameter und die allgemein höhere Redundanz, die sich aus einer höheren Beobachtungsanzahl ergibt führt zur numerischen Stabilisierung der nichtlinearen Optimierung. Überdies steht die erreichte Genauigkeit - wie bei allen photogrammetrischen Verfahren - in unmittelbarem Zusammenhang mit der Bodenauflösung (Ground Sampling Distance, GSD) bzw. dem Aufnahmeabstand. Objekte die kleiner sind als die Bildauflösung können nicht erfasst werden, und entsprechend ist die erreichbare Genauigkeit in dieser Richtung klar begrenzt.

Bei näherer Analyse der möglichen genauigkeitsrelevanten Einflussparameter öffnet sich ein weites Feld. Neben dem offensichtlichen Aufnahmesystem bzw. der Kamera, müssen vor allem die Aufnahmekonfiguration (Parameter der Bildaufnahme), sowie die Art der Bildauswertung und der Maßstabs- und Datumsfestlegung genannt werden. Natürlich ist hier auch noch die Beschaffenheit des aufzunehmenden Objekts zu nennen, wobei dies selten vom Anwender beeinflusst werden kann, und die einzige Eingriffsmöglichkeit in der Regel durch den Verzicht oder die zeitliche Verschiebung des Messeinsatzes gegeben ist.

Es existiert somit eine Reihe unterschiedlicher Einflussgrößen und abhängig vom Anwendungsfall bzw. Autor steht ein anderer im Zentrum der Betrachtungen. So stellen z.B: (Greiwe et al., 2017) oder (Cramer and Leinss, 2016) sehr stark auf die eingesetzte Kamera ab, während bei (Przybilla et al., 2015) oder (Sanz-Ablanedo et al., 2018) die Frage der Georeferenzierung im Zentrum steht. Die präsentierten Ergebnisse bzw. vor allem auch die erkannten systematischen Fehlermuster deuten allerdings klar darauf hin, dass - viel mehr als in der klassischen Photogrammetrie mit kalibrierten Messkameras - starke Korrelationen zwischen den verschiedenen Einflussparametern bestehen, weshalb alle Parameter gemeinsam und auf keinen Fall nur isoliert betrachtet werden dürfen. Entsprechend schwierig ist es auch erkannte Phänomene bzw. systematische Effekte an einer bestimmten Ursache festzumachen, oder aber allgemein gültige Empfehlungen aus der Analyse eines einzelnen Parameters zu geben. Die Aufnahmekonfiguration beispielsweise soll mehrere Aufgaben erfüllen: Offensichtlich soll zunächst einmal versucht werden das gesamte Objekt mit Bildern abzudecken, um Vollständigkeit sowie den ausreichenden Detailgrad zu gewährleisten. Zusätzlich soll die Konfiguration aber ausreichend stabil sein um eine physikalisch richtige Schätzung der inneren Orientierung zu ermöglichen, und gleichzeitig soll sowohl die Zeit für die Bildaufnahme als auch die angehäuften Datenmenge möglichst gering gehalten werden.

Ein typisches "Fehlerbild" der SfM- Auswertung ist der "Dome Effekt" (Fraser, 2013; James and Robson, 2014; Javernick et al., 2014). Das heißt der gesamte Bildverband neigt zu einer kuppelförmigen Verkrümmung, deren Ursache in der klassischen Photogrammetrie zumeist an einer fehlerhaft geschätzten inneren Orientierung (Kamerakonstante und Radialverzeichnung) festgemacht wird. Bei Structure from Motion allerdings, handelt es sich hier sehr häufig um "künstlich fehlerhafte" intrinsische Parameter, die sich als numerisches Optimum in der Bündelblockausgleichung ergeben wenn der Bildverband oder die Passpunktconfiguration für eine derartige Optimierung nicht geeignet sind. Anders ausgedrückt sind charakteristische "domartige" Fehlermuster zumeist ein Ergebnis fehlerhafter intrinsischer Parameter. Die Fehler in der inneren Orientierung ergeben sich allerdings oftmals als Folge externer Parameter wie z.B. einer ungeeigneten Aufnahmeanordnung, die aufgrund der stark automatisierten Auswertung und der auf inneren Genauigkeitsmaßen basierenden Optimierung nahezu ungefiltert Eingang in die Ergebnisse findet.

Der aktuelle Stand des Wissens beschränkt sich darauf die genauigkeitswirksamen Parameter einzeln zu identifizieren und deren Einfluss zu analysieren (one-factor-at-a-time). Werden die unterschiedlichen Untersuchungen (siehe Abschnitt 3.2) allerdings als Gesamtpaket betrachtet und versucht die theoretischen Zusammenhänge herzustellen so wird deutlich, dass die Abhän-

gigkeiten zwischen den einzelnen Größen nicht vernachlässigt werden dürfen, da ein offensichtlich mit Bedacht gewählter Parameter zu negativen Effekten bei einem anderen führen kann und dies wiederum eine falsche Interpretation der Analyse zur Folge haben kann. So geben (Lindstaedt and Kersten, 2018) beispielsweise Empfehlungen für die Passpunktconfiguration anhand von vielfachen der Bildbasis. Die Bildbasis wiederum ergibt sich als Ergebnis der gewählten Flughöhe, Kameraorientierung und Überlappung zwischen den Bildern und hat starken Einfluss auf die Strahlenschnittgeometrie und die Matching-Genauigkeit (Zeisl et al., 2009). Ganz allgemein gilt, dass bei der Auswertung mittels SfM ein höherer Bildüberlapp und dementsprechend kleinere Basisabstände notwendig sind. Dies führt wiederum dazu, dass altbewährte Ansätze der Aufnahmeplanung nicht direkt übertragbar sind und geänderte Betrachtungsweisen der Themen Genauigkeit sowie Flug- und Aufnahmeplanung benötigt werden. Der größte Forschungsbedarf ergibt sich demnach im Finden von Relationen und Zusammenhängen zwischen den verschiedenen Einflussgrößen, und aus der Sicht des praktischen Anwenders soll vordergründig auf jene abgestellt werden, die auch unmittelbar vom Anwender bzw. Piloten beeinflussbar sind. Unter Bezugnahme auf die in Abschnitt 1.3 aufgeworfenen Fragen ergeben sich nach tiefgreifendem Literaturstudium nun die folgenden offenen Punkte, die im Zuge der nachstehend präsentierten praktischen Untersuchungen behandelt werden:

- Welche Parameter der Bildaufnahme beeinflussen die Genauigkeit der rekonstruierten 3D-Objekte bei der Auswertung mittels Structure from Motion? Welche Steuergröße hat starken und welchen nur geringen Einfluss?
- In welcher Form äußern sich die Einflüsse an den Ergebnissen? Kommt es zu systematischen Effekten bzw. Deformationen? Worin liegen die Ursachen für die erkannten Phänomene? Sind es wirklich die analysierten Größen oder werden Abhängigkeiten übersehen?
- Gibt es Gemeinsamkeiten bzw. Parallelen zur klassischen Photogrammetrie und wo liegen Unterschiede?
- Wie muss die Datenaufnahme erfolgen, um reproduzierbare Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit zu gewährleisten?
- Welche Bedeutung kommt den Erkenntnissen bei der markscheiderischen Vermessung im Bergbau zu?

Die vorliegende Arbeit versteht sich gewissermaßen als Handlungsempfehlung für die Anwender der UAV- Photogrammetrie bzw. Structure from Motion. Deswegen soll der Fokus der gegenständlichen Forschung einerseits auf jene Punkte gelegt werden, die sich von der klassischen Photogrammetrie unterscheiden und andererseits sollen, wie schon in Abschnitt 1.2 erwähnt, jene Parameter im Zentrum stehen, die vom Anwender im Feld gesteuert werden können. Vor diesem Hintergrund wird auch der Einfluss der eingesetzten Kamera bewusst ausgeklammert. Einerseits würde dies den Umfang der Untersuchungen ins unermessliche ansteigen lassen, andererseits wird die Auffassung vertreten, dass der Einfluss der Kamera so bestimmend für die Ergebnisgüte ist, dass andere Parameter überprägt würden. Durch die gewählte Kamera wird das grundsätzliche Genauigkeitsniveau festgelegt. Einflüsse der Bildaufnahme gelten allerdings weitestgehend unabhängig davon und können zumindest relational erforscht werden. Entsprechend führt die Analyse verschiedener Kameras nicht zu zusätzlichen Erkenntnissen hinsichtlich der formulierten Forschungsfrage und kann somit entfallen.

# Kapitel 4

## Vorversuche und Methodik

Zur Beantwortung der in Abschnitt 3.3 aufgeworfenen Fragen bedarf es einer tiefgreifenden wissenschaftlichen Untersuchung, die zusätzlich zu der bereits präsentierten Literaturanalyse natürlich auch experimentelle Teile umfassen muss. Das Ziel ist die Beschreibung und Untersuchung eines komplexen multivariaten Systems, mit verschiedenen Eingangs- und Ergebnisgrößen, wobei der Fokus auf der robusten Identifikation genauigkeitswirksamer Steuerparameter, sowie der Ableitung belastbarer Relationen liegt.

Aus den dargestellten Überlegungen und den daraus abgeleiteten Zielen ergibt sich die in Abbildung 4.1 ersichtliche Herangehensweise bzw. auch der Ablauf der durchgeführten Untersuchungen. Im Wesentlichen umfassen die praktischen Versuche drei Abschnitte: Die Versuchsplanung, die Versuchsdurchführung und Datenakquisition und die Analyse der aufgenommenen Daten bzw. die Beurteilung der erreichten Genauigkeiten.



Abb. 4.1 – Die angewandte Forschungsmethodik umfasst im Wesentlichen 3 Abschnitte: Die Versuchsplanung nach dem Konzept der Statistischen Versuchsplanung, die Versuchsdurchführung in Form von Bildaufnahmen im Real- und Modellmaßstab, und die Beurteilung der erreichten Genauigkeit, wobei sowohl innere als auch äußere Genauigkeitsmaßstäbe angelegt werden.

Im Folgenden wird nun jeder der angesprochenen Abschnitte näher erläutert und vor allem auch versucht die Motivation für die gewählte Vorgehensweise darzulegen.

## 4.1 Versuchsplanung

Die zielgerichtete Planung und sorgfältige Durchführung von Experimenten bilden die Grundlage jeder experimentell basierten wissenschaftlichen Arbeit. Soll der Einfluss einer Steuergröße auf das Verhalten einer Zielgröße studiert werden, sind Versuche notwendig, wobei in der Regel verschiedene Stufen der Steuergröße getestet werden und die Reaktion der Zielgröße beobachtet wird (one-factor-at-a-time). Unbedingte Voraussetzung für den Erfolg einer derartigen Analyse ist, dass es gelingt alle anderen Einflussgrößen weitestgehend konstant zu halten. Ist dies jedoch nicht möglich, oder sollen wie im vorliegenden Fall mehrere korrelierte Einflussgrößen analysiert werden, kommt der Versuchsplanung eine noch größere Bedeutung zu. (Kleppmann, 1998; Montgomery, 2013; Siebertz et al., 2010)

Insbesondere in der industriellen bzw. ingenieurwissenschaftlichen Anwendung (Produktentwicklung, Prozessoptimierung) stellt die Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) als Methodik zur systematischen Planung und statistischen Auswertung von Versuchen ein wichtiges Werkzeug dar. Mit verhältnismäßig geringem Aufwand wird durch strukturierte Planung der funktionale Zusammenhang von Einflussparametern und Ergebnissen ermittelt bzw. mathematisch beschrieben. Aus den Ergebnissen kann erkannt werden, welche Werte der Steuergrößen besonders günstig für verschiedene Zielgrößen sind, aber vor allem auch welche Relationen zwischen den einzelnen Steuergrößen bestehen und welche Kompromisse gegebenenfalls eingegangen werden müssen. (Kleppmann, 1998; Montgomery, 2013; Siebertz et al., 2010)

Ohne an dieser Stelle zu tief ins Detail zu gehen, soll kurz das zu Grunde liegende Konzept beschrieben werden, da dies zum Verständnis der später beschriebenen Versuchsanordnung notwendig ist.

Zielgrößen bzw. Qualitätsmerkmale beschreiben das Ergebnis der Versuche. Sie können entweder direkt gemessen oder indirekt aus anderen Größen abgeleitet werden. Auf jeden Fall aber müssen sie geeignet sein das Systemverhalten ausreichend zu beschreiben und eine Beeinflussung durch die Einflussgrößen sollte zumindest im Bereich des Möglichen liegen. Die Menge aller Einflussgrößen wird "Parameter" genannt, wobei grundsätzlich zwischen Steuer- und Störgrößen unterscheiden wird. Während Steuergrößen auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort gehalten werden können, führen Störgrößen zu zufälligem Rauschen in den Ergebnissen, da ihr Wert in der Regel weder einstellbar noch messbar ist. Jene Parameter, die als relevant betrachtet werden und somit Teil des Versuchsplans sind, werden als "Faktoren" bezeichnet und die Einstellungen oder Werte, die ein Faktor annehmen kann, heißen "Stufen" oder "Level". Bei der Wirkung eines Faktors auf das System spricht man von sogenannten "Effekten", wobei – und das ist im vorliegenden Fall von besonderer Bedeutung – auch Wechselwirkungseffekte (Korrelationen) bestimmt werden können. Grundsätzlich werden nach dem Konzept der statistischen Versuchsplanung verschiedene Faktoren auf mehreren Stufen getestet und abhängig von der geplanten Feldkonstruktion miteinander kombiniert. Neben dem zunächst logischen aber sehr aufwendigen Vollfaktorplan – jede Kombination der Faktoren wird getestet – existieren noch eine Reihe von vereinfachten Teilfaktorplänen, wo nicht alle Effekte eindeutig sichtbar werden, allerdings der Aufwand durch eine geringere Versuchsanzahl signifikant verringert werden kann. Die Effekte errechnen sich aus der Differenz zweier Mittelwerte bei unterschiedlichen Faktoreinstellungen (Kontrastmethode), und quantifiziert somit die mittlerer registrierte Veränderung der Zielgröße beim Wechsel der Faktoreinstellung von einer zur nächsten Stufe.

Im Gegensatz zu “one-factor-at-a-time“ werden mehrere Faktoren gleichzeitig verändert, wobei in der Auswertung jedes Ergebnis mehrfach verwendet, auf diese Weise eine Trennung der Einflüsse ermöglicht und gleichzeitig der Informationsgehalt je Einzelversuch erhöht wird. Der Versuchsplan stellt im Grunde ein lineares Gleichungssystem dar, wobei jeder Versuch eine Gleichung liefert, auf deren Basis es möglich ist Beschreibungsmodelle anzupassen. Bei einem Überschuss an Gleichungen (Versuchen) ist es naturgemäß auch möglich das Beschreibungsmodell zu kontrollieren, was auf jeden Fall anzustreben wäre. (Kleppmann, 1998; Siebertz et al., 2010)

Eine unbedingte Voraussetzung zum Erfolg der statistischen Versuchsplanung ist die tatsächliche Durchführbarkeit und vor allem auch Durchführung (gewählte Faktorstufen müssen eingehalten werden) der geplanten Experimente, was unter Realbedingungen allerdings oft nur schwer möglich ist. Besondere Bedeutung kommt auch der Abgrenzung des Systems zu, da eine falsche Abgrenzung und Wahl der untersuchten Stufen zum Scheitern oder zumindest zum Verfälschen der abgeleiteten Zusammenhänge führen kann. In diesem Zusammenhang ist es somit auch wichtig das zu erwartende Ergebnis und dessen Grenzen näher zu spezifizieren: Als Ergebnis der Versuchsplanung bzw. der anschließenden Auswertung erhält man ein empirisches Modell, das den Zusammenhang zwischen den untersuchten Faktoren und den Zielgrößen beschreibt. Da es sich um ein empirisches Modell handelt, wird der untersuchte Zusammenhang allerdings nur im untersuchten Bereich (Abgrenzung des Systems verhindert Extrapolation) und nur im Rahmen der möglichen Form (mathematisches Modell wird vom Anwender vorgegeben) beschrieben. (Kleppmann, 1998; Montgomery, 2013; Siebertz et al., 2010)

Aufgrund der dargelegten Einschränkungen muss bei der statistischen Versuchsplanung bereits am Anfang klar festgelegt werden was untersucht werden soll, und ein grundlegendes Verständnis über die untersuchten Phänomene ist entsprechend schon vor Beginn notwendig. Zu diesem Zweck werden neben dem Studium vorhandener Literatur üblicherweise Vorversuche durchgeführt, die einerseits dazu dienen die Faktoren zu identifizieren und auszuwählen, und andererseits auch helfen die spätere Versuchsanordnung festzulegen bzw. zu spezifizieren.

#### 4.1.1 Vorversuche zur Faktorenauswahl

Ist zwar eine grob abgegrenzte Gruppe an Einflussgrößen bekannt, aber ist noch nicht sicher welche davon auch tatsächlich Eingang in den Versuchsplan finden sollen, werden in der Regel Vorversuche durchgeführt. Im vorliegenden Fall wurden daher die in Frage kommenden Einflussgrößen nach dem Prinzip “one-factor-at-a-time“ anhand verschiedener Datensätze aus realen UAV- Bfliegungen untersucht. Ziel dieser Untersuchungen war neben grundsätzlichem Erfahrungszuwachs eine Liste mit Faktoren, die danach im Rahmen eines statistisch konzipierten Versuchsplans näher analysiert werden sollen.

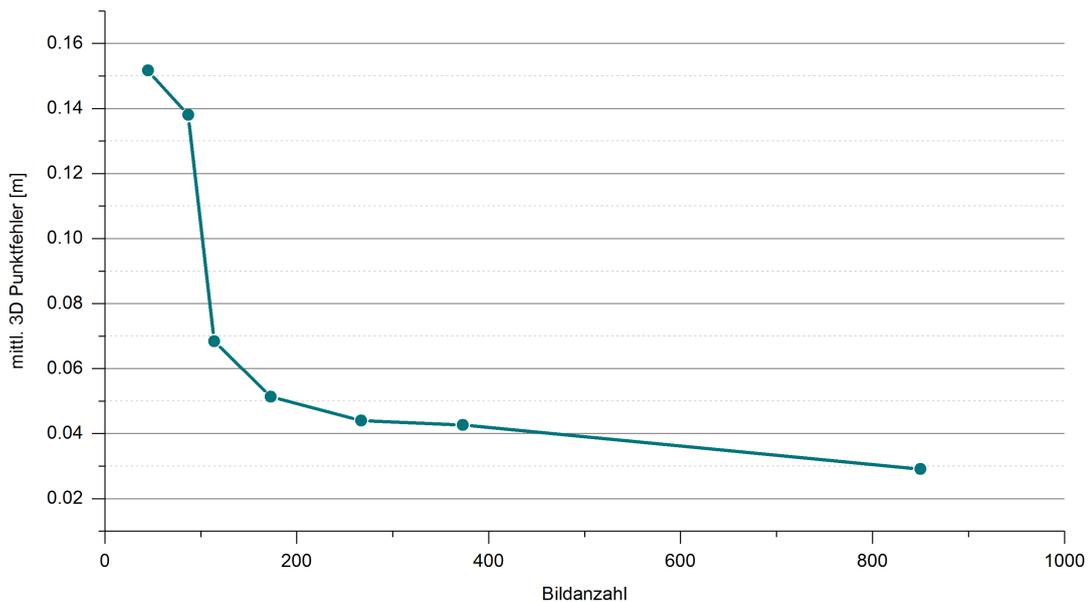
Wie bereits erwähnt wurde auch hier die wohl mächtigste Einflussgröße in Form der verwendeten Kamera ausgeklammert und der Fokus auf geometrische Parameter der Bildaufnahme gelegt. Allen nachfolgend präsentierten Untersuchungen ist die Wahl des Qualitätsmerkmals gemein. Im Zentrum steht bekanntermaßen die erreichte Genauigkeit, weshalb alle Versuche auf einem Vergleich zu einer, mit übergeordneter Genauigkeit hergestellten, Referenz basieren.

#### **Einfluss der Bildanzahl**

Unter Bezugnahme auf den Faktor  $k$  in Gl. 3.1 hängt die Genauigkeit maßgeblich von der Anzahl der, an der Auswertung beteiligten Bilder bzw. Stereobildpaare ab. Je mehr Bilder zur Rekonstruktion verwendet werden, desto höher ist die Redundanz der Bildaufnahme, die

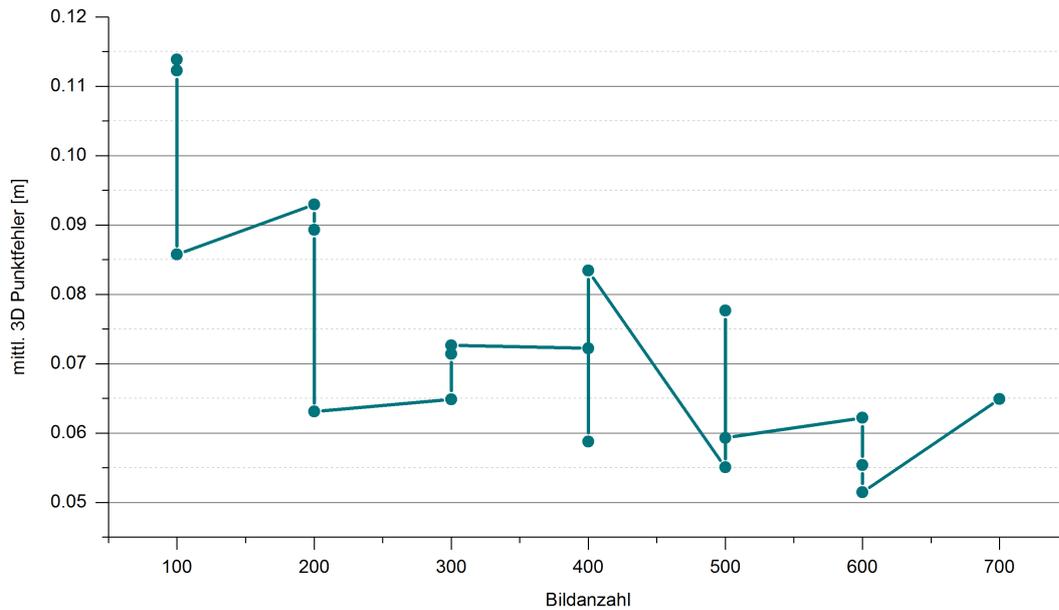
Wahrscheinlichkeit für stabile Matches und Bildverknüpfungen steigt, und auch die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion sollte gesteigert werden können. (Atkinson, 1996; Fraser, 1984)

In Abbildung 4.2 ist eines der ersten Ergebnisse der vorliegenden Forschung dargestellt, und auch hier ergibt sich - aus der Analyse verschiedener Aufnahmekonfigurationen bei der Erfassung einer Bruchwand am Steirischen Erzberg - ein klar ersichtlicher Zusammenhang zwischen der Anzahl der beteiligten Bilder und der mittleren Punktlagegenauigkeit an den untersuchten Prüfpunkten. Mit steigender Gesamtanzahl an Bildern nimmt die Genauigkeit klar zu, womit die Aussage von (Fraser, 1984) und (Atkinson, 1996) zunächst auch für die SfM- Auswertung klar bestätigt werden könnte.



**Abb. 4.2** – Aus der Analyse unterschiedlicher Aufnahmekonfigurationen bei der Befliegung einer Bruchwand am Steirischen Erzberg zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Anzahl der an der Auswertung beteiligten Bilder und der erreichten Genauigkeit.

Die Anzahl an beteiligten Bildern betrachtet allerdings in keiner Weise die dahinter stehende Aufnahmegeometrie (im auffälligsten Fall könnten alle Bilder von einem Standpunkt aus aufgenommen worden sein) und erlaubt somit auch keine entsprechenden Rückschlüsse. Besonders deutlich wird dieser Umstand bei der Analyse zufällig ausgewählter Bilder bzw. daraus generierter Bildverbände. Im Zuge der Versuche wurden aus einer Gesamtheit von rund 1000 Bildern je drei Bildverbände zu je 300, 400, 500, 600 und 700 Bildern erzeugt, und das mit Prüfpunkten versehene Objekt rekonstruiert. Die in Abbildung 4.2 noch deutlich ersichtliche Systematik kann bei den Ergebnissen der zufälligen Bildauswahl in Abb. 4.3 nicht mehr in dieser Deutlichkeit erkannt werden. Zwar zeigt sich eine leichte Tendenz zu höheren Genauigkeiten mit steigender Bildanzahl, allerdings kann ein klarer systematischer Zusammenhang nicht ausgemacht werden. Die verschiedenen Realisierungen gleicher Bildanzahl zeigen starke Variabilität, und die erkennbare Abnahme der Schwankungen mit steigender Bildanzahl ist auch stark in der Tatsache begründet, dass die ausgewählten Datensätze einander - aufgrund der geringeren Anzahl an Freiheitsgraden bei der Bildauswahl - stärker ähnlich sind, und nicht in einer robusteren Rekonstruktion. Dass bei steigender Bildanzahl natürlich auch die Wahrscheinlichkeit steigt in Summe einen stabilen Bildverband zu erzielen ist augenscheinlich, jedoch liegt dies vielmehr an der geometrischen Anordnung der Bilder untereinander und nicht nur an ihrer bloßen Menge.



**Abb. 4.3** – Bei zufälliger Auswahl zuvor definierter Anzahl an Bildern zur 3D Rekonstruktion kann zwar tendenziell eine Steigerung der Genauigkeit mit steigender Bildanzahl erkannt werden. Ein ausschließliches Festmachen der erreichten Genauigkeit an der Anzahl der beteiligten Bilder wäre jedoch zu weit gegriffen.

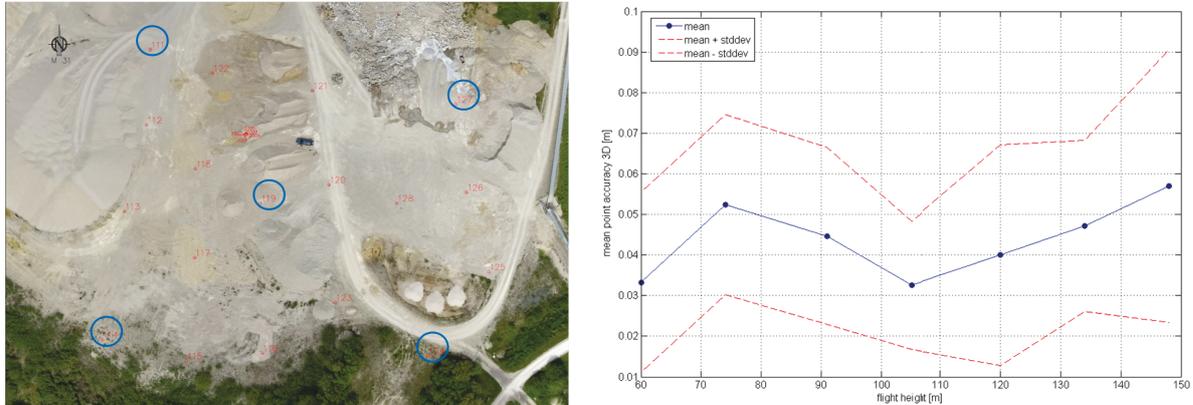
Die Anzahl der beteiligten Bilder ist somit nicht als Grundlage für Rückschlüsse auf die erreichte Genauigkeit geeignet und somit liegt der Schluss nahe, dass es andere Faktoren geben muss, die einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Ergebnisgüte zeigen. Die Bildanzahl scheidet als möglicher Faktor im finalen Versuchsplan jedenfalls aus.

### Einfluss des Objektabstands

Allein aus der Tatsache, dass die Genauigkeit durch die GSD bzw. das Auflösungsvermögen der Bildaufnahme begrenzt wird, kann der Aufnahme- bzw. Objektabstand als eine der wichtigsten Einflussgrößen ausgemacht werden. Die grundlegende Annahme wäre, dass die Genauigkeit mit steigender Aufnahmeentfernung abnimmt, was im Wesentlichen aus dem abnehmenden Detailgrad der Bilder folgt. (Luhmann, 2018a)

Zur Verifizierung dieser Aussage wurde eine Messkampagne mit insgesamt sieben Flügen in unterschiedlichen Höhen durchgeführt (von 60 m bis 150 m in 15 m Schritten) und zur Evaluierung der Genauigkeit wurden im 4,5 ha großen Gebiet insgesamt 19 Referenzpunkte durch Auslegen von Target-Tafeln bzw. durch Aufsprühen von Farbkreisen signalisiert (rot dargestellt in Abb. 4.4 links). Fünf gleichmäßig im Gebiet verteilte Punkte (in Abb. 4.4 links mit Kreisen markiert) wurden als Passpunkte zur Georeferenzierung verwendet und die übrigen Punkte dienten als Prüfpunkte im Sinne der Genauigkeit. Als Sensorplattform wurde das Flächenflugzeug senseFly eBee, ausgerüstet mit einer Sony DSC-WX220 Kompaktkamera verwendet. Durch die Bauart des Flugzeugs waren alle aufgenommenen Bilder Vertikalaufnahmen, wobei sowohl Longitudinal- als auch Lateralüberlapp konstant bei 85 beziehungsweise 70 % gehalten wurden. (Tscharf, 2016) Anhand der Ergebnisse in Abb. 4.4 rechts kann erkannt werden, dass sowohl die mittleren Fehler als auch die Standardabweichungen innerhalb des Gebiets (veranschaulicht durch die roten Linien in Abb. 4.4 rechts, die den  $\pm\sigma$  Bereich andeuten) mit steigender Flughöhe zunehmen. In allen durchgeführten Untersuchungen auffallend ist vor allem auch, dass bei Verwendung der

beschriebenen Ausrüstung die höchste Genauigkeit bei einer Flughöhe von rund 100 m erreicht werden konnte. Die Begründung hierfür liegt vermutlich in einem Optimum aus Erkennbarkeit der Texturen sowie der Passpunkte und den entsprechend genauen Bildmessungen.



**Abb. 4.4 – Links: Fünf (mit Kreisen markiert) der insgesamt 19 Punkte wurden als Passpunkte für die Schätzung der Transformationsparameter im Zuge der Georeferenzierung verwendet. Rechts: Die Gegenüberstellung der mittleren Fehler mit der Flughöhe zeigt eine leichte Zunahme der Fehler mit steigender Höhe, wobei alle Fehler im einstelligen Zentimeterbereich liegen. (Tscharf, 2016)**

Zusammen mit weiteren ähnlich konzipierten Versuchen mit anderen Plattformen zeigt sich auf jeden Fall klar, dass auch bei der Auswertung mittels SfM ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Flughöhe und der erreichten Genauigkeit besteht. Die Flughöhe muss daher unbedingt im Faktorraum des zu entwickelnden Versuchsplans sein, wodurch auch die bereits im Zuge der präsentierten Vorversuche erkannte Systematik noch näher erforscht werden kann.

### Einfluss des Bildüberlapps

Voraussetzung für die Anwendbarkeit von Structure from Motion ist das Vorliegen mehrerer sich überlappender Bilder, die von unterschiedlichen Standpunkten aus aufgenommen wurden. (Rosnell and Honkavaara, 2012) konnten zeigen, dass bei der SfM- Auswertung wesentlich höhere Bildüberlappungen nötig sind als in der klassischen Luftbildphotogrammetrie üblich, was vordergründig auf die abnehmende Genauigkeit der automatisierten Korrespondenzanalyse und generell auf die geringere Anzahl an verbleibenden Beobachtungsgleichungen (korrespondierende Punkte) zurückzuführen ist.

Erste, vorbereitend zu den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten, Versuche im in Kapitel 5 näher beschriebenen Untersuchungsgebiet zeigten, dass für eine robuste Auswertung mittels Structure from Motion eine Bildüberlappung  $>65\%$  angestrebt werden sollte. Vor allem wenn die Aufnahme in regelmäßigem Raster mit nur einer Aufnahmeentfernung erfolgt, kommt es bereits bei einer Überlappung von  $60\%$  zum Scheitern der Bildorientierung, da die Anzahl der belastbaren Beobachtungsgleichungen zur Schätzung aller Unbekannten (innere und äußere Orientierung aller beteiligten Bilder) nicht mehr ausreichend ist. Eine ausreichende Bildüberlappung stellt somit einen limitierenden Faktor in der Prozessierung bzw. Planung von UAV-Aufnahmen dar. Der angesprochene Grenzwert von  $65\%$  kann auch anhand existierender kommerzieller Lösungen zur Flugplanung erkannt werden. So beschränkt beispielsweise “Pix4Dcapture“ die wählbare Bildüberlappung auf den Bereich zwischen  $70$  und  $90\%$  (Pix4D S.A., 2019).

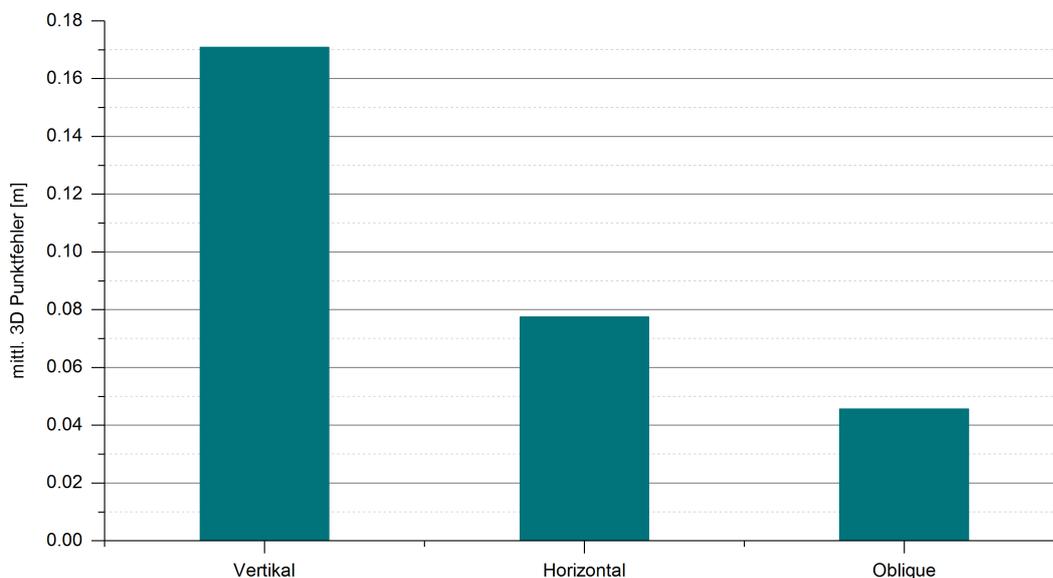
Der Umstand des völligen Scheiterns der Auswertung legt allerdings auch die Vermutung nahe, dass die erreichte Genauigkeit der Rekonstruktionen eine Abhängigkeit von der gewählten

Bildüberlappung zeigt. Der Überlapp zwischen benachbarten Bildern, sowohl innerhalb einer Bildbahn, als auch dazwischen, ist daher ebenso als Faktor im finalen Versuchsplan vorzusehen wie die zuvor erwähnte Flughöhe.

### Einfluss der Schnittgeometrie

Wie bereits mehrfach erwähnt handelt es sich bei der photogrammetrischen Triangulation im Wesentlichen um Winkelmessungen zwischen korrespondierenden Bildstrahlen. Auf Basis der Winkelmessungen werden über räumlichen Rückwärtsschnitt die Aufnahmepositionen und über Vorwärtsschnitt die Koordinaten der Objektpunkte bestimmt. Entsprechend ist es naheliegend, dass ähnlich der herkömmlichen Geodäsie grundlegende Prinzipien auch hier gelten, und dass der Konfiguration der Strahlenschnitte entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. (Kahmen, 2006; Niemeier, 2008)

Zur Prüfung des Einflusses der Schnittgeometrie wurden mehrere Befliegungen durchgeführt, wobei die Schnittwinkel sowohl über variierende Blickwinkel der Kamera relativ zum Objekt als auch zu den anderen Bildern realisiert wurden. Abbildung 4.5 verdeutlicht den Einfluss der Schnittgeometrie anhand der bereits erwähnten Bruchwand am Steirischen Erzberg. Die rund 25 m hohe und 100 m lange, steil stehende Bruchwand sowie die beiden angrenzenden Tagbauetagen wurden einmal ausschließlich mit vertikalen, einmal ausschließlich mit horizontalen und einmal mit einer Kombination aus vertikalen, horizontalen und geneigten Bildern (oblique) aufgenommen.



**Abb. 4.5 – Die Kombination unterschiedlicher Aufnahmerichtungen (oblique) führt aufgrund vorteilhafter Konfiguration von Strahlenschnitten zur höchsten Genauigkeit. Sowohl Objektpunkte als auch Aufnahmepositionen können in diesem Fall am genauesten bestimmt werden.**

Da sich die zur Beurteilung der Genauigkeit herangezogenen Prüfpunkte größtenteils in der Bruchwand befanden und nur wenige auf den angrenzenden Etagen, ist die Genauigkeit des “horizontalen Bildverbands“ wesentlich höher als jene des “vertikalen“. Dieser Umstand ist hauptsächlich auf Abschattungen bzw. auf Nicht-Sichtbarkeit vertikaler Flächen in vertikalen Bildern zurückzuführen, und verdeutlicht einmal mehr die Bedeutung einer an die Objektgeometrie angepassten Aufnahmerichtung. Auffallend ist jedoch auch, dass die höchsten Genauigkeiten durch

die Kombination verschiedener Blickwinkel erreicht werden konnten. Einerseits wird in dieser Konfiguration jeder Objektpunkt durchschnittlich öfter gesehen und die gesteigerte Redundanz erhöht die Positionsgenauigkeit, andererseits wird der Bildverband durch die höhere Anzahl an Verknüpfungen bzw. das Gleichungssystem durch die höhere Anzahl an Beobachtungsgleichungen stabilisiert, was systematische Deformationen des Bildblocks (Dome-Effekt) abschwächt.

Im Rahmen einer zweiten Versuchsserie wurde eine aufgelassener Steinbruch mit einer Generalneigung von rund  $30^\circ$  und teilweise hochstämmigem Bewuchs vermessen. Um zumindest in den Randbereichen der bewachsenen Flächen Einblick unter die Baumkronen zu erhalten wurde das Gebiet einmal aufwärts und einmal abwärts befliegen, wobei die Kamera je einmal  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  bzw.  $45^\circ$  aus der vertikalen geneigt wurde. Überdies erfolgte die komplette Befliegung einmal mit einer Canon EOS 6D mit einem 35 mm Tamron Objektiv und einmal mit einer Panasonic Lumix GH4 mit einem 144 mm Lumix Objektiv. Die Evaluierung der Genauigkeit erfolgte wieder über im Gebiet verteilte und mit übergeordneter Genauigkeit vermessener Pass- und Kontrollpunkte. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem Kamerawinkel von  $45^\circ$  die höchsten Genauigkeiten erreicht wurden. In Relation zum ansteigenden Gelände weisen die Aufnahmeachsen in diesem Fall die höchste Orthogonalität zur Objektoberfläche auf was sich in der höchsten Ergebnisgüte widerspiegelt. Außerdem auffallend ist, dass die Panasonic Lumix mit der deutlich kürzeren Brennweite geringere Sensitivität auf die Kameraorientierung zeigt, als die Canon EOS. Die Strahlenbündel bei kurzer Brennweite sind wesentlich weiter geöffnet, wodurch bessere Strahlenschnitte (nahe  $90^\circ$ ) tendenziell begünstigt werden. Die Orientierung der Aufnahmeachsen relativ zur Objektoberfläche ist in diesem Fall von geringerer Bedeutung.

Zusammenfassend zeigen alle präsentierten Untersuchungen einen deutlichen Einfluss der Schnittgeometrie bzw. Aufnahmerichtung auf die erreichte Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion. Zum Teil ergibt sich die Konfiguration der Strahlenschnitte zwar aus dem gewählten Objektstand und Überlapp, aber die präsentierten Versuche zeigen auch deutlich, dass die Objektgeometrie bzw. die relative Ausrichtung der Kamera starken Einfluss auf die Genauigkeit hat und entsprechend Berücksichtigung im Versuchsplan finden sollte.

### **Einfluss der Georeferenzierung**

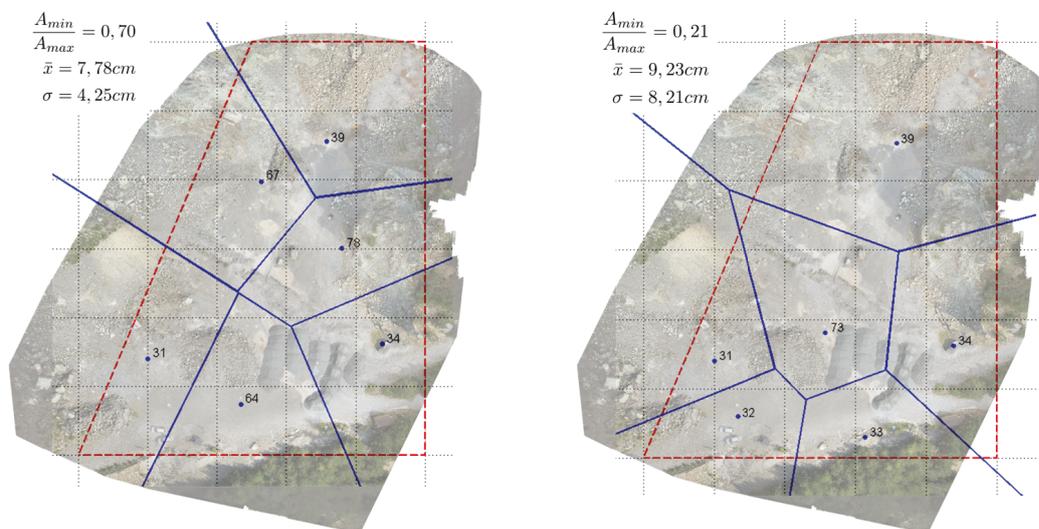
Zur Anwendung der UAV-Photogrammetrie in der markscheiderischen Praxis sind die Ergebnisse in vollständiger Orientierung an das System der Landesvermessung anzuschließen (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013), bzw. muss bei einfachen innerbetrieblichen Vermessungen zumindest eine Skalierung erfolgen. In der Regel kommen hierzu Methoden der indirekten Georeferenzierung (vgl. Abschnitt 3.2.4) bzw. Passpunkte zur Anwendung.

Mit der Zielsetzung den Einfluss der Passpunktanordnung zu verifizieren bzw. falls vorhanden diesen Faktor auf geeignete Weise in den Versuchsplan zu integrieren, wurden verschiedene Passpunktanordnungen getestet und gleichzeitig versucht diese anhand eines quantitativen Maßes zu bewerten.

Abhängig von der Größe und den topographischen Gegebenheiten des aufzunehmenden Gebiets zeigt sich, dass die besten Ergebnisse mit 5-10 Passpunkten erreicht werden können, wobei hinsichtlich der räumlichen Konfiguration darauf zu achten ist, dass die Passpunkte gleichmäßig im gesamten Gebiet verteilt und nicht zu sehr am Rand des Bildblocks platziert werden. Während (Lindstaedt and Kersten, 2018) versuchen die Güte der Passpunktanordnung über vielfache der Bildbasis zu bewerten, zeigte sich anhand numerischer Simulationen, dass die Größe zugeordneter Voronoi Polygone innerhalb eines definierten Untersuchungsgebiets ein geeignetes Bewertungsmaß liefern kann (siehe Abb. 4.6). Die Polygone ergeben sich als Schnittpunkte der Streckensymmetralen zwischen benachbarten Punkten und ordnen somit jedem Punkt eine Art Einwirkungsfläche zu. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass das Verhältnis der kleinsten

( $A_{min}$ ) zur größten ( $A_{max}$ ) Teilfläche in unmittelbarem Zusammenhang mit der Güte der Georegistrierung steht. Übersteigt das Verhältnis von  $A_{min}$  zu  $A_{max}$  den Grenzwert von 0,65, kann von einer gleichmäßigen Verteilung der Passpunkte im Gebiet ausgegangen werden, was in weiterer Folge auch zu einer hohen und im gesamten Gebiet gleichmäßigen Genauigkeit führt. Eine ungleichmäßige Verteilung der Passpunkte ( $A_{min}$  zu  $A_{max} < 0,65$ ), führt hingegen zu hohen Genauigkeiten im Umfeld der Passpunkte und zu negativen Ausreißern in den nicht abgedeckten Bereichen. Die Belastbarkeit der Ergebnisse im gesamten Gebiet kann somit nicht mehr gegeben sein, wodurch die Vermessung im schlimmsten Fall wiederholt werden muss.

Zur besseren Veranschaulichung sind in Abb. 4.6 beispielhaft zwei Passpunktkonfigurationen dargestellt, wobei links eine gut ( $A_{min}$  zu  $A_{max} = 0,70$ ) und rechts ( $A_{min}$  zu  $A_{max} = 0,21$ ) eine schlecht geeignete Anordnung dargestellt ist.



**Abb. 4.6** – Das Verhältnis der kleinsten zur größten Einwirkungsfläche in Form von Voronoi Polygonen ist ein geeignetes Maß zur Bewertung verschiedener Passpunktanordnungen. Links: Gleichmäßige Verteilung führt zu konstant hoher Genauigkeit im gesamten Gebiet. Rechts: Eine ungleichmäßige Verteilung der Passpunkte führt auch zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Genauigkeit. (Tschaf et al., 2016a)

Während im Rahmen einer Testbefliegung mit Passpunktanordnung 1 (links in Abb. 4.6) eine mittlere Genauigkeit  $\bar{x}$  von 7,78 cm und eine Standardabweichung  $\sigma$  von 4,25 cm erreicht werden konnte, zeigen die Ergebnisse für Anordnung 2 (rechts in Abb. 4.6) wesentlich größere Streuung innerhalb des Gebiets. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse, Fehler an jedem der Prüfpunkte für Anordnung 1 (rot in Abb. 4.7) und Anordnung 2 (grün in Abb. 4.7), verdeutlicht diesen Umstand noch ein weiteres Mal. Vor allem an den im Norden des Untersuchungsgebiets liegenden Prüfpunkten 38 und 39 zeigen sich große Differenzen. In diesem Bereich zeigt Anordnung 2 eine schwache Passpunktdeckung und die Rekonstruktion ist hier entsprechend schwächer gestützt.

Die vorgestellten Versuche machen deutlich, dass die Größe der durch die zugeordneten Voronoi Polygone gegebene Einwirkungsfläche ein geeignetes Maß zur Bewertung verschiedener Passpunktanordnungen ist. Die dimensionslose Kennzahl ist vor allem unabhängig von den Parametern der Bildaufnahme wähl- und beurteilbar, und ermöglicht eine objektive Bewertung, die auch für nicht photogrammetrische Anwendungen verwendet werden kann. Durch die quantitative Bewertungsmöglichkeit ist auch eine Integration in die Versuchsplanung unkompliziert

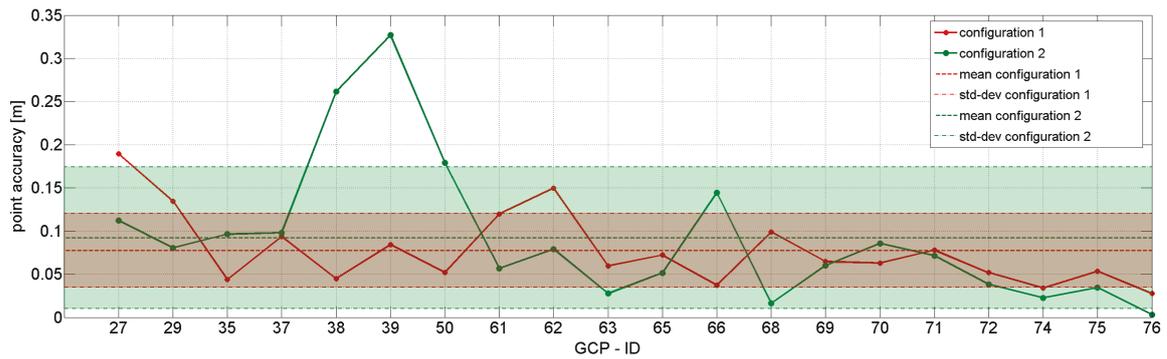


Abb. 4.7 – Vor allem die im Norden des Untersuchungsgebietes liegenden Punkte 38 und 39 zeigen bei Anwendung von Konfiguration 2 große Fehler als Resultat der fehlenden Passpunktdeckung. (Tscharf et al., 2016a)

möglich, was vor allem eine relationale Gegenüberstellung mit anderen Faktoren und eine unabhängige Analyse des Passpunkteinflusses ermöglicht.

Neben der räumlichen Verteilung der Punkte, kommt natürlich auch der Erkenn- bzw. Identifizierbarkeit der Punkte eine große Bedeutung zu, wobei heutzutage häufig sogenannte “Fiducial Marker“ zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich um computergenerierte Elemente (in der Regel schwarz weiß binär codiert), die in der Szene automatisch detektiert und identifiziert werden können, wodurch nicht nur der Ungenauigkeitsfaktor Mensch ausgeschlossen, sondern vor allem auch der Prozess der Datenaufbereitung effizienter gestaltet werden kann. Mit dem Ziel eine robuste Lösung zum Monitoring von Naturgefahren bzw. Stein- und Felssturzereignissen zu entwickeln wurde eine Analyse unterschiedlicher Passpunktsignalisierungen durchgeführt, und sowohl die Häufigkeit als auch die Genauigkeit der Detektion untersucht (Tscharf et al., 2019a).

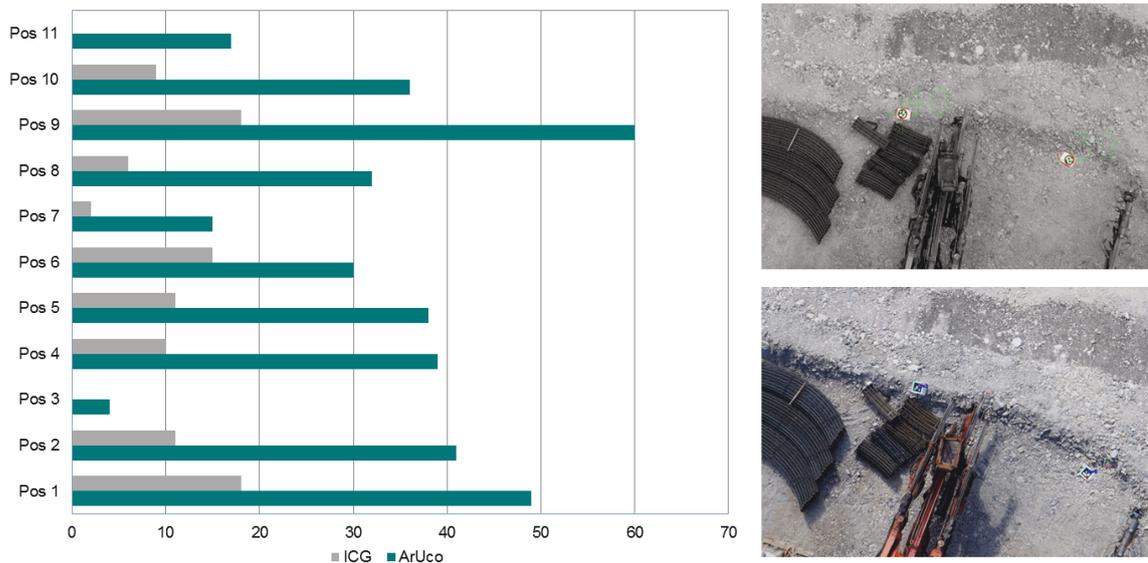


Abb. 4.8 – Aus der Gegenüberstellung der Detektionshäufigkeit geht eindeutig hervor, dass die quadratischen ArUco marker (rechts unten) wesentlich häufiger in den Bildern erkannt werden können, als die kreisrunden ICGs (rechts oben). (Tscharf et al., 2019a)

Die Gegenüberstellung des Systems ArUco (Garrido-Jurado et al., 2014) mit einer Entwicklung des Instituts für Maschinelles Sehen und Darstellen der TU Graz (ICG) (Rumpler et al., 2014)

(siehe Abb. 4.8) zeigt deutlich, dass die quadratischen ArUcos signifikant häufiger erkannt werden können als die kreisrunden Signalisierungen des ICG. Dieser Umstand ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die einfachere Gestaltung des Binärcodes zurückzuführen. Während die „ICG Marker“ als rotationsinvarianter 10Bit Code ohne Startpixel ausgeführt sind, wurden die ArUcos mit 4x4 Bit + 1 Borderbit erzeugt, und in Relation zur Gesamtgröße des Markers nimmt die „Codierung“ bei den kreisrunden Markern nur rund 31 % ein, während die Fläche der ArUcos nahezu zur Gänze für die Codierung verwendet werden kann. (Tscharf et al., 2019a)

Wird neben der Häufigkeit allerdings auch die Güte der Detektion betrachtet (siehe Vergleich in Tab. 4.1) so zeigt sich allerdings, dass die Erkennung des kreisrunden Signals mit höherer Genauigkeit erfolgt. Dies liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit daran, dass die Bestimmung des Mittelpunkts eines Kreises bzw. einer Ellipse in der Bildverarbeitung mit höherer Genauigkeit durchgeführt werden kann, als dies durch den Schnittpunkt der Diagonalen bei quadratischen Objekten möglich ist, wobei insbesondere auch die projektive Verzerrung mitberücksichtigt werden muss. (Hartley and Zisserman, 2003; Luhmann, 2018b)

Zur Objektivierung der Analysen wird auch für die Untersuchungen der gegenständlichen Arbeit eine automatisierte Pass- und Kontrollpunktdetektion angestrebt. Einerseits wird die Auswertung dadurch beschleunigt, andererseits wird der Faktor Mensch durch die automatische Bildmessung weitestgehend eliminiert. Aufgrund der erkannten hohen Genauigkeit und der geringeren Fehleranfälligkeit wird für alle weiteren Versuche die kreisrunden Marker des ICG verwendet. Dadurch soll eine hohe Analysenschärfe sichergestellt und eine potentielle Störgröße ausgeschlossen werden.

**Tab. 4.1 – Gegenüberstellung der Restklaffungen verschiedener Markertypen (Tscharf et al., 2019a)**

	<b>X error</b> <b>(cm)</b>	<b>Y error</b> <b>(cm)</b>	<b>Z error</b> <b>(cm)</b>	<b>Total</b> <b>(cm)</b>	<b>Image</b> <b>(pix)</b>	<b># of points</b>
<b>ICG</b>						
manual	1,066	1,301	1,491	2,260	0,462	7
automated	0,767	0,567	1,166	1,527	0,492	5
<b>ArUco</b>						
manual	1,722	2,896	1,721	3,783	0,451	7
automated	1,622	2,583	1,665	3,474	0,600	7
<b>manuell</b>						
ICG	1,066	1,301	1,491	2,260	0,462	7
ArUco	1,722	2,896	1,721	3,783	0,451	7
<b>automatisch</b>						
ICG	0,767	0,567	1,166	1,527	0,492	5
ArUco	1,622	2,583	1,665	3,474	0,600	7

#### 4.1.2 Parameterauswahl und Festlegung des Versuchsplans

Werden die präsentierten Vorversuche in ihrer Gesamtheit betrachtet, so ergibt sich zunächst eine umfassende Parameterliste und außerdem können auch bereits spezifische Effekte vermutet werden (z.B. Einfluss der Flughöhe). Andererseits zeigen die Ergebnisse aber auch, dass nicht alle erkannten Phänomene in unmittelbarem Zusammenhang mit dem untersuchten Parameter stehen (z.B. Einfluss der Bildanzahl), oder aber die betrachteten Parameter nur das Ergebnis

anderer Steuergrößen sind. Faktoren müssen jedoch gezielt und reproduzierbar eingestellt werden und überdies ist es wichtig, dass sich Kombinationen von Faktorstufen nicht gegenseitig ausschließen, um die praktische Durchführbarkeit der Versuche nicht zu gefährden.

Die Bedeutung einer Einflussgröße, die nicht als Faktor im Versuchsplan enthalten ist kann natürlich nicht erkannt werden und wird eine wichtige Einflussgröße unkontrolliert verändert, können die Ergebnisse verfälscht werden. Eine geschickte Auswahl der Faktoren ist daher erfolgsentscheidend und die Bewertung und Gewichtung potentieller Einflussgrößen ist daher von größter Wichtigkeit.

Üblicherweise erfolgt eine Einteilung der Parameter in zwei Gruppen: Faktoren, die im Versuchsplan analysiert werden und übrige Parameter, die während der Versuche weitestgehend konstant gehalten werden sollen. Die Stoßrichtung der gegenständlichen Versuche ist die Analyse der geometrischen Aufnahmeparameter bei UAV- Befliegungen im Bergbau. Es sollen vor allem jene Parameter in die Betrachtung einbezogen werden, die vom Piloten im Feld steuerbar sind, und unter dem Gesichtspunkt der Praktikabilität auch tatsächlich gesteuert werden. Sämtliche Eigenschaften des aufzunehmenden Objekts oder auch Einflüsse der Witterung sollen entsprechend nicht betrachtet werden, wiewohl alle Untersuchungen in stabilen Untersuchungsgebieten erfolgen, die zumindest im Versuchszeitraum keinen geometrischen Veränderungen unterliegen. Außerdem wird versucht starke Variationen in der Beleuchtung und den Witterungsverhältnissen zu vermeiden, was naturgemäß nur innerhalb bestimmter Schranken möglich ist. (Kleppmann, 1998; Siebertz et al., 2010)

### **Faktoren**

Unter Berücksichtigung der Literaturanalyse (Abschnitt 3.2), der durchgeführten Vorversuche (Abschnitt 4.1.1) und der praktischen Einschränkungen im Betrieb werden die folgenden fünf Faktoren definiert, die überdies auch in den meisten verfügbaren Flugplanungswerkzeugen (z.B.: Pix4Dcapture oder UgCS) implementiert sind:

1. Flughöhe (A)
2. Überlapp longitudinal (B)
3. Überlapp lateral (C)
4. Blickwinkel relativ zum Objekt (D)
5. Passpunktkonfiguration zur Georegistrierung (E)

Entscheidend für die Auswahl ist neben dem vermuteten bzw. vorhandenen Einfluss auf die Genauigkeit vor allem die Tatsache, dass alle fünf Faktoren unabhängig von einander eingestellt und variiert werden können, sowie der verhältnismäßig geringe Aufwand bei der Veränderung der Stufen. Die gewählten Faktoren ermöglichen eine vollständige geometrische Beschreibung des Bildverbands und repräsentieren somit die “stärksten Hebel“ zur Planung der räumlichen Aufnahmekonfiguration.

Die Flughöhe ist neben dem gewählten Aufnahmesystem der entscheidendste Faktor für den Detailgrad der Bilder bzw. die erreichte Bodenauflösung. Sie begrenzt die erreichte Genauigkeit nach unten und hat außerdem auch starken Einfluss auf den zeitlichen Aufwand zur Vermessung im Feld. Die Überlappung innerhalb einer Flugbahn bzw. in Flugrichtung (Überlapp longitudinal), die Überlappung zwischen den Flugstreifen (lateral) und die Blickrichtung der Kamera relativ zur aufgenommenen Objektfläche beschreiben gemeinsam die Schnittkonfiguration

der Bildstrahlen und treten hier an die Stelle des "Höhe zu Basis Verhältnisses" im Stereornormalfall. Die Konfiguration der Passpunkte bei der Transformation in ein übergeordnetes Koordinatensystem ist zwar kein alleiniges Problem der Photogrammetrie, soll aber - aufgrund der Tatsache, dass dieser Schritt bei UAV-Befliegungen nach heutigem Stand der Technik noch immer ein unbedingtes Erfordernis darstellt - dennoch in die Untersuchungen mit einbezogen werden, um ein vollständiges Bild der nötigen Außendienstarbeiten geben zu können.

Der kritischen Anmerkung, dass eine Untersuchung der genannten Faktoren nicht notwendig sei, da der Einfluss offensichtlich und ohnehin bekannt ist, sei an dieser Stelle entgegengestellt, dass im Rahmen der Forschung nicht nur das Vorhandensein eines Einflusses analysiert werden soll, sondern vielmehr die Stärke des Einflusses quantifiziert und Relationen zwischen den einzelnen Faktoren abgeleitet werden sollen. Außerdem eröffnet die Versuchsplanung samt statistischer Auswertung eine neue Innensicht und erlaubt vor allem auch eine getrennte Betrachtung jedes Faktors, was bei einer anderen Versuchsanordnung aufgrund der vorhandenen Korrelation zwischen den Einflussgrößen nicht immer möglich wäre.

### **Faktorstufen**

Neben den gewählten Faktoren sind vor allem die gewählten Einstellungen, die sogenannten Faktorstufen von Bedeutung. Der Effekt eines Faktors hängt von den gewählten Stufen ab. Kleine Stufenabstände führen zu kleinen Effekten, weshalb empfohlen wird die Stufenabstände aufeinander abzustimmen. Ist wenig über die Wirkung der gewählten Faktoren bekannt, so sollten die Systemgrenzen weitestgehend ausgenützt und "Randstellungen" getestet werden. Dies stellt sicher, dass die abgeleiteten Aussagen zumindest ein Mindestmaß an allgemeiner Gültigkeit haben und die praktische Relevanz der Ergebnisse gegeben ist.

Aufgrund der verhältnismäßig großen Anzahl an Faktoren sollen zunächst nur je zwei Stufen definiert werden. Ein solcher Versuchsplan liefert den Nachweis über die Relevanz der Faktoren, ermöglicht die Ermittlung eines linearen Effekts auf die untersuchte Zielgröße und liefert Anhaltswerte, welche Stufe eines jeden Faktors günstig ist (Lösung von Zielkonflikten).

Beim Faktor der Flughöhe ergeben sich die Grenzen aus den rechtlichen Rahmenbedingungen (siehe Abschnitt 2.1.3) sowie aus der technischen Sinnhaftigkeit bzw. Durchführbarkeit. Nach oben ist die Grenze durch die gesetzlich normierte maximale Flughöhe von 150 m gegeben und am unteren Ende wird der Faktorraum durch eine minimale Flughöhe von rund 30 m zur sicheren Flugdurchführung begrenzt. Unterhalb dieser Höhe können Flächen bergbaulicher Dimension nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll vermessen und außerdem kann ein kollisionsfreier Flug durch schwierige topographische Bedingungen nicht mehr ausreichend sichergestellt werden.

Da die meisten UAV-Befliegungen nach wie vor als regelmäßige Rasterflüge geplant werden, soll diese Form des Bildverbands auch hier Anwendung finden. Die durchgeführten Vorversuche machten deutlich, dass bei SfM-Auswertung eine Bildüberlappung von 70 % die untere technische Grenze darstellt. Vor allem bei Aufnahmen aus größeren Höhen, wo bei geringem Überlapp nur mehr wenige Bilder zur Abdeckung des zu erfassenden Gebiets notwendig sind, wird die Anzahl der mit ausreichender Genauigkeit gefunden Korrespondenzen bzw. Beobachtungen zu klein und die Auswertung scheitert. Die theoretisch obere Grenze liegt zwar bei knapp unter 100 % - bei einer Überlappung von 100 % ändert sich die Aufnahmeposition nicht mehr und eine 3D Rekonstruktion wird unmöglich - allerdings wird sinnvollerweise von 90 bis 95 % gesprochen. Entsprechend sollen sowohl für die longitudinale als auch die laterale Überlappung die Faktorstufen mit 70 bzw. 90 % festgesetzt werden, was außerdem noch den praktischen Vorteil bietet, dass sich die 70 % Datensätze durch Weglassen einzelner Aufnahmen aus den hochüberlappenden mit 90 % ergeben.

Bestehende Ansätze zur photogrammetrischen Netzwerkplanung gehen davon aus, dass die höchsten Genauigkeiten mit orthogonal zur Objektoberfläche stehenden Aufnahmeachsen erreicht werden können, obwohl damit eine geringere Genauigkeit in Aufnahme­richtung in Kauf genommen wird (Atkinson, 1996). Bei Luftbildaufnahmen horizontaler Geländeoberflächen wäre die Orthogonalität durch vertikale Aufnahme­achse gegeben, wobei bei einer Blickrichtung von 45° schon sehr stark “über das Objekt hinweg geblickt“ wird und eine noch flachere Aufnahme nicht mehr sinnvoll erscheint. Auf Basis dieser Überlegungen und den erkannten Effekten aus den in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Vorversuchen sollen die Stufen für den Faktor Blickwinkel relativ zum Objekt mit 45° (schleifend) bzw. 90° (Nadir) gewählt werden.

Um auch den Einfluss der Passpunkt­konfiguration in den Versuchsplan integrieren zu können, soll die in Abschnitt 4.1.1 beschriebene Bewertungsmethode angewandt und basierend auf dem Verhältnis von kleinster zu größter Einwirkungsfläche je eine gute ( $A_{min}$  zu  $A_{max} > 0,65$ ) und eine schlechte ( $A_{min}$  zu  $A_{max} < 0,65$ ) Passpunkt­konfiguration entworfen werden.

### Wiederholung

Einer der kritischsten Punkte jeder experimentellen Arbeit ist die Analysenschärfe bzw. die Versuchsstreuung. Sind die durch die Faktorvariation hervorgerufenen Effekte geringer als die Genauigkeit in der Bestimmung der Zielgröße können die Effekte nicht erkannt werden und die Versuche werden wertlos. Es ist bekannt, dass der Mittelwert einer erhöhten Anzahl an Einzelmessungen eine genauere Schätzung der gemessenen Größe liefert als die Einzelmessung und dass diese Vorgehensweise bei genügend großer Zahl an Einzelmessungen auch ein erprobtes Mittel zur Verminderung des Versuchsrauschens ist. Die Wiederholung des ein und desselben Versuchs erhöht somit die Aussagekraft bzw. noch viel wichtiger wird erst durch die Wiederholung von Versuchen eine Aussage zur Versuchsstreuung ermöglicht. (Niemeier, 2008)

Im vorliegenden Fall soll daher jeder Versuch zweimal durchgeführt werden. Damit ist allerdings nicht nur die zweimalige Durchführung der SfM Auswertung gemeint, sondern wird vielmehr die Bildaufnahme ein zweites Mal auf unabhängige Weise wiederholt.

### Randomisierung

Ein weiterer wichtiger Grundsatz der Versuchsplanung ist die Randomisierung. Durch willkürliche Festlegung der Versuchsanordnung soll verhindert werden, dass die Ergebnisse durch Trends bzw. systematische Zusammenhänge zwischen den Faktorstufen beeinflusst werden. Wird z.B. der Einfluss der Temperatur auf einen Fertigungsprozess untersucht, soll ein stetiges Aufheizen und damit systematisches Steigern der Temperatur vermieden werden, da Zieltemperatur und Aufheizvorgang mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht als unabhängig betrachtet und somit auch Abhängigkeiten zwischen den Versuchen nicht ausgeschlossen werden können. Zur statistischen Analyse der Versuchsergebnisse muss jedoch Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Versuchen gegeben sein, da sonst signifikante Faktoreinflüsse erkannt werden können, die in Wahrheit nur auf den Einfluss einer nicht kontrollierten Störgröße zurückzuführen sind.

Im vorliegenden Fall ist die Gefahr der fehlenden Unabhängigkeit zwischen den Versuchen grundsätzlich als gering einzuschätzen. Die einzige Gefahr ist durch den Umstand gegeben, dass die Datensätze mit geringem Überlapp als Teilmenge aus den stark überlappenden entnommen werden. Das bedeutet, dass ein etwaig unscharfes Bild im Ursprungsdatensatz auch in der Teilmenge enthalten sein kann. Da allerdings nicht davon auszugehen ist, dass ein einziges an der Auswertung beteiligtes Bild in der Lage ist den gesamten Bildverband zu stören, bzw. solche Bilder in der Regel aussortiert und nicht orientiert werden, werden alle durchgeführten Versuche als unabhängig betrachtet.

Trotzdem soll das Prinzip der Randomisierung angewandt und die Versuche in zufälliger Reihenfolge durchgeführt werden. Zur Analyse der Ergebnisse können diese ja wieder in inhaltlich relevante Ordnung gebracht werden.

### **Blockbildung**

Unter Blockbildung wird die Einteilung der Einzelversuche in Gruppen (Blöcke) verstanden, so dass innerhalb jedes Blocks die zufälligen Unterschiede möglichst gering sind und jede Faktorstufenkombination möglichst gleich oft auftritt. Die praktische Relevanz besteht in der Möglichkeit der Analyse nicht steuerbarer Einflussgrößen, wodurch in weiterer Folge die Faktorauswahl überprüft werden kann. (Siebertz et al., 2010)

In den gegenständlichen Versuchen könnte hiermit z.B. der Einfluss der Witterung gemeint sein. Während davon auszugehen ist, dass alle an einem Tag durchgeführten Befliegungen mehr oder weniger zu den selben Witterungsbedingungen aufgenommen wurden, können die Belichtungsverhältnisse an einem anderen Tag völlig anders sein. Die Belichtungssituation hat zwar mit Sicherheit einen starken Einfluss auf die Ergebnisse, entzieht sich aber nahezu völlig dem Einfluss des Anwenders vor Ort und kann vor allem auch nicht eindeutig gemessen und gesteuert werden. Als Faktor ist das Wetter somit zwar nicht geeignet, allerdings könnten alle Flüge eines Tages zu einem Block zusammengefasst werden und anschließend der Einfluss des Faktors "Block" bestimmt werden. Weißt dieser Faktor einen größeren Effekt auf, als die für die Versuchsdurchführung gewählten, muss die Versuchsanordnung noch einmal hinterfragt werden, da die Menge der verbliebenen Störgrößen zu groß ist und die gewählten Faktoren das Systemverhalten anscheinend nicht ausreichend beschreiben können.

Obwohl der Störfaktor "Witterung" nicht unmittelbar vom Anwender im Feld beeinflusst werden kann, ist es notwendig diese Einflüsse von den "echten" bzw. untersuchten Effekten zu trennen. Aus diesem Grund soll wie bereits kurz angedeutet vorgegangen werden: Die Aufnahmen sollen an zwei unabhängigen Tagen durchgeführt werden, wobei an jedem der beiden Tage alle notwendigen Befliegungen durchzuführen sind. Die angesprochene Wiederholung der Versuche wird somit als Block betrachtet, was zwar die Beurteilung des Analysefehlers verfälscht, allerdings die Möglichkeit bietet nicht kontrollierbare Witterungsbedingungen in die Auswertung zu integrieren.

### **Versuchsplan**

Nachdem Faktoren, Stufen, etwaige Blockbildung und Anzahl der Replikationen festgelegt sind, muss nur noch die endgültige Feldkonstruktion erfolgen, also die Festlegung wie Faktorstufen innerhalb der Versuche kombiniert werden. Einerseits wird dadurch die Anzahl der notwendigen Versuchsdurchläufe bestimmt, andererseits beeinflusst die Feldkonstruktion auch die nachgeschaltete Modellbildung und somit die Aussagekraft und praktische Relevanz der Versuchskampagne. Wie erwähnt stellt ein Versuchsplan grundsätzlich ein lineares Gleichungssystem dar. Jeder Versuchsdurchlauf liefert eine Gleichung und entsprechend können grundsätzlich Beschreibungsmodelle angepasst werden, deren Parameterzahl der Anzahl an Versuchsdurchläufen entspricht, wobei wie bei jeder Modellanpassung natürlich auch hier ein Überschuss an Beobachtungen anzustreben ist. Die Parameter bzw. Koeffizienten des angepassten Modells sind durch die jeweiligen Effekte gegeben, auf deren Basis, zusammen mit der Versuchsstreuung, in weiterer Folge die statistische Signifikanz eines Faktors auf die Zielgröße nachgewiesen werden kann.

Als zunächst offensichtlichste Methode, allerdings auch mit dem größten Versuchsaufwand verbunden, ergibt sich der Vollfaktorplan, wo jede Faktorstufenkombination zumindest einmal vorkommt. Obwohl es das Ziel der statistischen Versuchsplanung ist mit möglichst geringem Ver-

suchsaufwand ein Maximum an Ergebnisse zu erzielen (Kleppmann, 1998; Montgomery, 2013; Siebertz et al., 2010), soll auch auch im vorliegenden Fall ein Vollfaktorplan zur Anwendung kommen. Der Vorteil liegt insbesondere darin, dass neben den Haupteffekten auch alle Wechselwirkungen zwischen den Parametern eindeutig identifiziert werden können, was bei sogenannten Teilfaktorplänen nicht immer der Fall ist.

Aus den gewählten fünf Faktoren, getestet auf jeweils zwei Stufen ergeben sich demnach 32 Versuchsdurchläufe. Aufgrund der geplanten Wiederholung bzw. Blockbildung existiert jede Faktorkombination im endgültigen Plan zweimal, was zu insgesamt 64 Versuchsdurchläufen führt. Zur besseren Veranschaulichung ist die Struktur des angewandten Vollfaktorplans in der auszugsweisen Darstellung in Tab. 4.2 noch einmal ersichtlich, wobei jede der 64 Zeilen eine Gleichung liefert und jede der 31 Spalten (mit Ausnahme der Versuchs-ID) einen unbekanntem Effekt darstellt.

Tab. 4.2 – Vollfaktorieller Versuchsplan mit 5 Faktoren auf 2 Stufen und 2 Wiederholungen

ID	A	B	C	D	E	AB	AC	...	DE	ABC	...	CDE	ABCD	...	ABCDE
1	+	-	+	-	-	-	+	...	+	-	...	+	+	...	-
2	+	-	+	-	+	-	+	...	-	-	...	-	+	...	+
3	-	-	+	+	-	+	-	...	-	+	...	-	+	...	-
4	+	-	+	+	-	-	+	...	-	-	...	-	-	...	+
5	-	+	-	-	+	-	+	...	-	+	...	+	-	...	-
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
33	-	+	-	-	+	-	+	...	-	+	...	+	-	...	-
34	+	-	-	+	+	-	-	...	+	+	...	-	+	...	+
35	-	+	-	+	+	-	+	...	+	+	...	-	+	...	+
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
63	-	+	+	+	-	-	-	...	-	-	...	-	-	...	+
64	-	-	-	+	+	+	+	...	+	-	...	-	-	...	-

Die Feldkonstruktion liefert 31 orthogonale Spalten, wovon nur die ersten fünf (A,B,C,D,E) als Einstellungsmuster für die Faktoren genutzt werden. Diese repräsentieren die fünf Haupteffekte und die übrigen Spalten dienen zunächst nur dazu, die Modellkonstanten höherer Ordnung zu ermitteln. Hierbei handelt es sich um zehn Zweifachwechselwirkungen (von AB bis DE), zehn Dreifachwechselwirkungen (von ABC bis CDE), fünf Vierfachwechselwirkungen (ABCD bis BCDE) und die Fünffachwechselwirkung zwischen allen untersuchten Faktoren (ABCDE). Während die ersten fünf Spalten tatsächlichen Versuchsparameter entsprechen bzw. vor den Versuchen gezielt gewählt und eingestellt werden, werden die Effekte höherer Ordnung aus den Spalten der Haupteffekte durch Multiplikation errechnet, was vor allem bei der in Tab. 4.2 verwendeten kodierten Schreibweise (- und +) einfach möglich ist.

Außerdem kann in Tab. 4.2 auch sehr deutlich die Randomisierung der Versuche erkannt werden. Die Abfolge von - und + ist vollkommen zufällig und eine zeitlich Korrelation der Versuche ist somit nicht gegeben.

## 4.2 Datenakquisition und Versuchsdurchführung

Unter Bezugnahme auf Abb. 4.1 stellt die Versuchsdurchführung bzw. die Datenakquisition den nächsten Abschnitt der praktischen Untersuchungen dar. Eine detaillierte Beschreibung der

durchgeführten Versuche kann den nachstehenden Kapiteln 5 und 6 entnommen werden, aber trotzdem soll im Folgenden die Herangehensweise und Motivation dargelegt werden.

Nachdem die zu untersuchenden Parameter und auch der Ablauf der Versuche festgelegt sind, sollen diese in Form von realer Bildaufnahme bzw. UAV- Befliegung durchgeführt werden, wobei besonders darauf geachtet werden soll alle übrigen Einflussgrößen möglichst konstant zu halten. Alle im Rahmen der vorliegenden Dissertation präsentierten Untersuchungen basieren somit auf realen Bildern und “echten“ Kameras. Simulationsbasierte Ansätze (z.B. (Zhou et al., 2019)) mit “virtuellen“ Bildern und Kameramodellen werden entsprechend nicht angewandt bzw. näher behandelt.

Um die Beurteilung der Genauigkeit zu ermöglichen, müssen zunächst geeignete Testobjekte ausgewählt und vorbereitet sowie Evaluierungsmöglichkeiten geschaffen werden, wobei eine objektive Analyse nur über ein mit übergeordneter Genauigkeit hergestelltes Referenzmodell möglich ist. Da es sich bei der Photogrammetrie um ein flächiges Messverfahren handelt, das die Objektoberfläche in hohem Detailgrad in Form einer 3D-Punktwolke wiedergibt (siehe Abb. 4.9), wäre auch beim Referenzmodell eine Punktwolke eine geeignete Möglichkeit. Diese könnte zum Beispiel mit terrestrischem Laserscan in ausreichender Genauigkeit erzeugt werden, und die auftretenden Differenzen könnten flächig visualisiert und analysiert werden. Eine weitere Möglichkeit wäre ein dichtes Netz an, sowohl in den Bildern, als auch in der Örtlichkeit eindeutig identifizierbaren Referenzpunkten (zur geeigneten Signalisierung siehe Abschnitt 4.1.1), wie es in Abb. 4.9 anhand der roten und grünen Punkte, bzw. der vergrößert dargestellten Punktsignale am Beispiel einer Bruchwand am Steirischen Erzberg dargestellt ist.



**Abb. 4.9 – Zur Beurteilung der erreichten Genauigkeit sind punktwise (Netz aus Referenzpunkten, rot und grün) Referenzmodelle zu bevorzugen, da nur hier eine eindeutige Zuordnung zwischen Modell- und Objektpunkt möglich ist. (Rumpler et al., 2014)**

Obwohl die flächigen Daten der Photogrammetrie auf diese Weise weitestgehend nicht betrachtet werden, zeigt die Verwendung einzelner, eindeutig erkennbarer Vergleichspunkte doch auch Vorteile: Allen flächigen Verfahren (SfM, LIDAR, ...) ist gemein, dass die Ergebnisgüte und vor allem auch der erreichte Detailgrad und die Punktdichte ein unmittelbares Ergebnis der Aufnahmekonfiguration sind. So nimmt bei terrestrischem Laserscan die Punktdichte mit Entfernung vom Scannerstandpunkt systematisch ab und generell ist es zumeist nicht möglich einen Punkt der Ergebnispunktwolke eindeutig und reproduzierbar der Objektgeometrie zuzuordnen. Da auch die photogrammetrisch erzeugte Punktwolke nicht zwingendermaßen jedes Mal die selben Objektpunkte wiedergibt und mit hoher Sicherheit nicht die selbe Objektabastung liefert wie z.B. LIDAR ist ein Vergleich dieser beiden Verfahren auf Basis der Punktwolke immer mit

systematischen Einflüssen behaftet, die nur aus dem Vergleich, allerdings nicht dem untersuchten Phänomen resultieren. Die Tatsache, dass auch die juristisch normierten Grenzwerte (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013) als Punktlagefehler und nicht als flächiges Maß angegeben werden, kann an dieser Stelle zwar als vernachlässigbar betrachtet werden, soll aber dennoch nicht unerwähnt bleiben. Signalisierte Pass- und Kontrollpunkte können jedoch sowohl mit herkömmlichen Vermessungsmethoden im Feld (z.B. Tachymetrie) als auch durch Bildmessung eindeutig erkannt werden, was eine eindeutige Gegenüberstellung identer Objektpunkte ermöglicht und die Evaluierung von systematischen Einflüssen der Referenzvermessung befreit. Da die Bildmessgenauigkeit für signalisierte Punkte in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie für Natural Features ist davon auszugehen, dass die Genauigkeit der speziell signalisierten Punkte auf jeden einzelnen Verknüpfungspunkt und somit auf die Punktwolke übertragbar ist. Ob dies auch bei densifizierten - z.B. durch Stereo- oder Multiview-Stereo- Matching erzeugten - Punktwolken der Fall ist, entzieht sich dem Anwendungs- und Untersuchungsbereich der gegenständlichen Dissertation und ist für die präsentierten Untersuchungen somit nicht von Belang.

Wie in Abb. 4.1 angedeutet soll die Bildaufnahme unter Realbedingungen und zusätzlich auch im Modellmaßstab erfolgen. Einerseits kann es durchaus als gültige wissenschaftliche Praxis betrachtet werden grundsätzliche Zusammenhänge zunächst am Modell zu erforschen und anschließend die Gültigkeit der getroffenen Aussagen in der Realität zu verifizieren (Heiss, 2017; Ivanova et al., 2015; Moser et al., 2008; Schimek et al., 2015; Tscharf et al., 2018). Andererseits bieten modellhafte Versuche oftmals die Möglichkeit Faktorstellungen mit höherer Genauigkeit zu steuern, bzw. sind auch Faktorkombinationen, die in der Natur nur schwer realisierbar sind, zumeist einfach herzustellen. Außerdem können im Labor die Umgebungsbedingungen weitestgehend konstant gehalten werden, und nicht kontrollierbare Störeinflüsse (z.B. Wind) werden minimiert. Da die photogrammetrisch erzeugten Modelle zunächst maßstabsfrei und geometrisch ähnlich sind (nur aus den Bildern ist die metrische Größe der aufgenommenen Objekte nicht definiert), werden die Versuchsergebnisse durch die Skalierung auch in keiner Weise verfälscht und die Versuche sollten unabhängig vom gewählten Maßstab zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

Bereits aus den gewählten Faktoren und den zugehörigen Stufen geht hervor, dass die Bildaufnahme, wie bei den meisten UAV-Einsätzen üblich, in regelmäßigem Raster und parallelen Bahnen in einer definierten Höhe über dem Gebiet erfolgen soll. Tatsächlich im Feld durchgeführt werden allerdings nur die stark überlappenden Datensätze mit 90 % Bildüberlappung, und jene mit 70 % ergeben sich als Subset durch Weglassen von Bildern bzw. Bahnen. Ebenso findet die Variation der Passpunktconfiguration nur in der Auswertung statt, indem jeweils die entsprechenden Punkte entweder als Pass- oder eben Kontrollpunkt verwendet werden. Außerdem soll jeder Bildverband zweimal unter den exakt selben Bedingungen getestet werden, um die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen und auch Aussagen zur Reproduzierbarkeit und Belastbarkeit der Ergebnisse treffen zu können.

Alle Aufnahmen sollen außerdem unter Verwendung des selben Kameramodells durchgeführt werden. Auf diese Weise können Einflüsse des Aufnahmesystems zwar nicht gänzlich ausgeschlossen, aber zumindest konstant gehalten werden.

Die Auswertung soll unter Verwendung der SfM-Pipeline des Instituts für maschinelles Sehen und Darstellen (ICG) an der TU Graz (TUG) in der Windows Version vom 08.04.2016 erfolgen. Der wesentliche Vorteil gegenüber kommerziellen Softwareprodukten wie z.B. Agisoft Photoscan besteht in der Zugänglichkeit zum Source Code und somit in der eindeutigen Festlegung der Auswerteparameter. Auf diese Weise können vorhandene Einflüsse der Auswerterroutine weitestgehend ausgeschaltet und die angestrebten Analysen zielgerichtet durchgeführt werden.

### 4.3 Faktorkombination

Aus der präsentierten Literaturanalyse zeigte sich deutlich, dass eine Kombination verschiedener Aufnahmerichtungen und -Entfernungen zu einer Stabilisierung des Bildverbands und der inneren Orientierung führt, wodurch in weiterer Folge die Genauigkeit der Ergebnisse gesteigert werden kann. Um diesen Umstand auch in den gegenständlichen Untersuchungen zu analysieren soll zusätzlich noch die Kombination verschiedener Faktorstufen betrachtet werden.

Konkret sollen einzelne Realisierungen der zuvor beschriebenen Versuche durchmischt bzw. zusammen ausgewertet werden, wobei vordergründig die Kombination unterschiedlicher Aufnahmeentfernungen und -Richtungen untersucht wird und die Bildüberlappung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Aus praktischer Sicht sollen vor allem die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Inwiefern wirkt sich ein Kombination verschiedener Aufnahmekonfigurationen bzw. eine mehrmalige Befliegung auf die erreichte Genauigkeit aus?
- Wie müssen Bilder aufgenommen werden, die den Bildverband stabilisieren bzw. welche zusätzlichen Aufnahmen sind notwendig um eine ursprünglich "schlechte" Flugplanung zu korrigieren?
- Mit welcher Anordnung können die besten Ergebnisse erzielt werden

Wie bereits angedeutet, sollen zur Beantwortung der aufgeworfenen Fragen allerdings keine zusätzlichen Bildflüge erfolgen, sondern lediglich vorhandene Datensätze nochmals zusammen ausgewertet werden.

### 4.4 Beurteilung der Genauigkeit

Der letzte Abschnitt der praktischen Untersuchungen umfasst die Analyse der Ergebnisse bzw. die Beurteilung der Genauigkeit. Nur bei geeigneter Definition des untersuchten Qualitätsmerkmals sind die Versuche erfolgreich und während in der Bildverarbeitung häufig der Rückprojektionsfehler der Objekt- beziehungsweise Merkmalspunkte als Maß der Genauigkeit Anwendung findet, ist für praktische Anwendungen vor allem die Genauigkeit der rekonstruierten Objektpunkte von Bedeutung. Im vorliegenden Fall soll jedoch nicht nur ein Gesichtspunkt der Versuchsergebnisse betrachtet werden, sondern vielmehr soll eine umfassende Betrachtung aller relevanten Ergebnisgrößen erfolgen.

Zu diesem Zweck wird eine grundlegende Unterscheidung in innere und äußere Genauigkeit vorgenommen, wohlweislich dass diese beiden Begriffe in der herkömmlichen Geodäsie in leicht anderem Zusammenhang üblich sind. Die innere Genauigkeit umfasst dabei jene Ergebnismerkmale die sich aus der alleinigen Auswertung der Bilder ergeben und somit keine unmittelbare metrische Qualität aufweisen. Die Beurteilung erfolgt im Bild- bzw. maximal im Modellkoordinatensystem. Die äußere Genauigkeit hingegen zielt auf den Vergleich der photogrammetrisch erzeugten 3D-Modelle mit übergeordnet genauen Referenzmodellen ab, und schlägt somit die Brücke zur praktischen Anwendung und metrischen Genauigkeitsbeurteilung.

#### 4.4.1 Innere Genauigkeit

Die Beurteilung der Qualität von mittels SfM erzeugten 3D-Modellen kann in einem ersten Schritt ohne Bezug zur Realität und alleine aus den statistischen Größen der Ausgleichsrechnung erfolgen. Die abgeleiteten Qualitätsparameter spiegeln dabei die Güte wider, mit der die Beobachtungen (Bildmessungen) unter Berücksichtigung der geometrischen Konfiguration

zum funktionalen Modell passen und können unabhängig vom gewählten Modell- oder Objektkoordinatensystem gegenübergestellt werden. Nachteilig ist mit Sicherheit, dass es sich zumeist um Ergebnisse einer numerischen Optimierung handelt. Das heißt, die Ergebnisse repräsentieren zwar die statistisch wahrscheinlichste und numerisch optimale Lösung, Rückschlüsse auf geometrische Richtigkeit sind allerdings - vor allem beim Vorhandensein systematischer Fehleinflüsse - zumeist nicht unmittelbar möglich.

### **Rückprojektionsfehler**

Die wohl am häufigsten betrachteten Kenngrößen der inneren Genauigkeit sind die mittleren Verbesserungen (Residuen) der Bildkoordinaten bzw. die Rückprojektionsfehler. Sie sind ein Maß für die Güte der Bildmessung und verdeutlichen neben der Qualität der Merkmalsextraktion auch die Güte der Kamerakalibrierung und der inneren Orientierung. (Luhmann, 2018b)

Die Rückprojektionsfehler an den homologen Merkmalspunkten dienen als Fehlermaß der Optimierung in der Bündelblockausgleichung und werden im Bundle-Adjustment entsprechend minimiert. Zur Beurteilung der verschiedenen Versuchsergebnisse anhand einer skalaren Größe soll hier der mittlere Rückprojektionsfehler über alle 3D-Punkte betrachtet werden. Abhängig von der Anzahl der beteiligten Bilder bzw. der extrahierten Merkmalspunkte kann die Mittelbildung allerdings zu einer starken Glättung führen und es ist nicht immer klar, inwieweit die erhaltenen Werte zur Beurteilung geeignet sind bzw. ob sich ein Bezug zu den Faktoren des Versuchsplans herstellen lässt.

### **Epipolargeometrie**

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der Bildverknüpfungen und der Stabilität des Bildverbands ist durch die gefundenen Epipolargeometrien bzw. die zu Grunde liegenden Punktkorrespondenzen gegeben. Die Schätzung der äußeren und inneren Orientierung basiert auf Paaren korrespondierender Features und im Zuge der Auswertung werden auch sogenannte Mismatches detektiert und aussortiert bzw. kann die Anzahl der verbliebenen Matches auch als Maß für die "Stärke" der Verknüpfung zweier benachbarter Bilder herangezogen werden. Die relativen Kameraorientierungen zwischen den Bildpaaren können als Epipolar-Graph dargestellt werden. Dieser stellt paarweise Rekonstruktionen und relative Orientierungen dar. Die Knoten entsprechen den Bildern und die Kanten den jeweiligen relativen Orientierungen. Je größer die Anzahl an Beobachtungsgleichungen (gültigen Matches), desto stabiler sind die Kanten und desto stärker überbestimmt ist das Gleichungssystem zur Schätzung der relativen Orientierung.

Neben der Anzahl an gültigen Matches kann jedoch auch die Anzahl an aussortierten bzw. ungültigen Matches von Bedeutung sein. Ist die Anzahl der im Zuge der RANSAC-Optimierung (Fischler and Bolles, 1981) aussortierten und nicht für die weitere Parameterschätzung verwendeten Mismatches hoch, so kann das ein Indiz dafür sein, dass auch unter den "robusten" Matches noch eine Reihe fehlerhafter verblieben sind, bzw. deren Genauigkeit geringer ist.

### **Simultankalibrierung**

Aufgrund der Tatsache, dass bei UAV-Anwendungen in der Regel keine Messkameras zum Einsatz kommen werden die Parameter der inneren Orientierung üblicherweise im Rahmen der Simultankalibrierung geschätzt bzw. optimiert. Wie in Abschnitt 3.3 erwähnt sind allerdings viele systematischen Fehler in der Bildorientierung bzw. der 3D-Rekonstruktion auf fehlerhaft geschätzte intrinsische Parameter zurückzuführen und insbesondere bei SfM kann eine ungeeignete Aufnahmekonfiguration auch zu einer "künstlich falschen" Kamerakalibrierung führen (Dome-Effekt).

Obwohl die Parameter der inneren Orientierung streng genommen nicht mehr als reine Ergebnisse der statistischen Optimierung betrachtet werden dürfen und bereits eine echte physikalische Bedeutung haben, werden sie an dieser Stelle zu den Größen der inneren Genauigkeit gezählt. Bei der Analyse der Versuchsergebnisse soll für jeden Datensatz die optimierte innere Orientierung untersucht werden. Auf diese Weise ist möglich etwaig erkannte Fehler in der 3D-Rekonstruktion in Bezug zu den Parametern der inneren Orientierung zu setzen, was vor allem zur korrekten Interpretation der Ergebnisse beitragen kann.

### 4.4.2 Äußere Genauigkeit

Für vermessungstechnische Anwendungen ist neben den diskutierten Größen der inneren Genauigkeit vor allem von Bedeutung, inwieweit die Vermessungsergebnisse die zu erfassende Realität wiedergeben können bzw. welche Abweichungen zwischen den abgeleiteten 3D-Modellen und der in der Natur vorhandenen Geometrie existieren.

Zur Beurteilung dessen ist natürlich zunächst eine quantitative Vorstellung der Realität bzw. ein geeignetes Referenzmodell notwendig, das - wie bereits in Abschnitt 4.2 ausgeführt - in Form eines dichten Netzwerks an eindeutig identifizierbaren Pass- und Kontrollpunkten realisiert werden soll. Naturgemäß ist ein vergleichbares Modell je einmal im Modell- und einmal im Realmaßstab notwendig, wobei auf die detaillierte geometrische Anordnung in den folgenden Kapiteln 5 und 6 eingegangen wird.

Als metrisches Fehlermaß sollen gemäß Gl. 2.16 die euklidischen Distanzen bzw. die Länge der 3D Abstandsvektoren zwischen der Referenzvermessung und den, aus den Bildern triangulierten, 3D-Objektpunkten ermittelt werden. Natürlich müssen die rein bildbasierten 3D-Rekonstruktionen zuvor noch über die beschriebenen Passpunkte in ein übergeordnetes Objektkoordinatensystem transformiert werden, da die Ermittlung der Abstandsvektoren nur in einem einheitlichen Koordinatenbezug sinnvoll ist.

Um jedem Versuchsdurchlauf am Ende eine eindeutige Fehler- bzw. Ergebnisgröße zuweisen zu können, soll anschließend über alle vorhandenen Kontrollpunkte gemittelt werden, wobei verschiedene Zonen zur Mittelbildung herangezogen werden sollen. Das Hauptqualitätsmerkmal der äußeren Genauigkeit ist somit die mittlere Länge des 3D-Abstandsvektors zwischen Referenzvermessung und SfM- Rekonstruktion. Da in der Geodäsie üblich, und vor allem auch da bei der geplanten Anordnung dahingehende Unterschiede zu erwarten sind, soll die Betrachtung auch getrennt nach Lage und Höhe, bzw. nach Differenzen in und quer zur Aufnahme- richtung erfolgen. Außerdem soll die Aussagekraft des berechneten Mittelwerts durch die empirische Standardabweichung ergänzt werden, und somit auch ein Maß für die Streuung der Fehler innerhalb des Gebiets analysiert werden.

Da sowohl die Flughöhe als auch der gewählte Untersuchungsmaßstab (Real- oder Modellmaßstab) starken Einfluss auf die Größenordnung der erreichten Genauigkeit zeigen wird die Genauigkeit in vielen Untersuchungen auch als vielfaches der GSD angegeben (z.B. (Rumpler et al., 2014)). Das beschriebene Fehlermaß lässt natürlich auch diesbezügliche Aussagen zu und könnte an gegebener Stelle auch mit geringem Aufwand modifiziert werden.

# Kapitel 5

## Untersuchungen im Realmaßstab

Wie bereits in Abschnitt 4.2 erläutert besteht der praktische Teil der Untersuchungen vordergründig in Datenakquisition bzw. in kontrollierter Bildaufnahme. Die Datenakquisition soll einerseits unter realen Einsatzbedingungen im aktiven Bergbau und andererseits, zur Sicherstellung konstanter äußerer Bedingungen sowie Faktorstufen, im Modellmaßstab erfolgen.

Im Folgenden werden zunächst die realmaßstäblichen Versuche präsentiert und in Kapitel 6 näher auf die Modellversuche eingegangen.

### 5.1 Testanordnung

Ziel der Versuche war es UAV-Befliegungen unter realen Bedingungen im Bergbau durchzuführen. Die Testbefliegungen sollten repräsentativ für "echte" Vermessungsflüge sein und, da gleichzeitig Aussagen zum Einfluss der Bildaufnahme auf die erreichte Genauigkeit möglich sein sollten, erfolgte die Aufnahme gemäß dem in Abschnitt 4.1.2 entwickelten Versuchsplan.

#### 5.1.1 Testgebiet Pronat Steinbruch Preg GmbH

Als Testgebiet diente ein rund 6 ha großer Bereich im Hartgesteinstagebau der Pronat Steinbruch Preg GmbH in St. Lorenzen/Knittelfeld. Es umfasst neben flachen fahrbahnähnlichen Bereichen mit geschüttetem Haufwerk auch steil stehende Wände und blockige Sturzhalden (siehe Abb. 5.1), wobei sich die näher untersuchten Testbefliegungen nur auf die weitestgehend flache Grundetage beschränkten (ca. 100 m x 120 m). Zur Schaffung eines einheitlichen Bezugskoordinatensystems wurden insgesamt 46 Punkte vermessen, vermarktet und für die Flüge signalisiert. Als Richtwert sollten die GCPs (Ground Control Points) mit 0,5 GSD eingemessen werden. Bei einer geplanten minimalen Flughöhe von 30 m ergibt sich bei Verwendung des nachstehend beschriebenen Aufnahmesystems eine Bodenauflösung von rund 7 mm, was in weiterer Folge eine Passpunktgenauigkeit von  $\pm 3,5$  mm. Die Vermessung erfolgte mittels Trimble S6 Totalstation als tachymetrische Netzmessung mit insgesamt vier Standpunkten und einer mittleren Positionsgenauigkeit von  $< 3$  mm in einem lokalen und zwangsfrei ausgeglichenen Koordinatensystem, da für die gegenständlichen Untersuchungen ein Anschluss an das System der Landesvermessung als nicht notwendig erachtet wurde. Das Referenzmodell erfüllt somit die Genauigkeitsanforderungen und bleibt auf diese Weise das Referenzmodell außerdem frei, von im vorliegenden Fall zu erwartenden, Spannungen im System der Landesvermessung, da sich das Untersuchungsgebiet an der Grenze zwischen zwei Bezugsmeridianen (MGI GK-M31, EPSG: 31255 bzw. MGI GK-M34, EPSG: 31256) befindet.

Als Vermarkung kamen in der Vermessung handelsübliche Spreizdübel zum Einsatz, die eine zwangszentrierte Montage der Signalisierungsplatten mittels M6 Sechskantschrauben erlauben.

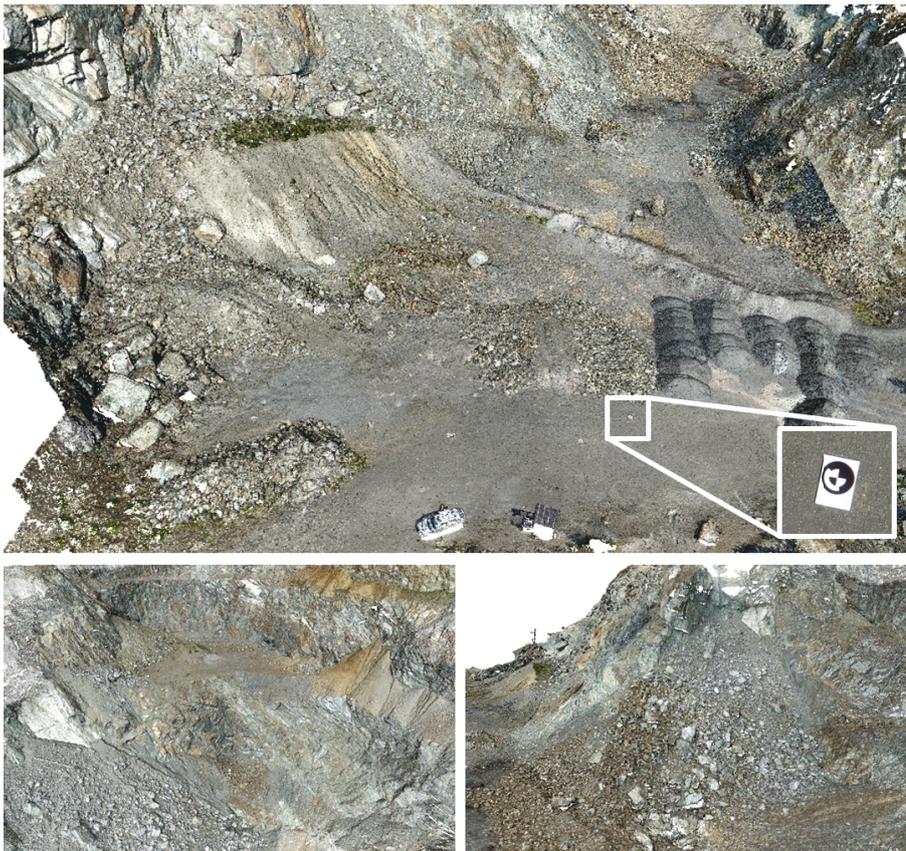


Abb. 5.1 – Das Testgebiet bei der Pronat Steinbruch Preg GmbH umfasst sowohl flache, fahrbahnähnliche Bereiche mit geschüttetem Haufwerk, als auch steil stehende Wände und blockige Sturzhalden. (Tscharf et al., 2016b)

Die Signalisierung erfolgte unter Verwendung der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen individuell identifizierbaren kreisförmigen Marker, die eine automatisierte Bildmessung ermöglichen und somit Fehler durch falsche Passpunktzuordnung von vornherein ausschließen (siehe Detailvergrößerung in Abb. 5.1). Die Größe der Signalisierung wurde mit einem Durchmesser von 50 cm so gewählt, dass auch aus einer Flughöhe von 150 m eine automatische Detektion noch möglich ist, und zur Gewährleistung der Planarität wurden die Marker Aluminiumverbundplatten aufgezogen. Als konkreter Messpunkt dient das Markerzentrum, das automatisch in den Bildern erkannt wird und gleichzeitig auch den Montagepunkt der Markertafeln darstellt. (Tscharf et al., 2016b)

### 5.1.2 Georeferenzierung

Wie in Abschnitt 4.1 bzw. 4.2 beschrieben soll auch die Georeferenzierung als Faktor (E in Tab. 4.2) untersucht werden. Entsprechend wurde jeder Datensatz unter Verwendung von zwei Passpunkt Konfigurationen transformiert. Die Passpunkte wurden aus der Gesamtheit der vorhandenen 46 Kontrollpunkte ausgewählt, wobei beide Konfigurationen je sechs Punkte umfassen. Konfiguration 1 (GCP-Config 1) umfasst die Punkte 31, 34, 39, 64, 67 und 78 ist durch eine gleichmäßige Verteilung der Punkte im gesamten Untersuchungsgebiet bzw. durch ein Verhältnis der kleinsten zur größten Einwirkungsfläche von 0,70 gekennzeichnet. Drei der sechs gewählten Punkte (31, 34, 39) wurden auch bei Konfiguration 2 (GCP-Config 2) verwendet, allerdings wurden die übrigen mit 32, 33 und 73 so gewählt, dass es zu einem Passpunktcluster im Sü-

den kommt, der nur durch den nördlichsten Punkt (Punkt-ID 39) geringfügiges Gegengewicht erhält. Das Verhältnis der kleinsten zur größten Einwirkungsfläche beträgt hier 0,21, was die ungleichmäßige Verteilung noch einmal quantitativ verdeutlicht.

Eine grafische Darstellung der beiden verwendeten Konfigurationen wurde bereits in Abb. 4.6 gezeigt, weshalb an dieser Stelle auf die nochmalige Visualisierung verzichtet wird.

## 5.2 Bildaufnahme

Die Bildaufnahme erfolgte an einem Tag (17.05.2017) in zwei unabhängigen Kampagnen bzw. Blöcken im Sinne der statistischen Versuchsplanung (Wiederholung der Flüge am Vor- bzw. Nachmittag). Durch autonomes Abfliegen einer zuvor geplanten Route wurde, im Rahmen der technischen Möglichkeiten für beide Blöcke der selbe Flugpfad eingehalten und aufgrund der Tatsache, dass sich die 70 % (Überlapp) Datensätze als Subset der 90 % Flüge ergeben, mussten nur die stark überlappenden Flüge tatsächlich ausgeführt werden. Das Flugsystem bewegte sich seitwärts entlang der Flugbahn, sodass die längere Bildseite parallel zur Flugrichtung stand. Konkret wurden die folgenden Flüge durchgeführt, wobei vor allem bei den niedrigen Flügen aufgrund der signifikant längeren Flugdauer mehrere Starts notwendig waren:

1. Nadir (Blickwinkel von  $90^\circ$ ) in 30 m Höhe mit sowohl longitudinaler als auch lateraler Überlappung von 90 %
2. Oblique (Blickwinkel von  $45^\circ$ ) in 30 m Höhe mit sowohl longitudinaler als auch lateraler Überlappung von 90 %
3. Nadir (Blickwinkel von  $90^\circ$ ) in 150 m Höhe mit sowohl longitudinaler als auch lateraler Überlappung von 90 %
4. Oblique (Blickwinkel von  $45^\circ$ ) in 150 m Höhe mit sowohl longitudinaler als auch lateraler Überlappung von 90 %

Entscheidende Bedeutung in der Flugplanung und Durchführung kommt auch der Fluggeschwindigkeit zu. Aufgrund der Größe des Gebiets und der stark überlappenden Abdeckung wurden die Bilder in Bewegung aufgenommen und nicht - wie bei der Verwendung eines Multikopters grundsätzlich möglich - im Stop and Go Betrieb. Die Fluggeschwindigkeit muss demnach mehrere Anforderungen erfüllen: Einerseits soll sie möglichst groß gewählt werden, um das gesamte Gebiet mit vertretbarem Zeitaufwand zu erfassen und die Flugzeit sowie die Anzahl der notwendigen Starts zu minimieren. Andererseits muss sie so gering sein, dass eine hohe Bildqualität sichergestellt werden kann und Bewegungsunschärfe vermieden wird. Zuletzt muss zur Einhaltung des definierten Überlapps auch die Bildfolgerate der Kamera berücksichtigt werden. Die Ermittlung des Überlapps erfolgt über den sogenannten "Antenna Footprint" am Boden, der abhängig von der Flughöhe und dem Blickwinkel unterschiedliche Größe und Form annimmt. Je höher die Aufnahmeposition desto größer ist naturgemäß der mit einem Bild abgedeckte Bereich, und bei geneigter Aufnahme ändert sich die Form von rechteckig zu trapezförmig. Aus dem abgebildeten Bereich am Boden und der gewählten Überlappung ergibt sich in weiterer Folge der zulässige Abstand der Aufnahmepositionen, der zusammen mit der möglichen Bildfolgerate starken Einfluss auf die zulässige Flughöhe hat. Die maximale Bildfolgerate der eingesetzten Kamera (siehe Abschnitt 5.2.1) beträgt 1 s und zur sicheren Einhaltung eines maximalen Aufnahmeabstands von rund 4 m wurde die Geschwindigkeit mit 2 m/s festgesetzt.

### 5.2.1 Aufnahmesystem

Das Aufnahmesystem wird durch eine Sony  $\alpha$ 6000 mit APS-C-Sensor und einem Sony SEL-16F28 16 mm Festbrennweitenobjektiv (Äquivalente 35 mm-Brennweite von 24 mm) gebildet. Sony Systemkameras sind in der UAV-Anwendung weit verbreitet und zeichnen sich vor allem durch hohe Abbildungsqualität und Stabilität bei geringem Gewicht aus (Cramer and Leinss, 2016). Das Objektiv verfügt über einen Öffnungswinkel von  $83^\circ$  und außerdem über keine mechanische Bildstabilisierung.

Der Mindestfokussierabstand beträgt laut Datenblatt 24 cm, was bei UAV-Einsätzen allerdings keine Limitierung darstellt (Krause, 2019). Für alle Flüge wurde die Fokuseinstellung “unendlich“ verwendet und in weiterer Folge der vorhandene Autofokus deaktiviert. Ebenso wurden Blendenöffnung und Belichtungsdauer einmal vor Start der Mission an die aktuellen Gegebenheiten angepasst und dann für den gesamten Flug konstant gehalten.

Die Kamera ist mittels Gimbal am Kopter befestigt, wodurch eine stabile Kameraorientierung (Roll-, Nick- und Gierwinkel) gewährleistet sowie Vibrationen und andere Bewegungsunschärfen weitestgehend eliminiert werden.

### 5.2.2 UAV-Plattform

Als Trägerplattform kam das am Lehrstuhl für Bergbaukunde vorhandene und selbst gebaute UAS zum Einsatz. Es handelt sich dabei um einen an die zuvor definierte Kamera - und somit auch Dienstmasse - angepassten Hexakopter, wobei im Wesentlichen Komponenten aus dem Modellflugbereich verbaut wurden und die wichtigsten technischen Daten bzw. Komponenten bei (Tscharf et al., 2016b) detailliert aufgelistet sind. Bei dem zentralen Bauteil, dem Flight Controller, handelt es sich um einen DJI Naza M V2. Dieser verfügt über eine integrierte Dämpfung der Regler, Gyroskop, Beschleunigungsmesser, Barometer sowie externen GNSS Empfänger, und übernimmt während des Fluges die Stabilisierung des Systems. Das System verfügt außerdem über eine Genehmigung der Kategorie A (vgl. Abb. 2.3), womit die angestrebten Forschungsflüge in Bergbaubetrieben abgedeckt sind. Die Steuerung des gesamten Systems erfolgt über eine mobile Bodenstation, die es ermöglicht, dass alle Funktionen (Steuerung des Flugkörpers und der Kamera) von einer Person erledigt werden können.

Im vorliegenden Fall erfolgten die Flüge autonom gemäß einem zuvor erstellten Flugplan. Zur Planung wurde das Tool UgCS (Universal ground Control Software (SPH Engineering, 2019)) in der frei verfügbaren Version verwendet, das auch eine dreidimensionale Flugplanung und entsprechende Anpassung an die Topographie zulässt.

## 5.3 Bildauswertung

Nach der erfolgten Bildaufnahme wurden die Bilder zunächst sortiert und entsprechend dem zu Grunde liegenden Versuchsplan in 32 Subsets unterteilt. Durch die zwei Varianten der Georeferenzierung ergeben sich schlussendlich 64 Versuche die unabhängig voneinander prozessiert wurden, um Aussagen hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit zu ermöglichen. Die 3D-Rekonstruktion erfolgte unter Verwendung des Tools “qt-offline-sfm“, das eine einfache GUI für die SfM-Pipeline des ICG an der TU Graz darstellt.

Die Prozessierungsparameter wurden bei allen Durchläufen konstant gehalten und können im Detail dem Anhang der Arbeit entnommen werden (vgl. Abschnitt ??). Am wesentlichsten sind dabei der Modus für die Korrespondenzanalyse und die Simultankalibrierung. Das Matching erfolgte nach dem Prinzip “brute-force“, wo jedes Bild gegen jedes abgeglichen wird und keine Vororientierung oder Vorselektion der Bilder erfolgt. Die Simultankalibrierung wurde im

Modus “adjust-group“ und mit der Option “optimize-radial-distortion“ durchgeführt. Das bedeutet, dass im Zuge der Bündelblockausgleichung eine einheitliche innere Orientierung für alle beteiligten Bilder geschätzt wird. Es wird somit davon ausgegangen, dass die Parameter der inneren Orientierung zumindest während der Bildaufnahme stabil waren und alle Bilder mit dem selben Kameramodell beschrieben werden können. Überdies geht die verwendete Pipeline von initial entzerrten Eingabebildern aus. Das heißt die eingesetzte Kamera wurde zuvor unter Laborbedingungen einmal initial kalibriert, um ausreichend belastbare Startwerte für die innere Orientierung vorgeben zu können.

Zusätzlich zu den 64 Einzelversuchen, die sich aus dem Versuchsplan ergeben, wurden insgesamt 27 Faktorkombinationen gebildet, die jeweils unter Anwendung beider Passpunktkonfigurationen in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert wurden. Die Bilder für die erwähnten 27 Datensätze wurden aus beiden “Aufnahmeblöcken“ (siehe Blockbildung in Abschnitt 4.1.2) entnommen, wodurch auch hier eine Analyse von nicht steuerbaren Störfaktoren ermöglicht wurde.

Im Zuge der Auswertung wurde allerdings festgestellt, dass nur 52 der ursprünglich geplanten 64 Datensätze tatsächlich prozessiert werden konnten. Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebiets in Kombination mit den gewählten Faktorstufen war es nicht möglich die hohen Flüge mit geringem Überlapp auszuwerten. Das gewählte Gebiet wurde zu klein dimensioniert. Aus einer Höhe von 150 m sind nur noch zwei Bilder notwendig um das gesamte Testgebiet abzudecken. In dem verhältnismäßig kleinen Überlappungsbereich konnte jedoch keine ausreichende Anzahl an homologen Punkten mehr gefunden werden und die Gesamtheit der Unbekannten konnte nicht mehr verlässlich geschätzt werden.

Dieser Umstand gemeinsam mit der Tatsache, dass die gewählten Faktorstufen unter Laborbedingungen exakter eingehalten werden können, führten – verstärkt durch die positiven Erfahrungen in anderen Bereichen der photogrammetrischen Forschung (Tscharf et al., 2018) - zur ergänzenden Durchführung einer vergleichbaren Kampagne im Maßstab 1:100, die im folgenden Kapitel im Detail präsentiert wird.

# Kapitel 6

## Untersuchungen im Modellmaßstab

Zunächst war das Ziel der Modellversuche die zuvor beschriebenen Befliegungen unter Laborbedingungen und in verkleinerter Form nachzubilden. Die Motivation dazu ergab sich vor allem aus praktischen Problemen bei der Durchführung der realmaßstäblichen Versuche, bzw. bietet die modellhafte Anordnung eine sehr einfache Möglichkeit zur Versuchswiederholung unter konstanten Bedingungen, oder aber auch zur Analyse “unkonventioneller“ Aufnahmekonfigurationen.

### 6.1 Testanordnung

Die Versuche wurden im Maßstab 1:100 durchgeführt und das rund 2 m x 3 m große Versuchsfeld wurde mit insgesamt 33 Pass- bzw. Kontrollpunkten versehen. Als Testobjekt diente ein abgegrenzter Bereich eines gut texturierten Laborbodens, worauf zur Nachbildung der Topographie im Steinbruch einzelne Gesteinsbrocken, bzw. Körnungen verteilt wurden. Die Signalisierung der Referenzpunkte erfolgte unter Verwendung der in Kapitel 5 beschriebenen Fiducial Marker, die natürlich auch entsprechend verkleinert wurden. Die Marker wurden auf Papier ausgedruckt und im Testbereich aufgeklebt, wodurch eine stabile Verortung gewährleistet werden konnte. (siehe Abb. 6.2)

Als einheitliches Bezugskoordinatensystem wurde ein lokales Koordinatensystem mit vertikaler z-Achse definiert in dem sowohl die Referenzpunkte als auch die Aufnahmepositionen eindeutig beschrieben werden können.

#### 6.1.1 Referenzvermessung

Entgegen der ursprünglichen Erwartungshaltung zeigte sich bei der Schaffung der Referenzinformationen zur Evaluierung der Genauigkeit, dass dies im Modellmaßstab mitunter wesentlich schwieriger als in der realmaßstäblichen Untersuchung sein kann. Die zur Referenzvermessung eingesetzte Methode sollte um eine Größenordnung genauer sein als das untersuchte Verfahren (zumindest 0,5 GSD), und muss insbesondere auch reproduzier- und belastbare Ergebnisse liefern.

Während die Genauigkeit der photogrammetrischen Verfahren im kleineren Maßstab als Funktion der kleineren Bodenauflösung (GSD) signifikant zunimmt zeigen herkömmliche geodätische Verfahren dieses Verhalten nicht im selben Ausmaß. Bei der hier vorgestellten Anordnung im Maßstab 1:100 bedeutet dies, dass die zu erwartenden Genauigkeiten bzw. Unterschiede zwischen verschiedenen Bildverbänden in der Größenordnung von wenigen Zehntelmillimetern liegen, da in der Realität von einstelligen Zentimeterwerten ausgegangen werden kann. (Rumpler et al., 2014; Tscharf et al., 2015)

### Genauigkeitsvoranschlag

Die Vermessung erfolgte mit der am Lehrstuhl für Bergbaukunde vorhandenen Trimble S6 Totalstation mit einer herstellerseitigen Genauigkeit von 0,5 mgon für Horizontal- und Vertikalwinkelmessung bzw. 3 mm+3 ppm bei der Distanzmessung auf Prismen. Ein einfacher Genauigkeitsvoranschlag für Polares Anhängen eines Punktes nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz (siehe Gl.2.28) mit den angeführten a priori Genauigkeiten führt zu Standardabweichungen der berechneten Neupunkte von rund 2,5 mm.

Auch bei der Beobachtung in mehreren Sätzen unter Einbeziehung verschiedener Instrumentenstandpunkte, zeigt sich somit deutlich, dass eine Netzanordnung wie sie im Realmaßstab angewandt wurde, zur Bestimmung der Referenzkoordinaten im vorliegenden Fall zunächst nicht geeignet ist. Dieser Umstand ist hauptsächlich auf die Ungenauigkeit der elektrooptischen Entfernungsmessung zurückzuführen, was vor allem auch in der theoretischen Betrachtung der Punktbestimmung über Vorwärtseinschnitt (mit der angegebenen Richtungsgenauigkeit von 0,5 mgon) deutlich wird. Werden die Punkte über Vorwärtseinschnitt von mehreren Standpunkten aus bestimmt, so sollten Genauigkeiten der zu bestimmenden Neupunkte in der Größenordnung weniger Zehntelmillimeter möglich sein.

Dies gilt allerdings nur, wenn die Standpunkte als fehlerfrei angenommen werden können. In einem lokalen Koordinatensystem kann zwar die absolute Position der Punkte vernachlässigt werden, liegen im Netz allerdings nur Winkelmessungen vor, so erfolgt die Skalierung aus den Relativabständen zwischen den bekannten Instrumentenstandpunkten. Die relative Lage der Standpunkte zueinander ist somit von größter Bedeutung und entsprechend bleibt die Skalierung bzw. Entfernungsmessung zunächst einmal als Problem erhalten.

### Durchführung der Vermessungen

Aufgrund der angesprochenen "Ungenauigkeit" der elektrooptischen Entfernungsmessung – nicht nur bei reflektorloser Messung, sondern auch bei der Verwendung von Prismen - musste die Referenzvermessung - und auch schon die Bestimmung der Instrumentenstandpunkte - mit einer alternativen Skalierung durchgeführt werden. Zwei, ein Meter lange, Referenzmaßstäbe wurden als Basislatten orthogonal zueinander in der Szene positioniert und deren Enden von insgesamt vier, rund um das Areal angeordneten, Instrumentenstandpunkten aus in jeweils zwei Vollsätzen angezielt. Um die Koordinaten der 33 Kontrollpunkte zu bestimmen, wurden diese ebenfalls in zwei Vollsätzen von jedem der vier Standpunkte aus eingemessen.

Die Bestimmung der Standpunktkoordinaten bzw. der Längen zwischen den Standpunkten erfolgte unter Lösung der Hansen'schen Aufgabe ((Härpfer, 1914)), deren Messanordnung in Abb. 6.1 dargestellt ist. Klassisch wird dabei von zwei unbekanntem Standpunkten (A und B in Abb. 6.1) ausgegangen zwischen denen einerseits gegenseitige Sicht besteht, und von wo aus auch jeweils Sicht zu beiden Endpunkten (C und D in Abb. 6.1) einer bekannten Basis (c in Abb. 6.1) besteht. Die Lösung erfolgt über trigonometrische Funktionen bzw. über geometrische Zusammenhänge (z.B.:  $\alpha_2 + \beta_1 = \gamma_2 + \delta_1$ ) innerhalb der entstehenden Dreiecke. Wegen der starken Überbestimmtheit der geometrischen Figur(en), konnten außerdem noch alle Beobachtungen in einem bedingten Ausgleich verbessert werden.

Aufgrund der hohen Genauigkeit mit der die Länge der Basislatten bestimmt werden kann, zusammen mit der gegebenen Genauigkeit der Winkelmessung sind auch die Relativkoordinaten der Instrumentenstandpunkte mit einer Genauigkeit bestimmbar, die eine Ableitung der Referenzpunkte über Vorwärtseinschnitt zulässt.

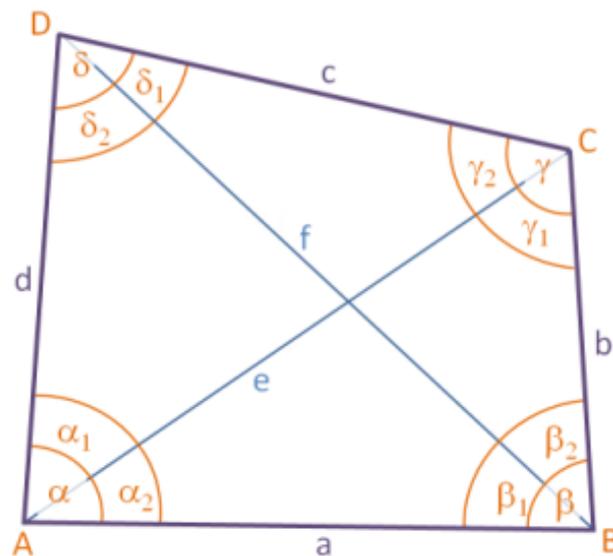


Abb. 6.1 – Mithilfe der Hansen'schen Aufgabe können unter Verwendung der bekannten Basis  $c$  und der gemessenen Winkel  $\alpha_i$  und  $\beta_i$  die unbekannt Standpunkte A und B bzw. deren Relativabstand, ermittelt werden. (Lehmann, 2019)

### Endgültiges Referenzkoordinatensystem

Zur Überprüfung der Güte der Referenzkoordinaten wurden insgesamt zwölf Relativdistanzen zwischen den Punkten mittels Stahlmessband auf Zehntelmillimeter genau bestimmt und mit den rechnerisch ermittelten gegenübergestellt. Im Zuge dieser Analyse wurde festgestellt, dass bei der Bestimmung der Punkte über Vorwärtseinschnitt Spannungen von bis zu einem Millimeter in den Referenzpunkten verbleiben, wodurch diese für eine Beurteilung der erreichten photogrammetrischen Genauigkeit ungeeignet sind. Im gegebenen Maßstab ist die Photogrammetrie der herkömmlichen Geodäsie überlegen weshalb für die Modellversuche eine alternative Koordinatendifferenz verwendet werden musste.

Um dem erwähnten Umstand Rechnung zu tragen sollte auch die verwendete Referenz Photogrammetrisch erstellt werden. Die in Kapitel 4 beschriebenen Vorversuche, sowie auch die in Kapitel 3 präsentierte Literaturanalyse zeigen deutlich, dass durch eine Kombination verschiedener Aufnahmedistanzen und Richtungen die höchsten Rekonstruktionsgenauigkeiten möglich sind und entsprechend diene ein derartiger Bildverband auch im gegenständlichen Fall als Referenz. Der Referenzbildverband umfasst Bilder aus drei unterschiedlichen "Flughöhen" und kombiniert überdies Nadiraufnahmen mit geneigten und verkanteten Bildern.

Zur Beurteilung der Ergebnisse im metrischen Sinne und vor allem auch zur Gegenüberstellung mit den realmaßstäblichen Untersuchungen muss allerdings auch dieser Bildverband zumindest skaliert werden. Dies erfolgte unter Verwendung der zuvor über Vorwärtseinschnitt bestimmten Koordinaten der Referenzpunkte. Dem Kritikpunkt, dass die photogrammetrischen Ergebnisse durch diese Vorgehensweise wieder verschlechtert würden, kann in Form der Gegenüberstellung mit den in der Örtlichkeit vermessenen Relativdistanzen entgegnet werden. Das auf diese Weise erstellte Referenzpunktfeld mit der Kurzbezeichnung "image", reproduziert die mittels Stahlmessband gemessenen Distanzen mit maximalen Abweichungen von 0,05 mm, weshalb die resultierenden Koordinaten als Referenzmaß verwendet werden konnten.

### 6.1.2 Georeferenzierung

Nachdem die Koordinaten der Referenzpunkt schlussendlich festgelegt wurden, wurden wiederum zwei verschiedene Passpunktanordnungen zur Georeferenzierung bzw. Skalierung der SfM-Rekonstruktionen definiert. Während Konfiguration 1 wiederum durch ein gleichmäßige Verteilung der Punkte im gesamten Gebiet gekennzeichnet ist (Abb. 6.2 links), zeigt Konfiguration 2 (Abb. 6.2 rechts) eine relative Häufung entlang der unteren Grenze des Untersuchungsgebiets und nur einen Punkt im oberen Bereich.

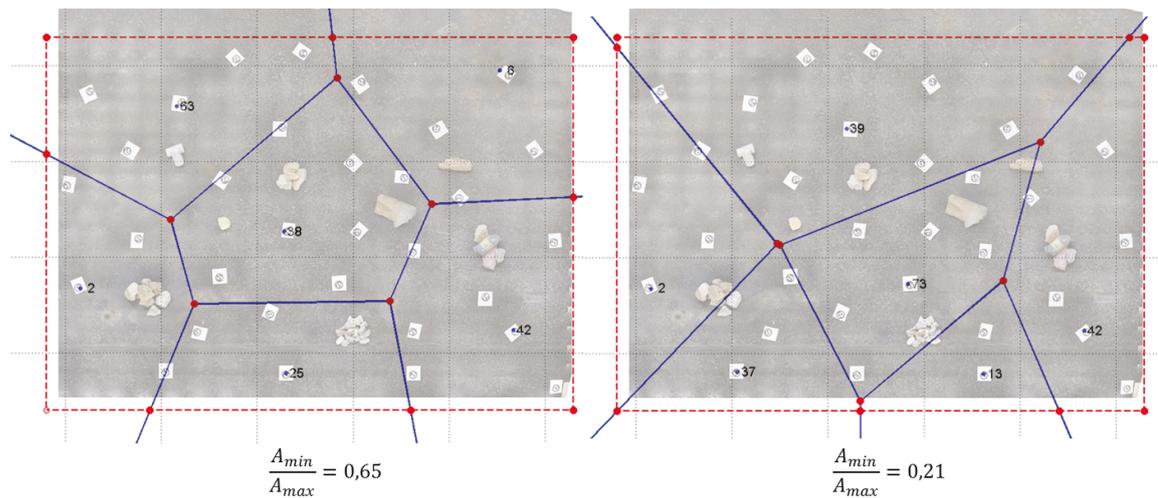


Abb. 6.2 – Wie bei den Versuchen im Realmaßstab wurden auch im Modellmaßstab zwei verschiedene Passpunktanordnungen zur Georeferenzierung analysiert.

Die beiden Konfigurationen wurden wieder unter Anwendung des in Abschnitt 4.1.1 definierten Beurteilungsrahmens erstellt, was bei Konfiguration 1 zu einem von  $A_{min}$  zu  $A_{max}$  von 0,65 und bei Konfiguration 2 von 0,21 führt.

## 6.2 Bildaufnahme

Im Gegensatz zu den Befliegungen im Steinbruch erfolgte die Bildaufnahme aus der Hand und ohne den Einsatz eines UAVs.

Die manuelle Bildaufnahme erfolgte wie bei den realmaßstäblichen Befliegungen in regelmäßigem Raster und parallelen Bahnen, wobei zur Gewährleistung der Bahnhaltigkeit die Kamera händisch an eine Führungsschiene angelegt wurde (Abb. 6.3), wo zusätzlich die geplanten Bildpositionen (errechnet aus der notwendigen Überlappung und dem entsprechenden Antenna Footprint) markiert waren und die längere Bildseite wieder parallel zur Flugbahn ausgerichtet wurde.

Wie in Abb. 6.3 ersichtlich erfolgte die Einhaltung der Flughöhe bzw. Aufnahmedistanz durch handelsübliche Vermessungsstative inklusive optischer Lote- und Horizontierungsvorrichtungen. Die Orientierung der Aufnahmeachse wurde mittels zwischen Kamera und Führungsschiene befestigten Keilen variiert.

Aufgrund der einfachen Durchführbarkeit und aufgrund an den realen Befliegungen erkannten Effekten wurde der Versuchsplan im Modellmaßstab beim Faktor Flughöhe um eine dritte Stufe ergänzt. Die Flughöhe nahm somit Werte von 32, 128 und 160 cm an, und der angewandte Vollfaktorplan vergrößerte sich auf eine Gesamtversuchszahl von 96. Alle übrigen Faktoren blieben jedoch unverändert. Die Bildüberlappung wurde mit 70 und 90 % und die Blickrichtung



Abb. 6.3 – Wie im Realmaßstab erfolgte auch bei den modellhaften Untersuchungen die Bildaufnahme in regelmäßigem Raster und parallelen Bahnen. Zur Gewährleistung der Bahnhaltigkeit wurde eine Führungsschiene verwendet und die Höhe wurde mittels Vermessungsstativen eingestellt.

der Kamera mit 45 bzw. 90° gewählt. Die Georeferenzierung erfolgte wie zuvor beschrieben unter Anwendung der beiden gezeigten Passpunktkonfigurationen.

Die Erhöhung der minimalen Flughöhe von eigentlich 30 auf 32 cm war der Tatsache geschuldet, dass, obwohl der Mindestfokussierabstand der verwendeten Kamera laut Datenblatt 24 cm beträgt, bei einem Aufnahmeabstand von 30 cm keine scharfen Bilder hergestellt werden konnten. Als Aufnahmesystem kam wie im Realmaßstab die beschriebene Sony  $\alpha 6000$  zum Einsatz, die somit das einzige nicht skalierte Element der Versuchsanordnung darstellt. Aufgrund des geringeren Objektabstands waren Anpassungen in der Fokussierung der Optik notwendig, da die im Realmaßstab gewählte Fokuseinstellung "unendlich" bei Objektabständen im Bereich weniger Dezimeter natürlich nicht verwendet werden kann. Die Fokuseinstellungen wurden für jede Höhe bzw. auch Blickrichtung separat vorgenommen und insbesondere bei den geringen Aufnahmedistanzen kam auch der Blendenöffnung bzw. der Beleuchtung besondere Bedeutung zu. Scharfe Bilder waren nahezu nur mit kleinen Blendenöffnungen möglich, wodurch naturgemäß auch die auf den Sensor treffende Lichtmenge verringert wurde. Um Bewegungsunschärfe durch längere Belichtungszeiten zu vermeiden, wurden auf eine gute Ausleuchtung des Versuchsareals geachtet und zusätzlich Halogenscheinwerfer positioniert (in Abb. 6.3 nicht ersichtlich).

### 6.3 Bildauswertung

Die Auswertung erfolgte auf die selbe Weise wie bei den realmaßstäblichen Versuchen (siehe Abschnitt 5.3). Die Prozessierung der Bilder wurde mit "qt-offline-sfm" unter Verwendung der selben Parameter durchgeführt, und aufgrund der Tatsache, dass anhand separater Versuchsreihen gezeigt werden konnte, dass der Einfluss nicht signifikant ist, wurde auch die selbe initiale Kalibriermatrix verwendet.

Im Gegensatz zu den Befliegungen im Pronat Steinbruch konnten im vorliegenden Fall jedoch alle 96 Datensätze problemlos ausgewertet und der Versuchsplan entsprechend vollständig abgearbeitet werden.

Um eine vollständige Analyse zu ermöglichen wurden auch im Modellmaßstab zusätzlich zu den genannten 96 Versuchsdurchläufen Faktorkombinationen gebildet. Da im Modellmaßstab insgesamt drei Aufnahmeentfernungen untersucht wurden, konnten auch zusätzliche Kombinationen konstruiert werden, weshalb zusätzlich zu den 27 realmaßstäblichen noch 14 weitere, und so

mit insgesamt 41 kombinierte Datensätze ausgewertet wurden. Wie im Realmaßstab erfolgte die Bildauswahl aus beiden "Aufnahmeblöcken" und außerdem wurde jeder Datensatz je einmal unter Anwendung der beiden Passpunktkonfigurationen in das übergeordnete Referenzsystem transformiert.

# Kapitel 7

## Ergebnisse im Realmaßstab

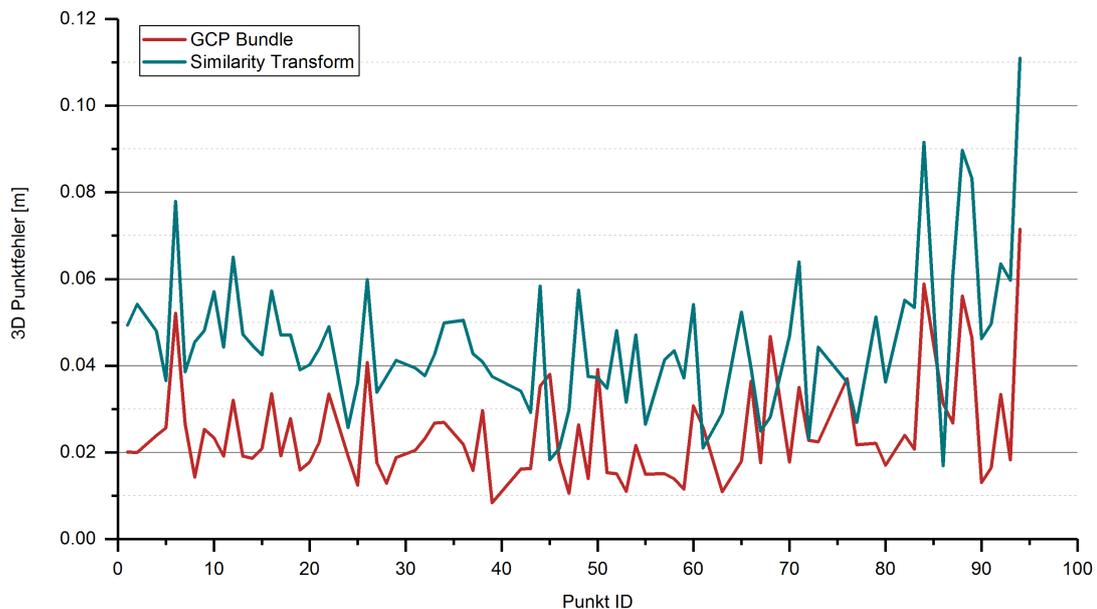
Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse der beschriebenen Versuche präsentiert werden. Neben den im Fokus stehenden Qualitätsmerkmalen (siehe Abschnitt 4.4) wird vor allem auch die Güte der Eingangsparameter bzw. die Genauigkeit der Faktorstellungen untersucht und außerdem auch im Detail auf die Ergebnisse aus den Faktorkombinationen eingegangen.

### 7.1 Erreichte Genauigkeiten - Grundlegende Genauigkeitsüberprüfung

Wie in Kapitel 3 erwähnt steht die erreichte Genauigkeit in unmittelbarem Zusammenhang mit der Bodenauflösung (GSD) bzw. dem Aufnahmeabstand. Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen (z.B.: (Luhmann, 2018a), (Greiwe et al., 2017) und (Rumpler et al., 2014)) zeigen dass die erreichbaren Genauigkeiten nach aktuellem Entwicklungsstand bei rund 1,5 GSD liegen, wobei unter üblichen im Bergbau herrschenden Bedingungen von einer Grenze von rund 2,5 bis 3 cm gesprochen werden muss. Hierbei ist anzumerken, dass in der Lage durchaus Werte bis zu 1 GSD möglich sind, wobei in der Höhe mit Werten von 2 bis 3 GSD gerechnet werden muss. Natürlich gilt dies nur für den üblichsten Fall des mehr oder weniger flachen Objekts und vertikaler Aufnahmerichtung und muss z.B.: beim Einsatz von UAVs zur Bruchwandvermessung umgedacht werden. Allgemeiner formuliert würde das heißen, dass in "Line of Sight" geringere Genauigkeiten zu erwarten, und quer zur Aufnahmerichtung Ergebnisse in der Größenordnung der Bildauflösung möglich sind.

Diese Erfahrungswerte konnten auch mit der in der gegenständlichen Forschung eingesetzten Ausrüstung anhand des Beispiels einer Bruchwand am Steirischen Erzberg verifiziert werden, wie in Abb. 7.1 erkannt werden kann (Rumpler et al., 2014). Vor allem bei dem hier gezeigten stark konvergentem und überlappenden Datensatz trägt die Integration externer Constraints (z.B. Passpunkte oder hochgenaue Kamerapositionen) in den Bündelblockausgleich positiv zur Güte der Ergebnisse bei. Die türkise Linie stellt dabei die Ergebnisse nach starrer Ähnlichkeitstransformation, und die rote nach Integration von Passpunkten in den Bündelblockausgleich dar. Jeder Punkt entlang der Linien repräsentiert dabei einen am Objekt angebrachten Kontrollpunkt. Es zeigt sich deutlich, dass bei "GCP Bundle" die Genauigkeit an allen Objektpunkten erhöht werden kann, und überdies werden Ausreißer geglättet was gleichbedeutend mit der Korrektur systematischer Deformationen der Rekonstruktion ist.

Die Benennung der Punkte am Objekt erfolgte von links nach rechts in aufsteigender Reihenfolge, wodurch der Verlauf der dargestellten Kurven eine weitere geometrische Qualität aufweist. Insbesondere am rechten Rand (Punkt ID 80-96) sind größere Abweichungen zu erkennen, die zwar durch den gezwängten Bündelblockausgleich reduziert werden aber trotzdem erkennbar



**Abb. 7.1** – Am Beispiel einer Bruchwand am Steirischen Erzberg konnte die Eignung der eingesetzten Ausrüstung eindeutig nachgewiesen werden. Die erreichten Genauigkeiten belaufen sich Mittel auf 1,54 GSD, wodurch auch aus der Literatur bekannte Erfahrungswerte verifiziert wurden. (Rumpler et al., 2014)

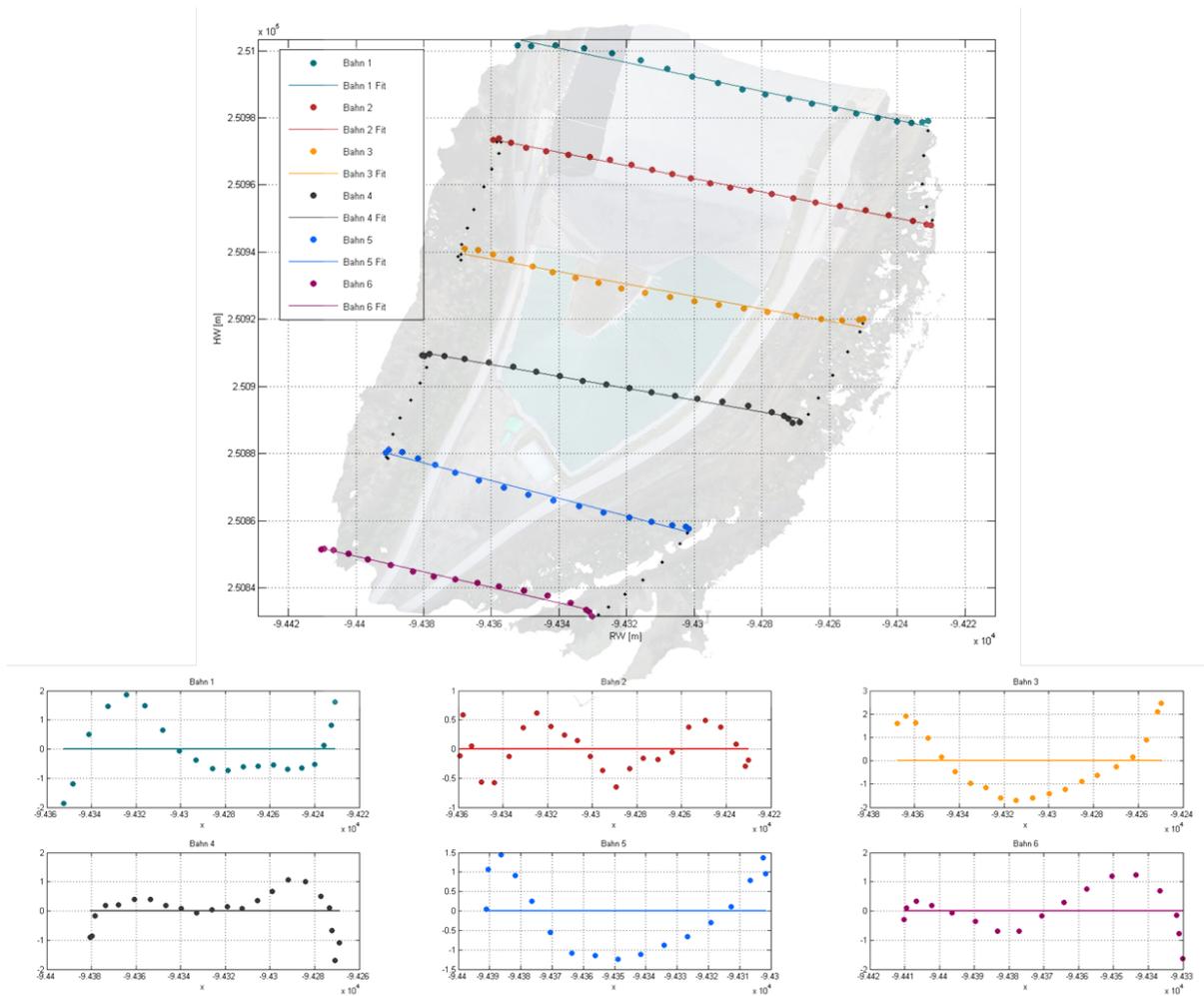
bleiben. Im Mittel können jedoch die aus der Literatur bekannten Erfahrungswerte reproduziert werden (mittlerer Fehler über alle Kontrollpunkte beträgt 1,54 GSD), woraus geschlossen wird, dass die eingesetzte Ausrüstung für die durchgeführten Untersuchungen als geeignet betrachtet werden kann.

## 7.2 Güte der Eingangsparameter

Eine der grundlegenden Forderungen der statistischen Versuchsplanung ist die exakte Abarbeitung des Versuchsplans, sowie eine ausreichend genaue Einstellung der Faktorstufen. Vor diesem Hintergrund wurde auch im vorliegenden Fall überprüft inwieweit die definierten Faktorstufen eingehalten werden konnten, bzw. ob die Qualitätsmerkmale durch etwaig ungenaue Faktoreinstellung verfälscht wurden. Indirekt legen die gewählten Faktorstufen die geplante äußere Orientierung jedes einzelnen Bildes fest und entsprechend kann aus der tatsächlichen Aufnahmegeometrie auch die Güte der Faktoreinstellung anhand geometrischer Parameter bewertet werden.

Alle Flüge erfolgten als regelmäßige Streifenflüge in planarem Raster und der Abstand zwischen den einzelnen Flugbahnen wird durch den gewählten Bildüberlapp in Kombination mit der Flughöhe und der Blickrichtung der Kamera festgesetzt. Sollen demnach die Faktorstellungen evaluiert werden, so müssen vor allem die Flughöhe, die Fähigkeit des Flugsystems einer geraden Bahn zu folgen und die Genauigkeit der Gimbalsteuerung betrachtet werden.

Die realmaßstäblichen Befliegungen wurden als autonome Wegpunktflüge durchgeführt, wobei die zuvor in UgCS geplanten Flüge auf den DJI Naza M V2 Flight Controller übertragen wurden. In diesem Fall wurde somit die Genauigkeit der verbauten on-Board Sensorik und die regelungstechnischen Fähigkeiten des Flugsystems überprüft.



**Abb. 7.2** – Aus den mittels SfM ermittelten Aufnahmepositionen zeigt sich, dass das eingesetzte Flugsystem zwischen 0,5 und rund 2 m von einer geplanten geradlinigen Bahn abweicht, wobei eine regelungstechnische Systematik und äußerer Einflüsse erkannt werden können.

Abb. 7.2 zeigt die Ergebnisse einer Vorabuntersuchung zur Gewährleistung der Faktorstellungen bzw. insbesondere des Bildüberlapps. Anhand eines mit der beschriebenen Ausrüstung durchgeführten Vermessungseinsatzes zur Kubaturermittlung eines Deponiekörpers, wurde die Fähigkeit des Flugsystems einer gerade Flugbahn zu folgen untersucht. Wie im beschriebenen Versuchsplan vorgesehen erfolgte die Befliegung in gerade Bahnen, wobei diese in Abb. 7.2 verschiedenfarbig dargestellt sind. Die farbigen Punkte zeigen die mittels SfM ermittelten Aufnahmepositionen der Kameras, und zur Beurteilung der “Bahnhaltigkeit“ wurde an jede Bahn eine lineare Funktion angepasst und anschließend die Residuen analysiert.

Besonders anhand der als Subplots dargestellten Residuen können die Abweichungen von bis zu 2 m erkannt werden, wobei allerdings auch erwähnt werden muss, dass Bahn 2 um nur 0,5 m von der Geraden abweicht. Insgesamt kann jedoch eindeutig eine regelungstechnische Systematik erkannt werden. Das Flugsystem versucht der durch Anfangs- und Endpunkt vorgegebenen Linie zu folgen, allerdings zeigt die Fluglageregelung eine erkennbare Trägheit, was zu einer mäandrierenden Bahn führt. Vor allem bei Bahn 2 (erste Reihe Mitte) kann beinahe ein sinusförmiger Verlauf erkannt werden. Durch das Anhalten und drehen am Ende der Bahn kommt es an den Anfangs- und Endpunkten zumeist zu den größten Abweichungen. Ausnahmen hierzu bilden

Bahn 3 (erste Reihe rechts) und Bahn 5 (zweite Reihe Mitte) die eine markante Ausbauchung in der Mitte der Bahn zeigen. In diesem Fall dürften wohl eher äußere Umstände (z.B. Windböen) für die starken Abweichungen verantwortlich sein, was vor allem durch die gleichgeartete Richtung und auffallend größere Amplitude bei Bahn 3 deutlich wird.

Die Auswirkung und Relevanz der gezeigten Ergebnisse erschließt sich vor allem in Kombination mit den geometrischen Parametern der im Versuchsplan enthaltenen Befliegungen, die in Tab. 7.1 in übersichtlicher Form zusammengefasst sind. Basierend auf der physischen Sensorgröße, der Pixelanzahl und der Brennweite der Kamera kann in Abhängigkeit von der Flughöhe und der Ausrichtung der Aufnahmeachse relativ zum Objekt die Ground Sampling Distance bzw. die Größe eines Pixels am Boden errechnet werden. Die Gesamtheit aller Pixel am Boden definiert den sogenannten "Antenna Footprint", der bei schräger Sicht nicht mehr rechteckig sondern trapezförmig ist, woraus sich bei gegebenem Überlapp der zulässige bzw. einzuhaltende Abstand zwischen den Bildern in lateraler und longitudinaler Richtung ergibt.

Tab. 7.1 – Geometrische Parameter der Flugplanung im Realmaßstab

Flughöhe	Blickwinkel	GSD		Antenna Footprint			height	Bildabstand	
		width	height	near	far	mean		width	height
(m)	(°)	(cm/px)	(cm/px)		(m)		(m)	(m)	(m)
<b>Überlapp 90%</b>									
25	90	0,612	0,609	36,719	36,719	36,719	24,375	3,672	2,438
25	45	0,612	1,682	38,837	112,722	75,780	63,948	7,578	6,395
150	90	3,672	3,656	220,313	220,313	220,313	146,250	22,031	14,625
150	45	3,672	10,089	233,022	676,333	454,677	383,685	45,468	38,369
<b>Überlapp 70%</b>									
25	90	0,612	0,609	36,719	36,719	36,719	24,375	11,016	7,313
25	45	0,612	1,682	38,837	112,722	75,780	63,948	22,734	19,184
150	90	3,672	3,656	220,313	220,313	220,313	146,250	66,094	43,875
150	45	3,672	10,089	233,022	676,333	454,677	383,685	136,403	115,106

Eine Abweichung von der geplanten Flugroute hat unmittelbare Auswirkung auf die Überlappung zwischen Bildern benachbarter Flugstreifen und beeinflusst somit die Versuche und deren Ergebnisse. Von besonderer Bedeutung ist dies vor allem bei geringeren Flughöhen und starker Bildüberlappung, da zur Gewährleistung des hohen Überlapps ein Abstand von rund 2,5 m eingehalten werden sollte. (siehe gelb hervorgehobene Zellen in Tab. 7.1) Die in Abb. 7.2 erkannten Abweichungen von bis zu 2,5 m können in diesem Fall ein erhebliches Problem darstellen und die Versuchsergebnisse stark verfälschen. Da es sich aber einerseits um ein handelsübliches System handelt ist aber davon auszugehen, dass vergleichbare Abweichungen auch bei Vermessungsflügen im Bergbau zu erwarten sind. Andererseits erfolgte die spätere Bildauswahl für die Versuchsdurchläufe händisch auf Basis der tatsächlichen Bildaufnahmepositionen, die mittels SfM unter Verwendung aller Bilder und Passpunkte ermittelt wurden, wobei natürlich auf die geometrische Richtigkeit der Anordnung geachtet wurde.

Neben dem Einfluss der Bahnhaltigkeit müssen aber natürlich noch weitere Parameter der Bildaufnahme einer kritischen Prüfung unterzogen werden. Zullererst ist hier die Flughöhe bzw. auch der indirekte Einfluss der Objektgeometrie zu nennen. Das Flugsystem bestimmt seine Höhe mittels GNSS und barometrischer Höhenmessung und steigt, gemäß der in UgCS durch-

geführten Planung, auf die definierte Höhe über Grund und hält diese im Rahmen von  $< 0,5$  m konstant. Obwohl die Absolutpositionierung mittels GNSS wohl mit Sicherheit keine ausreichende Genauigkeit für eine “ebene“ Flugbahn liefert ist das System durch den Barometer bzw. weitere Sensorik zumindest in der Lage eine angeflogene Höhe konstant zu halten. Von größerer Bedeutung ist bei dieser Vorgehensweise der indirekte Einfluss der Objektgeometrie bzw. Topographie. Wenn das System auf einer konstanten Höhe verbleibt ändert sich der Aufnahmeabstand mit jeder kleinen Veränderung in der Topographie und streng genommen liegt nicht im gesamten Gebiet die selbe Aufnahmeanordnung vor. Eine hochgenaue Anpassung der Flugtrajektorie an die Objektgeometrie ist bei Vermessungsflügen allerdings weder praktisch und wirtschaftlich sinnvoll, noch realistischerweise umsetzbar. Geringe Änderungen in der Aufnahmeanordnung müssen somit in Kauf genommen werden, was auch der üblichen Praxis im Bergbau entspricht. Die verwendete frei verfügbare Version von UgCS bietet überdies keine benutzerfreundliche Möglichkeiten einer geländeangepassten Flugplanung, da keine Möglichkeit besteht eigene Ground Truth Modelle als Basis zu verwenden und die bereitgestellten Geodaten für die kleinräumige UAV-Anwendung in der Regel zu ungenau sind.

Die Objektgeometrie hat aber naturgemäß auch Auswirkung auf die relative Ausrichtung der Kameraachse. Die Blickrichtung der Kamera wurde bezogen auf die vertikale mittels der Gimbalsteuerung definiert. Der verbaute Gimbal ermöglicht eine auf  $1^\circ$  genaue Einstellung und hält mit Ausnahme von Rotationen des Flugsystems um die eigene Steh-Achse die Sensorebene während des ganzen Fluges stabil. Entsprechend kann mit ausreichender Genauigkeit davon ausgegangen werden, dass die Kameraorientierung absolut im Raum festgelegt ist und lediglich die zufälligen Einflüsse der Objektgeometrie erhalten bleiben, die aber generell durch das Referenzpunktfeld erfasst sind und in der Natur der photogrammetrischen Bildaufnahme liegen.

### 7.3 Ergebnisse aus Einzelfaktoren (DoE)

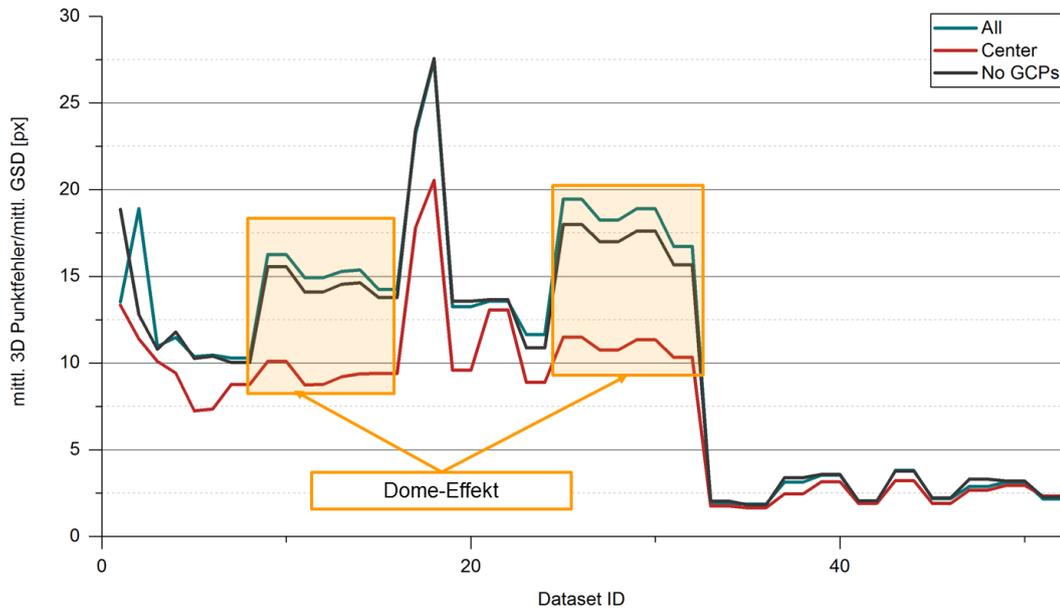
Im Folgenden sollen nun die Ergebnisse des Versuchsplans im Realmaßstab näher betrachtet werden. Neben den, vor allem für die markscheiderische Anwendung bedeutsamen Größen der äußeren Genauigkeit, wurden, um die Ursachen etwaig erkannter Effekte näher zu untersuchen, auch verschiedene Größen der inneren Genauigkeit (siehe Abschnitt 4.4) analysiert.

#### 7.3.1 Äußere Genauigkeit

Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 erwähnt wurde als Fehlermaß der äußeren Genauigkeit die mittlere Länge der 3D-Abstandsvektoren an den Pass- und Kontrollpunkten bestimmt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Datensätze untereinander hat es sich überdies bewährt diese Größe noch durch die mittlere theoretische Bodenauflösung (Ground Sampling Distance) zu dividieren, weshalb in nahezu allen nachfolgenden Abbildungen von “mittl. 3D-Punktfehler/mittl. GSD“ in Pixel (px) gesprochen wird.

Werden alle 52 vorhandenen Datensätze betrachtet so zeigt sich zunächst einmal, dass die erreichte mittlere Genauigkeit zwischen 1,9 und 27,5 GSD liegt, wobei eine markante Sprungstelle mit der Flughöhe erkennbar ist. Entgegen der ursprünglichen Erwartung, dass eine höhere Auflösung bzw. geringere Flughöhe zu einer höheren Genauigkeit führt zeigt sich anhand der durchgeführten Flüge genau das Gegenteil. Die “150 m Flüge“ sind auffallend genauer als jene, die in 30 m Höhe aufgenommen wurden, was auch in Abb. 7.3 deutlich erkannt werden kann, wo die Datensätze nach aufsteigender Flughöhe geordnet dargestellt sind. Dieser Effekt zeigt sich teilweise nicht nur relativ anhand der Vielfachen der Ground Sampling Distance, sondern auch absolut in metrischen Fehlern. D.h. bei vielen der durchgeführten Befliegungen konnte das Untersuchungsgebiet aus einer Höhe von 150 m mit höherer geometrischer Richtigkeit erfasst werden als aus

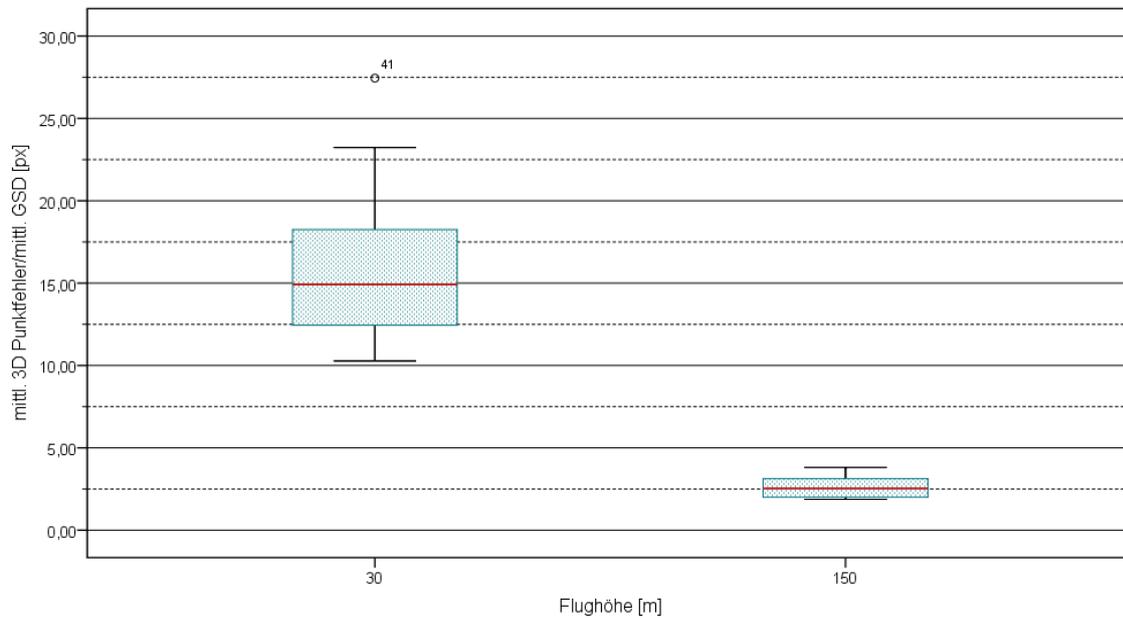
30 m. Außerdem kann erkannt werden, dass die Variabilität innerhalb der Datensätze bei den geringeren Flughöhen wesentlich höher ist. Die in geringer Höhe aufgenommenen Bilder liefern somit schlechtere Ergebnisse und diese zusätzlich mit geringerer Zuverlässigkeit. Bzw. könnte auch abgeleitet werden, dass wenn der Datensatz durch die geringe Flughöhe einmal “destabilisiert“ wurde auch die anderen Faktoren stärkere Auswirkung auf die Rekonstruktionsgenauigkeit entfalten können. (Tscharf et al., 2019b)



**Abb. 7.3** – Wird der mittlere 3D-Punktfehler durch die theoretische mittlere GSD dividiert kann ein eindeutiger Einfluss der Flughöhe erkannt werden, wobei die hohen Flüge zu höheren Genauigkeiten führen (Datensätze sind nach aufsteigender Flughöhe sortiert). nach (Tscharf et al., 2019b)

Noch deutlicher werden die beschriebenen Effekte anhand der Box-Plot Diagramme in Abb. 7.4 sichtbar. Die rechte Box fasst dabei die Ergebnisse aller 150 m Flüge zusammen und links sind jene mit einer Aufnahmedistanz von 30 m dargestellt. Während die mittlere Genauigkeit bei einer Flughöhe von 150 m bei rund 2,5 GSD liegt (rote Linie in Abb. 7.4) konnte aus einer Höhe von 30 m nur eine mittlere Genauigkeit von knapp unter 15 GSD erreicht werden. Außerdem kann auch deutlich die geringere Streuung der Ergebnisse bei größerer Flughöhe erkannt werden. Einerseits ist die “Box“, wo 75 % aller Datensätze enthalten sind rechts viel kleiner als links, und auch die durch die nach oben und unten reichenden T-Balken verdeutlichte Differenz zwischen größtem und kleinstem Wert ist bei größerer Flughöhe auffallend geringer. Korrekterweise muss hier allerdings angemerkt werden, dass die “30 m Box“ aus insgesamt 32 Fällen abgeleitet wurde und in 150 m nur 20 erfolgreiche Versuchsrealisationen zur Verfügung standen. Die Wahrscheinlichkeit zu größerer Streuung ist somit bei 30 m wesentlich höher, wobei die erkannten Unterschiede mit Sicherheit nur zu einem geringen Teil auf diesen Umstand zurückzuführen sind.

Um trotz der angesprochenen Mittelwertbildung über die 3D-Vektoren eine Aussage zur Variabilität der Fehler innerhalb des Untersuchungsgebiets zu ermöglichen, wurden verschiedene “Zonen“ untersucht, bzw. unterschiedliche Kontrollpunktmengen analysiert. Jede der drei in Abb. 7.3 dargestellten Linien steht hierbei für eine Analyse. Während bei “All“ über alle Punkte, sowohl Pass- als auch Kontrollpunkte, gemittelt wurde, wurden bei “Center“ lediglich jene Punkte verwendet, die im Zentrum des betrachteten Gebiets liegen, um so etwaige bei SfM-



**Abb. 7.4** – Der bereits in Abb. 7.3 erkennbare Einfluss der Flughöhe wird bei gruppierter Mittelwertbildung noch deutlicher, und außerdem kann auch eine auffallend geringere Streuung erkannt werden.

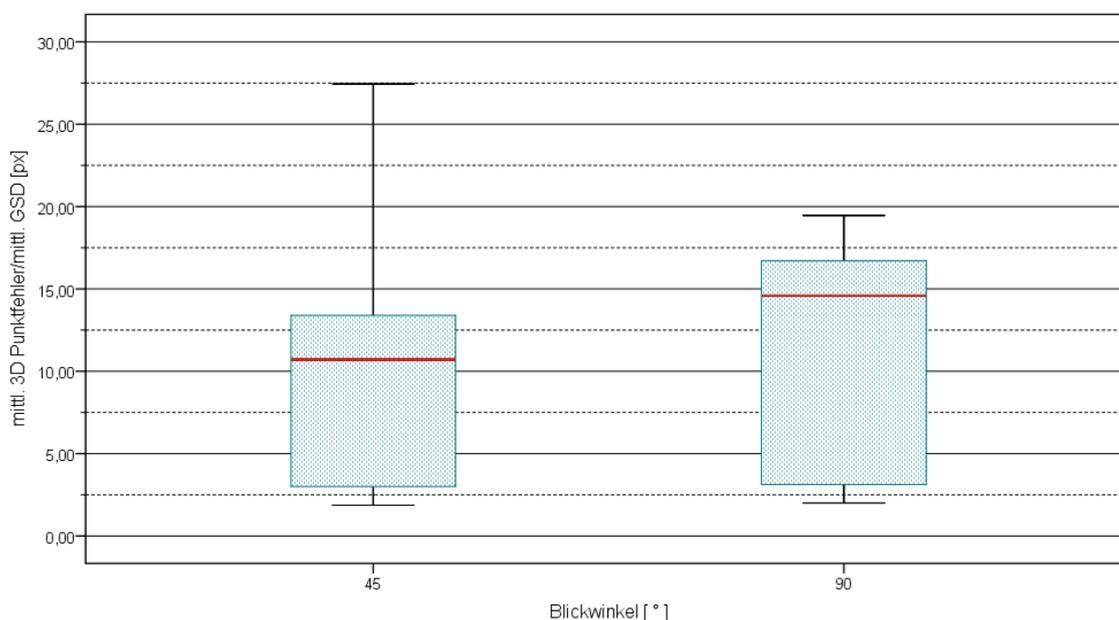
Auswertungen übliche Randeffekte (Dome-Effekt) studieren zu können. Bei “No GCPs“ wurden wiederum nur die Kontrollpunkte zur Mittelwertbildung herangezogen. Zeigen also die türkise und die dunkelgraue Linie starke Differenzen so deutet dies darauf hin, dass die Ergebnisse im Zuge der Transformation zu stark auf die Passpunkte “hin gespannt“ wurden.

Es kann also erkannt werden, dass der Zentrumsbereich bei nahezu allen Datensätzen genauer ist, was bei der beschriebenen Versuchsanordnung allerdings zu erwarten war und sich auch mit der herrschenden Lehrmeinung deckt (siehe Kapitel 2 und 3). Die Rekonstruktionen zeigen fast durchgängig den für SfM typischen “Dome-Effekt“ (die gesamte Rekonstruktion wird domartig verkrümmt, vgl. hierzu (James and Robson, 2014)). Auch dieser Effekt ist bei größeren Flughöhen schwächer ausgeprägt, was aber wohl in der Tatsache begründet liegt, dass bei den höheren Flügen weiter über die Ränder geblickt und ein größeres Gebiet erfasst wird, wodurch auch die angesprochenen Randeffekte außerhalb des Untersuchungsraums liegen und hier nicht erkannt werden können. (Tscharf et al., 2019b) Auffallend groß ist der beschriebene Unterschied in den beiden farblich markierten Bereichen. Hier liegen die niedrig geflogenen Nadirflüge. Der Dome-Effekt ist demnach bei Vertikalaufnahmen deutlich stärker ausgeprägt als bei Schrägsicht. Durch die vertikalen und vor allem parallelen Aufnahmeachsen ist die Schnittgeometrie der korrespondierenden Bildstrahlen stark schleifend, wodurch vor allem die Höhengenaugkeit negativ beeinflusst wird und was in weiterer Folge zu einer Durchbiegung der 3D-Rekonstruktion führt. Da bei geringer Flughöhe viele Bilder notwendig sind um das gesamte Gebiet zu erfassen, kommt es überdies zu einer Verstärkung, da der gesamte Bildverband auch eine größere Anzahl an Verbindungen umfasst wo Fehlorientierungen auftreten können.

Wird der verlauf der Kurven in Abb. 7.3 noch stärker hinsichtlich Korrelation mit den Faktorstufen analysiert, so zeigt sich, dass Schrägsicht zu höheren Genauigkeiten führen kann als Nadiraufnahmen, und dass ein höherer Überlapp naturgemäß die Genauigkeit erhöht, wobei der laterale Überlapp einen stärkeren Einfluss aufweist als jener in longitudinaler Richtung. In Abb. 7.3 kann dies an den “Höckern“ im Linienverlauf erkannt werden. Wie erwähnt wurden zur

besseren Veranschaulichung die Ergebnisse nicht randomisiert wiedergegeben, sondern zunächst nach Überlapp, danach nach Blickwinkel und zuletzt nach aufsteigender Flughöhe sortiert. Dies führt zu “Blöcken“ ähnlicher Aufnahmekonfiguration, die vordergründig durch die Blickrichtung der Kamera und die Flughöhe gebildet werden.

Deutlicher werden die erwähnten Effekte anhand der Box-Plot Diagramme in den Abbildungen 7.5 bis 7.7. Die mittleren Fehler bei Schrägsicht belaufen sich auf 10,7 GSD, während bei Nadiraufnahmen im Mittel nur 14,6 GSD erreicht werden konnten (vgl. Abb. 7.5). Die geringeren Unterschiede im Mittelwert deuten auf einen wesentlich schwächeren Effekt hin, als dies bei der Flughöhe der Fall ist und außerdem implizieren die großen Streuungen sowohl bei 45° als auch 90°, dass die Ergebnisse zusätzlich noch von anderen Faktoren beeinflusst werden, die überdies einen stärkeren Effekt zeigen.

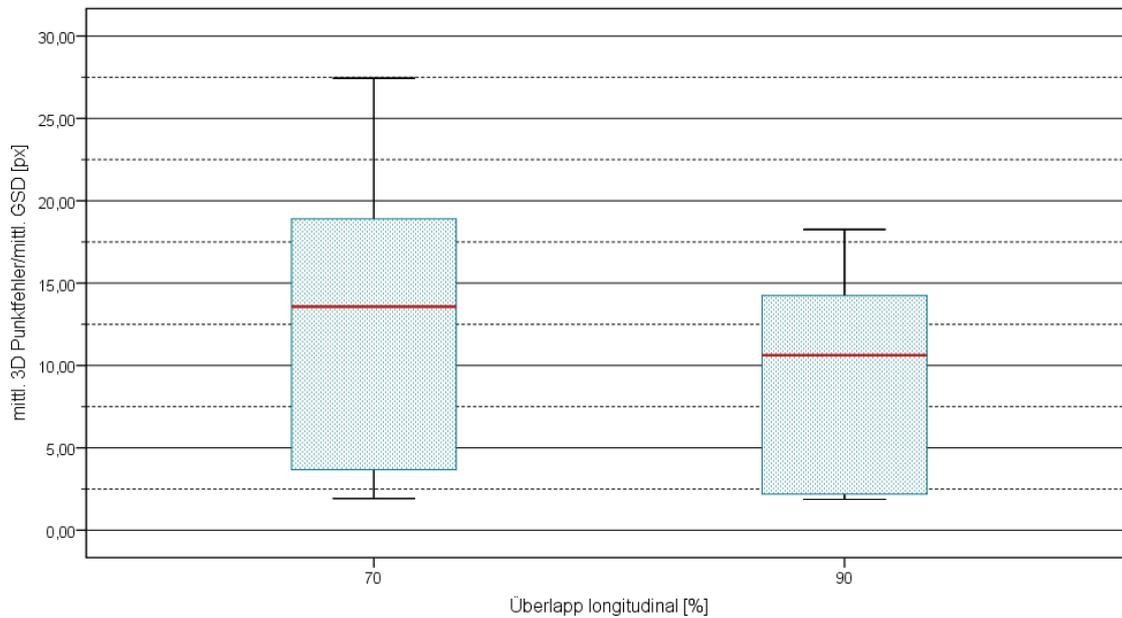


**Abb. 7.5** – Grundsätzlich kann gezeigt werden, dass sich Schrägsicht zwar positiv auf die Ergebnisse auswirkt, die große Streuung der Ergebnissen deutet jedoch darauf hin, dass noch zusätzliche Faktoren mit stärkerem Einfluss vorhanden sein müssen.

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei näherer Betrachtung der Bildüberlappung in longitudinaler Richtung (vgl. Abb. 7.6). Bei einem Überlapp von 90 % liegt der mittlere Fehler bei 10,6 GSD und bei einer Überlappung von 70 % beläuft sich die mittlere Genauigkeit auf 13,5 GSD.

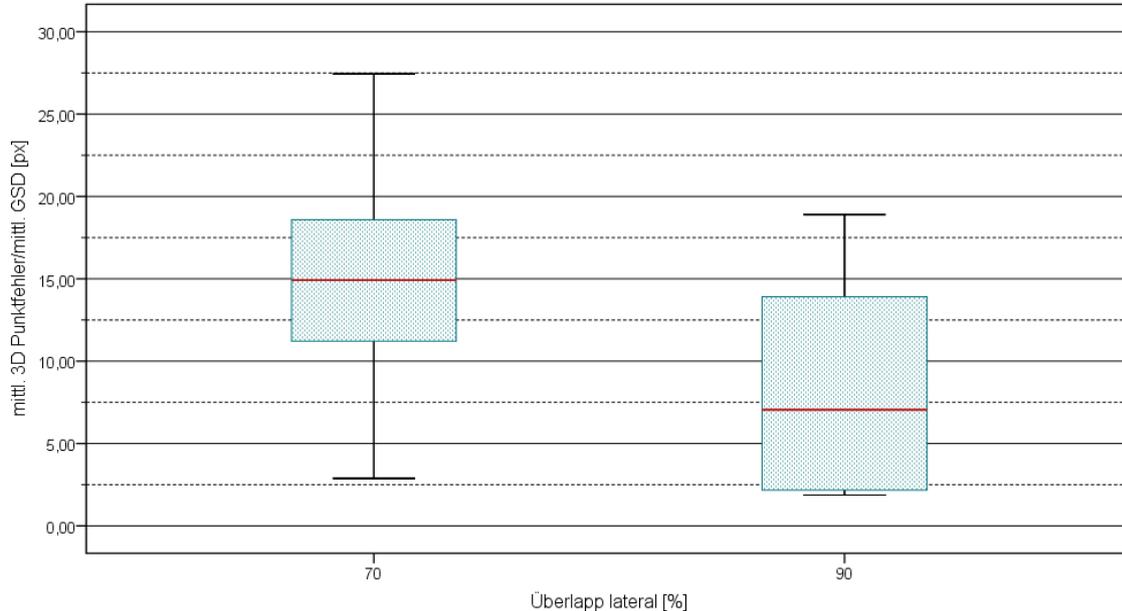
Im Gegensatz zur Betrachtung der Blickwinkel weisen die stark überlappenden Datensätze allerdings auch eine geringere Streuung auf, was auf einen stärkeren Einfluss schließen lässt.

Noch stärker ausgeprägt ist der positive Effekt der Bildüberlappung zwischen den Flugbahnen (lateral). Die Ergebnismenge verbessert sich von 14,9 GSD bei 70 % auf 7,0 GSD bei 90 % und auch die Streuungen der Werte ermöglichen eine deutlichere Aussage. Während bei der longitudinalen Überlappung (siehe Abb. 7.6) auch bei geringen Werten noch häufig gute Ergebnisse erzielt werden konnten - Box reicht weit nach unten bzw. deutlich unter die mittlere Genauigkeit der hohen Bildüberlappung - ist dies beim lateralen Überlapp nicht der Fall. 75 % aller Ergebnisse mit geringer Überlappung liegen deutlich über der mittleren Genauigkeit bei hoher Überlappung, bzw. zu einem Gutteil auch über dem oberen Quartil. Positivausreißer sind zwar aufgrund hier nicht sichtbarer Effekte anderer Faktoren trotzdem möglich, aber geringer wahrscheinlich als bei



**Abb. 7.6** – Obwohl der Effekt geringer ist als bei der Flughöhe, führt eine höhere Bildüberlappung in Flugrichtung eindeutig zu einer Verbesserung der Ergebnisse.

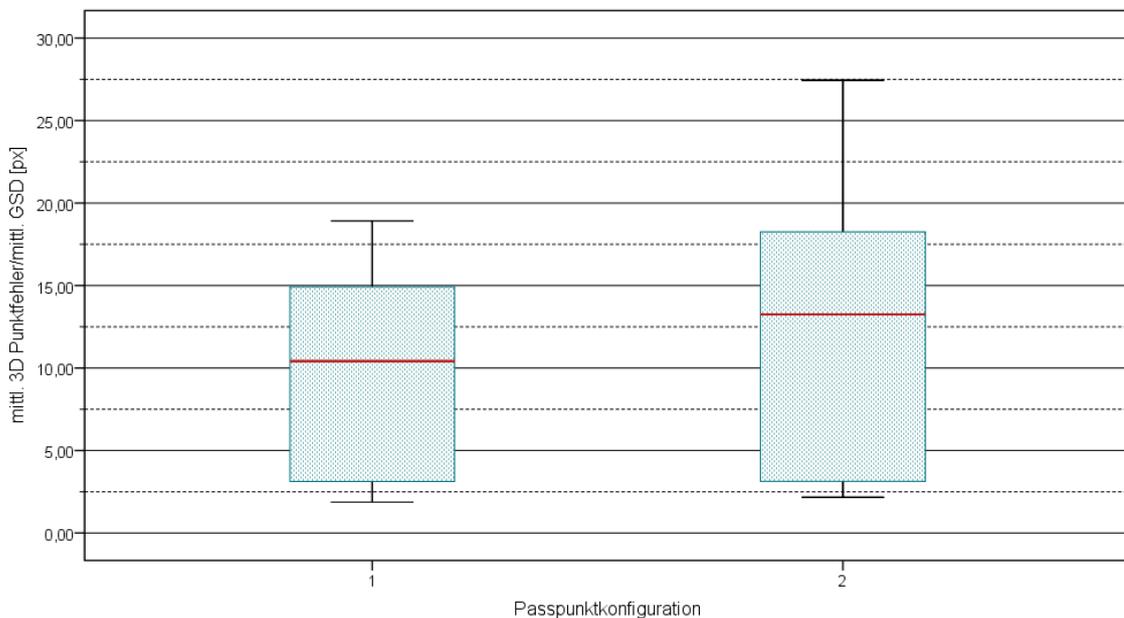
den in Abb. 7.5 und 7.6 dargestellten Faktoren der Blickrichtung und der Überlappung innerhalb der Bahn.



**Abb. 7.7** – Die detaillierte Analyse der lateralen Bildüberlappung zeigt deutlich, dass der Überlapp zwischen den Flugstreifen von größerer Bedeutung ist als jener innerhalb der Flugbahn.

Neben den unmittelbar den Bildverband beschreibenden Faktoren wurde jeder Datensatz auch unter Anwendung von zwei unterschiedlichen Passpunktanordnungen in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert. In Abb. 7.8 sind die Ergebnisse grafisch gegenübergestellt und es kann erkannt werden, dass die Transformation mit Passpunktanordnung 2 tendenziell

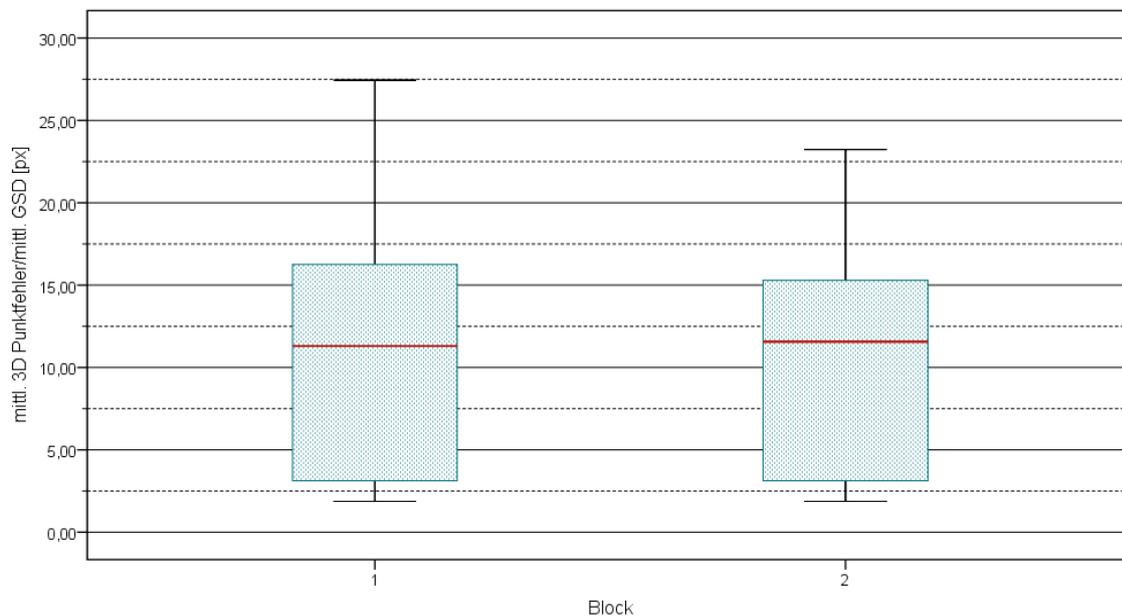
zu schlechteren Ergebnissen führt. Insbesondere fällt allerdings die größere Streuung der Ergebnisse auf. Passpunktconfiguration 2 führt nicht zwingendermaßen zu schlechteren Ergebnissen, aber die Wahrscheinlichkeit hierzu ist auf jeden Fall höher. Damit wird auch die grundlegende Idee hinter der Faktoren- und Stufendefinition reproduziert. Aus der numerischen Simulation in den Vorversuchen (vgl. Abschnitt 4.1.1) ging hervor, dass Passpunktconfiguration 2 nicht immer zu richtig geschätzten Transformationsparametern führt, gute Ergebnisse jedoch auch nicht ausgeschlossen sind. Die Streuung die anhand der Ergebnisse mit Passpunktconfiguration 1 erkannt werden kann, repräsentiert entsprechend viel mehr die Variabilität, die durch die übrigen Faktoren hervorgerufen wird und ist nur zu einem kleinen Anteil auf die Georegistrierung zurückzuführen.



**Abb. 7.8 – Wird Passpunktconfiguration 2 zur Transformation in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem verwendet sind schlechte Ergebnisse wahrscheinlicher. Umgekehrt führt dieser Umstand aber nicht zwingendermaßen zu einer Fehlschätzung der Transformationsparameter.**

Zuletzt besteht durch die beschriebene Blockbildung auch die Möglichkeit alle nicht explizit gesteuerten bzw. beeinflussbaren Faktoren unter dem Faktor Block zusammen zu fassen und deren Effekt entsprechend zu analysieren. Sofern der Faktorraum richtig abgegrenzt wurde und auch die äußeren Versuchsbedingungen konstant gehalten wurden, sollten hier keine starken Effekte auftreten. Der Vergleich der beiden Mittelwerte in Abb. 7.9 zeigt deutlich, dass die Abgrenzung des Versuchsraums im vorliegenden Fall gut gewählt wurde, und auch alle relevanten Faktoren Eingang in den Versuchsplan fanden. Block 2 weist zwar eine etwas geringere Streuung auf, allerdings ist dies hauptsächlich auf das zufällige Auftreten der markanten Ausreißer in Aufnahmeblock 1 zurückzuführen und deutet nicht unmittelbar auf einen verdeckten systematischen Einfluss hin.

Insgesamt bleibt aber der die Flughöhe klar als stärkster Einflussparameter auf die äußere Genauigkeit bestehen, was vor allem aufgrund der gewählten Betrachtung als vielfaches der mittleren theoretischen Ground Sampling Distance und aufgrund des Widerspruchs zur “natürlichen Erwartung“, dass höhere GSD auch zu höherer äußerer Genauigkeit führt, überraschend ist. Die anderen Faktoren haben zwar definitiv Einfluss, der Effekt auf die untersuchte äußere Genauigkeit ist aber mit Sicherheit geringer als jener der Flughöhe. Dies zeigt sich einerseits am

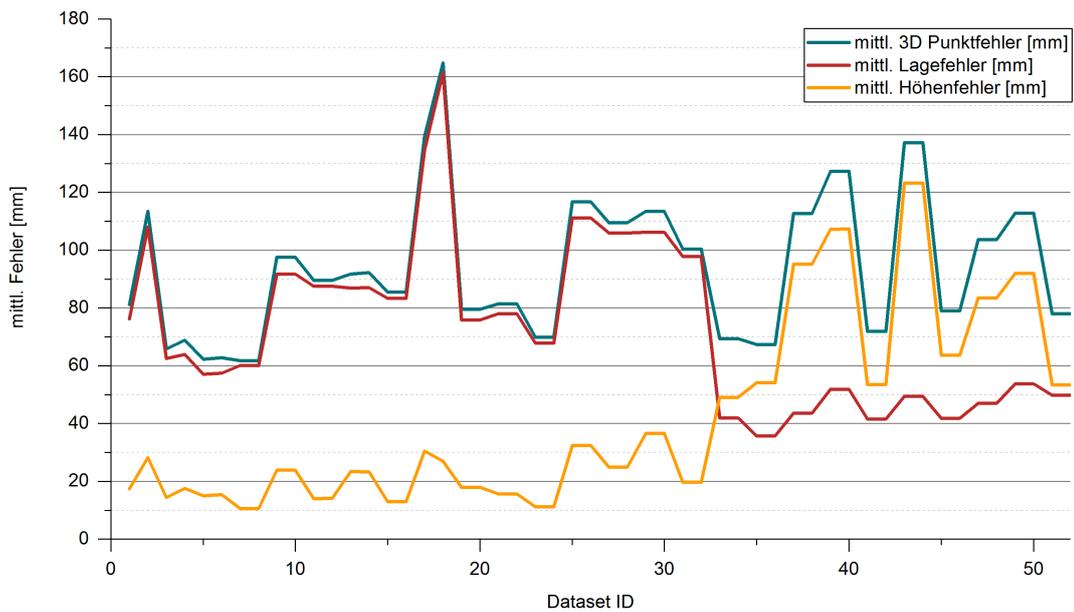


**Abb. 7.9** – Der Einfluss des Aufnahmeblocks auf die äußere Genauigkeit deutet darauf hin, dass der Faktorraum richtig abgegrenzt wurde, alle relevanten Einflussgrößen Teil des Versuchsplans sind und dass die Versuchsbedingungen in ausreichendem Maße konstant gehalten werden konnten.

Kurvenverlauf in Abb. 7.3, wo der Übergang von geringer zu großer Flughöhe zu einer ausgeprägten Sprungstelle führt und die anderen Faktoren nur verhältnismäßig kleine “Ausschläge“ hervorrufen, andererseits wird vor allem anhand der in den Box-Plot Diagrammen sichtbaren Streuung deutlich, dass neben dem untersuchten Faktor jeweils noch andere Faktoren vorhanden sein müssen, die die Ergebnisse beeinflussen.

Bei den markanten Ausreißern mit einer mittleren Genauigkeit von 27,5 bzw. 23,2 GSD (Datenpunkt 41 in Abb. 7.4 und Dataset ID 17 bzw. 18 in Abb. 7.3)) handelt es sich um niedrig geflogene Datensätze, die sowohl in lateraler als auch longitudinaler Richtung einen Überlapp von 70 % aufweisen. Die Aufnahmeachse war mit  $45^\circ$  gegen die Vertikale geneigt und beide Datensätze wurden unter Verwendung der schlechteren Passpunktconfiguration 2 in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert. Im Gegensatz dazu finden sich die mittels Konfiguration 1 transformierten Datensätze ganz links und zeigen Genauigkeiten von 13,5 bzw. 18,9 GSD. In diesem Fall zeigt sich, dass Faktoren mit geringerem Einfluss von “stärkeren“ überdeckt werden. Obwohl eine Blickrichtung von  $45^\circ$  grundsätzlich zu besseren Ergebnissen führt, ist hier der negative Einfluss der geringen Flughöhe, des geringen Überlapps und der Passpunktconfiguration zu stark. Wie bereits in den Vorversuchen (vgl. Abschnitt 4.1.1) erkannt ist es daher nicht möglich die Genauigkeit an einem einzelnen Parameter festzumachen oder die Faktorstellungen isoliert zu betrachten. Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Faktoren haben starke Auswirkung auf die Ergebnisse und sollten daher mitberücksichtigt werden.

Die besten Ergebnisse konnten aus einer Flughöhe von 150 m, mit 90 % Überlapp in beiden Richtungen, geneigter Aufnahmeachse und Passpunktconfiguration 1 erreicht werden. In diesem Fall waren nur 10 Bilder notwendig, um das gesamte Gebiet zu erfassen und diese dürften starke Verknüpfungen untereinander aufweisen. Die Rekonstruktion ist somit starr und weist nur eine geringe Anzahl an “Gelenken“ auf, wo Fehler passieren und systematische Deformationen auftreten können.



**Abb. 7.10** – Während bei geringer Flughöhe die Lage sehr schlecht und die Höhe sehr genau erfasst werden können, ist bei großen Flughöhen genau das Gegenteil der Fall.

Wird die Genauigkeit der Höhe und der Lage getrennt betrachtet ergibt sich das in Abb. 7.10 gezeigte Bild. Während bei geringer Flughöhe der dominante Fehleranteil jener der Lage ist, klappt dies mit dem Sprung in der Flughöhe schlagartig zum Höhenfehler um. Die jeweilig andere Komponente liefert immer nur einen geringen Anteil am Gesamtfehler, was vor allem auch anhand des partiell sehr ähnlichen Kurvenverlaufs der roten bzw. gelben Linie mit der türkisen Summenkurve erkannt werden kann. Vor allem hinsichtlich des Höhenfehlers, bzw. aus Sicht der Kamera hinsichtlich der geschätzten Tiefe, gilt die theoretische Betrachtung des Schnittwinkels korrespondierender Bildstrahlen auch für Structure from Motion. Je größer der Aufnahmeabstand, desto schleifender werden die Strahlenschnitte und desto geringer entsprechend auch die erreichte Genauigkeit. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch anhand der dargestellten Punktlagefehler (rote Linie in Abb. 7.10). Bei geringer Flughöhe werden die Schnittwinkel zwischen den Bildstrahlen sehr groß, was eine größere Unsicherheit in der  $xy$  Ebene zur Folge hat. Gleichzeitig ist die Konfiguration zur Schätzung der Tiefeninformation allerdings nahezu optimal.

Insgesamt kann auf jeden Fall ein eindeutiger und auch reproduzierbarer Zusammenhang zwischen der gewählten Aufnahmeanordnung und der erzielbaren Genauigkeit erkannt werden. Obwohl der Effekt der Flughöhe der mit Abstand stärkste zu sein scheint, kann auch die Stellung der anderen Faktoren in den Ergebnissen erkannt werden. Als erste Handlungsempfehlung könnte entsprechend der Rat zu größeren Flughöhen und stärkeren Bildüberlappungen ausgesprochen werden. Eine nähere Untersuchung der Ursachen und vor allem auch eine Verifizierung der dargestellten Effekte soll in den folgenden Abschnitten erfolgen.

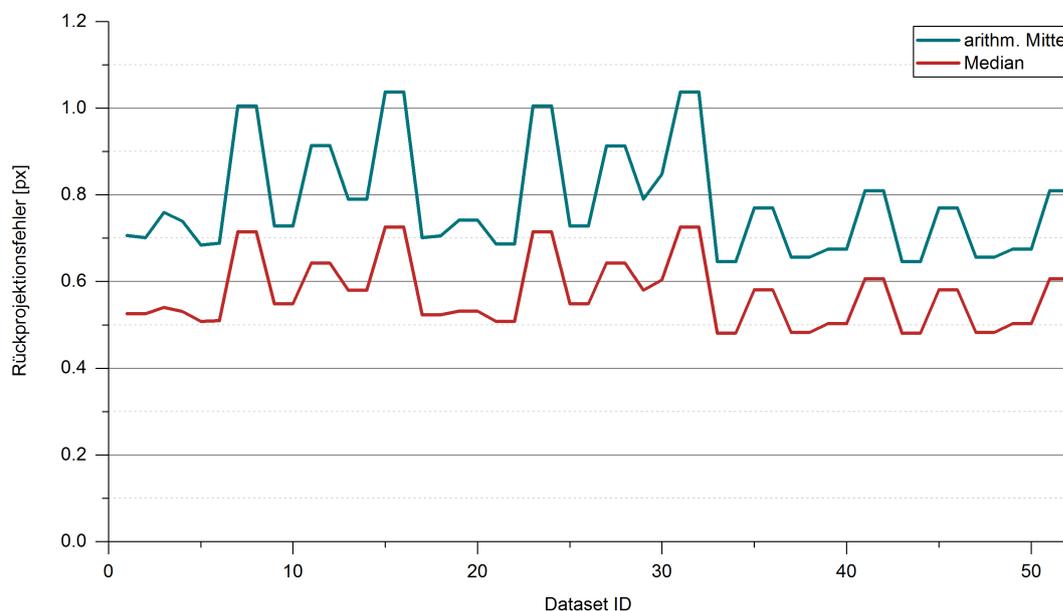
### 7.3.2 Innere Genauigkeit

Ergänzend zur äußeren Genauigkeit wurden auch die in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Parameter der inneren Genauigkeit untersucht. Obwohl für vermessungstechnische und markscheiderische Anwendungen zumeist die erreichte äußere Genauigkeit und metrische Richtigkeit der Vermessungen von Bedeutung ist, sollen im Sinne der wissenschaftlichen Sorgfalt auch die Auswirkungen der Bildaufnahme auf die Bildauswertung studiert werden. Außerdem können die Ergebnisgrö-

ßen bzw. Zwischenergebnisse der SfM-Prozessierung auch Hinweise auf etwaige Begründungen und Ursachen für die zu Tage getretenen Phänomene der äußeren Genauigkeit liefern, was neben der reinen Beschreibung der erkannten Effekte eines der wesentlichsten Ziele der vorliegenden Forschung ist.

### Rückprojektionsfehler

Wie bereits in Abschnitt 4.4.1 beschrieben sind die Rückprojektionsfehler eine der am häufigsten betrachtete Kenngröße der inneren Genauigkeit. Die in Pixel gemessene Differenz zwischen der initial gefunden Feature Position und dem in das Bild zurück projizierten 3D-Punkt, der sich aus dem Strahlenschnitt mit den benachbarten Bildern ergibt ist ein Maß für die Güte der Bildmessung und der inneren Orientierung und kommt vor allem im Bereich Computer Vision, wo die metrische Genauigkeit der Modelle nicht immer von übergeordneter Bedeutung ist, sehr häufig zum Einsatz.

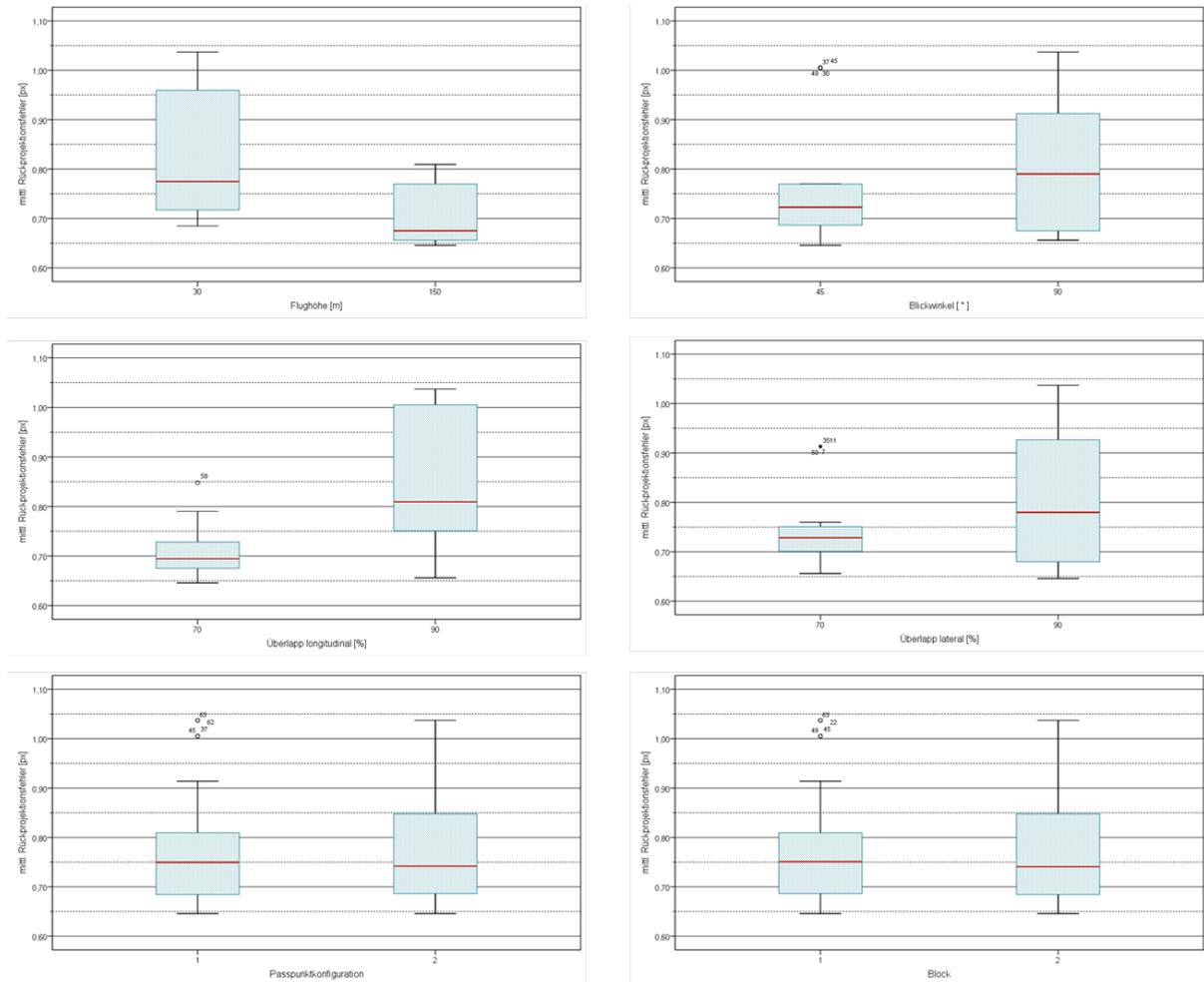


**Abb. 7.11** – Anhand der mittleren Rückprojektionsfehler kann zwar gewissermaßen der Einfluss der Aufnahmeconfiguration erahnt werden, allerdings sind die Auswirkungen hier sehr schwach und können somit nicht signifikant mit den Faktoren in Verbindung gebracht werden.

Werden nun die mittleren Rückprojektionsfehler - d.h. der Mittelwert bzw. Median aus allen Bildern und Features eines Datensatzes - des Versuchsplans im Realmaßstab untersucht, so führt dies zu dem in Abb. 7.11 gezeigten Verlauf. Die zu Grunde liegende Ordnung der Versuchsdurchführungen wurde gleich gewählt wie in Abb. 7.3 und die beiden Kurven zeigen je einmal das arithmetische Mittel (türkis) und einmal den Median (rot).

Zunächst einmal ist anzumerken, dass die Größenordnung mit rund 0,5 bis 1 px im üblichen Bereich liegt und entsprechend von einer erfolgreichen SfM-Rekonstruktion gesprochen werden kann. Außerdem fällt aber auch auf, dass der Median deutlich unter dem arithmetischen Mittel liegt, was auf das Vorhandensein von Ausreißern hindeutet. Nichtsdestotrotz zeigen aber beide Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf, woraus geschlossen werden kann, dass auch an den Rückprojektionsfehlern ein Einfluss der Bildaufnahme erkannt werden kann. Bei Wissen um die zuvor beschriebene Sprungstelle mit der Höhe kann diese (bei Dataset ID 32) auch in Abb. 7.11

erkannt werden, allerdings wird in diesem Fall der Einfluss durch die Mittelwertbildung sehr stark verdeckt, bzw. an den Rückprojektionsfehlern überhaupt nicht eindeutig sichtbar.



**Abb. 7.12 – Die Auswirkung der untersuchten Faktoren auf die mittleren Rückprojektionsfehler sind teilweise gleich- und teilweise gegenläufig zu jenen der äußeren Genauigkeit. Insbesondere der Effekt der Bildüberlappung (mittlere Zeile) zeigt ein gegensätzliches Bild.**

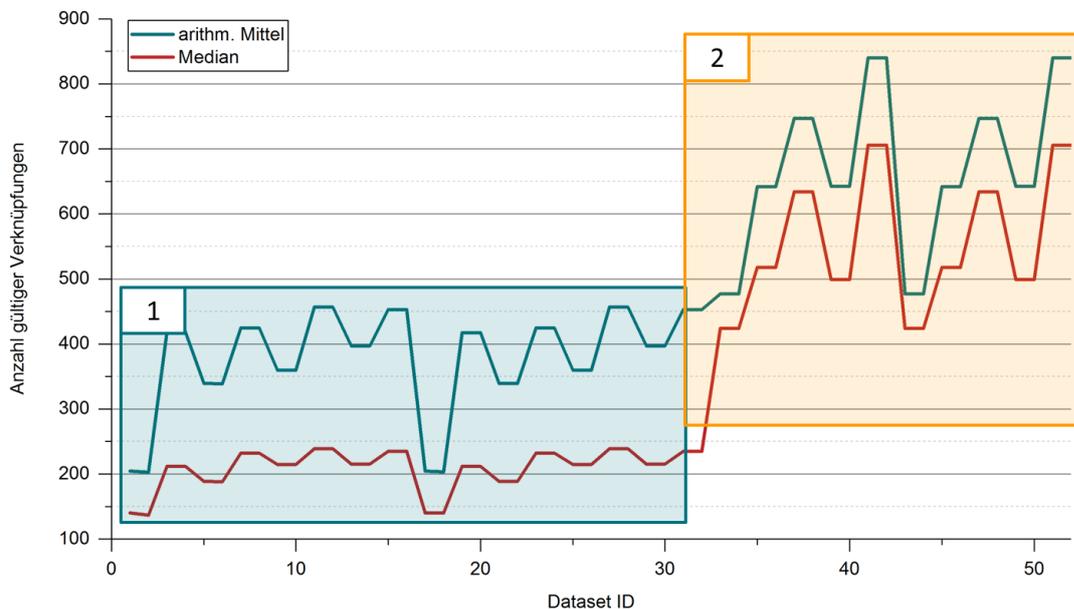
Wird der Zusammenhang zwischen den mittleren Rückprojektionsfehlern und den Faktoren des Versuchsplans allerdings näher untersucht, können zumindest die in Abb. 7.12 ersichtlichen Tendenzen erkannt werden. Dabei fällt vor allem auf, dass die Effekte der Bildüberlappung vollkommen gegenläufig zu jenen der zuvor diskutierten äußeren Genauigkeit sind. Während die mittleren Rückprojektionsfehler bei steigender Flughöhe geringer sind und außerdem auch geringere Variabilität zeigen, und auch die Aufnahme mit geneigter Kameraachse positive Auswirkung auf die Größe der Rückprojektionsfehler hat, kann sowohl in longitudinaler als auch in lateraler Richtung ein negativer Einfluss steigender Bildüberlappung erkannt werden. Eine Begründung hierfür kann wohl unmittelbar in der physikalischen Realität der größeren Überlappung gefunden werden. Je größer die überlappenden Bildbereiche, desto größer ist die Anzahl an potentiell korrespondierenden Bildpunkten und desto höher ist auch die Wahrscheinlichkeit für Fehlkorrespondenzen. Diese haben wiederum starke Auswirkung auf den hier dargestellten Mittelwert und ziehen diesen nach oben. Die beiden in der letzten Zeile dargestellten Faktoren der Passpunkt-Konfiguration und des Aufnahmeblocks zeige keine klaren Zusammenhänge mit den Ergebnissen. Beim Faktor “Block“ ist dies durchaus positiv zu bewerten, da dies gleichbe-

deutend mit einem vollständig umschriebenen Faktorraum ist, der Einfluss nicht untersuchter Faktoren entsprechend gering ist und dies insbesondere auf eine erfolgreiche Versuchsplanung hindeutet. Bei der links unten in Abb. 7.12 dargestellten Passpunktconfiguration war dies zwar nicht in dieser Deutlichkeit zu erwarten, allerdings, wurde schon an anderer Stelle darauf hingewiesen, dass die hier untersuchten Faktorstellungen wohl in Summe zu ähnlich sind bzw. der Effekt relativ zu den übrigen Faktoren vernachlässigbar gering einzuschätzen ist.

Zusammenfassend bleibt allerdings, dass die Rückprojektionsfehler nicht zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit geeignet sind. Die erkannten Effekte sind schwach ausgeprägt und insbesondere teilweise gleich- und teilweise gegenläufig. Ein direkter Rückschluss von den in der Auswertung beobachtbaren mittleren Rückprojektionsfehlern zu den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit ist somit nicht möglich, weshalb nachfolgend noch weitere Größen der inneren Genauigkeit untersucht wurden.

### Epipolargeometrie

Neben dem mittleren Rückprojektionsfehler kann auch die Anzahl an gültigen Verknüpfungen zwischen den Bildern als Maß für die Stabilität eines Bildverbands herangezogen werden. Je höher die Anzahl an gefundenen und gültigen Punktkorrespondenzen, desto stärker überbestimmt ist die Schätzung der relativen Orientierung der Bilder zueinander, und zumindest rein mathematisch müsste dies auch zu höheren Genauigkeit im Ergebnis führen.

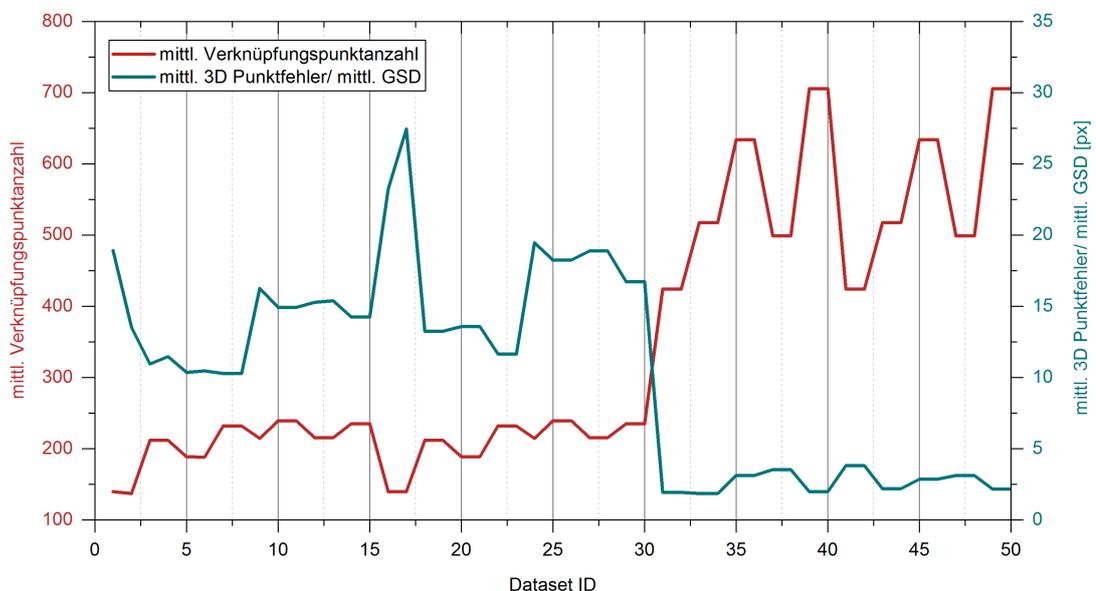


**Abb. 7.13** – Die Anzahl der gültigen Verknüpfungen zwischen den Bildern zeigt eine starke systematische Abhängigkeit von der Aufnahmeanordnung. Bei höherer Flughöhe (Bereich 2) ist auch die Anzahl der gültigen Matches höher.

Zur Ermittlung eines für den gesamten Datensatz repräsentativen Zahlenwerts wurde ähnlich vorgegangen wie zuvor bei den mittleren Rückprojektionsfehlern beschrieben. Für jeden Datensatz bzw. jede Versuchsdurchführung wurde für jedes Bild die Anzahl an gültigen (nach geometrischer Verifikation und Bündelblockausgleich) Verknüpfungen zu allen anderen erhoben und anschließend über alle beteiligten Bilder gemittelt. Natürlich wurden Nullzeilen dabei nicht zur Mittelwertbildung berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abb. 7.13 gra-

fisch zusammengefasst, wobei wiederum die türkise Linie das arithmetische Mittel und die rote den Median darstellt.

Auf jeden Fall kann deutlich ein systematischer Verlauf beider Kurven erkannt werden, wobei wiederum der Median immer unter dem arithmetischen Mittel liegt. Da die Sortierung der Datensätze wieder gleich gewählt wurde wie bei den bisherigen Darstellungen, ist auch hier sehr deutlich eine sprunghafte Veränderung mit der Flughöhe zu erkennen. Bei höherer Flughöhe (Bereich 2) existiert eine größerer Anzahl an gültigen Verknüpfungen zwischen den Bildern als bei geringerer Aufnahmedistanz (Bereich 1), was zwar zunächst durch den größeren Bildausschnitt logisch erscheint, allerdings dürfte dieser Umstand aufgrund des konstanten und prozentuell ermittelten Überlapps in beiden Höhen nicht von Bedeutung sein. Außerdem fällt auf, dass die Differenz zwischen arithmetischem Mittel und Median bei den hohen Flügen deutlich geringer ausfällt als bei einer Höhe von 30 m. Entsprechend scheint die Anzahl der Matches gleichmäßiger über alle Bilder verteilt zu sein, und der betrachtete Wert wird nicht so stark durch einzelne Ausreißer verfälscht.



**Abb. 7.14** – Die mittl. Verknüpfungsanzahl zwischen den Bildern reproduziert sehr deutlich die äußere Genauigkeit in Abb. 7.3 und gibt ein nahezu gespiegeltes Bild.

Noch deutlicher wird die angesprochene Systematik wenn die äußere Genauigkeit aus Abb. 7.3 mit der mittleren Anzahl an gültigen Verknüpfungen in einer Abbildung zusammengeführt wird (siehe Abb. 7.14). Die rote Kurve, die die mittl. Verknüpfungsanzahl zeigt verläuft nahezu gespiegelt zu den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit, die in diesem Fall wieder als vielfaches der GSD dargestellt ist. Es ist zwar zu erwarten, dass die Aufnahmeanordnung Auswirkung auf die Anzahl der Verknüpfungen zwischen den Bildern und damit auf die Stabilität des Bildverbands hat, dass diese Anzahl aber in unmittelbarem Zusammenhang mit erreichten äußeren Genauigkeit war so eindeutig nicht vorhersehbar. Abgesehen von der angesprochenen Sprungstelle können nämlich auch die Negativausreißer und die in Abschnitt 7.3.1 beschriebenen “Höcker“ erkannt werden. Auffallend ist nur die doch deutlich höhere Variabilität der Verknüpfungspunktzahl, was allerdings auch der Skalierung der Darstellung bzw. den unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben geschuldet ist.

Werden auch hier die unmittelbaren Zusammenhänge zwischen den Faktorstellungen und der untersuchten Ergebnisgröße in Form von Box-Plot Diagrammen analysiert, können die erkannten Relationen zur äußeren Genauigkeit noch ein weiteres Mal bekräftigt werden. Die in Abb. 7.15 dargestellten Diagramme reproduzieren das bereits mehrmals erwähnte gegenläufige Bild. Hohe äußere Genauigkeiten korrelieren mit hoher Anzahl an Verknüpfungspunkten zwischen den Bildern.

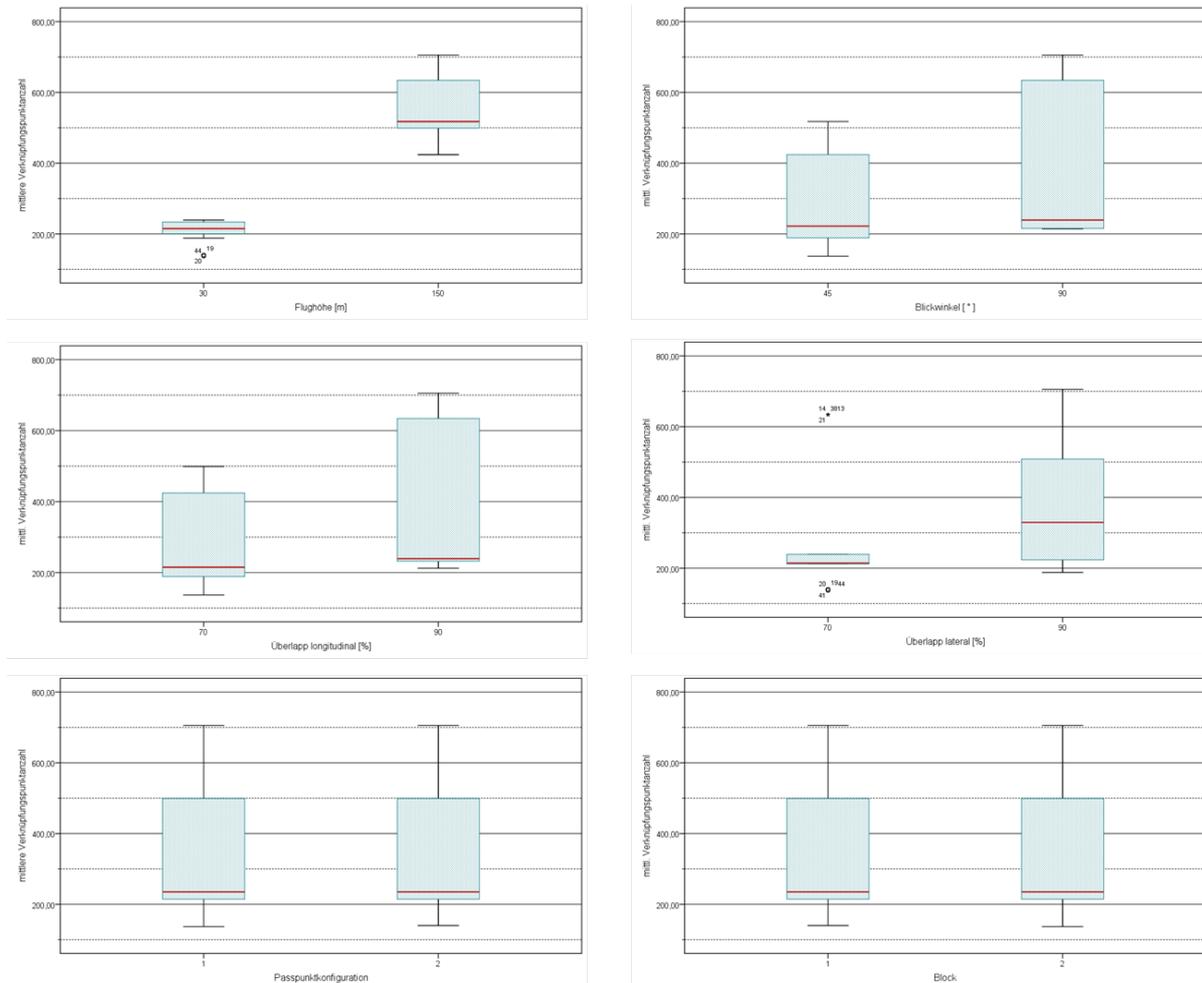


Abb. 7.15 – Die Zusammenhänge zwischen der mittleren Verknüpfungspunktzahl und den entsprechenden Faktorstellungen liefern ein gegenläufiges Bild zu den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit.

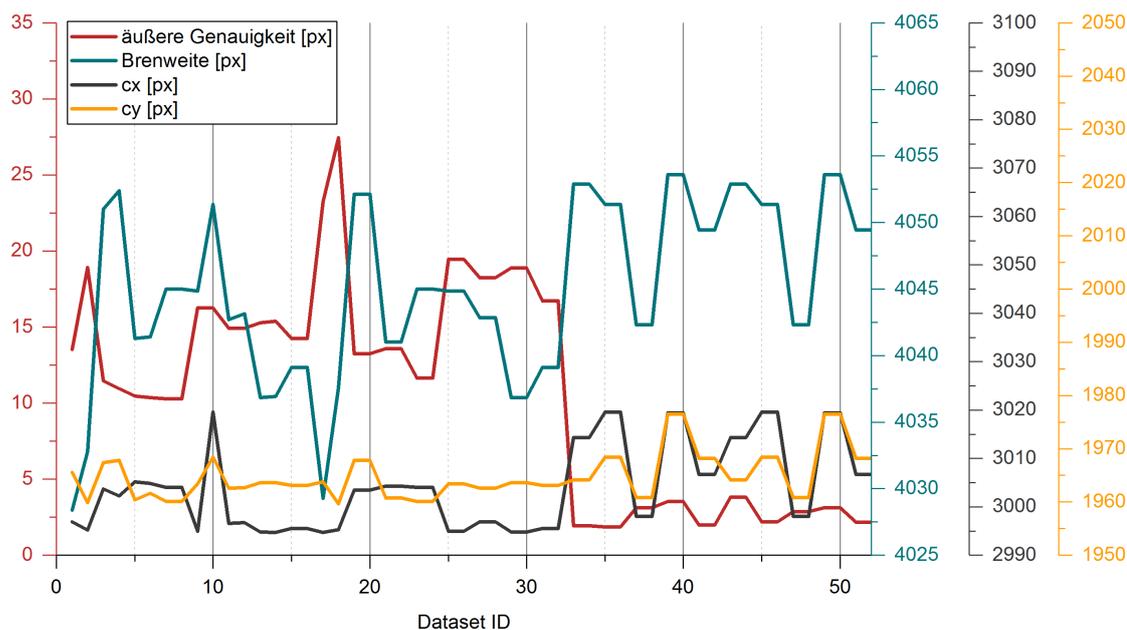
Wie schon bei den äußeren Genauigkeiten gezeigt ist der Effekt der Flughöhe stark ausgeprägt. Hinsichtlich der anderen Faktoren sind zwar auch Zusammenhänge zu erkennen, allerdings werden diese durch den starken Einfluss der Flughöhe überprägt, was einerseits aus den geringen Unterschieden der Mittelwerte in den entsprechenden Box-Plots und andererseits auch aus der großen Streuung der Werte innerhalb der untersuchten Kategorien deutlich wird. Außerdem sind natürlich auch die in den Abbildungen 7.3 und 7.13 ersichtlichen Ausreißer in den Diagrammen enthalten, was vor allem anhand der lateralen Bildüberlappung und an den großen Streubreiten deutlich wird. Gänzlich ohne Einfluss sind die Faktoren Passpunktconfiguration und Aufnahmeblock. Die Passpunktconfiguration wird erst nach Abschluss der eigentlichen SfM Prozessierung zur Ähnlichkeitstransformation der Ergebnisse in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem zum Einsatz und ist somit nicht in der Lage die Ergebnisse eben dieser zu beeinflussen,

und aufgrund der Tatsache, dass beide Aufnahmeblöcke am selben Tag aufgenommen wurden ist auch der Umfang an nicht untersuchten und im Faktor “Block“ zusammengefassten Faktoren entsprechend gering.

Zumindest anhand der Versuche zur Einzelfaktorvariation im Realmaßstab erscheint die mittlere Anzahl an gültigen Bildverknüpfungen allerdings klar geeignet um Rückschlüsse auf die erreichte äußere Genauigkeit zu ziehen, und außerdem legen die bisherigen Ergebnisse nahe, dass die äußere Genauigkeit vordergründig durch die Verknüpfungspunktzahl beeinflusst wird, die wiederum starke Abhängigkeit von den geometrischen Parametern der Aufnahmeanordnung zeigt.

### Simultankalibrierung

Ein weiterer, vor allem in der photogrammetrischen Literatur stark kontroversiell diskutierter Verfahrensschritt bei SfM ist die Simultankalibrierung, die vor allem auch starke Auswirkung auf die Güte der Ergebnisse entfalten kann (siehe Kapitel 2 und 3). Vor allem wenn viele “ungeprüfte“ Verknüpfungspunkte Eingang in die Auswertung finden und nicht kalibrierte Consumer-Kameras zum Einsatz kommen ist die Durchführung einer Simultankalibrierung von Nöten, wobei wie z.B. bei (Rosnell and Honkavaara, 2012), (James and Robson, 2014) oder (Zhou et al., 2019) gezeigt die Aufnahmeanordnung unmittelbare Auswirkung auf die Ergebnisse der Kalibrierung hat.

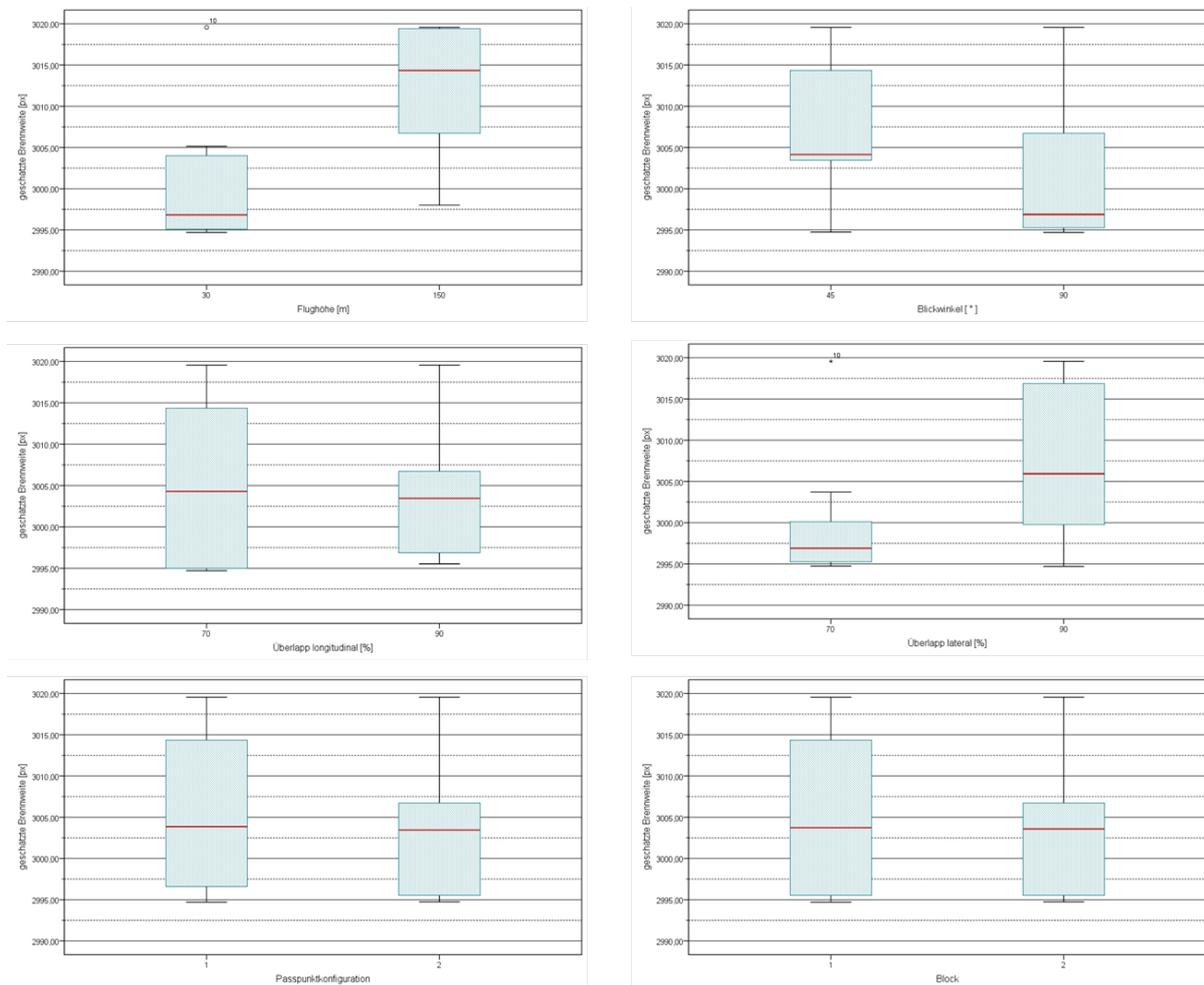


**Abb. 7.16** – Die Ergebnisse der Simultankalibrierung im Realmaßstab zeigen zwar im abgegrenzten Rahmen einen Zusammenhang mit der Bildaufnahme, eine eindeutige und belastbare Abhängigkeit kann jedoch nicht erkannt werden.

Vor diesem Hintergrund wurden die Ergebnisse der Simultankalibrierung für alle 52 vorhandenen Datensätze ermittelt und versucht einen Zusammenhang mit den Faktoren des Versuchsplans herzustellen. Dabei wird zunächst einmal offensichtlich, dass die geschätzten Brennweiten in einem Bereich von rund 20 Pixel bzw. 0,078 mm schwanken (türkise Linie in Abb. 7.16). Ebenso variieren die geschätzten Hauptpunktlagen  $c_x$  (dunkelgraue Linie in Abb. 7.16) und  $c_y$  (gelbe Linie in Abb. 7.16) nur im Bereich von 8 Pixel in x- und in 5 Pixel in y-Richtung. D.h. ganz allgemein kann die eingesetzte Kamera als stabil betrachtet werden und außerdem zeigte sich,

dass der Prozess der Simultankalibrierung sehr reproduzierbar erfolgt. Auffallend ist gewissermaßen auch, dass sich die Hauptpunktlage ähnlich verhält wie die Brennweite. Datensätze die zu einer kürzeren Brennweite führen weisen eine Hauptpunktlage aus, die eher in Richtung der linken oberen Ecke des Bildausschnitts verschoben ist, und je länger die geschätzte Brennweite, desto mehr verschiebt sich der ermittelte Bildhauptpunkt nach rechts unten.

Eine Beurteilung dieser Ergebnisse hinsichtlich geometrischer Richtigkeit konnte mangels "Referenzkalibrierung" nicht erfolgen, allerdings kann schon erkannt werden, dass Negativausreißer hinsichtlich der äußeren Genauigkeit auch durch eine "auffällige" innere Orientierung bzw. insbesondere Brennweite gekennzeichnet sind (Ausreißer nach oben in roter und nach unten in türkiser Linie in Abb. 7.16). Anhand der Darstellung in Abb. 7.16 lassen die Ergebnisse der Simultankalibrierung allerdings keine eindeutigen Rückschlüsse auf die äußere Genauigkeit (rote Linie in Abb. 7.16) zu bzw. kann auch keine klare Abhängigkeit von den untersuchten Faktoren erkannt werden. Es ist lediglich ersichtlich, dass die Kalibrierungsergebnisse innerhalb gewisser Schranken variieren, was allerdings an dieser Stelle als zufällig betrachtet werden muss.



**Abb. 7.17** – Anhand der dargestellten Box-Plot Diagramme kann zumindest ein Reaktion der geschätzten Brennweite auf die geometrische Aufnahmekonfiguration erkannt werden. Inwieweit die Ergebnisse der Realität entsprechen kann allerdings mangels Referenzkalibrierung nicht verifiziert werden.

Werden die dargestellten Ergebnisgrößen allerdings in Form von Box-Plot Diagrammen mit den Faktorstellungen gegenübergestellt zeigt vor allem die in Abb. 7.17 dargestellte Brennweite

durchaus eine Reaktion auf die gewählten Faktorstufen. Inwieweit diese als belastbar betrachtet werden dürfen kann an dieser Stelle nicht abschließend behandelt werden, aber zumindest sollen die aufgetretenen Ergebnisse kurz präsentiert werden.

So führt eine größere Flughöhe zu einer größer geschätzten Brennweite, wobei diese Aussage vorbehaltlich der erkennbaren Ausreißer getroffen werden muss, wie links oben in Abb. 7.17 erkannt werden kann. Während die longitudinale Überlappung in den gegenständlichen Untersuchungen keinen starken Effekt zeigt, können anhand der gewählten Aufnahme- bzw. des Blickwinkels und der lateralen Überlappung deutliche Effekte erkannt werden: Nadiraufnahmen führen zu kürzeren und große Überlappung zwischen den Flugbahnen zu längeren Brennweiten. Wiederum ohne Einfluss bleiben die Faktoren "Passpunkt-konfiguration" und "Block".

Grundsätzlich muss aber zu allen dargestellten Diagrammen in Abb. 7.17 angemerkt werden, dass die Streuung der Werte (Größe der Box und Länge der T-Balken) verhältnismäßig groß ist, und die Signifikanz der präsentierten Aussagen somit einer separaten Beurteilung bedarf und an dieser Stelle kritisch zu betrachten ist.

## 7.4 Ergebnisse aus Faktorkombination

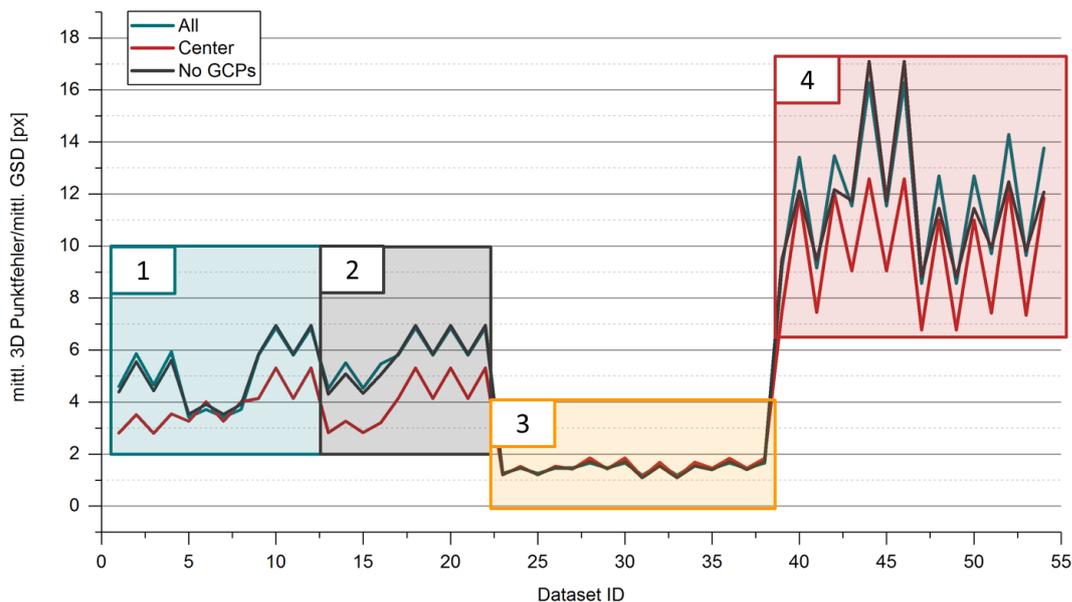
Erfahrungswerte verschiedenster Anwender und auch die seit Jahrzehnten gängige photogrammetrische Praxis zeigen, dass eine Kombination verschiedener Faktorstellungen positiven Einfluss auf die Ergebnisse entfalten kann, weshalb dies auch in der gegenständlichen Forschung in Form von Faktorkombination näher untersucht wurde. Im Folgenden werden die Ergebnisse, die sich aus der gemeinsamen Auswertungen ausgewählter Datensätze des zuvor beschriebenen Versuchsplans ergeben, präsentiert, wobei dies wiederum getrennt nach Ergebnisgrößen der äußeren und der inneren Genauigkeit geschieht.

### 7.4.1 Äußere Genauigkeit

In Abb. 7.18 sind die Ergebnisse der insgesamt 54 Datensätze - 27 verschiedene Bildverbände, wovon jeder je einmal unter Anwendung jeder Passpunkt-konfiguration transformiert wurde - in der üblichen Form als vielfaches der theoretischen bzw. mittleren GSD dargestellt. Die Ermittlung der theoretischen GSD erfolgte dabei einfach als arithmetisches Mittel aus den beteiligten Versuchen aus dem Versuchsplan. Auf eine gewichtete Berechnung, z.B. nach der Anzahl beteiligter Bilder in einer bestimmten Höhe wurde im Sinne der Einfachheit verzichtet und außerdem wurde den Berechnungen - wie auch bei allen übrigen Evaluierungen - immer die Nadir Auflösung zu Grunde gelegt. Ein detaillierte Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den gewählten Faktoren, wie sie im vorigen Abschnitt präsentiert wurde, ist in diesem Fall nur sehr schwer bzw. gar nicht möglich. Durch die Kombination verschiedener Faktorstellungen können die Ergebnisse nicht mit eindeutig mit einer Faktorstufe in Relation gesetzt werden. Entsprechend liegt der Fokus hier auf verbaler Beurteilung und Beschreibung der untersuchten Bildverbände.

Wie in Abb. 7.18 eindeutig erkannt werden kann bewegen sich die Genauigkeiten zwischen 1,19 und 16,27 GSD und damit teilweise klar unter, allerdings zum Teil auch deutlich über den Genauigkeiten aus den Einzelfaktoren (siehe Abschnitt 7.3.1). Auf jeden Fall aber decken sich die Ergebnisse mit den aus der Literatur bekannten Erwartungswerten (Rumpler et al., 2014), wenn auch einzelne Negativausreißer darauf hindeuten, dass eine Kombination verschiedener Faktorstellungen nicht zwingendermaßen zu einer Genauigkeitssteigerung führen muss.

Zur detaillierten Beurteilung der dargestellten Kurvenverläufe, müssen die hinter den einzelnen Datensätzen stehenden Faktorkombinationen in die Betrachtung miteinbezogen werden. Bei den ersten 12 Versuchen (linker Rand der Abbildung Dataset ID 1 bis 12, Bereich 1, türkis) wurden jedes Mal hohe mit niedrigen Flügen vermischt, wobei das vordergründige Ziel darin bestand



**Abb. 7.18** – Die gemeinsame Auswertung verschiedener Faktorstufen führt grundsätzlich zu einer Erhöhung der Genauigkeit gegenüber den Ausgangsdatensätzen, obwohl natürlich nicht jede Kombination zwingendermaßen zu hohen Genauigkeiten führt.

herauszufinden, durch welche zusätzlichen Aufnahmen ursprünglich schlechte Aufnahmeanordnungen verbessert bzw. korrigiert werden könnten. Es wurde versucht 30 m Flüge mit geringem Überlapp und variierender Blickrichtung mit verschiedenen ursprünglich genauen 150 m Flügen zu vermischen. Die große Anzahl an Versuchen ergibt sich dadurch, dass jede Kombination einerseits je einmal innerhalb eines jeden Aufnahmeblocks (vgl. Blockbildung in Abschnitt 4.1.2) gebildet, und anschließend je einmal unter Verwendung beider Passpunkt Konfigurationen (vgl. Abb. 4.6) in das übergeordnete Referenzsystem transformiert wurde. Da die Genauigkeiten der 30 m Ausgangsdatensätze alle im Bereich 19 bis 23 GSD liegen, kann auf jeden Fall von einem Erfolg und von Bestätigung der „Lehrbuchmeinung“ gesprochen werden. In allen Fällen konnte die Genauigkeit gesteigert werden, wie es an den mittleren Werten von 3,4 bis 6,8 GSD in Abb. 7.18 deutlich wird. Wird diese Genauigkeitsveränderung aus der anderen Richtung, aus Sicht der ursprünglichen 150 m Datensätze betrachtet, ergibt sich allerdings ein anderes Bild. Die 150 m Flüge wurden durch die Hinzunahme der geringeren Aufnahmehöhe nicht verbessert, sondern sogar verschlechtert. Die Genauigkeit der Faktorkombination liegt somit zwischen jener der beiden Ausgangsprodukte.

Die nächsten 10 Datensätze (Dataset ID 13 bis 22, Bereich 2, dunkelgrau) stellen den Versuch dar, die alleine nicht auswertbaren 150 m Flüge zu prozessieren, bzw. sollte untersucht werden inwieweit eine Kombination von schlechten Ausgangsdatensätzen noch zu positiven Ergebnissen führen kann. Erwartungsgemäß konnte in allen Fällen die Genauigkeit gegenüber den Ausgangsdatensätzen gesteigert werden und die Genauigkeiten der Endergebnisse liegen überdies in einem ähnlichen Bereich wie bei den Kombinationen 1 bis 12.

Allen 22 bis hierhin beschriebenen Datensätzen gemein ist, dass kein markanter Einfluss der Kamera-Blickrichtung erkannt werden kann. Weder die Kombination gleicher, noch die gemeinsame Auswertung unterschiedlicher Bildaufnahmerichtungen führt zu einer auffallenden Veränderung der Ergebnisse, was in dieser Form nicht erwartet wurde.

Die restlichen 32 Datensätze bilden daher Kombinationen verschiedener Aufnahmerichtungen, wobei immer Ausgangsdatsätze der selben Höhe und mit gleichem Überlapp ausgewertet wurden. Sehr klar erkennbar ist auch in diesem Fall ein starker Einfluss der Flughöhe. Während die Datensätze 23 bis 38 (Bereich 3, gelb) in einer Höhe 150 m aufgenommen wurden, liegt den Datensätzen im rechtesten Teil von Abb. 7.18 eine Aufnahmeentfernung von 30 m zu Grunde (Bereich 4, rot). Anhand der 150 m Flüge zeigt sich klar der positive Einfluss der beschriebenen Faktorkombination. Nicht nur, dass die Genauigkeit der Kombination in allen Fällen höher ist als jene der einzelnen Ausgangsdatsätze, sondern vielmehr konnten durch diese Anordnung auch die höchsten Genauigkeiten aller realmaßstäblichen Versuche erreicht werden. Unter diesen Umständen völlig verdeckt wird der Einfluss der Bildüberlappung, der zu keinen erkennbaren Unterschieden führt.

Anders verhält es sich bei den Datenätzen geringer Aufnahmehöhe. Zwar konnte in allen Fällen die Genauigkeit gesteigert werden, insgesamt sind die Ergebnisse aber deutlich schlechter als bei allen anderen kombinierten Auswertungen im Realmaßstab. Dieser Umstand wird allerdings durch die Betrachtung als Vielfaches der GSD noch einmal zusätzlich verstärkt und ist anhand der absoluten Punktfehler in mm nicht so deutlich sichtbar, obwohl auch in diesem Fall die größeren Aufnahmedistanzen zu höheren Genauigkeiten führen.

Wird der Kurvenverlauf als Ganzes betrachtet so sticht abgesehen von den beschriebenen groben Strukturen und den erkennbaren zusammenhängenden Blöcken vor allem auch der gezackte Verlauf ins Auge. Dieser Umstand ist ein Ergebnis der unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen der hier sehr schön und vor allem auch in Einklang mit den Simulationsergebnissen aus den Vorversuchen auftritt. Ist der Bildverband ausreichend stabil, kann der Einfluss der Passpunktanordnung sehr deutlich erkannt werden, wobei es unerheblich ist, ob das Ergebnis stabil genau oder ungenau ist. Je ungenauer allerdings der Datensatz generell, desto stärker wird auch der Einfluss der Passpunktanordnung sichtbar. Dieser Effekt konnten bei den Untersuchungen zu den Einzelfaktoren nicht in dieser Deutlichkeit erkannt werden, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Überprägung mit anderen Effekten zurückzuführen ist. Durch die Faktorkombination wird die SfM-Auswertung allerdings so weit stabilisiert, dass selbst der verhältnismäßig schwache Einfluss der Passpunktanordnung klar sichtbar wird.

Neben dem grundsätzlichen Kurvenverlauf wurden auch in diesem Fall die zuvor erwähnten Betrachtungszonen bzw. Kontrollpunktmengen analysiert. Wie auch bei den Einzelfaktoren sind die türkise und die dunkelgraue Linie einen nahezu deckungsgleich. D.h. Die Unterschiede zwischen Pass- und Kontrollpunkten sind sehr gering und die Transformation in das Referenzsystem erfolgte weitestgehend spannungsfrei. Die rote Linie liegt allerdings immer leicht unterhalb und deutet somit höherer Genauigkeiten im Zentrumsbereich an. Zwar sind diese Unterschiede geringer als bei den Einzelfaktoren, aber trotzdem sind auch die untersuchten Faktorkombinationen vom angesprochenen Dome-Effekt betroffen. Am geringsten fällt dieser bei den Datensätzen 23 bis 38 (Kombination verschiedener Blickrichtungen aus großer Höhe), was anzeigt, dass hier nicht nur die höchsten Genauigkeiten erreicht wurden, sondern insbesondere auch die Variabilität innerhalb des Untersuchungsgebiets am geringsten ist und die gesamte Szene somit mit einer einheitlich hohen Genauigkeit erfasst werden konnte.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der äußeren Genauigkeit eine Bestätigung der Lehrmeinung, dass die Kombination verschiedener Faktorstufen einen grundsätzlich positiven Einfluss auf die Ergebnisse hat, obwohl natürlich auch die "Ausgangsdatsätze" mit Bedacht gewählt werden müssen.

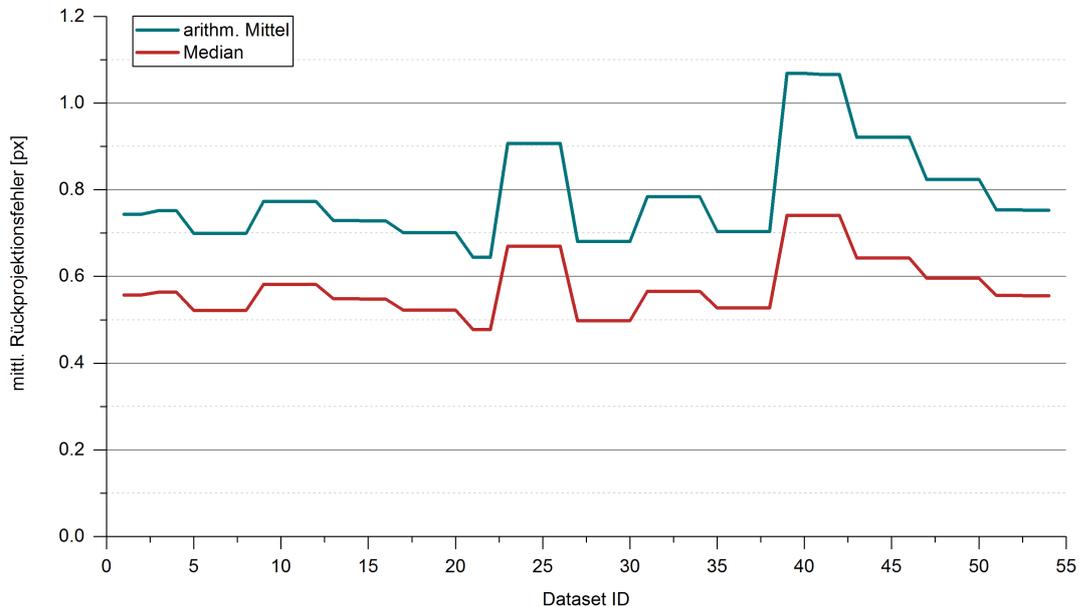
### 7.4.2 Innere Genauigkeit

Um, ergänzend zu den Auswirkungen, auch die Ursachen der gemeinsamen Auswertung verschiedener Faktorstufen näher beschreiben zu können, wurden auch für die Faktorkombination die Ergebnisgrößen der inneren Genauigkeit bestimmt, und nachfolgend in ähnlicher Weise wie in Abschnitt 7.3.2 präsentiert.

#### Rückprojektionsfehler

In Abb. 7.19 sind die mittleren Rückprojektionsfehler nach der Auswertung aufgetragen, wobei wiederum arithmetisches Mittel (türkis) und Median (rot) dargestellt sind.

Beide Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf und aufgrund des Vorhandenseins von Ausreißern liegt der Median unter dem arithmetischen Mittel. Die Größenordnung der Werte ist ähnlich wie bei der Auswertung der Einzelfaktoren (knapp unter 1 px), was auf eine grundsätzlich stabile SfM-Prozessierung ohne Komplikationen hindeutet.



**Abb. 7.19** – Die verbleibenden Rückprojektionsfehler der Faktorkombination liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den Einzelfaktoren.

Die gezeigten Linien folgen zwar einer gewissen Systematik, die Ausprägungen sind allerdings zu schwach um einen belastbaren Zusammenhang mit den Parametern der Bildaufnahme oder den zuvor gezeigten äußeren Genauigkeiten herzustellen. Die in Abb. 7.18 dargestellten und auch am Kurvenverlauf erkennbaren Bereiche können hier nicht ausgemacht werden. Die Kombination unterschiedlicher Faktorstufen führt zumindest hinsichtlich der verbleibenden Rückprojektionsfehler zu einer Stabilisierung und erkennbaren Homogenisierung. Die geometrischen Parameter der Bildaufnahme können anhand der dargestellten Ergebnisse nicht mehr erkannt werden. Die Variation der mittleren Rückprojektionsfehler erscheint zufällig und spätestens durch die Mittelwertbildung über alle Bilder und Projektionen können systematische Einflüsse auf diese Weise nicht mehr erkannt werden.

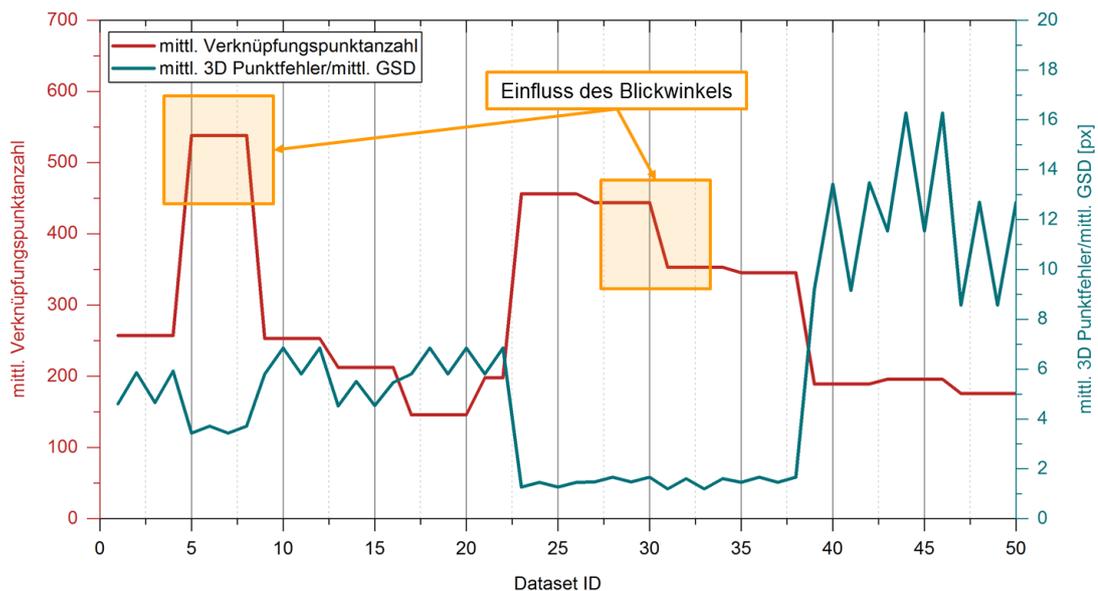
Der sehr stark treppenförmige Kurvenverlauf liegt darin begründet, dass die Rückprojektionsfehler unbeeinflusst von der räumlichen Ähnlichkeitstransformation mit wechselnder Passpunktkon-

figuration sind und entsprechend jeder Datensatz zweimal unmittelbar nacheinander dargestellt ist.

Die einzige Auffälligkeit besteht in der Tatsache, dass die Kombination verschiedener Flughöhen (linker Rand, Dataset ID 1-22) weniger Variation aufweist, als die Kombination verschiedener Aufnahmerichtungen. Obwohl mit diesen Anordnungen die höchsten äußeren Genauigkeit erreicht werden konnten, liegen die Rückprojektionsfehler über dem Durchschnitt und zeigen vor allem auch erhöhte Variabilität. Dadurch wird abermals die fehlende Eignung der Rückprojektionsfehler zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit verdeutlicht, und die Notwendigkeit nach alternativen Beurteilungsmöglichkeiten verstärkt.

### Epipolargeometrie

Der bereits an den Einzelfaktoren erkannte umgekehrte Zusammenhang zwischen äußerer Genauigkeit und mittlerer Verknüpfungspunkanzahl kann auch anhand der Faktorkombination deutlich erkannt werden. Bei den Datensätzen am linken Rand wird der Zusammenhang zwar nicht ganz so deutlich, allerdings finden sich hier auch jene Kombinationen wo versucht wurde Fehler der einzelnen Bestandteile zu korrigieren.



**Abb. 7.20** – Die Anzahl der gültigen Verknüpfungen zeigt auch anhand der Faktorkombination ein umgekehrtes Bild zur äußeren Genauigkeit. Je höher die Anzahl an Verknüpfungspunkten, desto höher auch die erreichte Objektgenauigkeit.

Die Größenordnung der gefundenen Korrespondenzen ist ähnlich wie in Abschnitt 7.3.1 und liegt zwischen 150 und 550 Verknüpfungspunkten. Der gestufte Verlauf ist darauf zurückzuführen, dass die innere Genauigkeit keine Abhängigkeit von der Art der Georeferenzierung aufweist und entsprechende immer 2 benachbarte Datensätze idente Ergebnisse aufweisen. Die rote Linie in Abb. 7.20 gibt sozusagen ein geglättetes Bild der türkisen wieder.

Hervorstechend ist der “Höcker“ am linken Rand bei den Datensätzen fünf bis acht. Die genannten vier Bildverbände unterscheiden sich von ihren unmittelbaren Nachbarn durch den Blickwinkel der Kamera bei dem in 30 m aufgenommenen Teil des Datensatzes. Ein ähnlicher Umstand liegt auch in der auffälligen Abtreppung in der Mitte der Abbildung vor. Während der

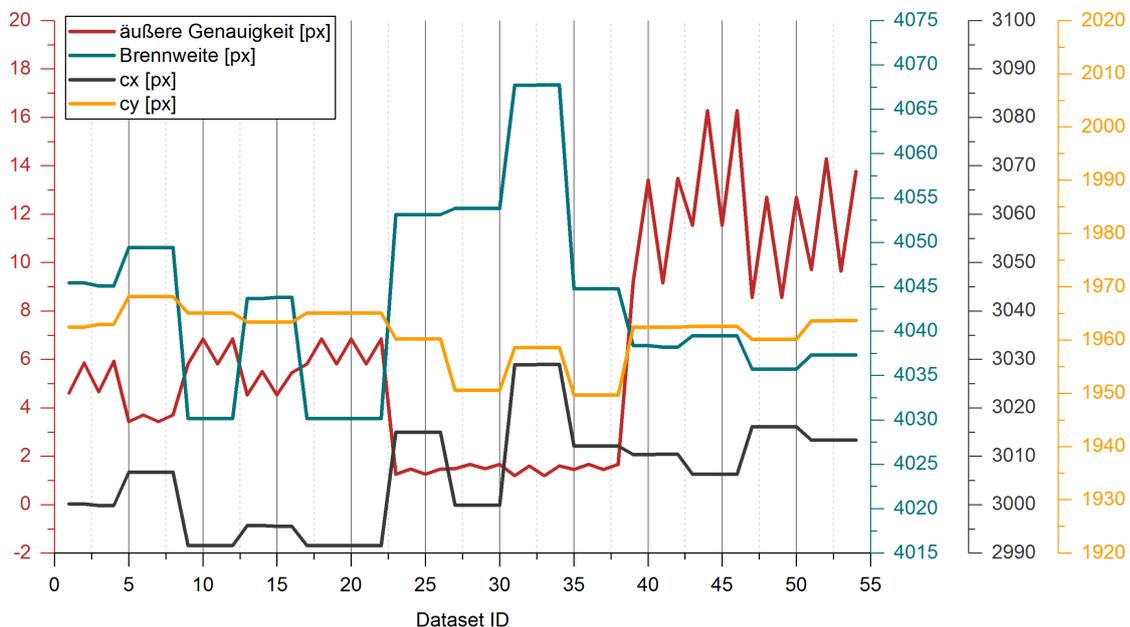
Einfluss der Blickrichtung an den äußeren Genauigkeiten kaum sichtbar war, äußert er sich sehr stark in der Anzahl an gültigen Bildverknüpfungen.

Relativ betrachtet, ist der Zusammenhang mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit aber auf jeden Fall zu erkennen und die Anzahl an Verknüpfungspunkten erscheint nach wie vor als geeignet um die äußere Genauigkeit zu beurteilen bzw. lässt sich hier eine Begründung für Effekte der äußeren Genauigkeit finden.

### Simultankalibrierung

Wie bei SfM üblich wurde auch bei den Datensätzen der Faktorkombination die innere Orientierung im Rahmen der Bündelblockausgleichung optimiert, wobei in Abb. 7.21 die geometrisch interpretierbaren Ergebnisse (Brennweite und Hauptpunktlage) gemeinsam mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit (als Vielfaches der GSD in Pixel) dargestellt sind.

Die erzielten Werte erscheinen plausibel, bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den Einzelfaktoren und auch die auftretenden Differenzen beschränken sich nur auf einen kleinen Bereich. Mit Ausnahme eines ausreißenden Blocks (Dataset ID 31 bis 34) unterscheiden sich die geschätzten Brennweiten lediglich um 20 Pixel und auch die Fehllage des Bildhauptpunkts verschiebt sich nur um bis zu maximal 20 Pixel. Anhand der Brennweite kann überdies eine schwacher Zusammenhang mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit erkannt werden, der allerdings nur relativ zu bewerten und nicht als absolutes Genauigkeitsmaß angewandt werden darf. Die auffallend größeren Brennweiten bei den Datensätzen höherer äußerer Genauigkeit deuten darauf hin, dass die reale Brennweite wohl eher im Bereich von rund 4060 Pixel liegen dürfte, eine fundierte Prüfung dieser Tatsache kann allerdings hier nicht durchgeführt werden.



**Abb. 7.21** – Die Ergebnisse der Simultankalibrierung aus der Faktorkombination unterscheiden sich nur im Detail von jenen der Einzelfaktoren. Zusammenhänge zur äußeren Genauigkeit bestehen nicht und die Variation der Werte muss als zufällig angesehen werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Simultankalibrierung allerdings ein eher zufälliges Bild. Zusammenhänge zwischen den Kalibrierergebnissen und der erreichten Genauigkeit oder der

Aufnahmeanordnung müssen in den Bereich der Vermutung geschoben werden und überdies zeigen sich auch keine markanten Unterscheide zu den Ergebnissen der Einzelfaktoren. Die innere Orientierung kann auch anhand der Faktorkombination nicht als Maß zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit herangezogen werden, und ganz grundsätzlich lässt die Datenlage hier auch keine weiteren Schlüsse zu.

# Kapitel 8

## Ergebnisse im Modellmaßstab

Als Ergänzung und aufgrund der Tatsache, dass im Realmaßstab nicht alle geplanten Versuche durchführbar waren, wurde zusätzlich noch eine ähnlich gestaltete und 96 Einzelversuche umfassende Versuchsserie durchgeführt (vgl. Kapitel 6), deren Ergebnisse im Folgenden präsentiert werden. Nach einer Beurteilung der Eingangsparameter werden zunächst die Ergebnisse des Versuchsplans und anschließend (wie im vorigen Kapitel) jene der Faktorkombination beschrieben.

### 8.1 Güte der Eingangsparameter

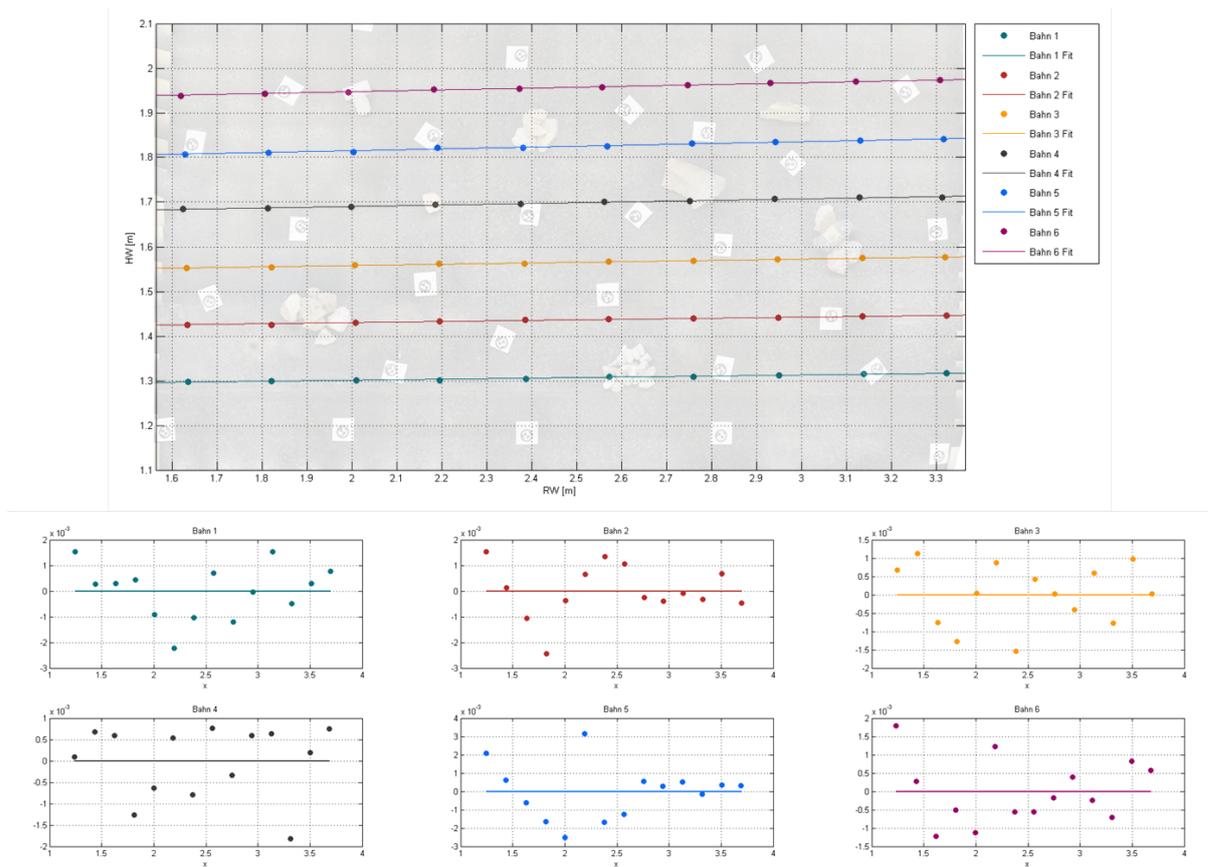
Im Modellmaßstab, wo die Faktoreinstellungen naturgemäß mit höherer Genauigkeit eingehalten werden können stehen die selben Parameter unter Beobachtung wie im Realmaßstab, obwohl hier bekanntermaßen kein Flugsystem zum Einsatz kam.

Die Herausforderungen bei der Herstellung eines gültigen Referenzpunktfeldes wurden schon in Abschnitt 6.1.1 beschrieben, aber auch im Modellmaßstab wurden die geometrischen Parameter der Bildaufnahme, insbesondere Bahnhaltigkeit, einer gesonderten Betrachtung zugeführt.

Im Modellmaßstab erfolgte die Bildaufnahme aus der Hand und zur Gewährleistung der Bahnhaltigkeit bzw. Flughöhe kam eine Führungsschiene bzw. Vermessungsstative, sowie zur Einstellung des Blickwinkels ein mit der Kamera verbundener Holzkeil zum Einsatz (siehe Abb. 6.3). Die Prüfung der Eingangsparameter erfolgte hier nach dem selben Muster, allerdings müssen die Ergebnisse aus zwei unterschiedlichen Richtungen betrachtet werden. Einerseits, soll wie im vorigen Abschnitt beschrieben, geprüft werden, ob es möglich ist die Versuche mit ausreichender Genauigkeit und vor allem auch Reproduzierbarkeit durchzuführen. Und andererseits soll die Vergleichbarkeit der Modellversuche mit den realmaßstäblichen Befliegungen sichergestellt werden.

Abb. 8.1 zeigt exemplarisch eine zu Abb. 7.2 ähnliche Auswertung anhand eines ausgewählten Versuchsdurchlaufs im Modellmaßstab. Bei näherer Betrachtung der Residuen lässt sich keine so deutliche Systematik erkennen wie im Realmaßstab. Die Abweichungen von der gerade Flugbahn sind zufällig und zeigen erwartungsgemäß nicht die zuvor beschriebenen Effekte der Fluglageregelung. Mit Abweichungen von maximal 5 mm sind auch die Amplituden wesentlich geringer. Im Ergebnis kann daraus gefolgert werden, dass die Flugbahnen im Modellmaßstab besser eingehalten werden können als unter Realbedingungen und entsprechend auch etwaig erkannte Effekte der Bildüberlappung belastbarer sein sollten.

Auch die Flughöhe und Blickrichtung der Kamera können im Modell starrer festgehalten werden. Die Höhe wurde mittels Messband bestimmt und die Blickrichtung schwankt auch nur im Bereich der manuellen Ungenauigkeit, wobei alle Versuche mit großer Sorgfalt durchgeführt wurden und sich Fehler anhand der Versuchswiederholungen zeigen sollten.



**Abb. 8.1** – Im Modellmaßstab kann keine systematische Abweichung der Aufnahmepositionen vom geplanten geradlinigen Verlauf erkannt werden. Die Residuen sind zufällig verteilt und auch hinsichtlich der Amplitude um eine Größenordnung geringer als im Realmaßstab.

Ein Umstand der in diesem Zusammenhang allerdings nicht unerwähnt bleiben darf ist die mechanische Stabilität der eingesetzten Kamera. Während im Realmaßstab alle Bilder mit den selben Kameraeinstellungen aufgenommen wurden, war dies im Modellmaßstab aufgrund der geringen Objektabstände nicht möglich. Somit konnte in diesem Fall der Einfluss der Kamera nicht vollständig ausgeschlossen werden, was unter Berücksichtigung der Literaturanalyse in Kapitel 3 auf jeden Fall bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

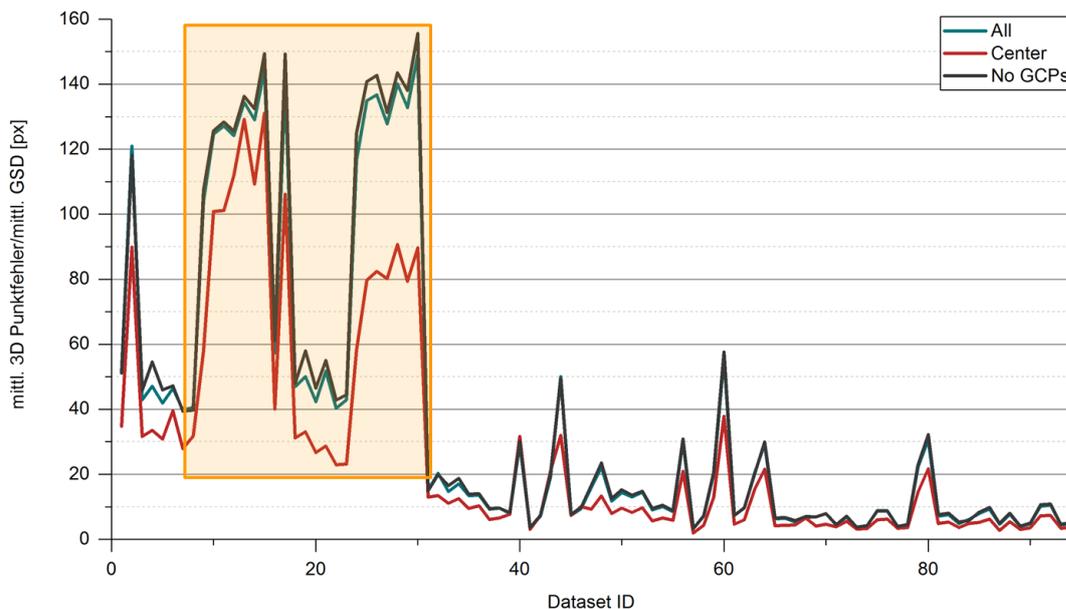
## 8.2 Ergebnisse aus Einzelfaktoren (DoE)

Auch die als Ergänzung bzw. Erweiterung zu den Befliegungen im Steinbruch Preg durchgeführten Modellversuche wurden nach den selben Kriterien ausgewertet und analysiert. Wieder werden zuerst die für die markscheiderische Anwendung bedeutsameren Ergebnisse der äußeren Genauigkeit präsentiert und anschließend untersucht, ob hinsichtlich der inneren Genauigkeit vergleichbare Phänomene erkannt werden können.

### 8.2.1 Äußere Genauigkeit

Durch die Hinzunahme einer dritten Flughöhe von 128 cm wurde der Versuchsplan zwar auf insgesamt 96 Durchläufe erweitert, allerdings stellten 2 Datensätze (55 und 64, Nadiraufnahmen aus 32 cm Höhe mit 70 % Überlapp in beiden Richtungen und beide aus Block 1) sehr starke

Ausreißer dar, und wurden nach erfolgter Plausibilitätsprüfung aus der Gesamtheit der Daten entfernt. Die aufgetretenen Fehler waren in diesen Fällen um eine Größenordnung größer und außerdem konnte bei rein qualitativer Betrachtung der Rekonstruktionsergebnisse schon erkannt werden, dass die SfM Auswertung eigentlich gescheitert war. Der Grund hierfür dürfte in der ungünstigen Faktorkombination und einem zusätzlichen nachteiligen, unkontrollierten äußeren Einfluss liegen. Die selbe Versuchsanordnung aus Block 2 konnte nämlich zumindest erfolgreich prozessiert werden, obwohl auch hier die Ergebnisse eher im unteren Drittel zum liegen kommen. Wie bereits anhand der Literaturanalyse erkannt (Zeisl et al., 2009) und in Abschnitt 4.1.2 diskutiert, stellt ein Überlapp von rund 70% eine untere Schranke für Structure from Motion dar und ein Scheitern der Auswertung ist in diesem Fall nicht gänzlich überraschend. Die mangelnde Robustheit gering überlappender Datensätze zeigt sich auch anhand der 32 cm Flüge mit geneigter Aufnahmeachse. Während bei einem Versuchsdurchlauf eine Genauigkeit von 51,4 GSD erzielt wurde, lieferte die Auswertung der Versuchswiederholung mittlere Fehler von 120,9 GSD. Bei Betrachtung der verbleibenden 94 Ergebnisse der Modellversuche in Abb. 8.2 zeigt sich aber grundsätzlich eine ähnliche Tendenz wie bei den zuvor beschriebenen Realmaßstabsdaten. Es kann wiederum der markante Sprung beim Übergang von den niedrigen zu den höheren Flügen erkannt werden, und beim Wissen über die Sortierung der Datensätze zeigen sich überdies auch Pakete wo der Einfluss des Blickwinkels deutlich wird.



**Abb. 8.2 – Die Äußeren Genauigkeiten im Modellmaßstab zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bereits Abb. 7.3 unter Realbedingungen gezeigt. Die erkannte Abhängigkeit der Genauigkeit von der Flughöhe ist aber keineswegs linear wie sich aus dem Verlauf der drei Linien erkennen lässt. (Tscharf et al., 2019b)**

Auffallend ist vor allem auch, dass die Verbesserung am Übergang von den 32 cm Flügen zu jenen in 128 cm wesentlich größer ausfällt als beim Übergang von 128 cm zu 160 cm. Die Abhängigkeit der erreichten Genauigkeit von der Flughöhe ist demnach auf keinen Fall linear, wie es die bloße Abschätzung über die Ground Sampling Distance andeuten würde. Bei der, wie in der Geodäsie üblichen, getrennten Betrachtung der Fehler in Lage und Höhe (vgl. Abb. 8.3) zeigt sich außerdem, dass Schrägsicht den Fehler von der Höhe zur Lage verschiebt, was sich auch mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Erfahrungswerten bzw. den theoretisch zu erwartenden Werten deckt. Grundsätzlich zeigen die Modellversuche allerdings einen stark dominanten Anteil des

Lagefehlers, was in dieser Form im Realmaßstab nicht erkannt werden konnte. Der untersuchte 3D Punktfehler ist zu einem Großteil auf Fehler in der  $xy$  Komponente zurückzuführen, während die Höhe sehr genau rekonstruiert werden konnte.

Werden die Ergebnisse in Abb. 8.2 und 8.3 gegenübergestellt fällt vor allem auch auf, dass die ‐Normierung‐ durch die theoretische GSD die Analyse der Daten wesentlich erleichtert, da Ausreißer gewissermaßen geglättet und die verschiedenen Parameterblöcke besser vergleichbar werden. Vor allem im Modellmaßstab, wo die Kameraeinstellungen mit der Aufnahmeentfernung verändert mussten, kann auf diese Weise auch der Einfluss des Aufnahmesystems gewissermaßen herausgefiltert werden, und eine Analyse der Daten hinsichtlich der formulierten Forschungsfragen wird möglich.

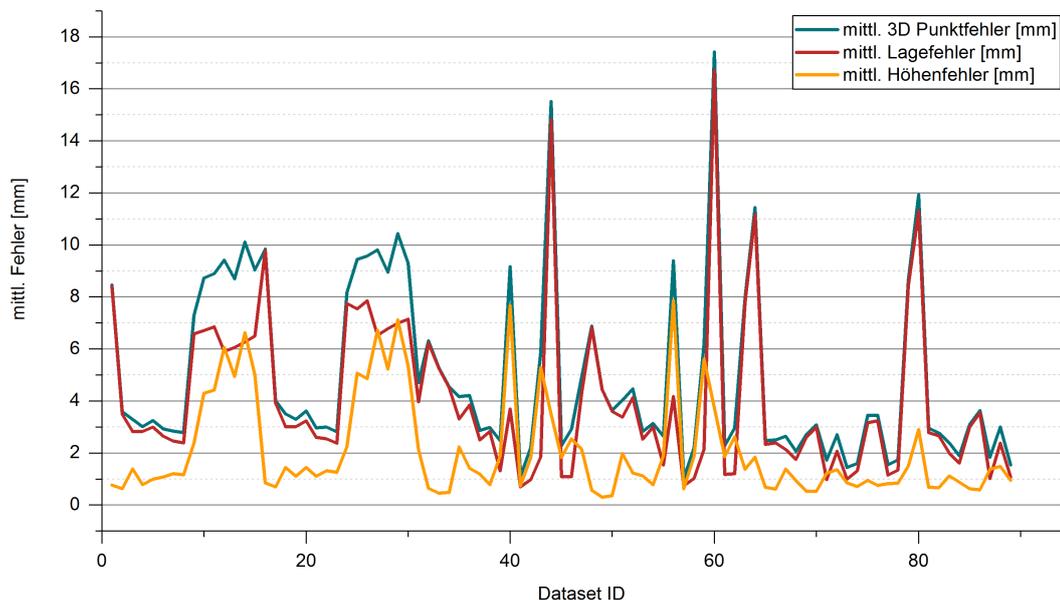
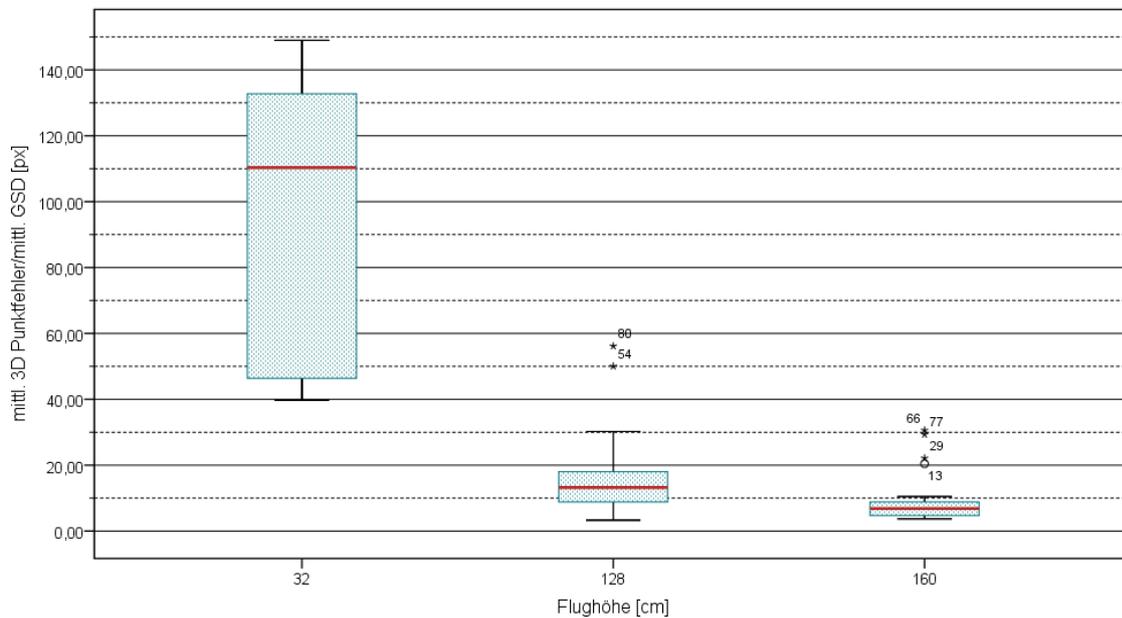


Abb. 8.3 – Äußere Genauigkeit im Modellmaßstab getrennt nach Lage und Höhe

Ganz generell fällt sowohl in Abb. 8.2 als auch in Abb. 8.3 auf, dass die Variabilität innerhalb der Daten höher ist als unter Realbedingungen, und außerdem liegen die erreichten Genauigkeiten in einem gänzlich anderen Bereich. Die Division der mittleren 3D-Punktfehler (arithmetisches Mittel über die 3D-Abstandsvektoren an den Kontrollpunkten) durch die theoretische Ground Sampling Distance führt zu Werten zwischen 3,0 und 149. Die maximalen Fehler sind somit um das siebenfache größer als im Realmaßstab, was auf jeden Fall einer gesonderten Betrachtung bedarf, allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Instabilität bzw. fehlende Skalierung des Aufnahmesystems zurückzuführen ist. Im Modellmaßstab wurden die schlechtesten Ergebnisse aus einer Höhe von 32 cm bei hohem Überlapp und vertikaler Aufnahmeachse erreicht, und die besten Ergebnisse konnten mittels Nadiraufnahmen aus 128 cm bzw. auch 160 cm Höhe mit 90 % longitudinale und 70 % lateralem Überlapp erzielt werden. Der anhand der realmaßstäblichen Versuche erkannte positive Einfluss von Schrägsicht konnte im Modell nicht gänzlich verifiziert werden. Zwar wurden jene Datensätze die große Differenzen zur Referenz aufweisen zwar ausschließlich mit vertikaler Aufnahmeachse aufgenommen, allerdings trifft dies auch auf die besten Datensätze zu. Nichtsdestotrotz können im Verlauf der Kurven in Abb. 8.2 wieder Blöcke ähnlicher Aufnahmeanordnung erkannt werden und ein systematischer Zusammenhang zwischen den erreichten Genauigkeiten und den Faktoren des Versuchsplans wird deutlich.

Zur genaueren Analyse der erkannten Effekte bzw. der angesprochenen Blöcke ähnlicher Aufnahmekonfiguration wurden die Ergebnisse wie bereits im Realmaßstab in einen grafischen Bezug mit den untersuchten Faktoren gesetzt. Die in Abb. 8.4 dargestellte Gegenüberstellung mit der Flughöhe macht den bereits in Abb. 8.2 erkennbaren positiven Einfluss steigender Flughöhe abermals deutlich. Bei Aufnahmeentfernungen von 128 bzw. 160 cm sind nicht nur die erreichten mittleren Genauigkeiten signifikant höher, sondern insbesondere sind auch die Streuungen der Werte um den erwähnten Mittelwerten deutlich geringer. Die vorhandenen Daten liefern somit einen robusten Hinweis auf einen positiven Effekt steigender Flughöhe und gemäß Abb. 8.4 scheint dieser Effekt auch so stark zu sein, dass die übrigen in den dargestellten Gruppenmittelwerten enthaltenen Effekte kaum sichtbar werden, bzw. nicht in der Lage sind die Ergebnisse sichtbar zu beeinflussen.



**Abb. 8.4** – Anhand der dargestellten Box-Plot Diagramme wird der positive Effekt steigender Flughöhe nochmals sehr deutlich. Einerseits liegt der Gruppenmittelwert bei den beiden größeren Aufnahmeentfernungen deutlich unter jenem bei 32 cm, andererseits sind auch die Streuungen der Werte wesentlich geringer.

Die nähere Betrachtung des Faktors Blickwinkel bzw. Aufnahmerichtung relativ zum Objekt liefert das in Abb. 8.5 dargestellte Bild. Während im Realmaßstab ein positiver Einfluss einer geneigten Kameraausrichtung erkannt werden konnte, ist dies im Modellmaßstab nicht der Fall. Die mittleren Genauigkeiten liegen bei einem Blickwinkel von  $45^\circ$  sogar höher als bei Nadiraufnahmen, wobei die Größe der Box und die Streuung der Ergebnisse auf das Vorhandensein vieler Negativausreißer schließen lässt. Auffallend schlechte Ergebnisse können nahezu ausschließlich bei vertikaler Aufnahmeachse erkannt werden und die Robustheit der 3D Rekonstruktion scheint bei Vertikalaufnahmen nicht gegeben zu sein.

Werden die unteren Grenzen der beiden Boxen näher betrachtet so zeigt sich allerdings auch deutlich, dass eine vertikal gegen das weitestgehend horizontale Objekt geneigte Kameraachse nicht zwingendermaßen zu schlechten äußeren Genauigkeiten führen muss. Wie bereits erwähnt sind sowohl die besten als auch die schlechtesten Ergebnisse dieser Gruppe zuzuordnen, woraus geschlossen werden kann, dass die Blickrichtung auch im Modellmaßstab nicht der dominante Einflussfaktor sein kann und die übrigen Faktoren (hauptsächlich Aufnahmeentfernung) von wesentlich größerer Bedeutung sein müssen.

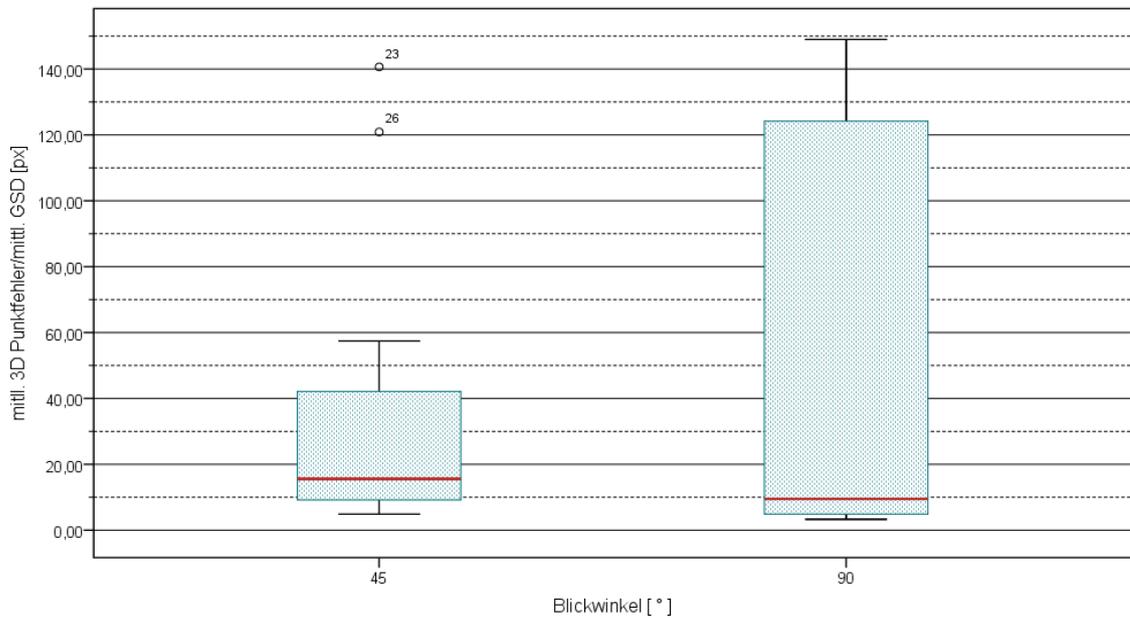


Abb. 8.5 – Der Einfluss des Blickwinkels auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab äußert sich vordergründig in der Streuung der Ergebnisse. Bei geneigter Kamera streuen die Werte wesentlich weniger, was auf das Vorhandensein anderer dominanter Faktoren hindeutet, die vor allem bei vertikaler Aufnahmeachse deutlich werden.

Bei Betrachtung der Bildüberlappung longitudinaler (innerhalb des Flugstreifens und orthogonal zur Aufnahme­richtung, Abb. 8.6) und lateraler (zwischen den Flugbahnen und in Aufnahme­richtung, Abb. 8.7) Richtung ergibt sich ein sehr ähnliches Bild.

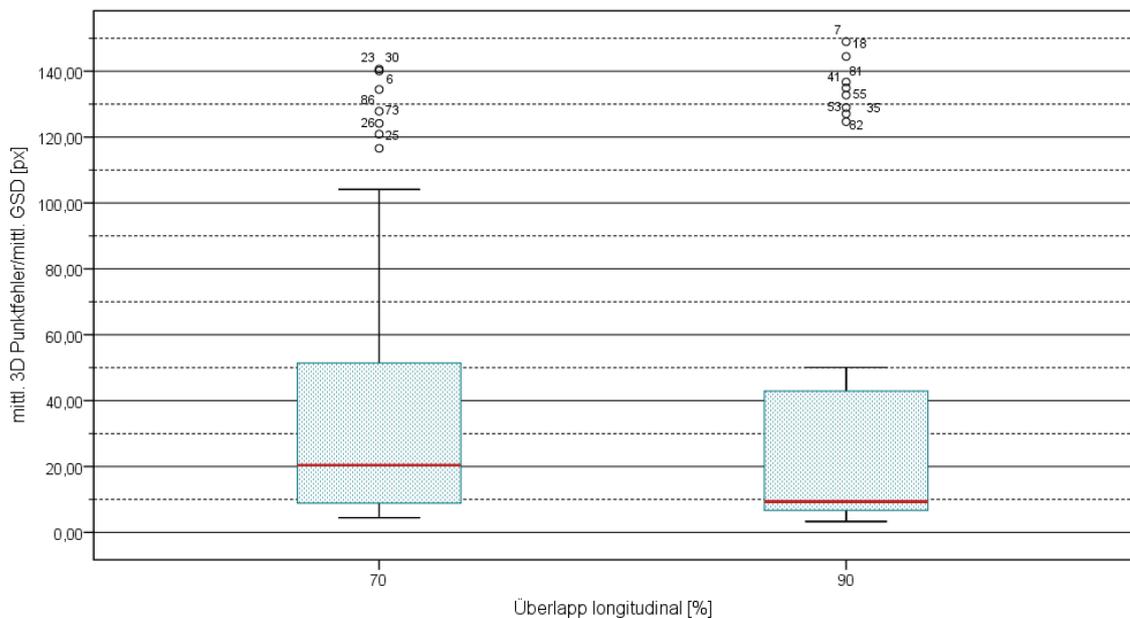
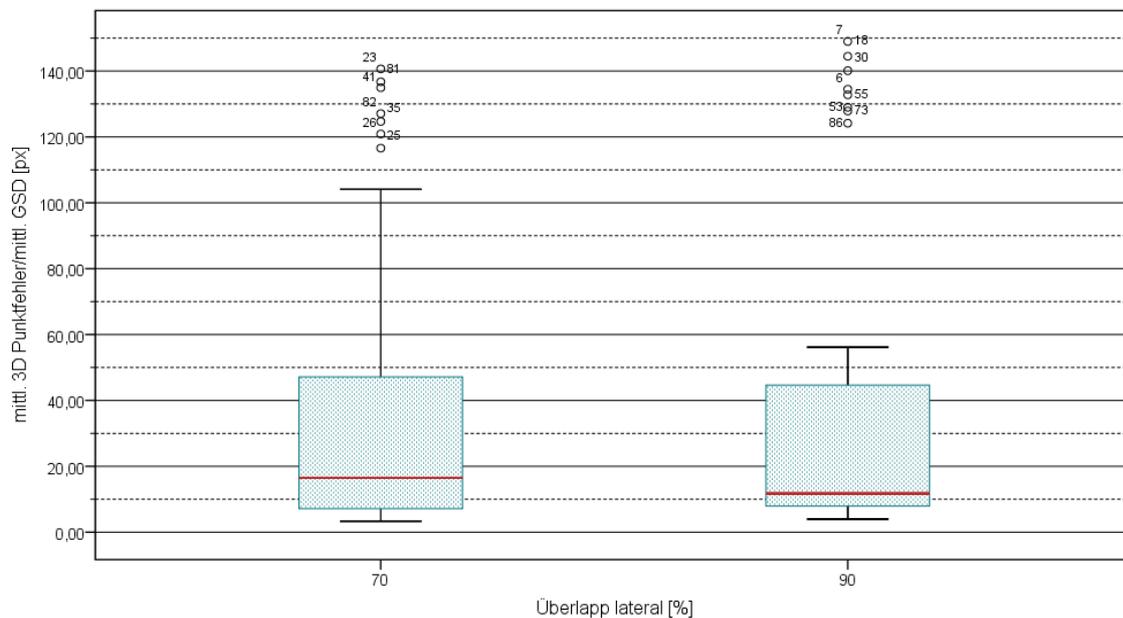


Abb. 8.6 – Wie schon im Realmaßstab konnten auch im Modellmaßstab mit einer starken Bildüberlappung höhere äußere Genauigkeiten erzielt werden.

Der stärkere Einfluss der lateralen Überlappung, der noch im Realmaßstab erkannt werden konnte kann im Modellmaßstab nicht mehr ausgemacht werden und die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Bildüberlappung sowohl innerhalb als auch zwischen den Flugbahnen von ähnlicher Bedeutung ist bzw. einen vergleichbaren Effekt aufweist. Auch wenn die mittleren Genauigkeiten den positiven Effekt der hohen Überlappung nicht eindeutig wiedergeben, weist die Größe der Box auf eine deutlich geringere Streuung der Ergebnisse und somit eine höhere Wahrscheinlichkeit zu hohen Genauigkeiten bei einer Bildüberlappung von 90 % hin. Verfälscht wird diese Aussage, durch den Umstand, dass auch die schlechtesten Ergebnisse mit starker Überlappung erzielt wurden.



**Abb. 8.7** – Anders als bei den realmaßstäblichen Ergebnissen ist der Einfluss der lateralen Bildüberlappung mit jener in longitudinaler Richtung (vgl. Abb. 8.6) vergleichbar. Ein noch stärker positiver Effekt kann nicht erkannt werden.

Ergänzend wird an dieser Stelle auch noch einmal darauf verwiesen, dass zwei Datensätze mit einer Überlappung von 70 % gänzlich von der Evaluierung ausgeschlossen wurden, da die Auswertung grundlegend gescheitert ist und die Bildzuordnungen offensichtlich fehlerhaft waren. Ähnlich wie bereits beim Kamerablickwinkel kann daher eine hohe Bildüberlappung empfohlen werden, obwohl positive Ergebnisse bei einem Überlapp von 70 % nicht ausgeschlossen sind. Bei einer Überlappung von 90 % ist allerdings ein gänzlichliches Scheitern der Auswertung - zumindest im Rahmen des Untersuchungsraums - weitestgehend nicht zu erwarten.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Faktorstufen der Passpunktanordnung in Abb. 8.8 liefert ein erwartetes Bild. Die Unterschiede zwischen den beiden Box-Plots sind marginal und der Einfluss der geometrischen Passpunktanordnungen auf die äußere Genauigkeit muss anhand der vorliegenden Ergebnisse im Modellmaßstab als vernachlässigbar eingestuft werden. Wie schon anhand der Ergebnisse im Realmaßstab gezeigt wurde, ist dies allerdings vielmehr ein Ergebnis des relativen Einflusses der untersuchten Faktoren. Der Effekt der Passpunktanordnung ist im Gegensatz zu den übrigen Faktoren so gering, dass er in der gewählten Darstellungsform nicht sichtbar wird. Dies wird insbesondere anhand der auffallenden Ausreißer und anhand der großen Streuung in beiden Gruppen deutlich.

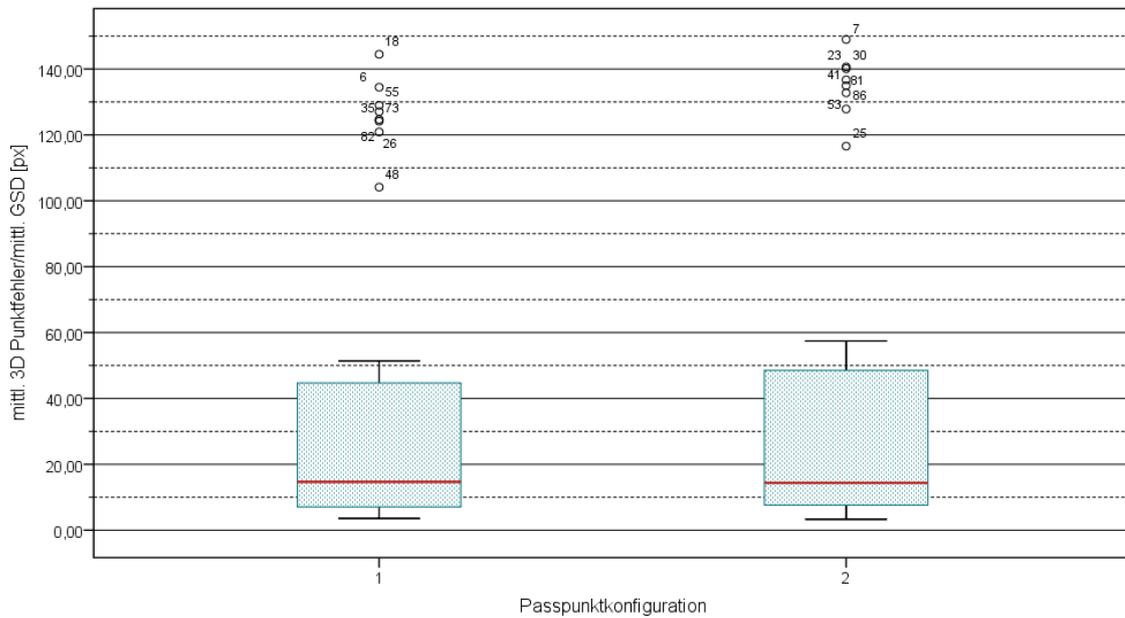


Abb. 8.8 – Der Einfluss der Passpunktconfiguration auf die äußere Genauigkeit im Modellmaßstab ist wenn überhaupt nur sehr schwach vorhanden und wird in der gewählten Darstellungsform von den übrigen Faktoren überprägt und nicht sichtbar.

Ähnlich verhält es sich bei der Summe aller nicht beeinflussbaren Faktoren die unter dem Faktor “Block“ zusammengefasst werden können. Obwohl die Streuung der Werte in Aufnahmeblock 2 offensichtlich noch größer ist - Länge des T-Balkens im rechten Box-Plot in Abb. 8.9 - weisen die als Punkte dargestellten Ausreißer im linken Diagramm auch auf eine große Variabilität innerhalb des Aufnahmeblocks 1 hin.

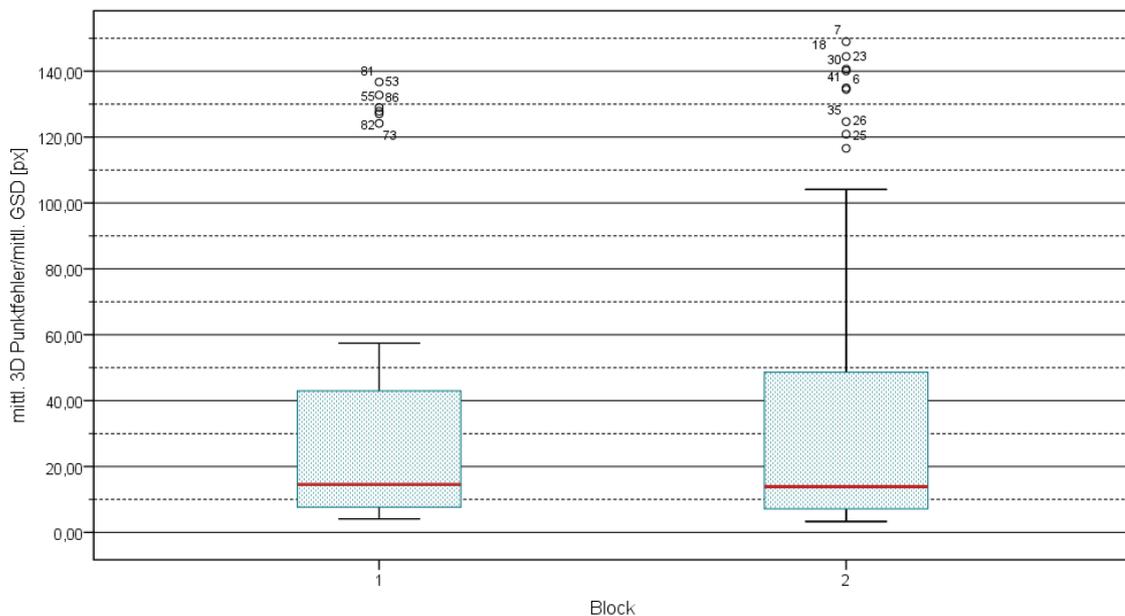


Abb. 8.9 – Auch im Modellmaßstab konnte der Faktorraum vollständig abgegrenzt und die Versuchsbedingungen ausreichend konstant gehalten werden.

Insgesamt zeigt sich aber auch im Modellmaßstab, dass es gelungen ist, den Faktorraum geeignet abzugrenzen und die Versuchsbedingungen ausreichend konstant zu halten. Ein Einfluss nicht steuerbarer Faktoren wird nicht sichtbar und die mangelnde Aussagekraft von Abb. 8.9 deutet nur darauf hin, dass andere und wesentlich "mächtigere" Faktoren an den Untersuchungen beteiligt sind.

Wie in Abb. 7.3 wurden auch im Modellmaßstab (vgl. Abb. 8.2) wieder unterschiedliche "Zonen" des Untersuchungsgebiets betrachtet, um Aussagen zur Variabilität innerhalb der Szene bzw. hinsichtlich eines etwaig auftretenden Dome-Effekts treffen zu können. Aus dem Vergleich der Linie "All" mit "No GCPs" in Abb. 8.2 kann auf jeden Fall klar erkannt werden, dass die Ergebnisse nicht auf die verwendeten Passpunkte hingespant wurden, was allerdings bei der Durchführung einer starren Ähnlichkeitstransformation mit sechs Passpunkten auch nicht unbedingt zu erwarten war. Die gesonderte Betrachtung des Zentrums (rote Linie "Center" in Abb. 8.2) zeigt aber doch mitunter beträchtliche Abweichungen. Vor allem bei geringen Flughöhen (Dataset ID 1 bis 25) und vertikaler Aufnahmeachse ("Höcker" im farblich markierten Feld) kann eine große Differenz zwischen der Genauigkeit im Zentrum und dem gesamten Gebiet erkannt werden. Dies deutet wiederum auf das Vorhandensein eines ausgeprägten Dome-Effekts hin. Die gesamte Rekonstruktion wird gebogen, was sehr große Differenzen am Rand und verhältnismäßig geringe im Zentrum der Szene zur Folge hat. Wie auch im Realmaßstab zeigen die größeren Flughöhen diese Effekte in schwächerer Form, was zum einen daran liegt, dass die erkannten Fehlerbeträge allgemein geringer sind, und zum anderen liegen die stark von Randeffekten beeinflussten Bereiche aufgrund des größeren Bildausschnitts außerhalb des Untersuchungsgebiets.

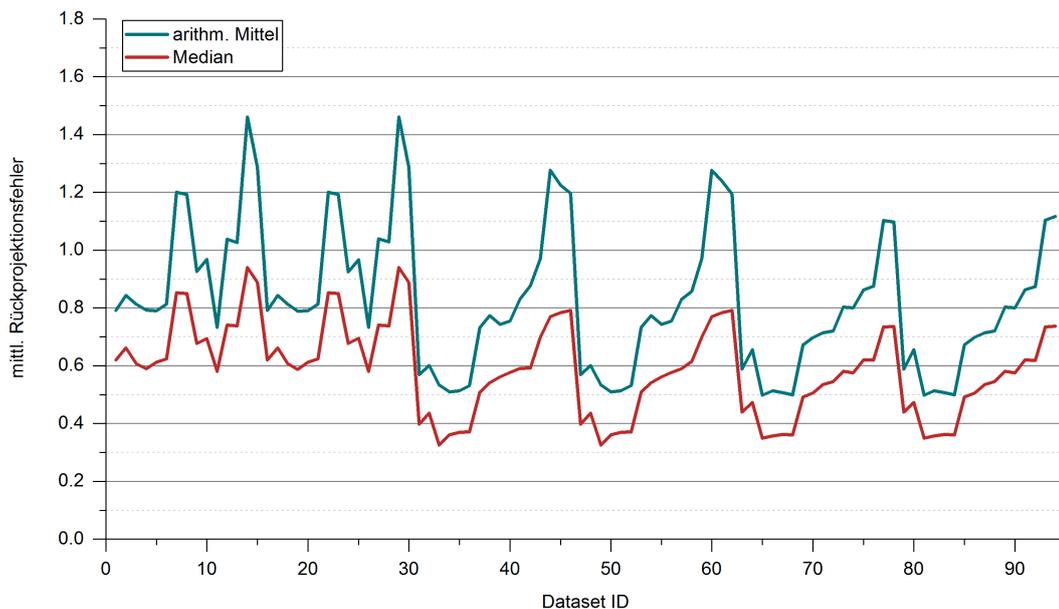
Zusammenfassend bleibt, dass auch im Modellmaßstab klare Zusammenhänge zwischen äußerer Genauigkeit und den Faktoren des Versuchsplans erkannt werden können. Obwohl die Variabilität und Streuung innerhalb der Daten - auch aufgrund der größeren Datenmenge - größer ist als unter Realbedingungen konnte der Effekt der Flughöhe verifiziert und auch der Einfluss der anderen Faktoren bestätigt und beobachtet werden.

### 8.2.2 Innere Genauigkeit

Ähnlich den Untersuchungen im Realmaßstab wurden auch für die Datensätze im Modell die Ergebnisgrößen der inneren Genauigkeit ausgewertet und mit jenen der äußeren Genauigkeit in Verbindung gesetzt.

#### Rückprojektionsfehler

Werden die mittleren Rückprojektionsfehler betrachtet so ergibt sich das in Abb. 8.10 dargestellte Bild. Es kann eindeutig ein Zusammenhang zu den Parametern der Bildaufnahme erkannt werden und besonders deutlich wird vor allem auch die "Periodizität" der Kurven, die sich durch die Wiederholung der Versuche bzw. die Blockbildung ergibt. Die zweite Versuchsdurchführung führt zu den nahezu gleichen mittleren Rückprojektionsfehlern, was darauf hindeutet, dass die geometrische Anordnung der Bilder einen stärkeren Einfluss zu haben scheint als die äußeren Bedingungen, bzw. auch, dass es im Modell sehr gut gelungen ist die äußeren Bedingungen sehr konstant zu halten. Abgesehen von der Wiederholung innerhalb der Daten können auch drei große Blöcke - Dataset ID 1 bis 30, 31 bis 62 und 63 bis 94 - erkannt werden, die die drei unterschiedlichen Flughöhen darstellen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass diese Blöcke nicht wirklich aufgrund der Größe der aufgetragenen Werte unterschieden werden können, sondern nur durch die erkennbare Periodizität und Ordnung der Datensätze. In zufälliger Ordnung wäre eine Aussage zu den zu Grunde liegenden Aufnahmekonfigurationen nur sehr schwer möglich und auf keinen Fall belastbar.

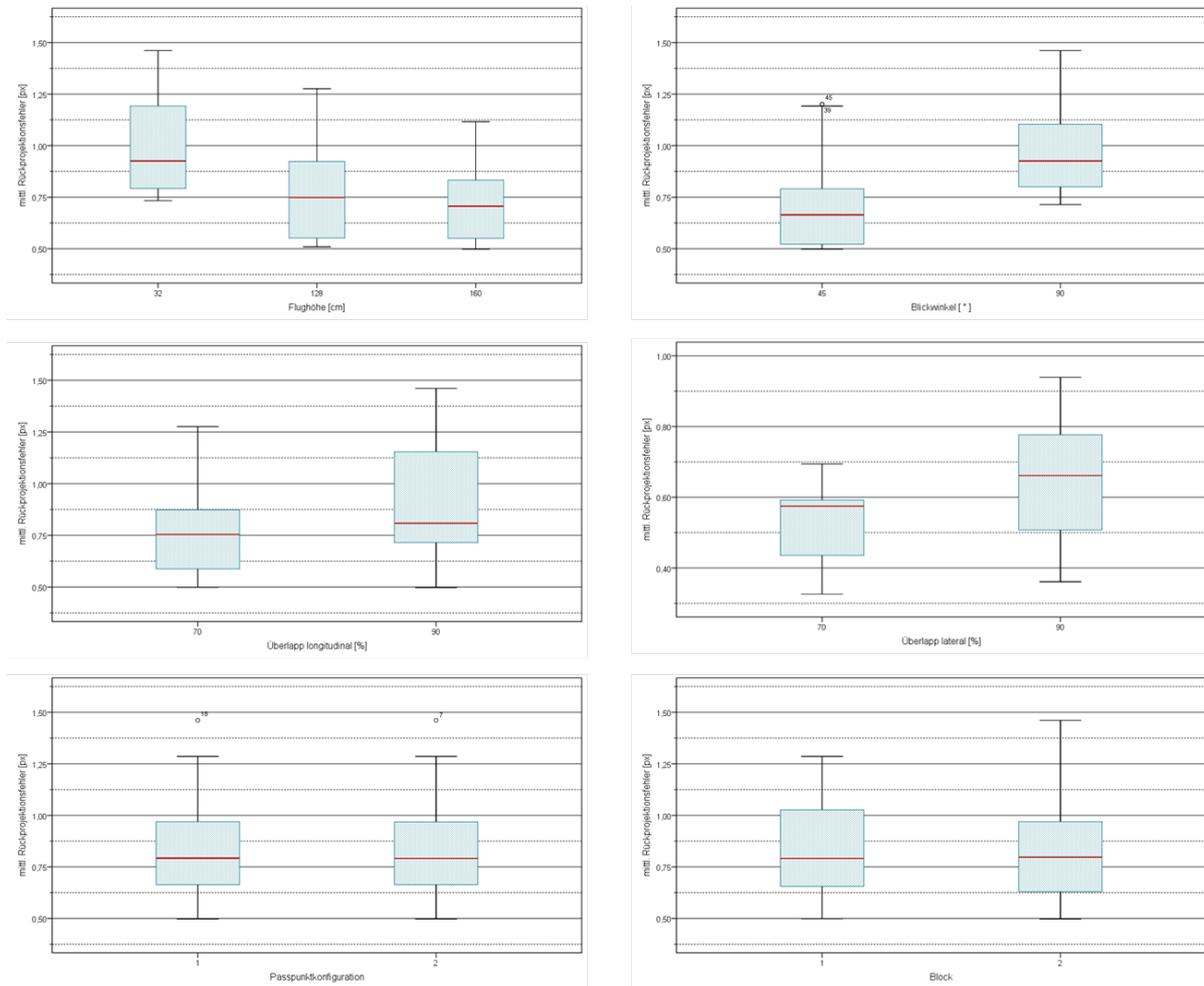


**Abb. 8.10** – Die mittleren Rückprojektionsfehler im Modellmaßstab lassen zwar aufgrund der Versuchswiederholung und dem Wissen über die Sortierung der Datensätze Rückschlüsse auf die Bildaufnahme zu, allein aus den dargestellten Ergebnissen können jedoch keine praktische relevanten Zusammenhänge abgeleitet werden.

Interessant ist allerdings auch, dass die verbliebenen Rückprojektionsfehler am Ende jedes sich wiederholenden Blockes ansteigen, wodurch sich der erkenntliche gezackte Verlauf ergibt. Von besonderer Relevanz ist dieser Umstand, da innerhalb des Blockes am Anfang Schräg- und ab der Hälfte Nadiraufnahmen liegen, und da wiederum innerhalb dieser Unterblöcke der Bildüberlapp stetig zunimmt. D.h. Die Rückprojektionsfehler sind bei hohem Überlapp und vertikaler Aufnahme deutlich höher als bei einem Überlapp von 70 % und einem Kamerablickwinkel von 45° zur Vertikalen. Von besonderer Bedeutung ist diese Tatsache, da sie unabhängig von der Flughöhe ist. Werden die einzelnen Blöcke noch genauer untersucht, so zeigt sich außerdem, dass alle am Anfang einen kleinen “Haken“ zeigen und sich bald danach ein Minimum einstellt, dass unabhängig der Flughöhe bei geneigter Kamera und einer Kombination der Bildüberlappung von je einmal 70 % und einmal 90 % auftritt. Dabei bildet die mittlere Flughöhe von 128 cm eine Ausnahme, da hier 90 % longitudinal und 70 % lateral vorherrschen, während bei den beiden anderen Höhen genau der umgekehrte Fall vorliegt.

Abb. 8.11 zeigt die beschriebenen Effekte noch einmal in übersichtlicher Form als Zusammenstellung von Box-Plot Diagramm, wo diese vor allem auch wesentlich deutlicher erkannt und interpretiert werden können als in Abb. 8.10. Besonders deutlich können der Einfluss der Flughöhe (links oben), des Blickwinkels (rechts oben) und auch der Bildüberlappung erkannt werden. Größere Aufnahmedistanzen, und geneigte Aufnahmeerichtung führen zu geringeren Rückprojektionsfehlern nach der Bündelausgleichung. Obwohl die Streuung der Werte eher hoch ist, sind diese Effekte offensichtlich. Auch hinsichtlich der Bildüberlappung (mittlere Zeile) kann ein Effekt auf die Größe der Rückprojektionsfehler erkannt werden. Entgegen den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit führt eine hohe Bildüberlappung hier zu großen Fehlern an den Rückprojektionen, was auch bereits im Realmaßstab in ähnlicher Weise erkannt werden konnte. Während Rückprojektionsfehler und äußere Genauigkeit bei den Faktoren Flughöhe und Blickwinkel ein vergleichbares Verhalten zeigen, sind die Effekte hinsichtlich Bildüberlappung genau gegenläufig

und eine Beurteilung der äußeren Genauigkeit auf Basis der Rückprojektionen ist somit nicht eindeutig möglich.



**Abb. 8.11 – Die Effekte der untersuchten Faktoren auf die verbliebenen Rückprojektionsfehler nach dem Bündelblockausgleich verhalten sich teilweise und gleich- und teilweise gegensinnig zu den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit.**

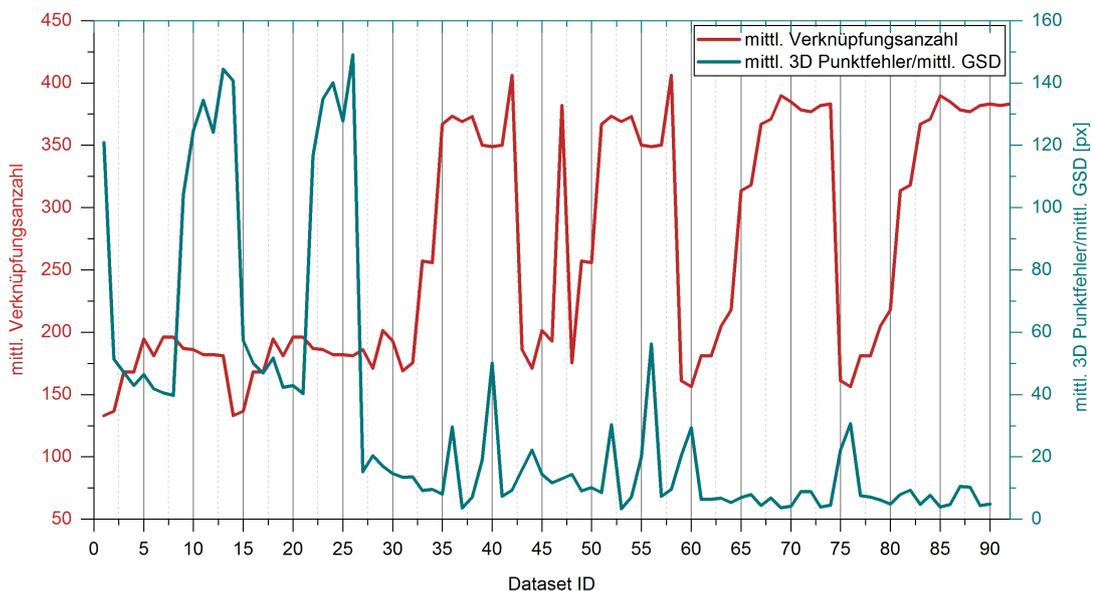
Interessant ist an dieser Stelle allerdings, dass die bereits in Abb. 7.9 erkannte höhere Variabilität in Aufnahmeblock 2 auch anhand der Rückprojektionsfehler sichtbar wird (rechts unten in Abb. 8.11). Zwar ist die 75% umfassende Box im rechten Diagramm etwas kleiner als links, allerdings können anhand der T-Balken ganz klar einige Ausreißer erkannt werden.

Ganz grundsätzlich zeigen die Rückprojektionsfehler aber eine sehr hohe Variation von 0,3 bis über 1,4 Pixel und sind damit geringfügig größer als bei den zuvor beschriebenen realmaßstäblichen Untersuchungen. Die größere Streuung und Variabilität der Daten ist aber auch der größeren Anzahl an Datenpunkten geschuldet, wodurch auch eine größere Anzahl an verschiedenen Ergebnisausprägungen ermöglicht wird. Obwohl bei näherer Betrachtung und Berücksichtigung der zu Grunde liegenden Datensortierung einige markante Effekte augenscheinlich wurden, kann rein aus den numerischen Werten der mittleren Rückprojektionsfehler allerdings auch im Modellmaßstab kein belastbarer Zusammenhang abgeleitet werden. Eine Beurteilung der vermessungstechnisch relevanten Genauigkeit auf Basis der Rückprojektionen ist somit auch im Modellmaßstab nicht möglich.

## Epipolargeometrie

Da sich im Realmaßstab die mittlere Anzahl an gültigen Verknüpfungen zwischen korrespondierenden Bildern als ein geeignetes Maß zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit gezeigt hat, wurde diese Größe auch für die Modelldaten bestimmt und entsprechend ausgewertet. (siehe Abb. 8.12)

Wird zunächst nur die rote Kurve in Abb. 8.12 betrachtet, so kann ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Rückprojektionsfehlern eine periodische Wiederholung ähnlicher Abschnitte erkannt werden. Da die Datensortierung gleich wie in Abb. 8.10 ist, können auch die selben Blöcke vergleichbarer Aufnahmeanordnung gefunden werden. Die mittlere Verknüpfungsanzahl im Modellmaßstab weist allerdings auch eine sehr starke Variabilität auf, und insbesondere bei den größeren Aufnahmeabständen schwankt die Anzahl sehr stark in Abhängigkeit von Blickrichtung und Überlapp.

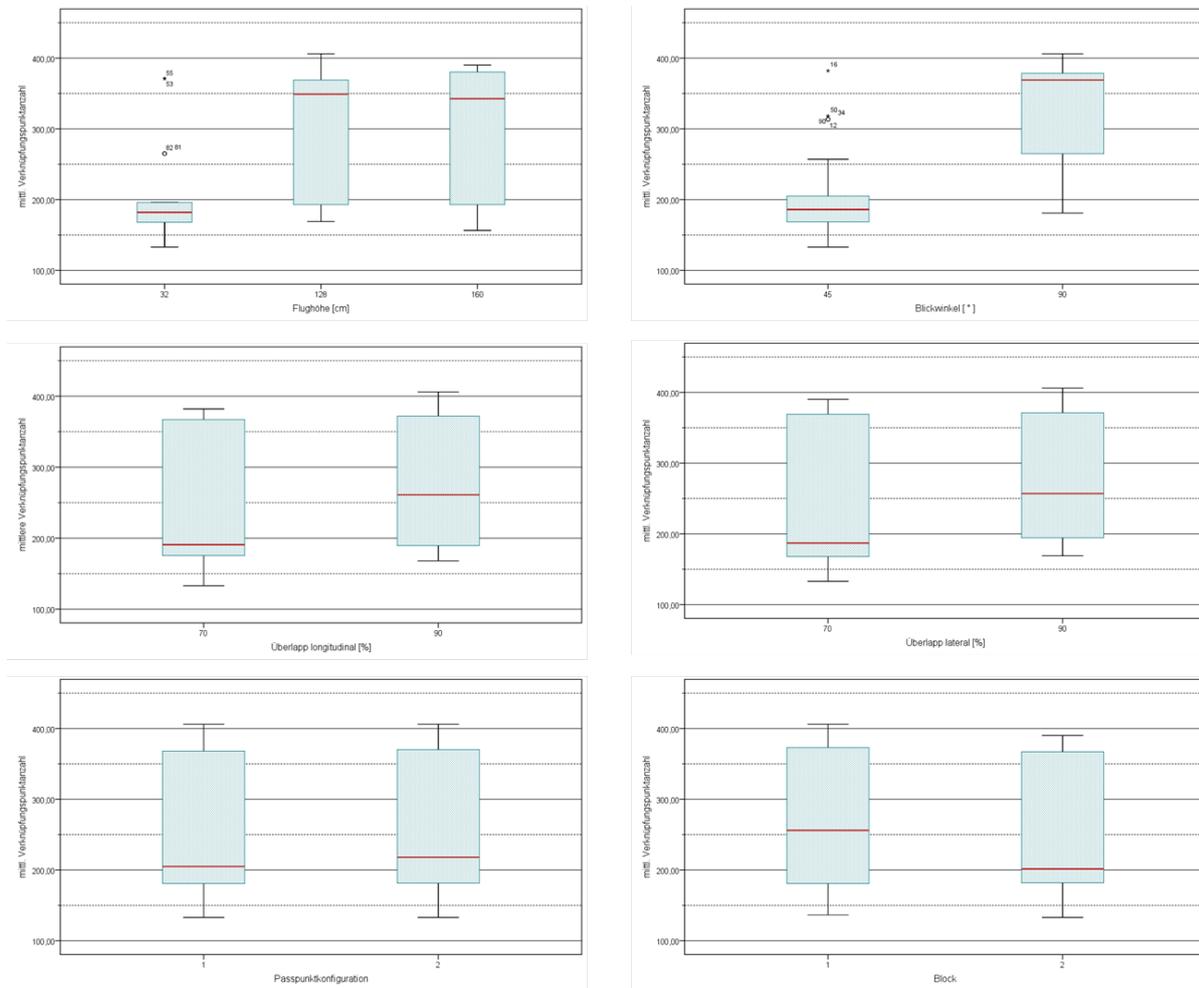


**Abb. 8.12** – Die Anzahl der gültigen Verknüpfungen im Modellmaßstab deutet zwar einen Zusammenhang mit der erreichten äußeren Genauigkeit an, allerdings lässt die Variabilität in den Daten eine eindeutige Beurteilung nicht zu.

Obwohl die gemeinsame Betrachtung der beiden in Abb. 8.12 dargestellten Kurven schon einer Systematik folgt und die im Realmaßstab erkannte umgekehrte Proportionalität schon vorhanden ist, ist der Zusammenhang in seiner Deutlichkeit nicht mit dem zuvor beschriebenen vergleichbar. Sowohl die erreichte Genauigkeit, als auch die mittlere Anzahl an gültigen Verknüpfungen zeigen immer wieder Ausreißer, die zwar miteinander korrespondieren, eine eindeutige und klare Aussage allerdings beinahe unmöglich machen. Wie bereits erwähnt kann im Modellmaßstab allerdings ein etwaiger Einfluss des Aufnahmesystems (Kamera wurde nicht skaliert) nicht gänzlich ausgeschlossen werden, bzw. liegt dieser sogar mit hoher Wahrscheinlichkeit vor, weshalb die untersuchten Effekte der Aufnahmeanordnung im vorliegenden Fall mitunter überdeckt oder verfälscht werden.

Werden die Ergebnisse in einen engeren Bezug zu den Faktoren des Versuchsplans gesetzt und gruppenweise als Box-Plots dargestellt (vgl. Abb. 8.13), wird das Bild etwas klarer. Abgesehen von den beiden Ausreißern zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der gewählten Flughöhe, obwohl die Werte in allen Fällen doch klar unter jenen des Realmaßstabs liegen. Während die

mittlere Anzahl gültiger Verknüpfungen in 32 cm bei 182 liegt, belaufen sich die Mittelwerte bei den größeren Aufnahmeentfernungen auf 349 bzw. 342,5. In ähnlicher Deutlichkeit kann der Effekt des Kamerablickwinkels erkannt werden. Hier zeigt sich allerdings klar, dass bei vertikaler Aufnahmeachse durchschnittlich nahezu 370 gültige Verknüpfungen vorliegen und bei einem Blickwinkel von 45° mit 186 im Mittel nur etwas mehr als die Hälfte gefunden werden.



**Abb. 8.13** – Wie bereits im Realmaßstab zeigt die Anzahl gültiger Verknüpfungen im Modellmaßstab eine gegenläufige Tendenz zu den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit. Eine große Anzahl an gültigen Verknüpfungen führt zu einer höheren Genauigkeit und umgekehrt.

Hinsichtlich der Bildüberlappung sind die Effekte zwar nicht so deutlich, aber trotzdem kann der positive Einfluss einer stärkeren Überlappung klar ausgemacht werden. Einerseits liegen die dargestellten Mittelwerte bei 90 % klar über jenen bei 70 %, andererseits deuten auch die geringeren Streuungen auf eine hohe Belastbarkeit dieses Effekts hin und verdeutlichen, dass eine starke Überlappung verlässlich zu einer größeren Anzahl an gültigen Bildverknüpfungen führt.

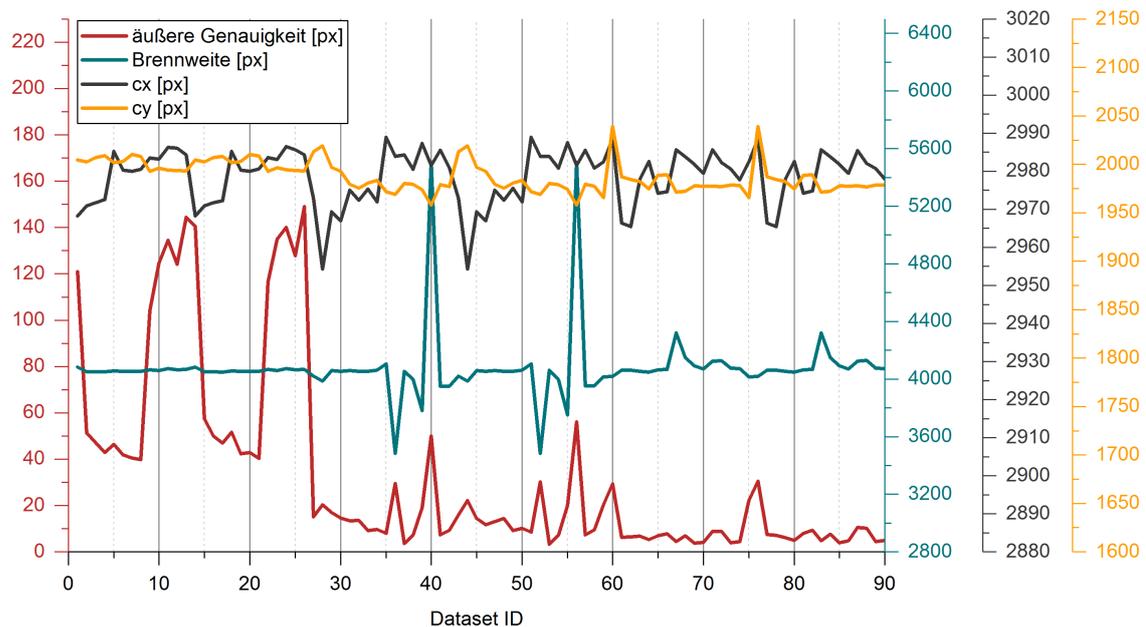
Erwartungsgemäß kann wie im Realmaßstab und bei den bereits präsentierten Rückprojektionsfehlern kein Einfluss der Passpunkt-konfiguration erkannt werden. Die Passpunkte wurden lediglich zur starren Ähnlichkeitstransformation verwendet, und können in diesem Fall somit nicht einmal theoretisch Einfluss auf die Bildverknüpfungen entfalten.

Zusammenfassend muss jedoch angemerkt werden, dass die Korrelation der Verknüpfungspunktzahl mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit im Modellmaßstab wesentlich schwächer

ausgeprägt ist, als dies im Realmaßstab der Fall ist. Nichtsdestotrotz kann die umgekehrte Proportionalität auch hier erkannt werden, und die Anzahl gültiger Bildverknüpfungen kann als “innere Begründung“ für die unterschiedlichen äußeren Genauigkeiten betrachtet werden.

### Simultankalibrierung

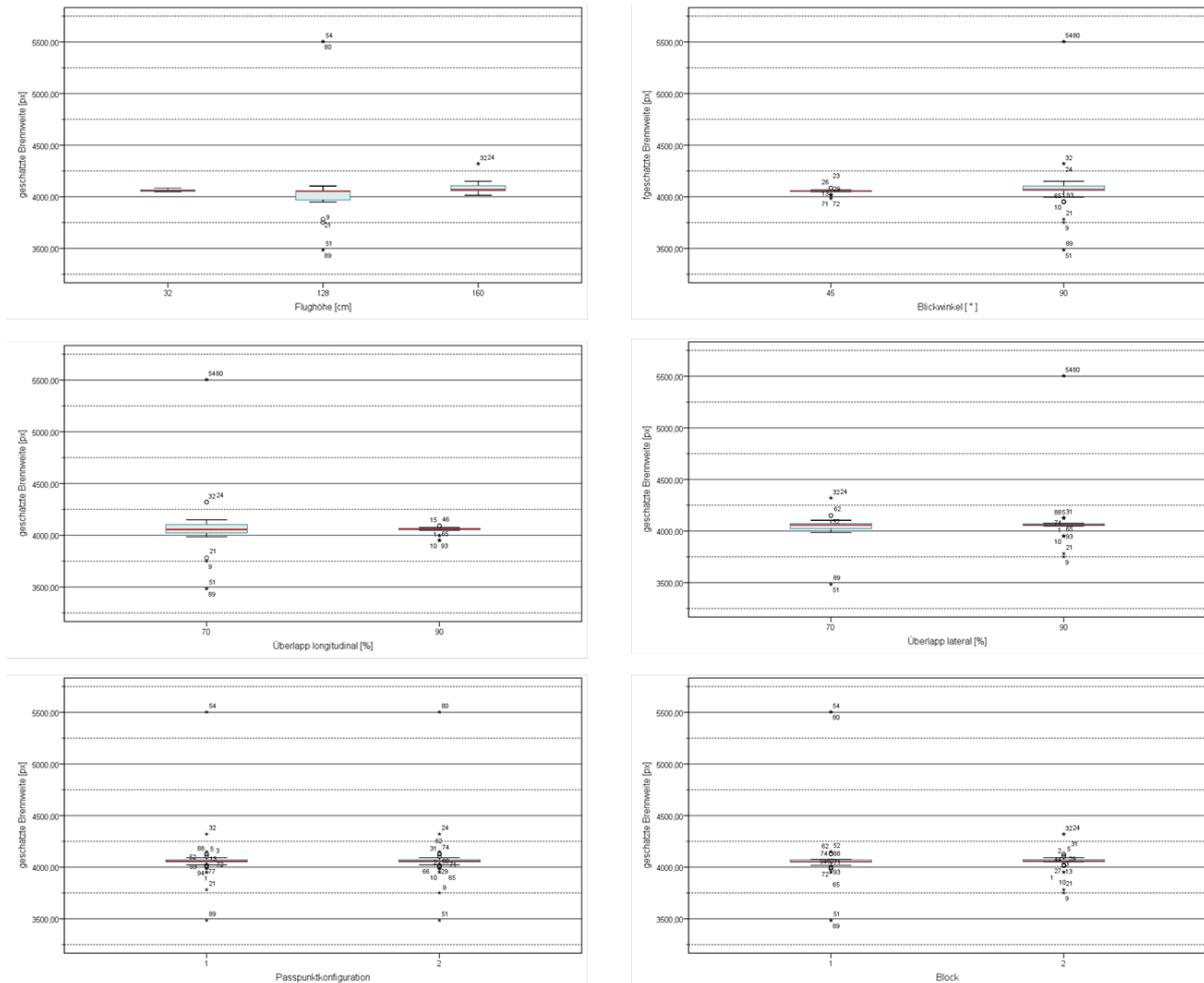
Eine etwaige Möglichkeit das Aufnahmesystem bzw. zumindest dessen Stabilität zu beurteilen bietet sich in Form der Ergebnisse aus der Simultankalibrierung. Im Gegensatz zum Realmaßstab war es bei den modellhaften Untersuchungen bekanntermaßen notwendig die Fokus- und Blendeneinstellungen anzupassen, um scharfe Fotos aufzunehmen und es konnte nicht wie bei den realen Befliegungen mit der Fokusstellung “unendlich“ fotografiert werden. (vgl. Abschnitt 6.2)



**Abb. 8.14** – Die Ergebnisse der Simultankalibrierung im Modellmaßstab lassen zwar bei vorhandenem Hintergrundwissen auftretende Muster erkennen, eine Beurteilung der Ergebnisse hinsichtlich der erreichten äußeren Genauigkeit ist allerdings wie im Realmaßstab nicht möglich.

Wie in Abschnitt 7.3.2 beschrieben wurden auch für die Modellergebnisse drei der wesentlichsten, die Geometrie der Kamera beschreibenden Parameter untersucht und in Abb. 8.14 mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit gegenübergestellt. Um die Darstellung einigermaßen lesbar zu machen, mussten die Skalierungen der Achsen stark adaptiert werden, was in diesem Fall beachtet werden muss, um falsche Rückschlüsse zu vermeiden. Außerdem wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit wiederum extreme Ausreißer entfernt. In diesem Zusammenhang wurde allerdings ein Effekt, der schon im Realmaßstab erkannt worden war, deutlich: Extreme Ausreißer in der äußeren Genauigkeit können zumeist auf “falsch“ geschätzte innere Orientierung und insbesondere Brennweite zurückgeführt werden. Auch die beiden zu Beginn der Evaluierung aussortierten Datensätze 55 und 64 zeigen mit über 5400 Pixel eine auffallend hohe Kamera-konstante. Ähnliches kann auch bei Datensatz 54 und 82 erkannt werden, die allerdings im Datenbestand blieben und in Abb. 8.14 mit Dataset ID 40 und 56 erkennbar sind. Sowohl die äußere Genauigkeit als auch die Brennweite zeigen hier “extremes Verhalten“ und weichen stark von den in der selben Konfiguration erfassten Datensätzen, in Abb. 8.14 jeweils unmittelbar links davon, ab.

Ganz allgemein kann aber eindeutig erkannt werden, dass die betrachteten Größen der inneren Orientierung in einem viel größeren Bereich schwanken als bei den realen Befliegungsdaten. So schwankt die Hauptpunktlage in x-Richtung um insgesamt 34 Pixel und in y-Richtung beträgt die Differenz zwischen kleinstem und größtem Wert sogar mehr als 80 Pixel. Ein noch unregelmäßigeres Bild liefert die geschätzte Brennweite, die Werte in einer Bandbreite von 3484,72 bis 5503,90 Pixel annimmt. Aufgrund der notwendigen Anpassungen in den Kameraparametern war dies allerdings zu erwarten und bei Wissen über diesen Umstand und die Sortierung der Datensätze können in Abb. 8.14 vielleicht sogar homogene Bereiche und Übergänge erkannt werden.



**Abb. 8.15 –** Vor allem das Vorhandensein von ausgeprägten Ausreißern in beide Richtungen macht eine Interpretation der geschätzten Brennweiten schwierig. Es wird jedoch deutlich, dass die Extremwerte nicht an einem einzelnen Faktor festgemacht werden können, sondern vielmehr eine Kombination ungünstiger Faktorstufen dafür verantwortlich zeichnet.

Die im Realmaßstab erkannten systematischen Zusammenhänge zwischen der Hauptpunktlage und der Brennweite konnten im Modellmaßstab nicht verifiziert werden, und auch die Gegenüberstellung mit der äußeren Genauigkeit lässt abgesehen von den beschriebenen Ausreißern keine klaren Rückschlüsse zu. Besonders deutlich wird dies vor allem auch anhand von Abb. 8.15, wo die Ergebnisse der Simultankalibrierung am Beispiel der geschätzten Brennweite mit den Faktoren des Versuchsplans gegenübergestellt wurden. Das Vorhandensein von einigen extremen Ausreißern macht eine sinnvolle Beurteilung unmöglich, allerdings ist zumindest erwähnenswert,

dass augenscheinlich eine Kombination verschiedener Faktorstufen bzw. verschiedene ungünstige Stellungen existieren, die zu den Ausreißern führen, da es nicht gelingt alle Ausreißer an einem Faktor festzumachen.

Insgesamt müssen daher auch im Modellmaßstab die Parameter der inneren Orientierung als zufällig betrachtet werden, bzw. war es im Rahmen der Untersuchungen nicht möglich einen signifikanten Einfluss der Faktoren auf die hier dargestellten Ergebnisse zu erkennen.

## 8.3 Ergebnisse aus Faktorkombination

Wie im Realmaßstab beschrieben wurden auch im Modellmaßstab ausgewählte Faktorkombinationen gebildet, um den Einfluss der gemeinsamen Auswertungen verschiedener Faktorstufen zu untersuchen. Aufgrund des umfangreicheren Versuchsplans ist auch die Anzahl der möglichen Kombinationen größer, weshalb im Folgenden insgesamt 68 Datensätze analysiert werden.

Die Vorgehensweise bei der Bildung der Kombinationen war dabei ähnlich wie bereits in Abschnitt 7.4 anhand der realmaßstäblichen Untersuchungen gezeigt: Zunächst wurde versucht Kombinationen zu bilden, die in der Lage sind ursprünglich schlechte Aufnahmeanordnungen zu verbessern, bzw. sollte untersucht werden inwieweit dies überhaupt möglich ist. Von dieser Idee wurden insgesamt 12 verschiedene Anordnungen getragen, wobei durch die Blockwiederholung und unterschiedliche Form der Georeferenzierung insgesamt 44 einzelne Datensätze gebildet wurden. Bei den verbliebenen 24 lag der Fokus wieder auf der Kombination verschiedener Aufnahmerichtungen bei gleichbleibender Aufnahmedistanz und Bildüberlappung.

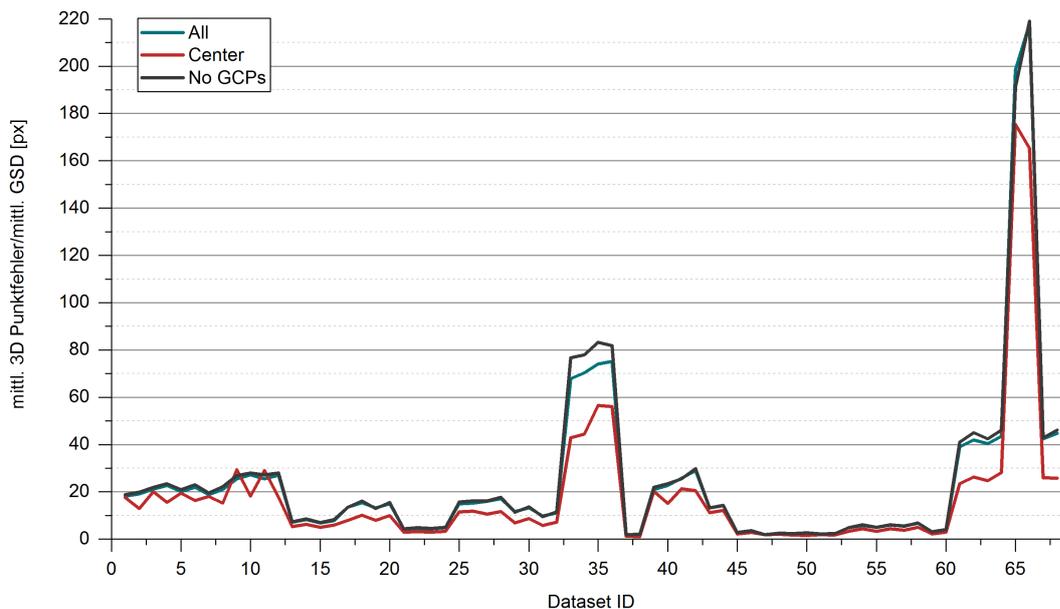
### 8.3.1 Äußere Genauigkeit

Abb. 8.16 zeigt die Ergebnisse aller 68 Faktorkombinationen in der gewohnten Weise als Vielfaches der mittleren Ground Sampling Distance. Dabei sticht insbesondere der Ausreißer am rechten Abbildungsrand ins Auge, der aufgrund seines Ausmaßes eine tiefgreifende visuelle Interpretation der Ergebnisse stark erschwert bzw. unmöglich macht. Bei den angesprochenen Datensätzen handelt es sich um die Kombination von geneigten und vertikalen Bildern, die in 32 cm mit einer Überlappung von 70 % in beiden Richtungen aufgenommen wurden. Die sehr schlechten Ergebnisse erweisen sich demnach als plausibel und konnten in dieser Form auch erwartet werden, allerdings wird dieser Umstand durch die gewählte Darstellungsvariante erheblich überzeichnet abgebildet.

Die Division durch die mittlere GSD hat sich in den bisherigen Darstellungen bewährt, da sie gewissermaßen zur Überhöhung etwaig vorhandener Effekte führt, was die Interpretation der Ergebnisse erleichtert. Andererseits ermöglicht sie eine bessere Vergleichbarkeit der Datensätze im Real- und Modellmaßstab, da die Maßstabskomponente in den untersuchten Differenzen eliminiert wird und die abgeleiteten Aussagen allgemeinere Gültigkeit aufweisen.

Im gegenständlichen Fall allerdings führt die angesprochene Überhöhung zu einer unsachgemäßen Überzeichnung des vorliegenden Ausreißers. Die bei einer Aufnahmeentfernung von 32 cm sehr geringe mittlere GSD von 0,07 mm pro Pixel überhöht die aufgetretenen Differenzen um ein Vielfaches und produziert so künstliche Ausreißer. Entsprechend erscheint hier die Darstellung der absoluten Fehlerbeträge in mm sinnvoller und bildet vor allem eine bessere Basis zur Interpretation.

In Abb. 8.17 bilden die angesprochenen Datensätze zwar noch immer einen negativen Ausreißer - die grundlegende Struktur der Kurven bleibt somit erhalten - allerdings lässt die geringere Variation in den aufgetragenen Werten auch eine Interpretation der übrigen Datensätze zu. Neben dem angesprochenen Ausreißer (Dataset ID 65 und 66) sticht vor allem der ausgeprägte Höcker in der Mitte der Abbildung ins Auge (Dataset ID 33 bis 36). Hierbei handelt es sich um



**Abb. 8.16** – In den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit der Faktorkombination im Modellmaßstab erweist sich die Darstellung als Vielfaches der mittleren GSD als ungeeignet. Ausreißer werden stark überhöht dargestellt und versperren dadurch die Sicht auf die übrigen Ergebnisse.

insgesamt 1054 Bilder umfassende Verbände wo Nadiraufnahmen aus 32 cm und geneigte Bilder aus 128 cm Höhe kombiniert wurden. Diese Ergebnisse fallen unter den Versuch die geringe Genauigkeit des 32 cm Fluges zu verbessern, liefern allerdings ein plakatives Beispiel für augenscheinliches Scheitern der Überlegungen. Die Genauigkeit wird gegenüber beiden kombinierten Ausgangsdatensätzen verschlechtert und der Bildverband gegenüber der getrennten Auswertung destabilisiert.

Zu den übrigen Datensätzen ist zunächst einmal zu sagen, dass die Genauigkeit in nahezu allen Fällen gegenüber den kombinierten Ausgangsdaten erhöht werden konnte, und dass bei den besten Datensätzen (Kombination aller 3 Flughöhen bei gleichzeitiger Variation der Blickrichtung und der Bildüberlappung, Dataset ID 37 und 38) mittlere Genauigkeiten von 0,6 mm erreicht werden konnten. In Anbetracht der Tatsache, dass die erreichten Genauigkeiten im Modellmaßstab generell immer deutlich schlechter waren als unter Realbedingungen ist dies allerdings ein plausibler Wert, der im Gesamtbild auch in Einklang mit theoretisch zu erwartenden Ergebnissen im Bereich weniger Zehntelmillimeter gebracht werden kann.

Abgesehen von den angesprochenen Beispielen 37 und 38 konnten, wie auch im Realmaßstab, die höchsten Genauigkeiten aus einer Höhe von 160 cm mit hohem Überlapp und Kombination der Aufnahmerichtungen erreicht werden (Dataset ID 45 bis 52). Wird der Überlapp allerdings verringert, so verschlechtert sich die Genauigkeit wie anhand der Datensätze 53 bis 64 erkannt werden kann.

Wird der linke Rand von Abb. 8.17 einer näheren Betrachtung zugeführt so ist die erkannte Variation auf die Genauigkeit der miteinander kombinierten Partner zurückzuführen. Eine klare Empfehlung welche Kombination zu bevorzugen wäre kann allerdings nicht ausgesprochen werden.

Wie auch bereits in Kapitel 7 beschrieben wurden auch im vorliegenden Fall wieder unterschiedliche Kontrollpunktmengen und Beobachtungszonen miteinander verglichen. Wie in allen bisher gezeigten Abbildungen, zeigt sich auch hier, dass der durch die rote Linie dargestellte Zentrums-

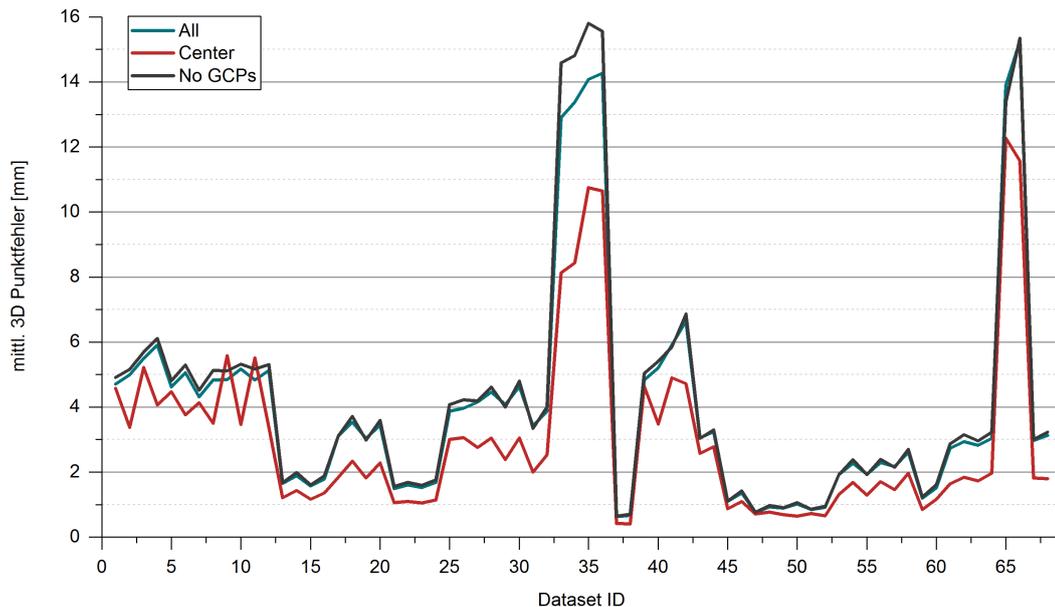


Abb. 8.17 – Ganz grundlegend zeigen die Ergebnisse aus der Faktorkombination im Modellmaßstab einen ähnlichen Verlauf wie bereits im Realmaßstab erkannt. Einzelne Ausreißer verfälschen die Ergebnisse, die höchsten Genauigkeiten konnten allerdings auf die selbe Weise erzielt wie unter Realbedingungen.

bereich durchwegs genauer ist, als das gesamte Gebiet, das durch die türkise bzw. dunkelgraue Linie beschrieben wird. Auffallend ist allerdings schon, dass die türkise bzw. dunkelgraue Kurve gegenüber der roten gewissermaßen geglättet erscheint. Neben der Tatsache, dass eigentlich alle Datensätze den bereits diskutierten Dome-Effekt zeigen reagiert der Zentrumsbereich sensibler auf die zur Georeferenzierung verwendete Passpunktmenge, da dies der Parameter ist wodurch sich unmittelbar benachbarte Datensätze von einander unterscheiden. In den meisten Fällen sind die Ergebnisse wie erwartet bei Verwendung von Konfiguration 1 (vgl. Abb. 6.2) besser, wobei die Unterschiede generell und insbesondere in Relation ID zur Gesamtgenauigkeit sehr gering sind.

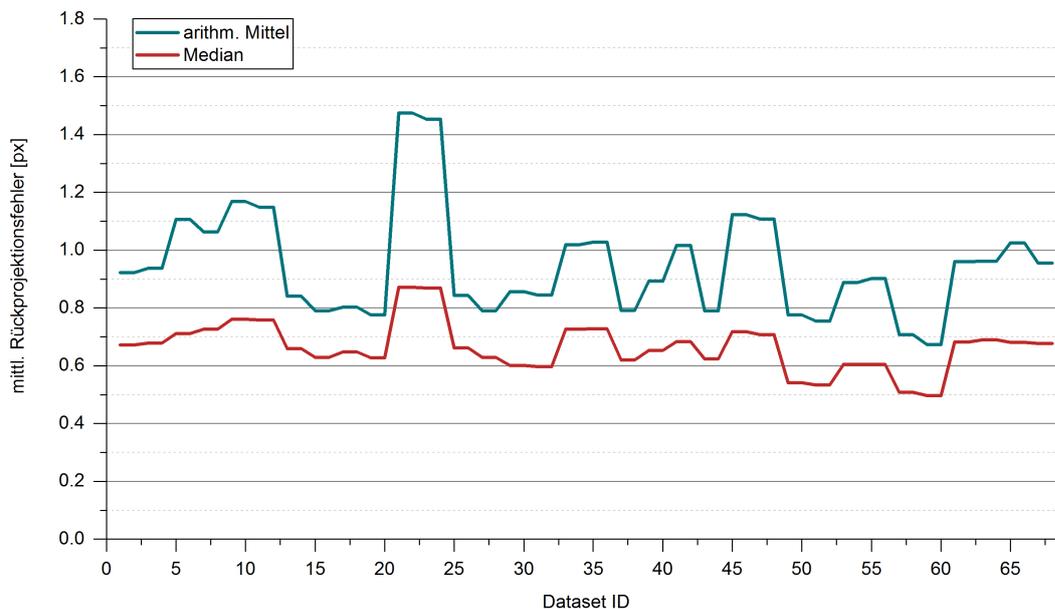
### 8.3.2 Innere Genauigkeit

Nach Beurteilung der äußeren Genauigkeit erfolgte auch im gegenständlichen Fall der Faktorkombination im Modellmaßstab eine nähere Untersuchung der erkannten Effekte anhand der Ergebnisgrößen der inneren Genauigkeit.

#### Rückprojektionsfehler

Die Analyse der mittleren Rückprojektionsfehler in Abb. 8.18 liefert auch für die hier dargestellten kombinierten Datensätze im Modellmaßstab ein ähnliches Bild wie bei allen übrigen Untersuchungen. Die nach der Bündelblockausgleichung verbleibenden Fehlprojektionen belaufen sich auf Werte zwischen 0,5 und 1,5 Pixel und in allen Fällen deutet der durch den Median gebildete Mittelwert (rot) gegenüber dem arithmetischen Mittel (türkis) auf das Vorhandensein von Ausreißern hin. Weder die konkreten Werte, noch die Differenz zwischen Median und arithmetischem Mittelwert lassen allerdings Rückschlüsse auf die erreichte äußere Genauigkeit zu, bzw. sind zur Beurteilung der erreichten äußeren Genauigkeit geeignet.

Es kann zwar eine vorhandene Systematik erkannt werden, ein Zusammenhang mit der dahinter stehenden Aufnahmeanordnung kann allerdings genauso wenig erkannt werden, wie Korrelatio-



**Abb. 8.18** – Die mittlere Rückprojektionsfehler der Faktorkombination im Modellmaßstab deuten in ihrer Größenordnung darauf hin, dass die SfM Prozessierung im üblichen Maße genau durchgeführt werden konnte. Zusammenhänge zu den erreichten Genauigkeiten oder aber markante Unterschiede zu den Ergebnissen aus den Einzelfaktoren können allerdings nicht erkannt werden.

nen mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit. Weder die in Abb. 8.17 erkannten Ausreißer noch der grundsätzliche Verlauf der Kurven wird anhand der mittleren Rückprojektionsfehler ersichtlich. Auf Basis der vorliegenden Datenlage kann eine abschließende Beurteilung der Ergebnisse allerdings nicht erfolgen und die Effekte müssen als zufällige Schwankung bzw. Rauschen interpretiert werden.

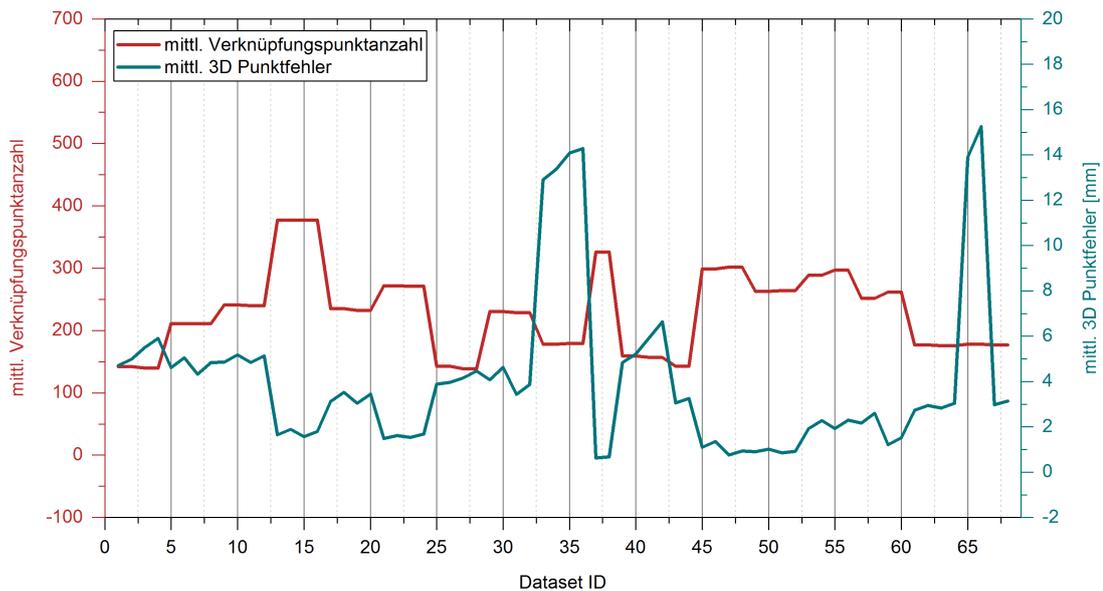
## Epipolargeometrie

Im Gegensatz zu den mittleren Rückprojektionsfehlern bietet das zur Beurteilung der Stabilität des Bildverbandes eingeführte Qualitätsmaß der mittleren Verknüpfungspunkanzahl eine wesentlich bessere Möglichkeit zur Beurteilung der Ergebnisse, was sich in allen bisherigen Fällen in Form eines umgekehrten Zusammenhangs zur äußeren Genauigkeit geäußert hat.

Im Fall der Faktorkombination im Modellmaßstab zeigt sich der angesprochene Zusammenhang zwar nicht immer ganz eindeutig - vor allem Negativausreißer in der äußeren Genauigkeit sind nicht immer mit Ausreißern in den gültigen Verknüpfungen assoziiert - allerdings kann der grundlegende Zusammenhang auch in Abb. 8.19 gut erkannt werden.

Es kristallisiert sich somit immer mehr heraus, dass die mittlere Verknüpfungspunkanzahl ein gutes Mittel zur äußeren Genauigkeitsbeurteilung darstellt, auf dessen Basis eine genauigkeitsoptimierte Flugplanung möglich wäre und das auch Grundlage für einen automatischen “Next-View-Generator“ sein könnte.

Bei näherer Betrachtung der aufgetragenen Werte fällt auf, dass die mittlere Anzahl an gültigen Verknüpfungen mit Werten zwischen 150 und 400 in einem sehr ähnlichen Bereich liegt wie bei den Einzelfaktoren, wobei die geringere Variabilität und der gestufte Verlauf - wie im Realmaßstab - auf Blockwiederholung und zweimalige Georeferenzierung zurückzuführen sind. Trotzdem muss an dieser Stelle einschränkend erwähnt werden, dass die erkannten Effekte wohl nur durch



**Abb. 8.19** – Auch anhand der Faktorkombination im Modellmaßstab kann der umgekehrte Zusammenhang zwischen der Anzahl gültiger Verknüpfungen und den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit erkannt werden. Auftretende Ausreißer werden allerdings nur teilweise reproduziert.

die gemeinsame Betrachtung mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit interpretiert werden können. Die Beurteilung der Ergebnisse allein auf Basis der Anzahl an gültigen Bildverknüpfungen wäre nicht belastbar, bzw. lässt die Variabilität innerhalb der Daten keine stichhaltige Aussage zu. Die Modellversuche reproduzieren somit die mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhandenen theoretischen Zusammenhänge, eine absolute Zahl, die eine robuste Beurteilung ermöglichen würde kann jedoch nicht gegeben werden.

### Simultankalibrierung

Obwohl in den bisherigen Analysen zumeist keine belastbaren Aussagen aus den Analysen der optimierten inneren Orientierungsparameter abgeleitet werden konnten, wurden diese auch für die Faktorkombination im Modellmaßstab erhoben und vergleichend in Abb. 8.20 gegenübergestellt. Auffallend ist zunächst, dass die geschätzten Brennweiten bei Dataset ID 41 und 42 einen markanten Ausreißer zeigen. Die Brennweite wurde in diesem Fall mit 4368 Pixel (entspricht rund 17,01 mm) viel zu lang geschätzt, wobei die Hauptpunktlage an dieser Stelle zu keinem auffälligen Ergebnis führt. Die erreichte Genauigkeit ist in diesem Fall mit 5,9 bzw. 6,6 mm zwar auch gering, allerdings ist die Abweichung zu den übrigen Datensätzen wesentlich kleiner als es die Brennweite vermuten ließe.

Abgesehen von dem bereits diskutierten Ausreißer zeigen die Kalibrierergebnisse keine markanten Auffälligkeiten und auch bei Wissen um die zu Grunde liegende Sortierung der Datensätze können keine zusammenhängenden Blöcke erkannt werden. Der in allen Datensätzen leicht nach oben links verschobene Bildhauptpunkt verändert sich um rund 20 Pixel und mit Ausnahme von Dataset ID 41 und 42 liegt die Brennweite zwischen 4025 und 4070 Pixel bzw. 15,7 und 15,9 mm. Ein Zusammenhang mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit oder den Parametern der Bildaufnahme kann jedoch nicht erkannt werden. Weder Positiv- noch Negativausreißer

zeigen ähnliches Verhalten und auch die verschiedenen Parameter untereinander zeigen keinerlei Zusammenhang.

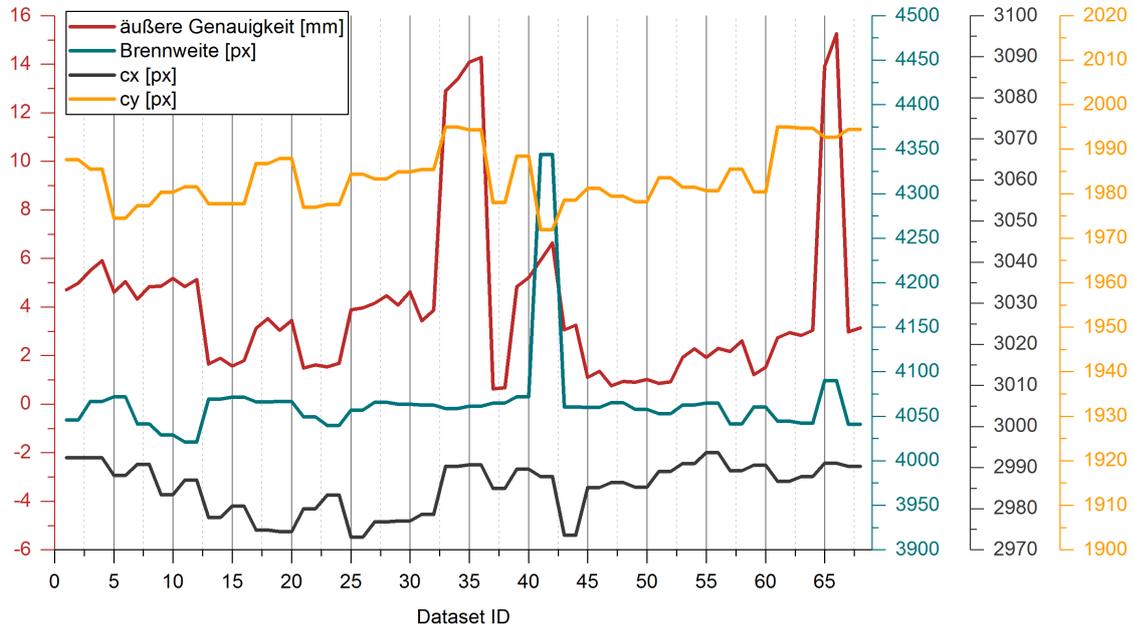


Abb. 8.20 – Die Ergebnisse der Simultankalibrierung aus Faktorkombination im Modellmaßstab bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den Einzelfaktoren, ein Zusammenhang mit der Aufnahmeanordnung bzw. der äußeren Genauigkeit ist jedoch nicht erkennbar.

## Kapitel 9

# Gegenüberstellung von Real- und Modellmaßstab

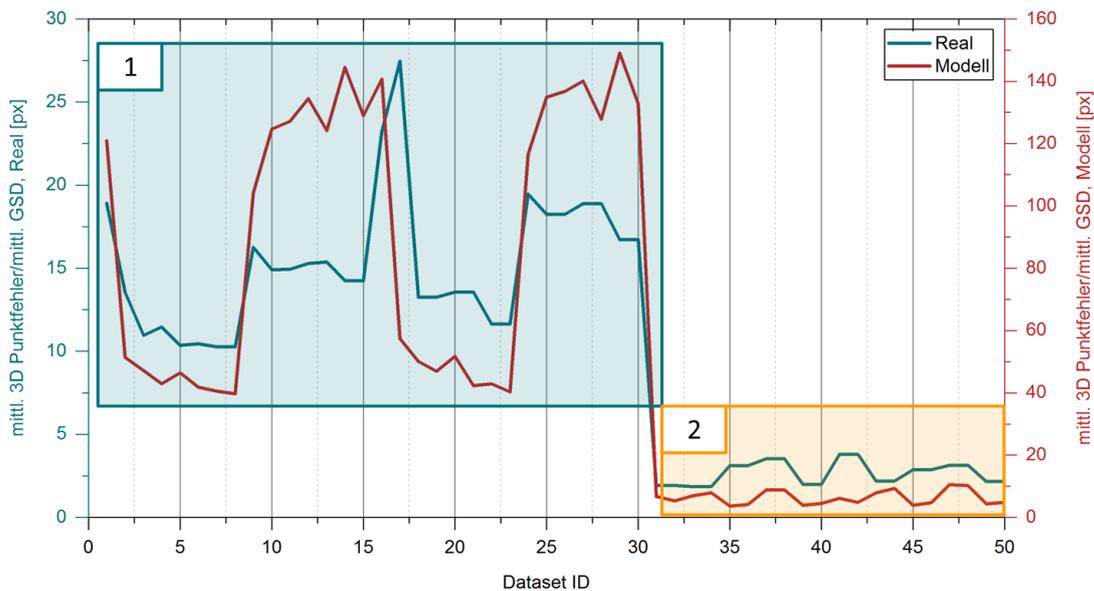
Auch wenn im Zuge der Beschreibung der Ergebnisse aus den Modellversuchen schon immer wieder Bezug auf die realen Befliegungen genommen wurde, sollen nachstehend die beiden Versuchsserien noch einmal kompakt gegenübergestellt werden. In beiden Versuchsreihen wurden im Grunde die selben Versuche angestellt und auch die Auswertung erfolgte nach den selben Schemata. Die Modellversuche wurden als Ergänzung zu den Befliegungen im Steinbruch durchgeführt und hatten das vorrangige Ziel ein vollständiges Abarbeiten des Versuchsplans (siehe Abschnitt 4.1.2) zu ermöglichen, Faktorstellungen in ausreichendem Maße genau zu halten und äußere Störeinflüsse zu minimieren. Die bisher gezeigten Ergebnisse deuten darauf hin, dass dies im Rahmen der technischen Möglichkeiten gelungen ist, wobei die detaillierten Ergebnisse nachfolgend, wieder getrennt nach äußerer und innerer Genauigkeit präsentiert werden. Natürlich wurden die Daten vor der Gegenüberstellung aufbereitet und sortiert, sodass es zu keinen Fehlvergleichen kommen kann. Entsprechend wurden die 128 cm Datensätze genauso von den Betrachtungen ausgeschlossen, wie alle zuvor beschriebenen Ausreißer. Im Ergebnis verbleiben sodann 50 Vergleichspaare, die die Grundlage aller weiteren Auswertungen bilden.

### 9.1 Ergebnisse aus Einzelfaktoren (DoE)

#### 9.1.1 Äußere Genauigkeit

Wie bereits erwähnt können anhand der modell- und realmaßstäblichen Datensätze ähnliche Zusammenhänge erkannt werden, wobei insbesondere der Einfluss der Flughöhe deutlich wird. Bereich 1 in Ab. 9.1 kennzeichnet daher Flüge geringer Aufnahmeentfernung und in Bereich 2 sind jene aus einer Höhe von 150 m bzw. 160 cm zusammengefasst. Insgesamt muss allerdings erwähnt werden, dass die Genauigkeit der Modellergebnisse um mehr als eine Größenordnung schlechter ist als jene der realen Befliegungen, und diese Tatsache lediglich durch die Darstellung mit mehreren y-Achsen kompensiert werden kann.

Auch hinsichtlich Blickwinkel relativ zum Objekt sowie gewählter Bildüberlappung zeigen sich Gemeinsamkeiten, was an dem ähnlichen Verlauf der beiden Kurven in Abb. 9.1 noch einmal sehr schön deutlich wird. Auch wenn die Modellversuche zu einem gänzlich anderen Genauigkeitsniveau führen, so sind die relativen Einflüsse der Aufnahmeanordnung doch weitestgehend vergleichbar. Die Modellversuche verifizieren entsprechend die realen Befliegungen im Steinbruch und die erkannten Zusammenhänge konnten eindeutig bestätigt werden. Die aufgezeigten Relationen zwischen Aufnahmeanordnung und erreichter äußerer Genauigkeit können somit gewis-



**Abb. 9.1** – Die Gegenüberstellung der äußeren Genauigkeit in beiden Untersuchungsmaßstäben zeigt eine sehr ähnliche Systematik. Sowohl der Einfluss der Flughöhe als auch Blöcke gleicher Blickrichtung sind in beiden Maßstäben in ähnlicher Weise sichtbar.

sermaßen als allgemein gültig betrachtet werden und erhalten daher auch eine deutlich erhöhte praktische Relevanz.

Um Wiederholungen zu vermeiden wird an dieser Stelle jedoch auf eine Gegenüberstellung von Box-Plot Diagrammen verzichtet und auf die bereits präsentierten Ergebnisse in den Kapiteln 7 und 8 verwiesen. Es soll lediglich angemerkt werden, dass die erkannten Zusammenhänge im Realmaßstab deutlicher sichtbar wurden als dies bei den Modellversuchen der Fall ist, was aber zu einem Gutteil auf die größere Variabilität der Modellergebnisse zurückzuführen ist, die wiederum mit großer Wahrscheinlichkeit in der maßstabsbedingt erforderlichen Instabilität des Aufnahmesystems begründet ist.

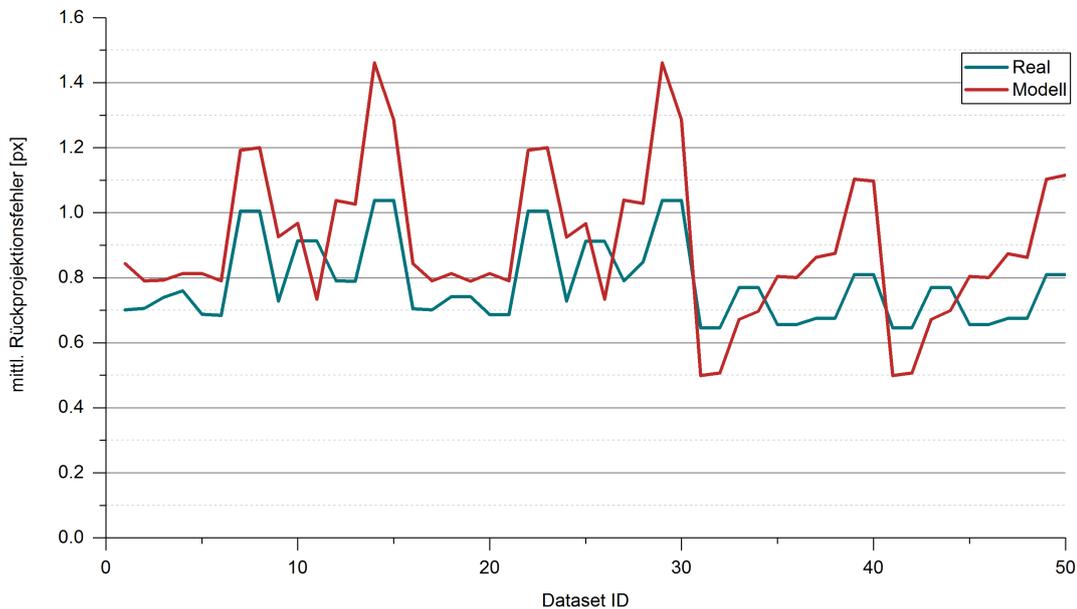
### 9.1.2 Innere Genauigkeit

Um eine zufällige Relation zwischen den Realbefliegungen und den Modellversuchen auszuschließen, und auch um einen vollständigen Vergleich zu ermöglichen wurden auch die Ergebnisgrößen der inneren Genauigkeit vergleichend analysiert. Zeigen sowohl innere als auch äußere Genauigkeit in beiden Maßstäben vergleichbare Ergebnisse, so könnten gleichsam Ursache und Wirkung verifiziert, die selben Aussagen aus zwei gänzlich unabhängigen Versuchsserien abgeleitet und die Belastbarkeit der Ergebnisse noch weiter gesteigert werden.

### Rückprojektionsfehler

Bei Betrachtung der mittleren Rückprojektionsfehler, in beiden Fällen wurde das arithmetische Mittel gewählt, zeigt sich ein grundsätzlich ähnliches Bild wie zuvor und die Zusammenhänge der Rückprojektionsfehler mit den Parametern der Bildaufnahme folgen sowohl im Real- als auch im Modellmaßstab ähnlichen Mustern. Die bei den äußeren Genauigkeiten erkannte Größenordnungsdifferenz zeigt sich anhand der Rückprojektionsfehler nicht wirklich, und die Werte liegen sowohl im Modell als auch in der Realität zwischen 0,5 und 1,4 Pixel. Die Modellergebnisse

weisen eine geringfügig größere Bandbreite auf, was allerdings noch immer im zu erwartenden Maß liegt.



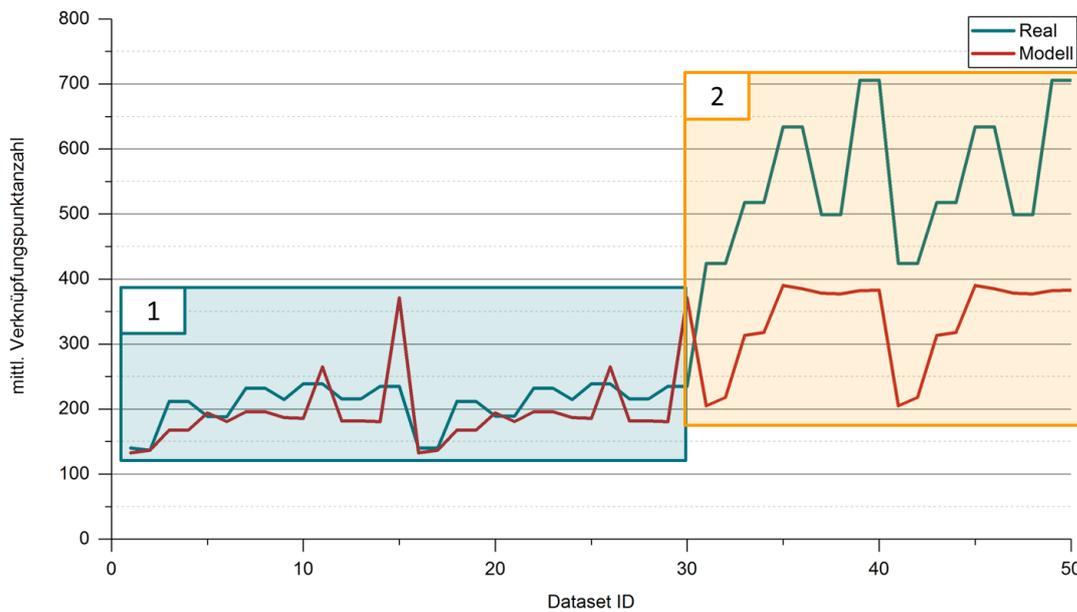
**Abb. 9.2** – Der Vergleich der Rückprojektionsfehler im Real- und Modellmaßstab lässt zwar keinen eindeutigen Zusammenhang zu den Parametern der Bildaufnahme erkennen, allerdings weisen beide Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf auf.

Da sowohl die modell- als auch die realmaßstäbliche Kurve einen sehr ähnlichen Verlauf zeigen, dürfte zwar schon ein Einfluss der Bildaufnahme sichtbar sein, aber auf keinen Fall treten die Effekte in ähnlicher Deutlichkeit wie in den zuvor gezeigten Abbildungen zu Tage. Aufgrund der Vielzahl an Bildmessungen, die hier zur Mittelwertbildung herangezogen werden, werden die auftretenden Phänomene verschleiert und sind in den Ergebnissen nur mehr bedingt sichtbar. Nichtsdestotrotz bleibt eine starke Ähnlichkeit zwischen den beiden Versuchsserien und Zonen ähnlicher Aufnahmeanordnung führen auch zu Zonen vergleichbarer Ergebnisse.

## Epipolargeometrie

Sowohl im Modell- als auch Realmaßstab zeigte die Bewertung der gültigen Epipolargeometrien anhand der mittleren Anzahl an gültigen Verknüpfungen zwischen den Bildern einen starken Zusammenhang mit den erreichten äußeren Genauigkeiten. Wird die angesprochene Größe in beiden Maßstäben gegenübergestellt, ergibt sich das in Abb. 9.3 gezeigte Bild.

Vor allem bei den geringen Aufnahmedistanzen (Dataset ID 1 bis 30, Bereich 1) ist die mittlere Verknüpfungspunktzahl in beiden Maßstäben sehr ähnlich. Es werden rund 150 bis 200 Verknüpfungen gefunden und abgesehen von der größeren Streuung im Modellmaßstab, sind auch die lokalen Unregelmäßigkeiten in beiden Maßstäben ähnlich. Bei den höheren Flughöhen (Bereich 2) zeigt sich allerdings eine deutliche Differenz zwischen den beiden Linien und im Realmaßstab konnten wesentlich mehr gültige Verknüpfungen gefunden werden als im Modell. Der oft angesprochene ‘‘Sprung‘‘ mit der Flughöhe ist im Modell viel schwächer ausgeprägt bzw. kaum zu erkennen, andererseits können lokale Effekte in den Linien auch bei den großen Höhen im rechten Bereich gut in Beziehung gesetzt werden, bzw. kann anhand beider Linien eine ähnlich Grundsystematik erkannt werden.



**Abb. 9.3 – Während bei großer Aufnahmedistanz im Realmaßstab eine stabilere Verknüpfung der Bilder besteht, kann dieser Umstand bei geringer Flughöhe nicht erkannt werden.**

Während im Realmaßstab die mittlere Anzahl an gültigen Verknüpfungen wahrscheinlich auch alleine als Bewertungskriterium für die äußere Genauigkeit dienen könnte, ist dies im Modell wohl nur bedingt möglich. In beiden Fällen muss jedoch gesagt werden, dass insbesondere bei den größeren Aufnahmedistanzen die Schwankungen innerhalb der Daten des jeweiligen Maßstabs sehr groß sind.

Zur näheren Untersuchung dieser Variabilität sind im folgenden nur die Datensätze der Flughöhe 150 m bzw. 160 cm als Box-Plot Diagramm dargestellt (Bereich 2 in Abb. 9.3). Der linken Spalte können die Ergebnisse des Realmaßstabs entnommen werden, und rechts sind jene der modellhaften Untersuchungen dargestellt.

Zuallererst sticht ins Auge, dass - sofern die Flughöhe "ausgeblendet" wird - der Blickwinkel (erste Zeile in Abb. 9.4) zum dominanten Faktor wird und somit auch hauptverantwortlich für den gezackten Verlauf der Kurven in Abb. 9.3 ist. Vor allem im Modellmaßstab (rechts oben) ist der Unterschied auffallend und es zeigt sich deutlich, dass die Anzahl gültiger Bildverknüpfungen bei Nadiraufnahmen größer ist, als bei relativ zum Objekt geneigter Aufnahmeachse.

Auch im Falle der longitudinalen Bildüberlappung (zweite Zeile in Abb. 9.4) zeigen die Ergebnisse im Real- und Modellmaßstab sehr ähnliche Tendenzen. Obwohl die erreichten Absolutwerte in einem gänzlich anderen Bereich liegen - zwischen 400 und 600 im Realmaßstab bzw. zwischen 300 und 350 im Modell - ist die erkannte Systematik vergleichbar und der positive Effekt einer starken Überlappung wird in beiden Betrachtungsmaßstäben deutlich.

Schwierig gestaltet sich die Beurteilung hinsichtlich des lateralen Überlapps. Da im Realmaßstab nur vier Versuche mit einer Überlappung von 70 % durchgeführt werden konnten ist eine Aussage hinsichtlich dieses Faktors nicht möglich und auch eine Gegenüberstellung mit den insgesamt 16 bzw. 32 Versuchen aus dem Modellmaßstab nicht objektiv durchführbar.

Insgesamt zeigt Abb. 9.4 allerdings deutlich, dass die Ergebnisse im Real- und Modellmaßstab, auch wenn sie auf den ersten Blick sehr unregelmäßig erscheinen, einer sehr ähnlichen Systematik folgen und insbesondere auch ein Zusammenhang zu den Faktoren des Versuchsplans hergestellt werden kann. Die ausgeprägte Variabilität der beiden Kurven in Abb. 9.3 ist somit der Effekt der

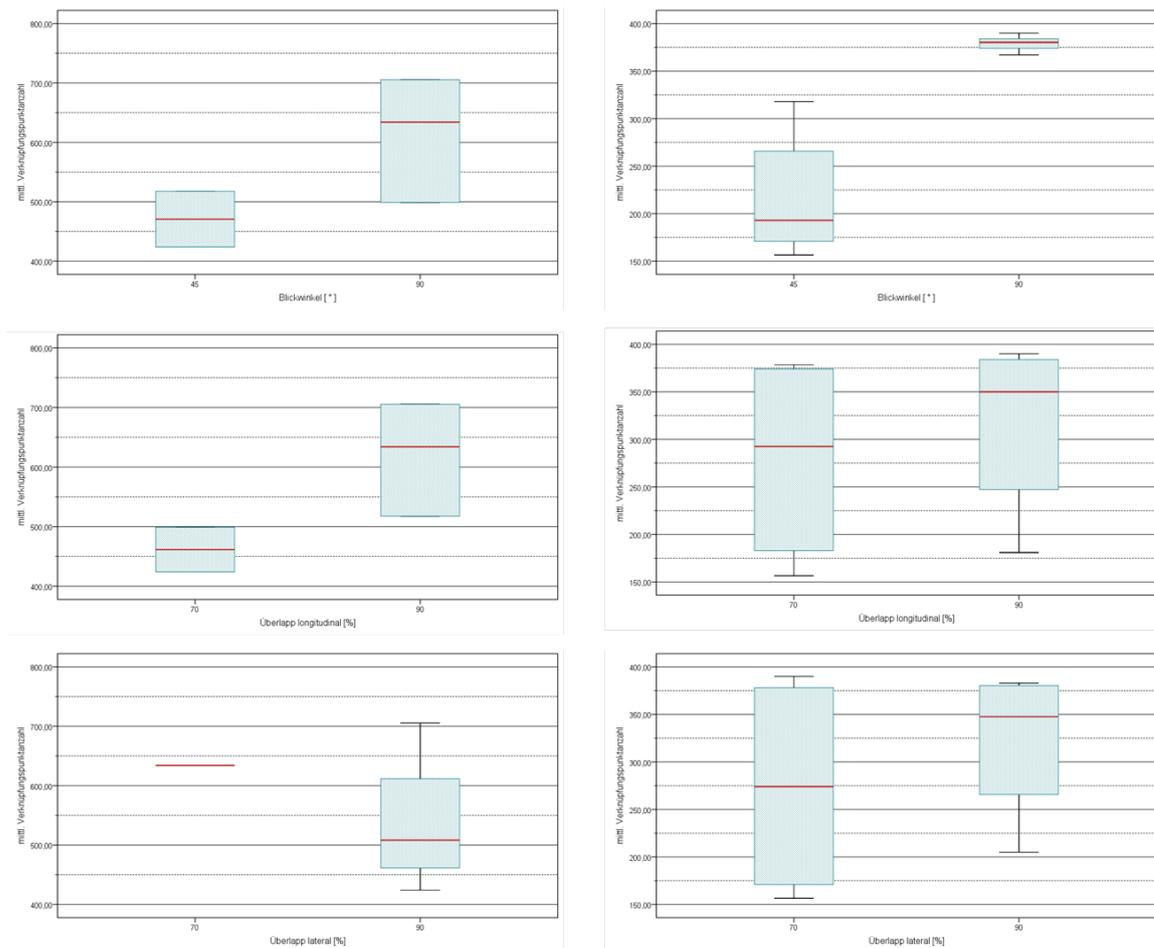


Abb. 9.4 – Gegenüberstellung der mittl. Verknüpfungspunktzahl bei großer Aufnahmeinstanz

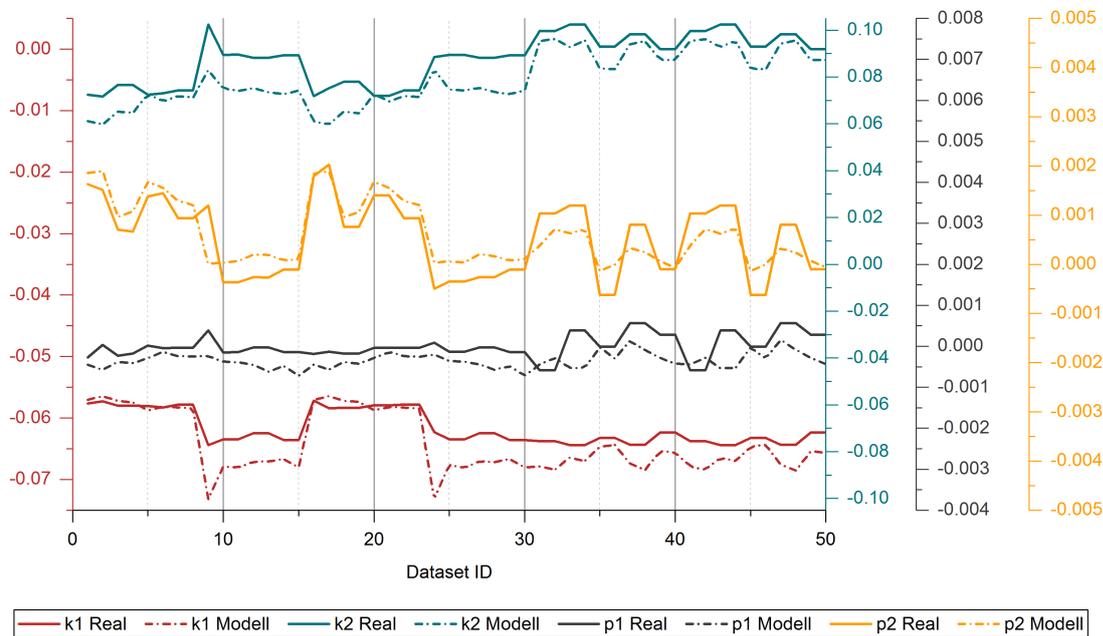
Bildüberlappung und vor allem auch des Blickwinkels, wodurch einmal mehr deutlich wird, dass die erzielten Ergebnisse nicht von einem einzelnen Einflussfaktor abhängig sind, sondern vielmehr auch die Wechselwirkungen zwischen den Größen von Bedeutung sind, wodurch vor allem auch eine eindeutige und einfache grafische Repräsentation der Ergebnisse erheblich erschwert wird.

### Simultankalibrierung

Die vergleichende Betrachtung der Ergebnisse der Simultankalibrierung bedarf einer gesonderten Diskussion. Aufgrund der Tatsache, dass im Modellmaßstab die Fokus- und Blendeneinstellungen an die jeweilige Aufnahmesituation angepasst werden mussten, entspräche eine unmittelbare Gegenüberstellung einem Vergleich von Äpfeln mit Birnen. Streng genommen erfolgten die Aufnahmen mit zwei unterschiedlichen Kameras und ein Vergleich der geometrischen Größen der Abbildungsgeometrie ist entsprechend nicht wirklich sinnvoll. So belaufen sich z.B. die geschätzten Brennweiten im Realmaßstab auf Werte zwischen 4028 und 4053 Pixel und im Modellmaßstab können Werte zwischen 3484 und 5503 Pixel gefunden werden.

Außerdem wurde schon in der getrennten Betrachtungen in den Abschnitten 7.3 und 8.2 gezeigt werden, dass ein Bezug zwischen Simultankalibrierung und äußerer Genauigkeit gar nicht, und zu den verschiedenen Faktoren des Versuchsplans auch nur in eingeschränktem Maß möglich ist. Innerhalb des jeweiligen Untersuchungsmaßstabs konnten allerdings keine unerklärlichen

Schwankungen in der optimierten inneren Orientierung erkannt werden, weshalb die Schlussfolgerung einer funktionierenden Simultankalibrierung möglich ist.



**Abb. 9.5** – Die Gegenüberstellung der Verzeichnungsparameter zeigt, dass sowohl die tangentialen als auch die radialen Koeffizienten weitestgehend maßstabsunabhängig sind.

Werden die angesprochenen Ergebnisse allerdings noch näher betrachtet und die Koeffizienten der Verzeichnungskorrektur miteinbezogen so zeigt sich doch ein bemerkenswerter Umstand. Sowohl im Real- als auch im Modellmaßstab führt die Optimierung der Intrinsic zu den nahezu selben Werten.

Die Gegenüberstellung der optimierten Parameter in Abb. 9.5 zeigt deutlich, dass die sowohl die radialsymmetrischen Verzeichnungsparameter ( $k_1$  und  $k_2$ ) als auch jene der tangentialen Verzeichnung ( $p_1$  und  $p_2$ ) weitestgehend maßstabsunabhängig sind und in beiden Maßstäben einen sehr ähnlichen Kurvenverlauf zeigen. D.h., dass die Aufnahmeanordnung starken Einfluss auf die Verzeichnungskorrektur nimmt, und dies vor allem unabhängig von den tatsächlichen Fokus- und Blendeneinstellungen sowie vom Aufnahmemaßstab ist. Inwieweit die geschätzten Parameter der Realität entsprechen, kann an dieser Stelle mangels Referenzkalibrierung nicht beurteilt werden, und die einzige Möglichkeit zur Wertung und Ordnung wäre durch einen Vergleich mit den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit möglich. Da sich hierbei allerdings kein belastbarer Zusammenhang erkennen lässt, müssen die Unterschiede in den Ergebnissen in diesem Rahmen unbewertet und lediglich phänomenologisch behandelt bleiben.

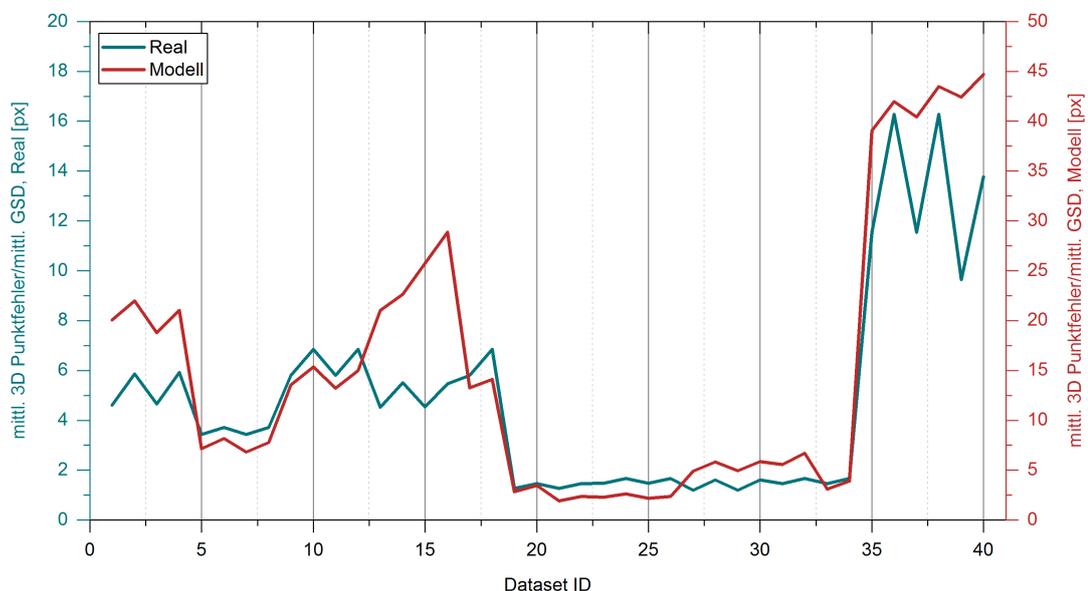
## 9.2 Ergebnisse aus Faktorkombination

Obwohl im Modellmaßstab mit insgesamt 68 Versuchen eine größere Anzahl an Versuchen durchgeführt wurde als im Realmaßstab (54 Datensätze), wurden die vergleichbaren Kombinationen gegenübergestellt, um etwaige Einflüsse des Untersuchungsmaßstabs auch anhand der Faktorkombination zu analysieren.

### 9.2.1 Äußere Genauigkeit

Die Gegenüberstellung der 40 “überlappenden“ Datensätze beider Maßstäbe in Abb. 9.6 zeigt, dass die Versuchsreihen sowohl im Real- als auch im Modellmaßstab zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen. Die beiden Kurven verlaufen nahezu deckungsgleich, allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse aus dem Modellmaßstab um den Faktor 2,5 ungenauer sind als die vergleichbaren Anordnungen im Realmaßstab. Dieser Umstand ist allerdings auch bereits von den Einzelfaktoren bekannt und ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen Einfluss der nicht im Maßstab 1:100 skalierten Kamera zurückzuführen.

Ähnliche Aufnahmeanordnungen führen in beiden Betrachtungsmaßstäben zu ähnlichen Ergebnissen und auch die “optimale“ Aufnahmekonfiguration besteht in beiden Maßstäben aus der Kombination verschiedener Blickrichtungen aus großen Aufnahmeentfernungen. Die einzige Ausnahme wird durch größeren Fehler der Datensätze 13 bis 16 gebildet. In diesem Fall wurde versucht die ausgewiesenen schlechten Ergebnisse, die sich bei geringem Aufnahmeabstand, geringem Überlapp und vertikaler Blickrichtung ergeben, durch Hinzunahme von in großen Höhen aufgenommenen Nadirbildern mit ebenfalls geringem Überlapp zu verbessern. Vor allem in Block 1 der Modellversuche wurde hier Datensatz 55 verwendet, der wie in Abschnitt 8.2.1 beschrieben aufgrund der erkennbaren Probleme bei der Bildauswertung von den weiteren Betrachtungen ausgeschieden wurde. Aus der Gegenüberstellung beider Maßstäbe zeigen sich somit noch einmal deutlich die bei ungeeigneter Aufnahmeanordnung auftretenden Probleme hinsichtlich Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Vor allem bei geringem Bildüberlapp ist die Streuung zwischen zwei Wiederholungen sehr hoch und kann von verhältnismäßig gut bis zum kompletten Scheitern führen. Obwohl das Scheitern durch die vorliegende kombinierte Auswertung verhindert werden konnte deuten die Differenzen zwischen Modell- und Realmaßstab schon auf eine hohe Unsicherheit in der Auswertung schwach überlappender Datensätze hin.



**Abb. 9.6** – Gegenüberstellung der äußeren Genauigkeit aus Faktorkombination zeigt einen nahezu deckungsgleichen Verlauf der Ergebnisse im Real- und Modellmaßstab.

Außerdem kann erkannt werden, dass der Einfluss der Georeferenzierung im Realmaßstab zu ausgeprägteren Unterschieden führt als bei der modellhaften Anordnung. Die durch die verschiedenen Passpunktanordnungen hervorgerufenen Differenzen zwischen unmittelbar benachbar-

ten Datensätzen sind im Realmaßstab wesentlich größer, bzw. werden diese durch die gewählte Skalierung auch deutlicher sichtbar.

### 9.2.2 Innere Genauigkeit

Die sehr ähnlichen Ergebnisse der äußeren Genauigkeit zeigen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die ähnlichen Effekte der inneren Genauigkeit als Begründung. Zur Prüfung dieser Aussage werden im Folgenden die Ergebnisse der inneren Genauigkeit für die Faktorkombination vergleichend analysiert.

#### Rückprojektionsfehler

Die Gegenüberstellung der nach dem Bundle Adjustment verbleibenden Rückprojektionsfehler zeigt geringfügig größere Fehler im Modellmaßstab (rote Linie in Abb. 9.7), wobei auch hier die Fehler im üblichen und erwartbaren Bereich von rund 0,5 bis 1,1 Pixel liegen. Aus der vergleichenden Betrachtung der beiden Kurven kann auch eindeutig ein Einfluss der zu Grunde liegenden Aufnahmeanordnung erkannt werden. Beide Kurven zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf und Blöcke ähnlicher Aufnahmeanordnung können eindeutig ausgemacht werden.

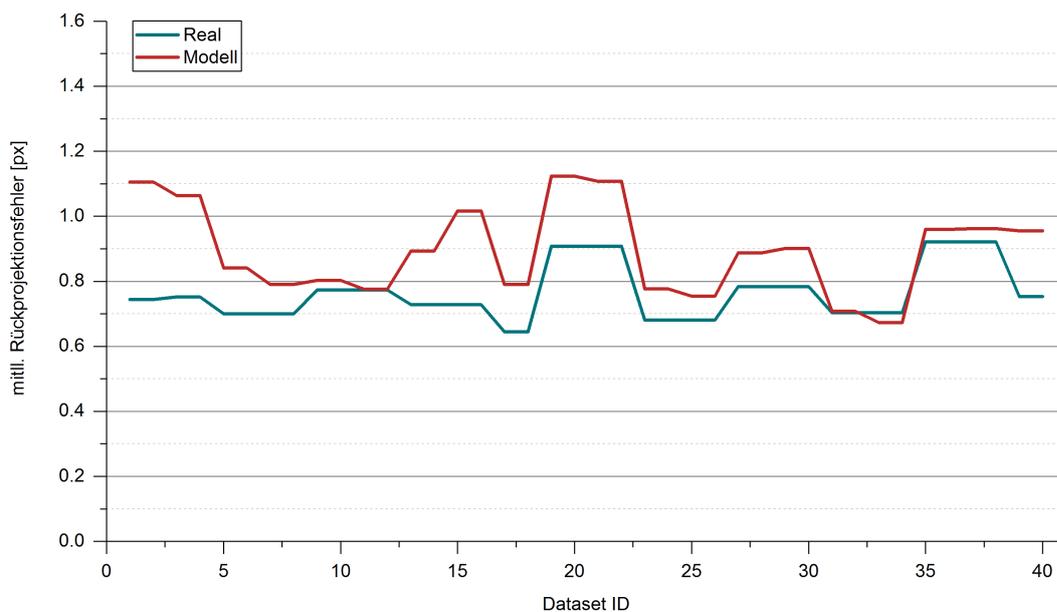


Abb. 9.7 – Die Gegenüberstellung der Rückprojektionsfehler aus Faktorkombination lässt in beiden Betrachtungsmaßstäben einen gleichartigen Zusammenhang mit der Aufnahmeanordnung erkennen. Rückschlüsse auf die äußere Genauigkeit sind allerdings nicht möglich.

Insgesamt erscheinen die mittleren Rückprojektionsfehler allerdings nicht zur marktscheiderischen Beurteilung der Ergebnisse geeignet. Nur auf Basis der Rückprojektionen ist eine Abschätzung der äußeren Genauigkeit nicht möglich und aus anwendungsorientierter Sicht ist der systematische Verlauf der dargestellten Kurven wohl nur von untergeordneter Bedeutung.

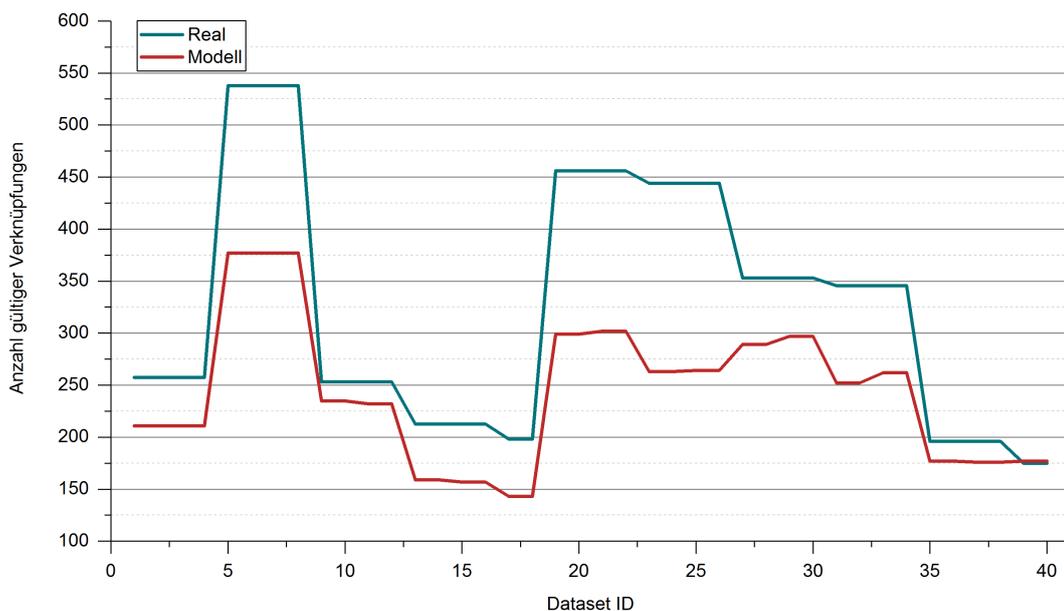
#### Epipolargeometrie

Ähnlich wie bei den Einzelfaktoren zeigte auch anhand der Faktorkombination die mittlere Anzahl an gültigen Verknüpfungen zwischen Bildern eines Bildverbands einen umgekehrten Zusammenhang mit den erreichten äußeren Genauigkeiten (siehe hierzu Abschnitt 7.4.2 und 8.3.2).

Diese Tatsache ist für beide Betrachtungsmaßstäbe gültig und entsprechend wurde in der Gegenüberstellung in Abb. 9.8 auf eine zusätzliche Darstellung der äußeren Genauigkeit verzichtet und der Fokus auf den Vergleich der beiden Versuchsmaßstäbe gerichtet.

Der markanteste Unterschied ist, dass im Realmaßstab eine deutlich höhere Anzahl an Verknüpfungspunkten vorliegt (siehe türkise Linie in Abb. 9.8). Dies trifft auf alle 40 untersuchten Datensätze zu und die Differenzen betragen zwischen 50 und 200. Unter Berücksichtigung des schon mehrmals diskutierten Zusammenhangs mit der äußeren Genauigkeit und unter Bezugnahme auf Abb. 9.6 könnte dies eine möglich Begründung für den in Abschnitt 9.2.1 erkannten Faktor von 2,5 sein. In allen bisherigen Ergebnissen war die Anzahl der gültigen Verknüpfungen umgekehrt proportional zur erreichten äußeren Genauigkeit und auch anhand der Gegenüberstellung der beiden Analysemaßstäbe wird dieser Effekt wieder deutlich. Auch wenn die Ursache für die in Abschnitt 9.2.1 präsentierten Genauigkeitsunterschiede mit hoher Wahrscheinlichkeit im nicht skalierten Aufnahmesystem zu suchen ist, erscheint die Auswirkung anhand der Ergebnisse der inneren Genauigkeit durchaus plausibel.

Wird Abb. 9.8 als Ganzes betrachtet, muss aber auf jeden Fall auch der sehr ähnliche Verlauf der beiden Kurven hervorgehoben werden. Relativ zu den Datensätzen des selben Betrachtungsmaßstabs reagiert die mittlere Verknüpfungspunkanzahl sowohl im Modell- als auch im Realmaßstab nahezu ident, und die unmittelbare Auswirkung der geometrischen Aufnahmeanordnung auf die Ergebnisse der SfM-Prozessierung wird einmal mehr bestätigt.

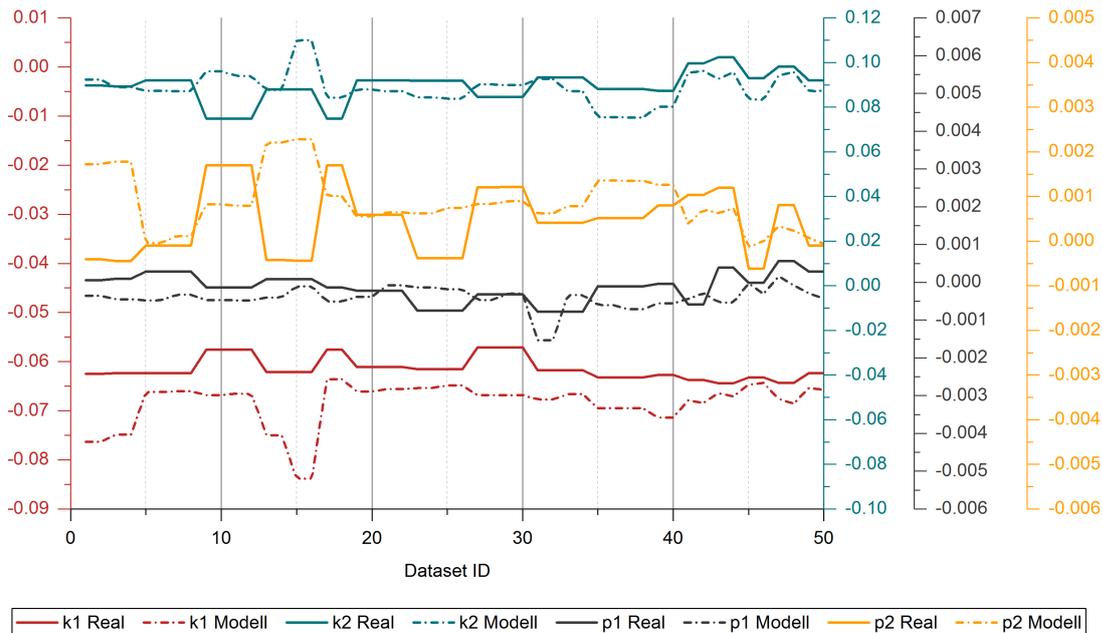


**Abb. 9.8 – Die höhere Anzahl an gültigen Verknüpfungen im Realmaßstab deckt sich mit der in Abb. 9.6 erkannten höheren Genauigkeit.**

Trotzdem müssen auch hier die getroffenen Aussagen mit Vorsicht behandelt und noch tiefgreifender durchdacht werden. Eine mathematisch stabile Beziehung zwischen der Verknüpfungspunkanzahl und einer erreichten metrischen Genauigkeit kann nicht erkannt werden. Alle Aussagen basieren rein auf relativen Gegenüberstellungen und deuten mögliche Tendenzen an. So ist z.B die Anzahl gültiger Matches bei den Datensätzen 6 bis 8 deutlich größer als bei 18 bis 33, die erreichte äußere Genauigkeit ist allerdings bei den letztgenannten hohen Flügen und der gemeinsamen Auswertung verschiedener Blickrichtungen in beiden Versuchsmaßstäben am höchsten.

### Simultankalibrierung

Anhand der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Einzelfaktoren konnte gezeigt werden, dass die Koeffizienten des optimierten Verzeichnungsmodells nahezu maßstabsunabhängig sind. Wie in Abb. 9.9 erkannt werden kann, trifft dies auf die Ergebnisse aus der Faktorkombination nicht bzw. nur bedingt zu. Die Abweichungen sind vor allem für  $k_1$  und  $p_2$  sehr groß, doch auch bei den anderen beiden Parametern ist die vermeintliche Ähnlichkeit hauptsächlich dem Darstellungsmaßstab von Abb. 9.9 geschuldet.



**Abb. 9.9** – Die Gegenüberstellung der Verzeichnungsparameter zeigt, dass sowohl die tangentialen als auch die radialen Koeffizienten weitestgehend unterschiedlich sind, und die Maßstabsunabhängigkeit anhand der Faktorkombination nicht nachgewiesen werden konnte.

Aufgrund des unterschiedlichen Aufnahmemaßstabs und den damit verbundenen notwendigen Anpassungen der Fokus- und Blendeneinstellungen trifft dies notwendigerweise auch auf die “klassischen“ geometrischen Parameter der inneren Orientierung (Brennweite, Hauptpunktlage) zu, weshalb an dieser Stelle auf eine grafische Gegenüberstellung verzichtet wurde. Während die geschätzten Brennweiten im Realmaßstab zwischen 4034 und 4067 Pixel betragen (siehe Abschnitt 7.4.2), belaufen sich die Brennweiten im Modellmaßstab auf 4049 bis zu 4368 Pixel. Auch die ermittelte Hauptpunktlage zeigt keine Gemeinsamkeit, bzw. eine maßstabsabhängige Abhängigkeit von der Aufnahmeanordnung. Die Schätzung der Parameter der inneren Orientierung wird zwar von der geometrischen Aufnahmeanordnung beeinflusst, die Art und Weise muss jedoch, zumindest im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen, im Real- und Modellmaßstab als gänzlich unterschiedlich bezeichnet werden.

# Kapitel 10

## Diskussion der Ergebnisse

Das vordergründige Ziel der vorliegenden Arbeit ist die robuste Identifizierung und Quantifizierung genauigkeitsrelevanter Einflussparameter bei der UAV-gestützten Vermessung und der Bildauswertung unter Verwendung von Structure from Motion. Als Ergebnis wird eine Beschreibung des absoluten Punktlagefehlers der rekonstruierten 3D-Punkte in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern der Bildaufnahme angestrebt, weshalb neben einer fundierten Literaturanalyse vor allem auch praktische Untersuchungen im Real- und Modellmaßstab den Kern der Arbeit bilden.

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargelegten Ergebnisse zeigen auf qualitative und teils auch bereits quantitative Weise, dass die geometrische Aufnahmeanordnung neben der Güte und Stabilität des Aufnahmesystems (nicht Teil der Untersuchungen) mit Sicherheit den stärksten Einfluss auf die erreichte dreidimensionale Rekonstruktionsgenauigkeit besitzt, weshalb diese im Folgenden einerseits unter theoretischen und praktischen Gesichtspunkten diskutiert und vor allem auch statistisch analysiert werden sollen, um die erkannten Effekte nochmals zu untermauern und zu belegen.

### 10.1 Güte der Eingangsparameter

Eines der Ziele der vorliegenden Dissertation ist eine Handlungsempfehlung für potentielle Anwender zu bieten, und vor diesem Hintergrund ist es naturgemäß auch von großer Bedeutung, dass die ausgesprochene Empfehlung auch praktisch umsetzbar ist. In diesem Kontext wurden in den Kapiteln 7 und 8 auch Analysen zur Güte der Eingangsparameter präsentiert und es konnte gezeigt werden, dass von einer planmäßig Durchführung der Versuche ausgegangen werden kann. Die abgeleiteten Ergebnisse und etwaig erkannte Effekte sind somit aus dieser Sicht jedenfalls als belastbar anzusehen und die Faktorstufen konnten mit ausreichender Genauigkeit eingehalten werden.

Werden die Untersuchungen aus einer stärker praktischen Perspektive betrachtet so muss angemerkt werden, dass die Untersuchungsobjekte aus Gründen einer reproduzierbaren Versuchsdurchführung und einer eindeutigen Faktorsteuerung nicht zu hundert Prozent mit realen Anwendungsfällen verglichen werden können und topographisch zumeist komplexer sind, als die weitestgehend flachen Versuchsgebiete. Während dies bei der prozentual angegebenen Bildüberlappung von untergeordneter Bedeutung ist, kommt dem Geländere relief bei den Parametern Flughöhe und Blickwinkel natürlich eine wesentlich größere Bedeutung zu. Typische Tagbauumgebungen entsprechen einer etagenhaft wechselnden Abfolge von steil stehenden und horizontalen Flächen und insbesondere bei den in Österreich üblichen Abtragungen bzw. Aushebungen ist neben den lateralen Dimensionen vor allem auch die Vertikalerstreckung ein nicht zu ver-

nachlässigender Faktor. Werden größere Gebiete bzw. mehrere Etagen überflogen ergeben sich bei weitestgehend konstanter Flughöhe Unterschiede im Objektabstand die sehr schnell mehrere Zehnermeter erreichen können. Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Flughöhe bzw. der Objektabstand einen der stärksten Einflussfaktoren auf die erreichbare Genauigkeit darstellt und entsprechend für Tagbauumgebungen die üblichen ebenen Rasterflüge mit konstanter Flughöhe nicht zu einer gleichmäßigen Genauigkeit der Rekonstruktionsergebnisse führen können.

Wie bereits in Abschnitt 4.1.1 gezeigt und durch die Ergebnisse der verschiedenen Versuchspläne nochmals verdeutlicht, kommt auch der Orientierung der Aufnahmeachse relativ zum Objekt bzw. zur Objektoberfläche große Bedeutung zu. Aufgrund der weitestgehend flachen Topographie der Untersuchungsgebiete (vgl. Kapitel 5 und 6) war es möglich diesen Einfluss im Detail zu studieren bzw. die gewählten Faktorstufen auch im gesamten Gebiet konstant zu halten. Die Etagenstruktur eines Tagbaus hingegen führt, bei konstant gehaltener Aufnahmeachse, zu ständig wechselnden Schnittgeometrien der Bildstrahlen, weshalb auch dieser Parameter in der praktischen Flugplanung nur schwer in einer bestimmten Stellung fixierbar ist. Wie der Ergebnisse der Vorversuche und auch der Versuchspläne zeigen, lässt die Kamerasteuerung diese Flexibilität auf jeden Fall zu, und die Regelungsgenauigkeit ist hier mehr als ausreichend.

Zusammenfassend muss jedoch dem Geländelief größere Bedeutung beigemessen werden als der Fluglageregelung bzw. Positionsbestimmung und Kamerasteuerung des Flugsystems. Zwar sind genaue GNSS Positionen (RTK-GNSS) mit Sicherheit vorteilhaft und beeinflussen vor allem auch den Flug und die Bildqualität positiv, in Relation zu den typischen topologischen Bedingungen sind die Ungenauigkeiten in den Positionsdaten des Flugsystems jedoch eher von untergeordnetem Einfluss. Vielmehr wird eine an das Gelände angepasste Flugplanung empfohlen, wobei vor allem die detaillierten Ergebnisse, Auswertungen und Verknüpfungen der vorliegenden Arbeit eine Grundlage bieten.

## 10.2 Statistische Interpretation

Nachdem in den Ergebniskapiteln 7, 8 und 9 die Einflüsse der verschiedenen Faktoren weitestgehend qualitativ und anhand von Abbildungen bzw. Box-Plot-Diagrammen erfolgt ist, sollen die Daten an dieser Stelle noch einmal einer näheren statistischen Betrachtung unterzogen werden. Die statistische Versuchsplanung bzw. die daraus resultierende Versuchsanordnung lässt neben der qualitativen Beurteilung der Ergebnisse auch quantitativ statistische Analysen zu. Die systematische Herangehensweise bei der Versuchsplanung und Durchführung ermöglichen es signifikante Einflussparameter zu identifizieren und zumindest ein stochastisches Beschreibungsmodell zu formulieren. Die mathematische Grundlage hierzu bildet die Varianzanalyse (analysis of variance, kurz ANOVA). Die Varianz einer oder mehrerer Zielvariablen wird dabei durch den Einfluss einer oder mehrerer Einflussvariablen (Faktoren) erklärt. Es wird sozusagen versucht Ursache und Wirkung stochastisch mit einander in Relation zu setzen und auf Basis der unterschiedlich starken Beiträge (Effekte) können mittels schrittweiser Faktorelimination die signifikanten Einflussgrößen gefunden werden.

Voraussetzung für eine entsprechende Analyse und mathematische Stabilität ist neben dem geeigneten Versuchsdesign - im vorliegenden Fall kam ein Vollfaktorplan zum Einsatz - vor allem auch die exakte und insbesondere vollständige Abarbeitung des Plans. Vor diesem Hintergrund kann die beschriebene Analyse nur anhand der Einzelfaktoren im Modellmaßstab erfolgen. Den Versuchen zur Faktorkombination lag eine andere Überlegung zu Grunde, weshalb auch die Grundsätze der statistischen Versuchsplanung nicht eingehalten wurden, und im Realmaßstab steht die nicht vollständige Durchführung der geplanten Versuche einer statistisch belastbaren

Analyse entgegen. Vor allem da ausgewählte Faktorstellungen nicht durchführbar waren ist das Versuchsfeld (vgl. Tab. 4.2) systematisch verändert bzw. nicht mehr orthogonal und die Analyse der Effekte ist nicht möglich.

Aufgrund der in Kapitel 9 gezeigten strukturellen Ähnlichkeit der Versuche im Modell- und Realmaßstab erscheint es allerdings als nicht zu ambitioniert die modellhaften Untersuchungen heranzuziehen, und auf Basis derer die statistische Beurteilung und quantifizierte Faktorenidentifikation durchzuführen. Ohne zu sehr auf die theoretischen Grundlagen einzugehen soll anhand der in Tab. 10.1 dargestellten ANOVA-Tabelle für den Modellmaßstab die Vorgehensweise bei der schrittweisen Faktorelimination bzw. -Identifikation beschrieben werden, bzw. soll im Folgenden auch die inhaltliche Interpretation der Ergebnisse erfolgen.

In der ersten Spalte von Tab. 10.1 stehen die untersuchten Faktoren (A, B, C, D, E, vgl. Abschnitt 4.1.2) bzw. deren Wechselwirkungen. Auf Basis der Mittelwerte bei verschiedenen Faktorstufen und der vorhandenen Freiheitsgrade (Anzahl der Faktorstufen minus 1) werden die sogenannten "Sum of Mean Squares Between Groups (SSB)" bzw. die "Mean Squares (MS)" ermittelt. SSB repräsentiert die Abweichung zwischen den Gruppen bzw. Faktorstufen und wird als mittlere quadratische Abweichung des Gruppenmittelwerts vom Gesamtmittelwert errechnet. Die zur endgültigen Bewertung verwendeten MS ergeben sich durch Division der SSB durch die zur Lieferung dieses Beitrags benötigten Freiheitsgrade, weshalb im vorliegenden Fall mit jeweils 2 Stufen und einem entsprechenden Freiheitsgrad von 1, SSB und MS immer zum selben Ergebnis führen. In weiterer Folge werden die beschriebenen Werte zur Ermittlung der Testvariable  $F$  herangezogen, wobei  $F$  gemäß der nachstehenden Gl. 10.1 berechnet wird, und als Verhältnis zwischen dem Einfluss eines Faktors zu dem in der Versuchsreihe aufgetretenen Fehler definiert ist. (Montgomery, 2013; Siebertz et al., 2010)

$$F = \frac{MS(Faktor)}{MS(Error)} \quad (10.1)$$

Die Faktorenauswahl erfolgt auf Basis der aus der F-Verteilung abgeleiteten Wahrscheinlichkeit  $p$  einen Fehler erster Art zu begehen. D.h.: Die Nullhypothese  $H_0$  wird abgelehnt, obwohl das Gegenteil der Fall ist. Im vorliegenden Fall besagt  $H_0$ , dass der Faktor keinen Einfluss auf das untersuchte Ergebnis hat, und  $p$  repräsentiert somit die Wahrscheinlichkeit einem Faktor einen Einfluss zuzusprechen obwohl dieser keinen hat. Abhängig vom festgesetzten  $\alpha$ -Risiko werden anschließend nacheinander die Faktoren eliminiert, wobei das gewählte Risiko-Niveau sich natürlich stark auf die Ergebnisse auswirkt. Anhand der "Blöcke" in Tab. 10.1 wird dies in besonderer Weise deutlich, und es ist augenscheinlich, dass mit sinkender Fehlerwahrscheinlichkeit die Anzahl der als signifikant betrachteten Faktoren deutlich abnimmt.

Ebenfalls wichtig für die Beurteilung der Ergebnisse ist der Anteil des Fehlers an der Gesamtvariabilität bzw. die "Sum of Squares Within Groups (SSW)", der in Tab. 10.1 als "% Total" in der letzten Zeile dargestellt ist. Aufgrund der Tatsache, dass alle Versuche zumindest zweimal durchgeführt wurden, kann diese Größe bestimmt werden und es kann vor allem auch deutlich der Anstieg mit fortschreitender Faktorelimination - besonders nach Elimination des Faktors "BLOCK", der indirekt die Versuchswiederholung widerspiegelt - erkannt werden. Der angesprochene "Fehleranteil" bietet insbesondere auch eine gute Möglichkeit zur Beurteilung des gewählten  $\alpha$ -Risikos. So zeigt Tab. 10.1 z.B. deutlich, dass bei einem Risikoniveau von einem Prozent der Fehler 58,07 % beträgt was tendenziell auf eine zu rigorose Elimination von Faktoren hindeutet und somit impliziert, dass das untersuchte Phänomen durch die gewählten Faktoren nicht mehr in ausreichendem Maße beschrieben werden kann.

Tab. 10.1 – ANOVA-Tabelle im Modellmaßstab, nach (Tscharf et al., 2019b)

Faktor	DF	SSB	MS	F	p	DF	SSB	F	p	DF	SSB	F	p	DF	SSB	F	p	DF	SSB	F	p
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
BLOCK	1	53.34	53.34	1.57	0.143	1	53.34	2.43	0.076												
A	1	408.71	408.71	12.05	0.001	1	408.71	18.60	0.000	1	408.71	17.69	0.000	1	408.71	13.53	0.000	1	408.71	12.05	0.001
B	1	182.45	182.45	5.38	0.013	1	182.45	8.30	0.003	1	182.45	7.90	0.003	1	182.45	6.04	0.009	1	182.45	5.38	0.013
C	1	139.93	139.93	4.13	0.026	1	139.93	6.37	0.007	1	139.93	6.06	0.009	1	139.93	4.13	0.026	1	139.93	4.13	0.026
D	1	190.69	190.69	5.62	0.012	1	190.69	8.68	0.002	1	190.69	8.26	0.003	1	190.69	6.31	0.007	1	190.69	5.62	0.012
E	1	3.74	3.74	0.11	1.126																
AB	1	18.94	18.94	0.56	0.398																
AC	1	37.05	37.05	1.09	0.218																
AD	1	504.48	504.48	14.88	0.000	1	504.48	22.96	0.000	1	504.48	21.84	0.000	1	504.48	16.71	0.000	1	504.48	14.88	0.000
AE	1	0.58	0.58	0.02	3.000																
BC	1	157.22	157.22	4.64	0.020	1	157.22	7.16	0.005	1	157.22	6.81	0.006	1	157.22	4.64	0.020	1	157.22	4.64	0.020
BD	1	12.49	12.49	0.37	0.540																
BE	1	0.46	0.46	0.01	3.373																
CD	1	0.70	0.70	0.02	2.727																
CE	1	0.93	0.93	0.03	2.358																
DE	1	0.36	0.36	0.01	3.799																
ABC	1	32.06	32.06	0.95	0.252																
ABD	1	52.60	52.60	1.55	0.145	1	52.60	2.39	0.078												
ABE	1	0.47	0.47	0.01	3.335																
ACD	1	93.57	93.57	2.76	0.061	1	93.57	4.26	0.024	1	93.57	4.05	0.027								
ACE	1	0.66	0.66	0.02	2.808																
ADE	1	0.41	0.41	0.01	3.566																
BCD	1	2.16	2.16	0.06	1.516																
BCE	1	0.54	0.54	0.02	3.106																
BDE	1	0.27	0.27	0.01	4.379																
CDE	1	0.04	0.04	0.00	11.818																
ABCD	1	120.52	120.52	3.55	0.037	1	120.52	5.49	0.012	1	120.52	5.22	0.014	1	120.52	3.55	0.037	1	120.52	3.55	0.037
ABCE	1	0.24	0.24	0.01	4.680																
ABDE	1	0.01	0.01	0.00	29.265																
ACDE	1	0.54	0.54	0.02	3.099																
BCDE	1	0.00	0.00	0.00	147.156																
ABCDE	1	0.43	0.43	0.01	3.507																
Error	31	1051.35	33.91			53	1164.43			55	1270.38			59	1781.62			56	1363.95		
Total	63	3067.94				63	3067.94			63	3067.94			63	3067.94				3067.94		
% Total		34.27%					37.95%				41.41%				58.07%				44.46%		
																					$\alpha = 0.04$
																					$\alpha = 0.01$
																					$\alpha = 0.05$

Neben der grundlegenden Systematik und Vorgehensweise können Tab. 10.1 allerdings auch die konkreten Ergebnisse der äußeren Genauigkeit bei der vorhandenen Datenlage im Modellmaßstab entnommen werden. Dabei zeigen sich erwartbare Zusammenhänge, die wie im Kontext der Varianzanalyse üblich getrennt nach Haupt- und Wechselwirkungseffekten präsentiert werden.

### 10.2.1 Haupteffekte

Die Wirkung eines Faktors auf die Ergebnisgröße, bzw. generell das System, wird durch den sogenannten Effekt beschrieben. Ist der untersuchte Faktor Teil des zu Grunde liegenden Versuchsplans, so wird auch oft vom “Haupteffekt“ gesprochen. Im vorliegenden Fall kommen entsprechend die Faktoren Flughöhe (A), Überlapp longitudinal (B), Überlapp lateral (C), Orientierung der Aufnahmeachse relativ zum Objekt (D) und Passpunktconfiguration zur Georegistrierung (E) in Frage, wobei diese Gruppe aufgrund der Versuchswiederholung und Blockbildung noch um den Faktor “Block“ erweitert wird. (Siebertz et al., 2010)

Die Ergebnisse in Tab. 10.1 geben hier ein klares Bild wieder, und ermöglichen aufgrund der verschiedenen dargestellten Risikoniveaus auch eine tiefere inhaltliche Interpretation bzw. Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse. Unabhängig vom gewählten Risiko zum Fehler erster Art wird den Faktoren Flughöhe und Blickwinkel immer ein signifikanter Einfluss auf die dargestellte äußere Genauigkeit zugestanden. Dies konnte auch anhand der Abbildungen in den Kapiteln 7 und 8 bereits deutlich erkannt werden und war insbesondere bei der Flughöhe auch in dieser Form zu erwarten.

Das selbe trifft auch auf die Bildüberlappung zwischen den Flugbahnen zu, die ebenfalls bereits anhand der Box-Plot Diagramme in Kapitel 8 stärkere Wirkung auf die Ergebnisse gezeigt hat als der Überlapp in longitudinaler Richtung. Wird das Risikoniveau nämlich mit 1 % gewählt, scheidet die Überlappung innerhalb der Flugbahn aus der Liste der signifikanten Parameter aus. In diesem Fall sei jedoch auch auf den zuvor diskutierten Fehleranteil (% Total) verwiesen, der mit 58,07 % überproportional hoch ausfällt.

Zumindest in der untersuchten Form kann die Passpunktconfiguration als nicht ausreichend genauigkeitswirksam nachgewiesen werden. Mit einem SSB von 3,74 (siehe Spalte 2 in Tab. 10.1) kann kein signifikanter Unterschied zwischen Konfiguration 1 und 2 erkannt werden, wobei hier angemerkt werden muss, dass beide untersuchten Konfigurationen mit Sachverstand gewählt wurden (Tscharf et al., 2018) und somit lediglich eine geringfügige Variation innerhalb der Georegistrierung studiert wurde.

Eine gesonderte Betrachtung ist hinsichtlich des zusätzlichen Faktors “BLOCK“ notwendig. Bei einem  $\alpha$ -Niveau von 10 % wird den nicht kontrollierbaren und unter “BLOCK“ zusammengefassten Einflussgrößen noch knapp ein signifikanter Einfluss zugestanden, wobei ab einem Niveau von  $\alpha = 5\%$  die Versuchswiederholung nicht mehr als relevant betrachtet wird. Wird diese Tatasche etwas detaillierter analysiert, kann auch relativ rasch eine Erklärung für den verhältnismäßig starken Einfluss der nicht kontrollierbaren Faktoren gefunden werden. Zur Durchführbarkeit der Varianzanalyse mussten alle Datensätze in die Betrachtung einbezogen werden, und es war somit nicht möglich die beiden in Kapitel 8 von den Analysen ausgeschlossenen Datensätze 55 und 64 auszuklammern. Der Umstand, dass diese beiden (erklärbaren) Negativausreißer beide aus dem Aufnahmeblock 1 stammen, gibt dem Faktor in der gegenständlichen statistischen Analyse ein überproportional hohes Gewicht, was wiederum zu der erkennbar niedrigen Wahrscheinlichkeit  $p$  im Rahmen der ANOVA führt

Dies führt somit generell zur Festsetzung des gewünschten Fehlerniveaus, woraus sich am Ende auch die endgültige Liste der relevanten Einflussfaktoren ableiten lässt. Wie bereits erwähnt ist der erste Kennwert für die Güte der Elimination der Schätzfehler (% Total). Es fällt auf, dass dieser Wert bei einem  $\alpha$ -Niveau von 1 % mit fast 60 % deutlich zu hoch ausfällt und außerdem

ist die nur aus drei Hauptfaktoren bestehende Parameterliste auch aus theoretischer Sicht nicht wirklich als sinnvoll zu betrachten. Der geringste Schätzfehler kann bei einem  $\alpha$ -Risiko von 10 % erkannt werden. Allerdings umfasst das Modell hier noch den Faktor "BLOCK", der vor allem unter den kontrollierten Bedingungen des Modellmaßstabs als nicht signifikant zu beurteilen ist. Wird die Faktorelimination auf Basis des Schätzfehlers gemeinsam mit einer sachkundigen Plausibilitätsprüfung durchgeführt so ergibt sich das in den Spalten 21 bis 25 erkennbare Bild. Nach Faktorelimination mit Fehlerniveau 4 % verbleiben Flughöhe, Bildüberlappung in beiden Richtungen und Blickwinkel als signifikante Haupteffekte übrig. Dies deckt sich vor allem auch mit den Erkenntnissen, die bereits aus den grafischen Repräsentationen in den vorigen Kapiteln abgeleitet werden konnten und erscheint überdies auch aus theoretischer Sicht plausibel.

Nichtsdestotrotz kann an dieser Stelle eine Anmerkung zum oftmals angesprochenen Schätzfehler bzw. "% Total" nicht entfallen. Auch wenn alle Faktoren und Wechselwirkungen im Modell belassen werden, ergibt sich der Fehler zu 34,27 %. Unter "normalen" Bedingungen würde die gesamte Versuchsreihe wahrscheinlich wiederholt werden, im vorliegenden Fall allerdings wurde die hohe Variabilität der Daten auch schon anhand der grafischen Ergebnisdarstellungen in Kapitel 8 ersichtlich, und liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an dem im Rahmen der Versuchsreihe nicht näher untersuchten Aufnahmesystem. Einerseits ist die Kamera die einzige Komponente, die beim Übergang vom real- zum Modellmaßstab nicht im Maßstab 1:100 skaliert wurde, und andererseits war es zur Gewährleistung der Versuchsdurchführung und zur Erzeugung scharfer Bilder auch notwendig die Parameter des Aufnahmesystems mit den geometrischen Parametern der Bildaufnahme anzupassen. Die Versuchsreihe im Modellmaßstab ist somit gewissermaßen von Einflüssen des Aufnahmesystems "verfälscht" und darf nur relational, allerdings nicht in absoluten Werten interpretiert werden.

### 10.2.2 Wechselwirkungseffekte

Die Haupteffekte bezeichnen die mittlere Veränderung der Ergebnisgröße in Folge der Stufenvariation. Es ist aber natürlich nicht ausgeschlossen, dass hierbei auch eine Abhängigkeit vom Ausgangszustand besteht, bzw. ist dies in der Praxis sehr häufig der Fall. Hängt der Effekt eines Faktors von der Stellung eines anderen Faktors ab, so nennt man dies Wechselwirkung bzw. Wechselwirkungseffekt. (Siebertz et al., 2010)

Auch im gegenständlichen Fall der geometrischen Parameter der photogrammetrischen Bildaufnahme auf die äußere Genauigkeit von Structure from Motion sind derartige Wechselwirkungen sehr wahrscheinlich bzw. gibt Tab. 10.1 den entsprechenden Beleg. Bei dem anhand der Hauptfaktoren definierten  $\alpha$ -Niveau von 4 % verbleiben die Wechselwirkungen zwischen Flughöhe und Blickrichtung, zwischen lateralem und longitudinalem Überlapp, sowie auch zwischen allen 4 Hauptfaktoren als signifikant. Abgesehen von der inhaltlichen Plausibilität, dass ein Zusammenhang zwischen Flughöhe und Orientierung der Aufnahmeachse besteht sind mit der in Tab. 10.1 ersichtlichen Liste auch die statistischen Forderungen erfüllt: Es dürfen grundsätzlich nur jene Wechselwirkungen im Modell verbleiben, deren zugehörige Hauptfaktoren auch als signifikant betrachtet werden. Eine Wechselwirkung zwischen Flughöhe und Georeferenzierung wäre somit nicht zulässig, da die Passpunktkonfiguration im vorliegenden Fall, ja als nicht signifikant beurteilt wurde.

Werden die beschriebenen Wechselwirkungen aus einer inhaltlichen Perspektive betrachtet, ist eine Korrelation zwischen Flughöhe und Blickwinkel offensichtlich logisch. Während der Aufnahmeabstand die bestimmende Größe für Genauigkeit und Auflösung darstellt, ist die Orientierung des Aufnahmesystems hauptbestimmend für vorhandene bzw. vermiedene Abschattungen. Die Wechselwirkung zwischen den beiden Größen lässt sich wiederum an einfachen Beispiel erklären: Beflogen werden soll ein weitestgehend flaches Gebiet in dessen Zentrum sich ein rund 20 m

hoher Schüttguthaufen befindet. Wird die Kamera nun aus der vertikalen geneigt, werden die mitunter steilen Flanken des Haufens deutlicher erfasst als dies bei Nadiraufnahmen der Fall wäre. Abhängig von der gewählten Flughöhe allerdings kann der Effekt entstehen, dass sich hinter dem Haufen ein großer abgeschatteter Bereich zeigt (geringe Flughöhe), bzw. kann bei größer gewählter Flughöhe auch über den Haufen hinweggeblickt werden, was allerdings wieder mit geringere Detailgrad in den der Kamera zugewandten Flanken einhergeht.

Bei den Überlappungen innerhalb und zwischen den Flugbahnen ist die Wechselwirkung wohl hauptsächlich auf eine stärkere Verknüpfung des Bildverbands zurückzuführen. Ist der Überlapp in beiden Richtungen gering, so ist der gesamte Bildverband instabil. Ist er jedoch in beiden Fällen hoch, besteht eine positiv verstärkende Wechselwirkung auf die gesamte Rekonstruktion. Insgesamt sind die als statistisch signifikant erkannten Faktoren und Wechselwirkungen durchaus im Einklang mit der herrschenden Lehrmeinung, bzw. mit den in Kapitel 2 und 3 dargelegten theoretischen Grundlagen. Obwohl bis zu diesem Punkt noch keine Aussage über die Art und Weise bzw. Wirkrichtung (z.B positiver Einfluss steigender Flughöhe) des Einflusses getroffen werden kann, sondern lediglich die Relevanz der genannten Parameter statistisch nachgewiesen wurde, können die Ergebnisse eine wertvolle Basis für eine weitere Modellbildung liefern.

Ganz grundsätzlich wäre die Varianzanalyse zwar auch in der Lage Aussagen in diese Richtung zu ermöglichen, allerdings kann dem vorliegenden zweistufigen Versuchsplan nur ein lineares Beschreibungsmodell zu Grunde gelegt werden, das mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht ausreichend zutreffend wäre. Diese Tatsache konnte schon anhand der Vorversuche in Abschnitt 4.1.1 gezeigt werden und stochastische Lösung für ein physikalisch offensichtlich anderes Problem wird als nicht sinnvoll erachtet.

## 10.3 Inhaltliche Interpretation

Neben der rein mathematisch statistischen Analyse der durchgeführten Versuchsreihen und der empirischen Beurteilung der Ergebnisse, soll auch der inhaltlichen Interpretation und der Diskussion möglicher Ursachen und Begründungen ausreichend Raum gegeben werden. Ergänzend zum bloßen Aufzeigen erkannter Effekte sollen deren Ursachen analysiert und aufgezeigt, und auf diese Weise zu einem besseren Verständnis von Structure from Motion für markenscheidende Anwendungen beigetragen werden. Dies soll an dieser Stelle zunächst individuell für die Faktoren des Versuchsplans erfolgen, während im nachfolgenden Abschnitt die Ergebnisse der Faktorkombination näher diskutiert werden. Aufgrund der in Kapitel 9 gezeigten Ähnlichkeit der Ergebnisse im Real- und Modellmaßstab - relevante Zusammenhänge konnten im jeweilig anderen Maßstab verifiziert werden - erfolgt die Interpretation subsummierend und für beide Untersuchungsmaßstäbe gültig.

Wie bereits erwähnt, und sowohl qualitativ als auch quantitativ gezeigt, erscheinen die erzielten Ergebnisse zunächst plausibel. Es wird allerdings auch sehr deutlich, dass die Auswertung mittels SfM nicht in jeglicher Hinsicht den bekannten photogrammetrischen Gesetzmäßigkeiten gehorcht, die Beurteilung der Genauigkeit einer gesonderten Betrachtung bedarf, und auch die bekannten Genauigkeitsmaße nicht direkt übertragen werden können.

### 10.3.1 Flughöhe (A)

Es war zu erwarten und ist auch aus theoretischer Sicht mehr als nur logisch, dass die Flughöhe bzw. der Aufnahmeabstand einen der wichtigsten Einflussparameter auf die erreichte äußere Genauigkeit darstellt, die Art und Weise bzw. die Wirkrichtung sind jedoch überraschend. Entgegen der theoretischen Überlegung, dass ein geringerer Abstand zu einem höheren Detailgrad der Bilder und entsprechend auch zu einer höheren äußeren Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion führt,

zeigen die vorliegenden Versuche genau das Gegenteil. Sowohl im Real- als auch im Modellmaßstab konnten die Referenzobjekte bei gleich bleibendem prozentuellem Überlapp mit deutlich höherer Genauigkeit rekonstruiert werden. Besonders deutlich wird dies aufgrund der zumeist gewählten Darstellungsform der Ergebnisse als Vielfaches der theoretischen Ground Sampling Distance. Die höheren Flüge sind sozusagen nicht so viel schlechter, wie sie es gemäß der GSD sein müssten, und die positive Wirkung des Aufnahmeabstands ergibt sich demnach nicht wie ursprünglich angenommen aus dem gesteigerten Detailgrad, sondern eben gerade umgekehrt proportional aufgrund anderer Gründe.

Unter der im Rahmen der Versuche herrschenden Annahme, dass das idente Untersuchungsgebiet aus verschiedenen Höhen bei gleichbleibender prozentueller Bildüberlappung erfasst werden soll, ist der markanteste Unterschied, dass aus größerer Höhe schlichtweg weniger Bilder benötigt werden um das selbe Gebiet zu erfassen. In geringer Höhe verfügt der Bildverband somit über eine wesentlich größere Anzahl an "instabilen Gelenken" was sich auch in der 3D-Rekonstruktion widerspiegelt. Je weniger Bilder, desto stabiler wird der gesamte Bildverband und die Unsicherheit in der Bildzuordnung nimmt ab. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten nicht detektierter Mismatches ist bei größerer Bildanzahl naturgemäß höher und die 3D-Rekonstruktion wird demnach genauer, wenn es gelingt das Objekt mit möglichst wenigen, stark überlappenden Bildern aufzunehmen. Obwohl der hohe Überlapp zwischen den Bildern deren Verknüpfung stabilisieren sollte, leidet der gesamte Bildverband wohl doch unter der insgesamt sehr großen Anzahl an Bildern und Verknüpfungen, die die Rekonstruktion "weich" machen und die Genauigkeit mindern. Die Tatsache, dass alle Bildmessungen und Triangulationen weitestgehend ohne Interaktion des Anwenders erfolgen und nicht auf Qualität und Richtigkeit überprüft werden, birgt Gefahren, die bei unüberlegter Anwendung unmittelbare Auswirkungen auf die Ergebnisse entfalten können.

Der diskutierte theoretische Ansatz wäre damit auch im Einklang mit dem klassisch photogrammetrischen Zugang das aufzunehmende Objekt mit möglichst wenig Bildern abzudecken (Kraus, 1994), was auch die Grundlage bestehender Netzplanungsansätze wie (Fraser, 1984) bildet. Während dies jedoch für die traditionelle Herangehensweise mit einer geringen Anzahl an hochgenauen Verknüpfungspunkten und a priori Kalibrierung photogrammetrischer Messkameras durchaus plausibel erscheint, erfordert die Übertragung auf moderne Auswerteroutinen mittels Structure from Motion eine weitere Analyse bzw. Begründung. Neben der automatischen Detektion und Korrespondenzanalyse natürlicher Features wird der Kern von SfM durch die Bündelblockausgleichung gebildet. Im Zuge dessen werden bekanntermaßen die Parameter der inneren Orientierung inklusive Verzeichnung, jene der äußeren Orientierung, sowie die Objektkoordinaten der triangulierten 3D-Punkte geschätzt, und auf Basis der in den Bildern messbaren Rückprojektionsfehler mittels robuster Kostenfunktionen optimiert. Im Gegensatz zur klassischen Photogrammetrie ist die Anzahl der zu bestimmenden Unbekannten bei SfM üblicherweise wesentlich größer und die bei UAV-Befliegungen unregelmäßigen Bildverbände erfordern somit eine signifikant größere Anzahl an Beobachtungsgleichungen bzw. Verknüpfungspunkten. Aus dieser Warte erscheint die Erfassung mit wenigen Bildern und damit einhergehend auch weniger Verknüpfungspunkten, trotz der damit verbundenen geringeren Anzahl an Unbekannten, wiederum eher unlogisch.

Die umfassenden durchgeführten Analysen und vor allem die Untersuchung der Ergebnisgrößen der inneren Genauigkeit ermöglichen jedoch einen tieferen Blick auf die Ergebnisse und eröffnen auf diese Weise auch neue Interpretationsmöglichkeiten und Ansätze (vgl. Kapitel 7, 8 und 9). Während weder die nach dem Bundle Adjustment verbliebenen Rückprojektionsfehler, noch die im Zuge der Simultankalibrierung geschätzten intrinsischen Kameraparameter einen erkennbaren Zusammenhang zu den geometrischen Parametern der Bildaufnahme zeigen, lieferte die Analyse der gültigen Epipolargeometrien eine nicht erwartete Erkenntnis. Die mittlere Anzahl an gültigen

Verknüpfungen zwischen den Bildern eines mittels SfM ausgewerteten Bildverbands zeigt ein robust gegenläufiges Verhalten zu den Ergebnissen der äußeren Genauigkeit. Je höher die Anzahl an Verknüpfungspunkten desto höher sind auch die erreichten Genauigkeiten bzw. desto geringer sind die gemessenen Fehler.

Dieser Zusammenhang wird insbesondere auch bei Betrachtung der verschiedenen Aufnahmeabstände deutlich und kann Licht in die zuvor besprochene Dunkelheit bringen. Obwohl aufgrund der geringeren Bildanzahl bei größerer Flughöhe weniger Bildmessungen zur Schätzung der Unbekannten zur Verfügung stehen, ist die Qualität der einzelnen Bildverknüpfung höher bzw. stabiler. Aus größeren Höhen kann eine größere Anzahl an richtigen und gültigen Feature Matches gefunden werden, die wiederum zu einer starrereren Verknüpfung innerhalb des gesamten Bildverbands führen. Dieser Umstand ist zu einem gewissen Teil auch der typischen Oberflächentextur eines Bergbaus geschuldet. Gesteinsoberflächen sind allein aufgrund der genetischen Entstehung und der kristallographischen Hintergründe in hohem Maße repetitiv und bei der Aufnahme vieler kleiner Ausschnitte ist die Wahrscheinlichkeit für Fehlzuordnungen sehr hoch und nach erfolgter Verifizierung der gefundenen Matches verbleibt nur eine geringe Anzahl zur Modellschätzung übrig. Können jedoch auch großräumige Inhomogenitäten zur Korrespondenzanalyse verwendet werden - wie es bei Aufnahmen aus größeren Höhen der Fall ist - können etwaige Mehrdeutigkeiten besser aufgelöst werden. Ohne an dieser Stelle zu weit vorzugreifen ist dies auch eine schlüssige Begründung für die höhere Genauigkeit bei der kombinierten Auswertung verschiedener Flughöhen. Die Überblicksaufnahmen sind in der Lage die Schwächen in der Verknüpfung der Nahaufnahmen auszugleichen und der Bildverband als Ganzes wird stabilisiert. (Luhmann, 2018b; Ruml et al., 2014)

Zusammenfassend ist der positive Einfluss der steigenden Flughöhe demnach zweifach: Einerseits umfasst der Bildverband weniger instabile Gelenke, und andererseits sind diese Gelenke aus größeren Höhen stabiler als bei der Aufnahme aus nächster Nähe.

### 10.3.2 Überlapp longitudinal und lateral (B & C)

Während in der klassischen Aerophotogrammetrie Längs- und Querüberdeckungen von rund 50 bis 60 % üblich sind, berichten viele Anwender der UAV-Vermessung von Bildüberlappungen in der Größenordnung von rund 70 % oder höher (Rosnell and Honkavaara, 2012). Auch die Ergebnisse der gegenständlichen Forschung zeigen klar den positiven Effekt einer stärkeren Bildüberlappung und insbesondere konnte auch gezeigt werden, dass Werte unter 70 % vermieden werden sollten, da eine erfolgreiche Auswertung in diesen Fällen oftmals nicht möglich war.

Aufgrund der Tatsache, dass - insbesondere bei der automatisierten SfM Auswertung - die Chance zum Auffinden einer ausreichenden Anzahl an gültigen Korrespondenzen mit der Größe des Überlappungsbereichs ansteigt, kann diese Tatsache durchaus als plausibel betrachtet werden. Bekanntermaßen können ja grundsätzlich ausschließlich überlappende Bereiche rekonstruiert werden und aufgrund der Instabilität der Aufnahmegeometrie und Anordnung erfordert Structure from Motion einen größeren Überlappungsbereich als nicht-automatisierte Routinen.

Wird die Bildüberlappung zu gering gewählt, kann es sein, dass zu wenige Korrespondenzen für ein stabile Lösung der Gleichungssysteme gefunden werden können. Insbesondere beim Vorhandensein einer größeren Anzahl von Ausreißern führt eine geringe Anzahl an Beobachtungspunkten zu numerischen Instabilitäten und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist nicht mehr gegeben. Auf diese Weise wird auch die große Versuchsstreuung gering überlappender Bildverbände erklärbar. Die schwache Stützung der Gleichungssysteme durch belastbare Beobachtungen erschwert das Finden eines absoluten Minimums und lässt unterschiedliche lokale Extrema zu. Ganz grundsätzlich stehen die dargestellten Überlegungen auch im Einklang mit der Tatsache, dass eine höhere Anzahl an Verknüpfungspunkten auch zu einer höheren äußeren Genauigkeit

der 3D-Rekonstruktion führt und kann auch anhand der Ergebnisse in den Kapiteln 7, 8 und 9 klar erkannt werden.

Neben der Anzahl der gefundenen Korrespondenzen zeigt die Bildüberlappung jedoch auch großen Einfluss auf die Qualität und Richtigkeit der Matches. Je geringer die gewählte Bildüberlappung, desto mehr nähert sich die Schnittgeometrie der Bildstrahlen dem bei einem Überlapp von rund 50% errichteten Idealfall eines Schnittwinkels von  $90^\circ$  an (Optimales Verhältnis von Aufnahmedistanz  $h$  zu Bildbasis  $b$ ), bzw. zeigt die Bildüberlappung allgemein starken Einfluss auf die räumliche Konfiguration der Strahlenschnitte (Kraus, 1994). Obwohl die geometrische Konfiguration bei geringeren Überlappungen zwar grundsätzlich besser ist, kann es zu Problemen beim Finden der Korrespondenzen kommen, da die Bildähnlichkeit bei zu großer Bildbasis nicht mehr in ausreichendem Maße gegeben ist. Wie (Zeisl et al., 2009) zeigen, nimmt die "Matching-Genauigkeit" des SIFT-Deskriptors (Lowe, 2004) ab einer Blickwinkeldifferenz von rund  $30^\circ$  stark ab und die gefundenen Korrespondenzen sind oftmals fehlerbehaftet bzw. im schlimmsten Fall Mismatches. Die auf diese Weise in die Auswertung eingebrachten Ausreißer werden bei der Schätzung der relativen Orientierung ("Camera Pose Estimation", bzw. Schätzung der Fundamentalmatrix  $\mathbf{F}$ ) üblicherweise mittels RANSAC (Fischler and Bolles, 1981) gefiltert um eine robuste Parameterschätzung zu ermöglichen. RANSAC weist allerdings eine starke "Zufälligkeitskomponente" auf, und lässt bei mehrmaliger Wiederholung unterschiedliche Ergebnisse zu. Gemäß Gl. 10.2 (Fischler and Bolles, 1981), wo  $p$  die Erfolgswahrscheinlichkeit,  $\varepsilon$  den Ausreißeranteil und  $s$  die minimale Anzahl an notwendigen Stützpunkten zur Modellschätzung bezeichnen reagiert die Anzahl an notwendigen Iterationen  $N$  sehr sensibel auf den zu erwartenden Anteil an fehlerhaften Datenpunkten.

$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - \varepsilon)^s)} \quad (10.2)$$

Bei geringer Bildüberlappung ist der Ausreißeranteil erwartungsgemäß größer und, sofern überhaupt eine ausreichende Anzahl an gültigen Verknüpfungen gefunden werden kann, muss dies bei der Modellschätzung auf jeden Fall berücksichtigt werden. Wird die Anzahl der Iterationen, wie im vorliegenden Fall nicht angepasst, kann dies zu den erkannten Differenzen zwischen eigentlich vergleichbaren Datensätzen führen.

Abgesehen von der generell positiven Wirkung stärkerer Bildüberlappung zeigen die Ergebnisse jedoch auch einen stärkeren Einfluss der lateralen Überlappung als dies beim Überlapp innerhalb der Flugbahn der Fall ist. Aus rein geometrischer bzw. photogrammetrischer Sicht gibt es hier zunächst keine klare Begründung. Die erkannten Effekte sind vielmehr in der Versuchsanordnung begründet und entsprechend kann die Wichtigkeit der Bildüberlappung hinsichtlich der erreichten äußeren Genauigkeit in beiden untersuchten Richtungen als gleich betrachtet werden. Sowohl im Modell- als auch im Realmaßstab erfolgte die Bildaufnahme so, dass die längere Seite des Bildsensors parallel zur "Flugrichtung" orientiert war. Gemeinsam mit dem Umstand, dass der Öffnungswinkel der verwendeten Kamera mit  $72,59^\circ$  in Längs- und  $51,98^\circ$  in Querrichtung unterschiedlich ist, erlaubt dies größere Abstände zwischen den Aufnahmepunkten innerhalb der Bahn als zwischen den Bahnen. Bei der Gewährleistung eines prozentuell definierten Überlapps ist daher auch die Toleranz für Ungenauigkeiten bei Einhaltung der Aufnahmeposition innerhalb der Bahnen (longitudinal) größer als dies in der anderen Richtung der Fall ist. Der stärkere Effekt der lateralen Überlappung ist demnach eher ein Ergebnis der größeren Sensibilität auf Ungenauigkeiten bzw. die gewählte Versuchsanordnung und hat wohl keine tiefere photogrammetrische Bedeutung.

Die in vielen praktischen Anwendungen aus wirtschaftlichen Gründen geringer gewählte laterale Überlappung kann daher auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht empfohlen werden, und

aus Sicht der Genauigkeit sollte die Überdeckung bei der Auswertung mittels SfM in beiden Richtungen gleich hoch und mit mindestens 80 % gewählt werden.

### 10.3.3 Blickwinkel relativ zum Objekt (D)

Neben der Flughöhe schreiben die Ergebnisse aller Versuche - insbesondere auch jene zur Faktorkombination - der Orientierung der Aufnahmeachse relativ zum Objekt den größten Effekt zu. Die im Zuge der Versuche durchgeführte Gegenüberstellung von Vertikalaufnahmen mit relativ zur horizontalen Objektoberfläche geneigten Blickrichtung zeigt deutlich, dass Schrägsicht in der Lage ist die Güte der Ergebnisse zu erhöhen und den Bildverband zu stabilisieren. Wie bereits in Abschnitt 10.1 erläutert darf dieser Umstand zwar bei der praktischen Anwendung nicht losgelöst von den herrschenden topographischen Bedingungen bzw. der Geometrie des aufzunehmenden Objekts interpretiert werden, die weitestgehend horizontalen Untersuchungsgebiete im Real- und Modellmaßstab ermöglichen hier jedoch klare Aussagen.

Die Gegenüberstellung Versuchsergebnisse mit jenen der Literaturanalyse ist rasch in der Lage eine Erklärung für die erkannten Phänomene zu finden. Bekanntermaßen ist einer der zentralen Prozessschritte einer SfM-Pipeline die simultane Schätzung der inneren Orientierung bzw. die Simultankalibrierung. (Wackrow and Chandler, 2008), (Fraser, 2013) und (James and Robson, 2014) konnten zeigen, dass konvergente Bildaufnahme die korrekte Schätzung der inneren Orientierung und der Objektivverzeichnung begünstigt und dass insbesondere bei weitestgehend vertikaler und paralleler Aufnahmeachse durch Fehlschätzung der Brennweite der bereits öfter erwähnte Dome-Effekt besonders stark ausgeprägt ist.

Dass dieser Effekt auch bei den durchgeführten Versuchen vorherrschend ist, wird durch die exemplarische Darstellung in Abb. 10.1 verdeutlicht, wo die ermittelten 3D-Punktfehler als hundertfach überhöhte Höhenkomponente einer interpolierten Oberfläche über einem regelmäßigen Raster dargestellt sind. Während die beiden linken Abbildungen aus Nadirflügen abgeleitet wurden, stellen die beiden rechten Datensätze Realisierungen mit geneigter Aufnahmeachse dar. Abgesehen von der starken Ähnlichkeit der verschiedenen Realisierungen kann links sehr deutlich eine starke Zunahme der Fehler zu den Rändern hin beobachtet werden, wogegen die Fehler rechts grundsätzlich deutlich geringer ausfallen und gleichmäßiger im gesamten Gebiet verteilt sind.

Bei allen vier Darstellungen auffallend ist die erkennbare Hochwölbung im Zentrum. Obwohl auch diese bei den Vertikalaufnahmen stärker ausfällt ist sie doch auch bei Schrägsicht vorhanden. Dieser Umstand ist mit hoher Wahrscheinlichkeit in den zur Georeferenzierung verwendeten Passpunkten begründet und führt hier zu einem lokalen "Hinspannen" der Ergebnisse auf die zur Schätzung verwendeten Punkte. Die Passpunkte wirken hier dem Muster der Durchbiegung entgegen, wodurch die zentrale Hochwölbung entsteht.

Abgesehen von der Abschwächung des Dome-Effekts und der günstigeren Anordnung zur Simultankalibrierung wirkt sich Schrägsicht allerdings auch ganz grundlegend auf die räumliche Konfiguration der Strahlenschnitte aus. Insbesondere zur Ableitung von Tiefeninformationen bzw. Punkthöhen ergeben sich schwächer schleifende Schnitte und die Triangulation nähert sich zusehends dem geometrischen Optimum von  $90^\circ$ . (Kraus, 1994; Luhmann, 2018b) Der Umstand, dass durch die geneigte Blickrichtung die Bildähnlichkeit, und entsprechend auch die Genauigkeit der gefundenen Korrespondenzen abnimmt, kann zumindest in den vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden. Der positive Einfluss der konvergenten Strahlenschnitte scheint den negativen des mangelhaften Matchings zu überprägen.

Zusätzlich zu den bereits dargelegten positiven Effekten konvergenter Aufnahmeanordnung hat die räumliche Konfiguration der Bildstrahlen bzw. genauer gesagt der Strahlenbündel naturgemäß auch erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung, die zwingen-

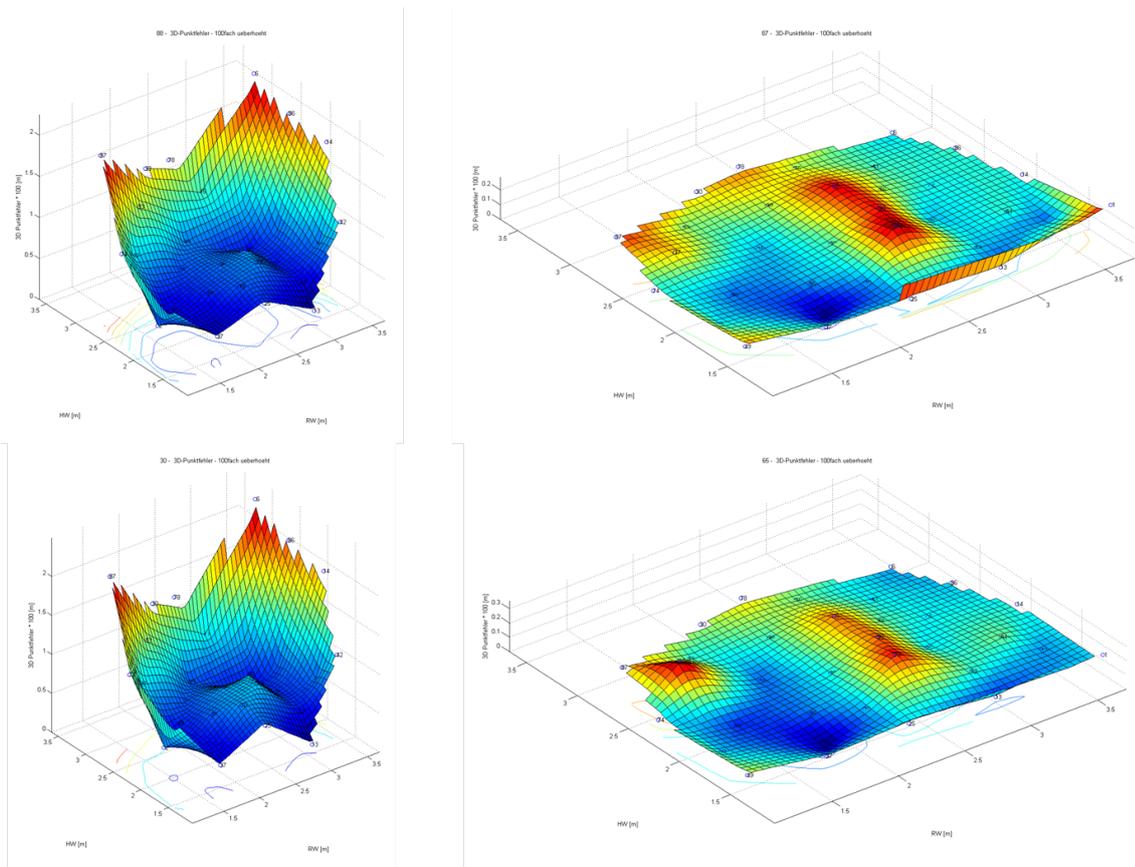


Abb. 10.1 – Dome-Effekt als Ergebnis der Aufnahmerichtung

der Bestandteil jeder SfM-Pipeline ist. Die Stärke der Bündelblockausgleichung besteht in der “ganzheitlichen“ Ausgleich komplexer Geometrien und der Bündelblock wird instabil wenn die geometrische Anordnung der Bündel zu “gleichmäßig“ ist. Bei einem nur Vertikalaufnahmen umfassenden Bildverband, der wie im vorliegenden Fall überdies noch aus einer einzigen Höhe aufgenommen wird, bestehen immer nur in abgegrenzten Bereichen Überlappungen und Korrespondenzen. Wie in einem aus der Geodäsie bekannten Polygonzug wird der Fehler von Bündel zu Bündel aufsummiert und die Gesamtrekonstruktion neigt zu systematischer Deformation aufgrund von Fehlerfortpflanzung. Durch geneigte und vor allem auch konvergente Strahlenbündel könnten Korrespondenzen zu weiter entfernten Bündeln und anderer Orientierung gefunden werden, und die nichtlineare Optimierung im Bundle Adjustment wäre nicht in der Lage die Rekonstruktion zu deformieren. Neben der grundlegend ungünstigen Anordnung zur Bündelausgleichung wird die systematische Deformation noch durch die zuvor angesprochene fehlerhafte Simultankalibrierung verstärkt. Aufgrund der fehlerhaften Schätzung der intrinsischen Parameter entstehen künstlich fehlerhafte Bildmessungen und Rückprojektionen, die in weiterer Folge mathematisch korrigiert werden und die physikalische Richtigkeit der Ergebnisse weiter verschlechtern.

### 10.3.4 Passpunktconfiguration zur Georeferenzierung (E)

Obwohl die Ergebnisse und auch die statistische Analyse ebendieser gezeigt haben, dass der Einfluss der Passpunktconfiguration zur Georeferenzierung in der untersuchten Form von un-

tergeordneter Bedeutung ist soll eine inhaltliche Interpretation nicht gänzlich entfallen, sondern vielmehr der Versuch unternommen werden dahinter stehende Ursachen zu identifizieren.

Zuallererst wurde die Möglichkeit der Einflussnahme durch die gewählte Versuchsanordnung deutlicher beschränkt als dies bei den übrigen Faktoren der Fall war. Aufgrund der in den meisten Fällen ohnehin ungünstigen Aufnahmeconfiguration zur Bündelblockausgleichung wurden die Passpunkte nur als Grundlage einer 3D-Ähnlichkeitstransformation nach Helmert benutzt und nicht - wie in vielen kommerziellen Software Anwendungen üblich - als externe Bedingung in den Bündelblockausgleich integriert. Entsprechend wurde den Passpunkten die Möglichkeit genommen den Bildverband in seiner relativen Anordnung und Form zu verändern, sondern die relative Kameraorientierung und auch die triangulierten 3D-Punkte wurden lediglich formerhaltend in das Referenzkoordinatensystem überführt. Auf diese Weise konnte jedoch vermieden werden, dass die geringe Anzahl an verwendeten Passpunkten etwaig vorhandene andere Einflüsse zu verzerren, was insofern von Bedeutung ist, da die Georeferenzierung durch den einheitlichen Koordinatenbezug gewissermaßen den Bewertungsmaßstab der Analysen festlegt.

Ein zweiter Punkt, der in die Betrachtung mit eingeschlossen werden muss, ist die Art der Analyse, bzw. Grenzen des untersuchten Faktorraums. Das Design der beiden Passpunktconfigurationen basiert grundsätzlich auf einer numerischen Simulation, wo aus einer Vielzahl an Realisierungen empirisch versucht wurde, gute von schlechten Passpunktconfigurationen zur Schätzung der Transformationsparameter einer 7-Parameter Transformation zu unterscheiden. Auf diese Weise wurde ein Bewertungsmaß, das auf dem Verhältnis der größten zur kleinsten zugeordneten Einwirkungsfläche je Passpunkt fußt, konstruiert und auf Basis dessen je 2 geometrische Anordnungen entwickelt (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die numerischen Untersuchungen zeigten jedoch, dass auch wenn das Verhältnis der angesprochenen Flächen gering ist die Transformationsergebnisse nicht zwingendermaßen schlecht sein müssen, die Wahrscheinlichkeit für Negativausreißer aber signifikant ansteigt. Entsprechend bilden die beiden untersuchten Anordnungen zwar höchstwahrscheinlich schon unterscheidbare Gegensätze, die Unterschiedlichkeit ist allerdings nicht so klar erkennbar, wie z.B. im Falle der Flughöhe oder der Bildüberlappung. In beiden Fällen wurden überdies aus der photogrammetrischen Praxis bekannte Grundsätze, wie z.B. dass der Passpunktabstand rund vier bis sechs Bildseitenlängen betragen soll (Kraus, 1994), eingehalten, was eine klare Abgrenzung der Ergebnisse zusätzlich erschwert.

Nichtsdestotrotz ist erkennbar, dass Passpunktconfiguration 1 (gleichmäßige Verteilung der Punkte) zu stabileren und genaueren Ergebnissen führt, als dies bei Konfiguration 2 (lokale Konzentration der Punkte) der Fall ist. Die Ergebnisse folgen somit den Erkenntnissen der numerischen Vorüberlegungen, und die Einflüsse werden vor allem dann sichtbar, wenn die Bildverbände in sich stabil sind und die Rekonstruktion im Modellmaßstab schon weitestgehend ähnlich und verzerrungsfrei ist. Dies zeigt sich vor allem anhand der Untersuchungen zur Faktorkombination, wo der Einfluss der Passpunktanordnung besonders sichtbar wird.

Ein weiteres Qualitätskriterium zum Einfluss der Passpunktanordnung ergibt sich aus dem Transformationsprozess selbst. Die Schätzung der Transformationsparameter erfolgte innerhalb einer RANSAC Schleife und entsprechend wurden nicht immer alle verfügbaren Passpunkte tatsächlich zur Schätzung verwendet. Aber auch in diesem Fall ist die unterschiedliche Qualität wohl eher auf die Modellkoordinaten und somit auf den SfM Prozess zurückzuführen und die Passpunkte nehmen nur untergeordnet Einfluss.

Allen Analyseunschärfen zum Trotz stellt die Verwendung von Passpunkten zur Georeferenzierung mit Sicherheit nach wie vor die genaueste Variante zur Skalierung und Verortung der Ergebnisse dar, und insbesondere bei stabiler Aufnahmegeometrie und Integration in den Bündelblockausgleich muss deren geometrische Konfiguration berücksichtigt werden um den gesetzlichen Anforderungen zu genügen. (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013)

Die präsentierten Ergebnisse illustrieren, dass obwohl die UAV-Vermessung mittlerweile gelebte Praxis und auch in der markscheiderischen Anwendung immer stärker verankert ist, eine fundierte wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema Genauigkeit und den dahinter stehenden Mechanismen von immanenter Bedeutung für die praktische Verwertung dieser Technologie ist. Auch wenn dies von manchen Seiten als gelöst betrachtet wird, besitzt entsprechende Forschung auf jeden Fall auch praktische Relevanz. Entgegen den ursprünglichen Erwartungen sticht vor allem der umgekehrte Einfluss der Flughöhe ins Auge, wobei hier vor allem ein anderer Wirkmechanismus des Steuerparameters erkannt werden kann. Anders als bislang angenommen ist nicht die Bildauflösung die vordergründig genauigkeitswirksame Größe sondern vielmehr die Verknüpfung der Bilder untereinander. Im Gegensatz zur klassischen Photogrammetrie wo die geometrische Aufnahmeanordnung nahezu ausschließlich die Triangulation betrifft, zeigt bei SfM mit automatischer Feature Detektion und Korrespondenzanalyse auch dieser Prozessschritt eine deutliche Abhängigkeit, wobei zusätzlich ein enger Zusammenhang zwischen der Anzahl an gültigen Verknüpfungspunkten zwischen den Bildern und der erreichten äußeren Genauigkeit erkannt werden kann.

## 10.4 Faktorkombination

Wie in den Kapiteln 4, 7 und 8 bereits erläutert, wurden im Zuge der Faktorkombination einzelne Realisierungen der Versuchspläne vermengt und, mit dem Ziel die Auswirkung der gemeinsamen Auswertung verschiedener Aufnahmekonfigurationen zu studieren, zusammen noch einmal ausgewertet. Vordergründig sollte Antwort auf die Frage gegeben werden, inwiefern sich eine Kombination verschiedener Anordnungen bzw. eine mehrmalige Befliegung auf die Qualität der Ergebnisse auswirkt, bzw. auf welche Weise Bildverbände stabilisiert werden können. Im Gegensatz zu den Einzelfaktoren ist es aufgrund der Kombination nicht unmittelbar möglich die Ergebnisse mit den Faktoren in Bezug zu setzen, und auch die Angabe mittlerer Faktorstellungen erscheint nicht sinnvoll. Entsprechend erfolgte die Beurteilung vergleichend zu den "Ursprungsdatensätzen" bzw. relativ untereinander.

Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die Kombination verschiedener Aufnahmeanordnungen durchaus positiv zu bewerten ist, die Situation allerdings schon eine gewisse Abhängigkeit von der Betrachtungsweise zeigt. Zu Beginn wurde versucht ursprünglich schlechte Aufnahmekonfigurationen "zu retten" bzw. zu optimieren und entsprechend verhalten sich auch die Ergebnisse. Werden ein guter und ein schlechter Datensatz miteinander kombiniert, so liegt die erreichte Genauigkeit üblicherweise dazwischen, bzw. kann z.B. aus der reinen Kombination verschiedener Flughöhen nicht zwingendermaßen eine hohe Genauigkeit erkannt werden. Zwar liegt die erreichte äußere Genauigkeit schon über jener der Eingangsdatensätze, eine absolut betrachtet hohe Ergebnisgüte kann daraus allerdings nicht abgeleitet werden.

Abgesehen von den Versuchen schwache Aufnahmeanordnungen zu stabilisieren, zielte die Kampagne zu den Faktorkombinationen allerdings auch darauf ab eine "optimale" Aufnahmeanordnung zu finden, bzw. zu analysieren welche Kombination zu grundlegend besseren Ergebnissen führt. Hierbei zeigte sich in allen Untersuchungsmaßstäben, dass eine Kombination verschiedener Aufnahmerichtungen bei gleichbleibender Flughöhe zu den besten Ergebnissen führte. Entgegen der in der klassischen Photogrammetrie üblichen Befliegung in verschiedenen Flughöhen zeigte im Rahmen der gegenständlichen Untersuchungen und der Auswertung mittels SfM die Kombination verschiedener Bildorientierungen einen stärker positiven Einfluss.

Neben der günstigeren Konfiguration der Strahlenschnitte zur Triangulation, ist hier mit Sicherheit auch die günstigere Anordnung der Bilder für das automatische Finden gültiger Punktrespondenzen von großer Bedeutung. Wie schon bei den Einzelfaktoren zeigte sich auch im Falle

der Faktorkombination eine Proportionalität der äußeren Genauigkeit mit der Anzahl an gültigen Verknüpfungen zwischen den Bildpaaren. Je höher die mittlere Anzahl an Bildverknüpfungen, desto geringer sind die erkannten Differenzen zur Referenzvermessung, wobei in beiden Fällen ein klarer Zusammenhang zu den Parametern der Bildaufnahme ersichtlich ist. Die Begründung für diesen Umstand kann wie bereits in Abschnitt 10.3 erläutert bei (Zeisl et al., 2009) gefunden werden. Die in der klassischen Photogrammetrie übliche Suche nach stabilen und geometrisch richtigen Verknüpfungspunkten wird bei SfM durch das automatisierte Matching und robuste Ausreißersuche ersetzt. Dennoch konnte im Rahmen der gegenständlichen Untersuchungen gezeigt werden, dass ein blindes Vertrauen auf die “Fähigkeiten“ moderner Algorithmen unangebracht ist, und trotz einer deutlich höheren Anzahl an Beobachtungsgleichungen und klarer Überbestimmtheit der zu lösenden Gleichungssysteme die Qualität der einzelnen Korrespondenzen von hoher Wichtigkeit für die Ergebnisgüte ist.

# Kapitel 11

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die UAV-Photogrammetrie und insbesondere auch die Auswertung mittels Structure from Motion ist mittlerweile mehr als nur in der praktischen Anwendung angekommen, und stellt in vielen Fällen eine wertvolle Ergänzung zu herkömmlichen Methoden dar. Die sinnvolle Nutzung neuer Technologien erfordert jedoch auch die richtige Verwendung, was wiederum das notwendige Wissen über Stärken, Schwächen und vor allem auch systembedingte Grenzen voraussetzt.

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war daher eine robuste Identifizierung und Quantifizierung genauigkeitswirksamer Einflussparameter bei der photogrammetrischen UAV-Vermessung im Bergbau bzw. der Auswertung mittels Structure from Motion. Überdies sollte eine belastbare Beschreibung des absoluten Punktlagefehlers der rekonstruierten Objektpunkte in Abhängigkeit der geometrischen und im Feld vom Piloten steuerbaren Parameter der Bildaufnahme gefunden, und daraus abgeleitet eine Handlungsempfehlung für Anwender formuliert werden.

Die dargestellten Überlegungen, Versuche und vor allem auch Ergebnisse und Interpretationen legen die hierzu notwendige theoretische und empirische Basis, und tragen auf diese Weise zum aktuellen Stand der Technik und des Wissens bei.

### 11.1 Genauigkeitsbeurteilung

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können aus verschiedenen Blickrichtungen betrachtet werden, und sind in ihrer Bedeutung entsprechend vielfältig.

Zunächst konnte gezeigt werden, dass bei "richtigem" Einsatz (Systemdesign, Flugplanung und Auswertung) die Genauigkeitsanforderungen der Markscheideverordnung (Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, 2013) eingehalten werden können, und die UAV-gestützte Vermessung somit im Rahmen der Systemgrenzen - so können z.B. Absteckungsarbeiten nicht durchgeführt werden - eine wertvolle Ergänzung zur Erfüllung der markscheiderischen Aufgaben im Tagbau sein kann und bereits ist.

Aus wissenschaftlich theoretischer Sicht konnten mittels tiefgreifender Analyse praktischer Daten im Real- und Modellmaßstab eine statistisch signifikante Auswahl genauigkeitsrelevanter Einflussparameter gefunden werden, und außerdem erlaubte die Untersuchung verschiedener "Ausprägungen" der Ergebnisse - äußere und innere Genauigkeit - vor allem auch Begründungen für die erkannten Phänomene zu geben.

Der deutlichste Zusammenhang konnte zwischen der erreichten äußeren Genauigkeit und der Anzahl an gültigen Verknüpfungen zwischen den Bildern erkannt werden. Je stärker die Verknüpfung zwischen den Bildern, bzw. je größer die Anzahl an gültigen Verknüpfungspunkten, desto höher ist auch die äußere Genauigkeit der rekonstruierten Objektpunkte. Zumindest zum relativen Vergleich zwischen Datensätzen erscheint diese Größe als belastbares Maß der Ge-

nauigkeitsbeurteilung, und zeigt vor allem einen wesentlich stärkeren Zusammenhang mit den erreichten äußeren Genauigkeiten als beispielsweise die mittleren Rückprojektionsfehler. Aus praktischer Hinsicht kann dieser Zusammenhang vor allem dazu genutzt werden, um Bilder ohne externen Vergleichsmaßstab aus Gründen der Genauigkeit von der Auswertung auszuschließen, bzw. kann dieses Kriterium als robuste Fehlerfunktion der äußeren Genauigkeit in die Optimierung bzw. die Bündelblockausgleichung integriert werden. Die mittlere Anzahl an gültigen Verknüpfungen könnte aber auch - gewissermaßen ähnlich dem DOP-Wert der Satellitengeodäsie (Kahmen, 2006) - als Abschätzungsfaktor für die Genauigkeit der Nahbereichsphotogrammetrie herangezogen werden, auf Basis dessen zumindest eine relative Beurteilung erwartbarer Fehler möglich wäre.

Hinsichtlich der identifizierten Parameter und vor allem auch hinsichtlich der zu Grunde liegenden Wirkmechanismen und Richtungen konnten teils aus den Grundlagen der klassischen Photogrammetrie erwartbare und teils überraschende Ergebnisse erzielt werden. Als statistisch signifikante Einflussgrößen konnten jedenfalls die folgenden identifiziert werden:

- Flughöhe (A)
- Bildüberlappung longitudinal (innerhalb der Flugbahn, B)
- Bildüberlappung lateral (zwischen den Flugbahnen, C)
- Blickwinkel der Kamera relativ zum Objekt (D)
- Wechselwirkung zwischen der Flughöhe und dem Blickwinkel der Kamera (AD)
- Wechselwirkung zwischen den beiden Bildüberlappungen (BC)
- Wechselwirkung zwischen allen vier Haupteffekten (ABCD)

Ein der markantesten Unterschiede zur klassischen Photogrammetrie besteht vor allem darin, dass die Flughöhe einen unerwarteten Einfluss zeigt. Die reine Erhöhung der Bildauflösung scheint auf automatische Feature Detektoren und vor allem auch das Feature Matching einen anderen Einfluss zu haben, als bislang angenommen bzw. kann auf jeden Fall gesagt werden, dass die geometrische Aufnahmeanordnung einen anderweitig ausgeprägten Einfluss auf die Auswertung hat als dies bei klassisch photogrammetrischen Ansätzen der Fall ist. Für klassisch photogrammetrische Auswertung ideal geeignete Bildverbände treffen die Anforderungen von SfM nicht im Kern, und entsprechend sind auch die Ergebnisse zum Teil negativ überraschend. Die einzelnen Verfahrensschritte von SfM dürfen nicht isoliert betrachtet werden, sondern die Interaktionen zwischen den Prozessschritten müssen miteinbezogen werden. Die vorliegende Dissertation liefert einen empirisch erprobten und theoretisch verifizierten Unterbau zur Aufnahmeplanung bei SfM Auswertung und zeigt deutlich die zu berücksichtigenden Zusammenhänge auf. Veränderungen in der Flughöhe führen zwar unter Umständen zu einer Verringerung der Bildauflösung und des Detailgrads, bzw. erscheint auf den ersten Blick auch die geometrische Konfiguration der Strahlenschnitte verschlechtert. In rein texturrell repetitiven Umgebungen wie einem Tagbau kann dies jedoch positive Auswirkung auf die Korrespondenzanalyse und die geometrische Richtigkeit der Objektpunkte haben. Die größere Anzahl gültiger Epipolargeometrien zwischen den an der Auswertung beteiligten Bildern weist klar in diese Richtung und ähnliche Denkmuster konnten auch bei den übrigen Parametern gefunden werden (vgl. Kapitel 10).

## 11.2 Handlungsempfehlung

Neben der wissenschaftlichen Befassung und Analyse will die vorliegende Dissertation allerdings auch Handlungsempfehlung und Unterstützung für UAV-Anwender sein. Kurz und prägnant sollen im Folgenden die wichtigsten “Regeln“ für den Piloten im Feld zusammengefasst werden, wobei die einzelnen Kapitel der Dissertation die theoretische und experimentelle Begründung zu den getätigten Aussagen liefern. Der Unterschied zu etwaig bereits vorhandenem “Erfahrungswissen“ besteht somit in der wissenschaftlichen Grundlage der getroffenen Empfehlungen, was ebendieses stärkeres Gewicht verleiht. Einschränkend muss jedoch angemerkt werden, dass auch an dieser Stelle die Grenzen des in Abschnitt 1.2 definierten Untersuchungsgegenstands aufrecht bleiben und die vorgebrachten Empfehlungen sich somit auf die vom Piloten im Feld beeinflussbaren Größen beschränken und beispielsweise das Aufnahmesystem als solches nicht betrachtet wird.

### 1. **Bildaufnahme aus großen Flughöhen zeigt positiven Einfluss auf die erreichte äußere Genauigkeit**

Entgegen den aus der klassischen Photogrammetrie erwarteten Zusammenhängen zeigt die Flughöhe einen umgekehrten Einfluss auf die Auswertung bei Structure from Motion und es wird somit die Bildaufnahme aus größeren Höhen empfohlen. Trotzdem muss diese Empfehlung in besonderer Weise durchdacht, und die Flughöhe kann naturgemäß nicht einfach beliebig gesteigert werden. Insbesondere das Scheitern der hohen Flüge mit geringem Überlapp im Realmaßstab zeigt, dass eine Mindestanzahl an Bildern notwendig ist, um die große Zahl an Unbekannten zu schätzen und überdies setzt auch die Erkennbarkeit zu rekonstruierender Objekte hier Grenzen. Außerdem beschränkte sich der Untersuchungsrahmen auf die gesetzlich gedeckten Bereiche (maximale Flughöhe von 150 m), und eine unmittelbare Extrapolation der Erkenntnisse ist mit Sicherheit nicht möglich.

### 2. **Starke Bildüberlappung in beiden Richtungen stabilisiert den Bildverband**

Die Bildüberlappung innerhalb und zwischen den Bahnen äußert sich vor allem in der Robustheit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Es kann sein, dass auch bei geringem Überlapp gute Ergebnisse erzielt werden, allerdings kann keine Gewähr gegeben werden, dass dies unter den selben Bedingungen wiederholbar ist. Geringe Bildüberlappung destabilisiert den Bildverband und macht ihn “angreifbar“ für unkontrollierbare Einflüsse, weshalb eine Bildüberlappung von 80 % oder mehr empfohlen wird um eine reproduzierbare Auswertung sicherzustellen.

### 3. **Geneigte Orientierung der Aufnahmeachse wirkt stabilisierend**

Es konnte gezeigt werden, dass eine relative Verschwenkung der Aufnahmeachse zur Objektfläche positiven Einfluss auf die Ergebnisse zeigt. Die angesprochene Verschwenkung relativ zum Objekt geht aber insbesondere auch mit einer relativen Verschwenkung der Bilder zu einander einher, und die auf diese Weise entstehenden konvergenten Strahlenschnitte, werden für die Optimierung im Zuge des Bündelblockausgleichs benötigt. Es wird somit empfohlen reine Nadirbefliegungen zu vermeiden und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von (Zeisl et al., 2009) konvergente Strahlenschnitte zu forcieren. Anders als in den präsentierten Untersuchungen, wo die geneigten Kameraachsen weitestgehend parallel waren, erscheint ein Wechsel der Blickrichtung mit jeder Flugbahn sinnvoll. Sofern die Kamerachse in Flugrichtung ausgerichtet ist, führt diese Anordnung in Flugrichtung zu ständiger Konvergenz und im Falle einer weitestgehend flachen Szene überdies zu einer konvergent Schnittgeometrie an der Objektfläche.

#### 4. **Structure from Motion braucht Motion**

Die Auswertung mittels SfM reagiert sehr empfindlich auf fehlende Bewegung der Kamera. Sind die Aufnahmepositionen zu ähnlich führt dies in den meisten Fällen zu Problemen bei der Schätzung der äußeren Orientierung und die fehlorientierten Bilder rufen starkes Rauschen hervor. Im Ergebnis wird der betroffene Bereich sozusagen mehrmals rekonstruiert und die geometrische Korrespondenz kann nicht hergestellt werden.

#### 5. **Für vermessungstechnische Genauigkeit sind Passpunkte erforderlich**

In den präsentierten Untersuchungen zeigte sich der Einfluss der Passpunktanordnung zwar als nicht signifikant für die untersuchte Genauigkeit, dies lag aber vordergründig an der Tatsache, dass beide analysierten Konfigurationen in der Lage waren gute Ergebnisse zu produzieren. Der sichtbare Einfluss im Falle der Faktorkombination zeigt aber deutlich, dass die Passpunktanordnung vor allem bei stabiler Aufnahmegeometrie deutlichen Einfluss entfalten kann. Neben der Gleichmäßigkeit der Verteilung, wie sie durch die in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen, Voronoi Polygone beziffert werden kann, sollten jedoch auch die Überlegungen von (Lindstaedt and Kersten, 2018) miteinbezogen werden. Der gewählte Passpunktabstand sollte rund sechs bis acht Bildbasen betragen, wobei der daraus abgeleitete Absolutwert natürlich stark von Flughöhe und gewählter Überlappung abhängig ist.

#### 6. **Kombination verschiedener Faktorstellungen steigert die Genauigkeit**

Die Versuche zur Faktorkombination zeigten deutlich, dass eine kombinierte Auswertung verschiedener Aufnahmeanordnungen bzw. die Kombination unterschiedlicher Faktorstufen einerseits in der Lage ist vorhandene Schwächen einer einzelnen Konfiguration auszugleichen, und andererseits durch gezielte Kombination auch die genauesten Ergebnisse erzielt werden konnten. Als besonders positiv stach die Kombination verschiedener Blickrichtungen hervor, wobei die Blickwinkeldifferenz idealerweise unter  $30^\circ$  betragen sollte, um eine ausreichend genaue Korrespondenzanalyse zwischen den Bildern zu ermöglichen (Zeisl et al., 2009). Vor allem bei größeren Arealen wird allerdings auf die Gefahr eines zeitlich versetzten zweiten Überfluges hingewiesen. Die Veränderung in den nicht kontrollierbaren äußeren Einflüssen kann zu Problemen bei Matching und wiederum zu stark verrauschten Punktwolken führen.

## 11.3 Ausblick

Wird der Blick in die Zukunft gewagt, bilden die Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation zunächst einmal die notwendige Basis um das Anwendungsfeld für UAVs weiter zu vergrößern. Das bessere Verständnis der erreichbaren Genauigkeiten und vor allem auch das tiefere Wissen über deren Zustandekommen, erlauben einen Blick über den aktuellen Tellerrand und eröffnen neue - bisher noch nicht erreichbare - Möglichkeiten. Im markscheiderischen Umfeld ist hier mit Sicherheit die Beobachtung von geogenen und anthropogenen Veränderungen zu nennen, wo die flächige Analyse in etwaig sicherheitlich gefährdeten Bereichen einerseits zur Erhöhung der Sicherheit, und andererseits auch zu einem besseren Verständnis der Versagensmechanismen beitragen könnte. Vor allem für hochgenaue Beobachtungsmessungen müssen die eingesetzten Instrumente "wirklich beherrscht" werden und alle möglichen Störeinflüsse schon in der Planung berücksichtigt werden.

Abgesehen von den erreichten Genauigkeiten liegt der größte Forschungsbedarf jedoch mit Sicherheit in der Datenverarbeitung. Nicht nur im bergmännischen Umfeld wird das Potential hochaufgelöster photogrammetrischer Daten noch nicht vollumfänglich ausgenutzt. Vor allem

die aktuellen Möglichkeiten zur Analyse großer Datenmengen bieten ein unüberblickbares Feld an Möglichkeiten, wobei immer eine entsprechende Datenqualität vorausgesetzt wird, wozu die vorliegende Arbeit unmittelbar beiträgt. Insbesondere das Vorhandensein der semantischen Bildinformation als Ergänzung zum geometrischen Modell kann für markscheiderische und bergmännische Anwendungen von großer Bedeutung sein, wie aktuelle Beispiele auch schon heute zeigen. Neben den großen Veränderungen, die sich als Ergebnis der gegenständlichen Forschung ergeben, zielt der “innensichtige“ Ausblick vielmehr auf eine Fortentwicklung der angewandten Methoden, bzw. auf ein noch tieferes Ergründen vorhandener Zusammenhänge ab. In diesem Zusammenhang würde eine Erweiterung des Untersuchungsraums über die aktuellen Grenzen hinaus mit Sicherheit einen starken Effekt erzielen. Die Frage nach der optimalen Aufnahmedistanz ließe sich nur beantworten wenn der “Umkehrpunkt“ gefunden würde, was allerdings vor allem aus juristischer Sicht eine spezielle Planung und Abwicklung der Versuche erfordern würde, da die rechtlichen Rahmenbedingungen hier derzeit ganz klare Grenzen setzen. Außerdem könnte die vorhandene Versuchsreihe um weitere “Zwischenstufen“ ergänzt werden um die erkannten Zusammenhänge auch funktional beschreibbar zu machen. Die aktuelle Anordnung ließe zwar grundsätzlich die Formulierung eines linearen Zusammenhangs zu, allerdings zeigt schon die Analyse von drei Flughöhen im Modellmaßstab, dass ein lineares Beschreibungsmodell nicht in der Lage ist die Realität abzubilden.

Auch aus anderen Maßstäben zur Beurteilung der Ergebnisse könnten mit Sicherheit weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Obwohl der hier angewandte punktweise Vergleich zumindest eine eindeutige Gegenüberstellung gewährleistet, würde die Gegenüberstellung mit Referenzpunktwolken (beispielsweise aus terrestrischem Laserscanning) wiederum eine alternative Beurteilung ermöglichen und aufgrund des flächigen Charakters auch gewissermaßen “besser zu den photogrammetrischen Ergebnissen passen.“

Sofern jedoch die Entwicklungen, vor allem im Bereich der Digitalisierung und Automatisierung, auch nur annähernd so schnell voranschreiten wie zuletzt, sind die formulierten Gedanken wahrscheinlich schon mit dem zu Papier bringen bereits überholt und der angestellte Ausblick kann nur mehr als wohlwollender Rückblick betrachtet werden.

# Literaturverzeichnis

- Aasen, H. (2017). “State-of-the-Art in UAV Remote Sensing Survey - First Insights into applications of UAV Sensing Systems”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W6, pp. 1–4. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-1-2017 (cit. on p. 19).
- Agarwal, Sameer, Yasutaka Furukawa, Noah Snavely, Ian Simon, Brian Curless, Steven M. Seitz, and Richard Szeliski (2011). “Building Rome in a day”. In: *Communications of the ACM* 54.10, p. 105. ISSN: 00010782. DOI: 10.1145/2001269.2001293 (cit. on p. 33).
- Agisoft LLC (2019). *Agisoft Metashape*. URL: <https://www.agisoft.com/> (cit. on p. 65).
- Agüera-Vega, Francisco, Fernando Carvajal-Ramírez, and Patricio Martínez-Carricondo (2017). “Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle”. In: *Measurement* 98, pp. 221–227. ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.12.002 (cit. on pp. 66, 68).
- Aldred, John (2018). *Sony’s new 31MP APS-C sensor has a global shutter and might come with the A6700/A7000*. URL: <https://www.diyphotography.net/sonys-new-31mp-aps-c-sensor-has-a-global-shutter-and-might-come-with-the-a6700-a7000/> (cit. on p. 61).
- Aleithe, Wolfgang (2016). “Beobachtungen von vertikalen Bodenbewegungen mit Hilfe präziser Aerophotogrammetrie”. In: *17. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 12. und 13. Mai 2016 in Freiberg*. Ed. by Anton Sroka. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, pp. 265–275. ISBN: 978-3-938390-17-7 (cit. on p. 33).
- Alsadik, B. S., M. Gerke, and G. Vosselman (2012). “OPTIMAL CAMERA NETWORK DESIGN FOR 3D MODELING OF CULTURAL HERITAGE”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* I-3, pp. 7–12. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprsannals-I-3-7-2012 (cit. on p. 64).
- Atkinson, K. B. (1996). *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Caithness, Scotland: Whittles Publishing. ISBN: 1-870325-46-X (cit. on pp. xiv, 62–64, 75, 85).
- Austro Control (2019a). *Auflistung der erteilten Betriebsbewilligungen für uLFZ der Klasse 1*. Ed. by Austro Control (cit. on pp. 11, 12, 15, 16).

- Austro Control, ed. (2019b). *Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1: LBTH 67* (cit. on pp. 18, 19).
- Barazzetti, L. (2017). “Network Design in Close-Range Photogrammetry with short baseline images”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W2*, pp. 17–23. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-17-2017 (cit. on p. 64).
- Barnhart, Richard K. (2012). *Introduction to unmanned aircraft systems*. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN: 978-1-4398-3521-0 (cit. on pp. 7, 8).
- Barry, P. and R. Coakley (2013). “Field Accuracy Test of RPAS Photogrammetry”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W2*, pp. 27–31. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-27-2013 (cit. on p. 52).
- Bay, Herbert, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, and Luc van Gool (2008). “Speeded-Up Robust Features (SURF)”. In: *Computer Vision and Image Understanding* 110.3, pp. 346–359. ISSN: 10773142. DOI: 10.1016/j.cviu.2007.09.014 (cit. on p. 37).
- Bertels, Udo (2016). “Bauwerksinspektionen und Vermessungen mit dem Multikopter - Welche Ergebnisse sind möglich!” In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 82/2016. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 205–226. ISBN: 978-3-95786-067-5 (cit. on p. 19).
- Boschi, Maximilian and Peter Boschi (2017). “Geodatenerfassung mittels UAVs(UNmanned Aerial Vehicles) - ein praxisnahe Perspektive: Kurzfassung”. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 162.10, p. 488. ISSN: 0005-8912. DOI: 10.1007/s00501-017-0646-z (cit. on p. 58).
- Brandt, Carsten (2018). “Unbemannte Luftfahrtsysteme in Deutschland - rechtlich gesehen”. In: *UAV 2018 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 89/2018. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 23–30. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on p. 14).
- Briese, Christian and Norbert Pfeifer (2013). “Aktuelle Forschung und Anwendung von unbemannten Luftfahrzeugen in Österreich - Vorwort”. In: *VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 101.2+3, p. 63 (cit. on pp. 2, 5).
- Briese, Christian, Raoul Fortner, Philip Sager, and Norbert Pfeifer (2013). “Vom Modellflughobby zu unbemannten Flugsystemen für die Geodatenerfassung”. In: *VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 101.2+3, pp. 64–74 (cit. on p. 14).
- Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat (1957). *Bundesgesetz vom 2. Dezember 1957 über die Luftfahrt (Luftfahrtgesetz – LFG): Luftfahrtgesetz – LFG* (cit. on pp. 8, 11, 14, 15).

- Bundesgesetzgeber, österreichischer Nationalrat (1999). *Bundesgesetz über mineralische Rohstoffe (Mineralrohstoffgesetz - MinroG): Mineralrohstoffgesetz - MinroG* (cit. on pp. 2, 19).
- Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2013). *Verordnung des Bundesministeriums für Wirtschaft Familie und Jugend über Vermessungen im Bergbau, das Bergbaukartenwerk und die Erfassung von Bodenbewegungen 2013: Markscheideverordnung 2013* (cit. on pp. v, vi, 1, 20, 51, 52, 54, 79, 89, 173, 176).
- Burkert, F. and Friedrich Fraundorfer (2013). “UAV-BASED MONITORING OF PEDESTRIAN GROUPS”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W2*, pp. 67–72. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-67-2013 (cit. on p. 19).
- Campion, M., P. Ranganathan, and S. Faruque (2018). “A Review and Future Directions of UAV Swarm Communication Architectures”. In: *2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, pp. 0903–0908. DOI: 10.1109/EIT.2018.8500274 (cit. on p. 21).
- Caroti, G., I. Martínez-Espejo Zaragoza, and A. Piemonte (2015). “Accuracy Assessment in Structure from Motion 3D Reconstruction from UAV-born Images: The influence of the data processing methods”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4*, pp. 103–109. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-103-2015 (cit. on pp. 53, 66).
- Colomina, Ismael and Pere Molina (2014). “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review”. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, pp. 79–97. ISSN: 09242716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013 (cit. on pp. 6, 7, 11, 12).
- Cramer, Michael (2001). *Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS-INS-Integration in der Aerophotogrammetrie*. Vol. 537. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C, Dissertationen. München: Verl. der Bayer. Akad. der Wissenschaften. ISBN: 3769695763 (cit. on p. 66).
- Cramer, Michael and Benedikt Leinss (2016). “Welche ist am besten? - Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie”. In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 82/2016. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 97–118. ISBN: 978-3-95786-067-5 (cit. on pp. 55, 56, 70, 96).
- Cramer, Michael, Heinz-Jürgen Przybilla, Henry Meißner, and Karsten Stebner (2017). “Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme”. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 67–84. ISBN: 978-3-95786-107-8 (cit. on pp. 58, 59).

- Daftry, Shreyansh, Michael Maurer, Andreas Wendel, and Horst Bischof (2013). “Flexible and User-Centric Camera Calibration using Planar Fiducial Markers”. In: *British Machine Vision Conference (BMVC)* (cit. on p. 35).
- Deutsches Institut für Normung (1995). *DIN 1319-1: 1995-01, Grundlagen der Meßtechnik\_ - Teil\_1: Grundbegriffe*. Berlin. DOI: 10.31030/2713411 (cit. on pp. 42, 48).
- Dirks, Holger (2018). “UAV für eine effiziente Vermessung im Insel- und Küstenschutz”. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 89/2018. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 117–122. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on p. 19).
- EASA (2019). *One step closer to harmonised rules for safe drones operation in Europe: EASA welcomes positive vote in the EASA Committee on future drone operation rules*. URL: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/news/one-step-closer-harmonised-rules-safe-drones-operation-europe> (cit. on pp. 16, 17).
- Eisenbeiß, Henri (2009). “UAV Photogrammetry”. Dissertation. Zürich: ETH Zürich (cit. on pp. 5–7, 12, 17, 18).
- EIT Raw Materials (2019). *Undromeda: Underground Robotic System for Monitoring, Evaluation and Detection Applications*. URL: <https://eitrawmaterials.eu/project/undromeda/> (cit. on p. 20).
- Eling, Christian, Lasse Klingbeil, and Heiner Kuhlmann (2016). “Warum UAVs und warum jetzt?” In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 82. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 9–30. ISBN: 978-3-95786-067-5 (cit. on pp. 9, 11).
- Fazeli, H., F. Samadzadegan, and F. Dadrasjavan (2016). “Evaluating the Potential of RTK-UAV for automatic Point Cloud Generation in 3D Rapid Mapping”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B6*, pp. 221–226. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B6-221-2016 (cit. on p. 66).
- Finkbeiner, Mario (2018). “Einsatz von UAV im Bereich der Deutschen Bahn AG”. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 163–171. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on p. 19).
- Fischer, Claus (2016). “Erfahrung mit Standard (LowCost)-UAV bei der Befliegung und Auswertung von Haufwerken”. In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 82/2016. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 227–234. ISBN: 978-3-95786-067-5 (cit. on p. 19).

- Fischler, M. A. and R. C. Bolles (1981). “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography”. In: *Communication Association and Computing Machine* 24.6, pp. 381–395 (cit. on pp. 34, 38, 39, 91, 170).
- Förstner, Wolfgang and Eberhard Gülch (1987). “A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features”. In: *Proc. ISPRS inter-commission conference on fast processing of photogrammetric data*. Ed. by A. Gruen, pp. 281–305 (cit. on p. 36).
- Fraser, Clive (1984). “Network design considerations for non-topographic photogrammetry”. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 50 (cit. on pp. 62, 75, 168).
- Fraser, Clive S. (2013). “Automatic Camera Calibration in Close Range Photogrammetry”. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 79.4, pp. 381–388. ISSN: 00991112. DOI: 10.14358/PERS.79.4.381 (cit. on pp. 63, 70, 171).
- Furukawa, Yasutaka and Jean Ponce (2009). “Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* (cit. on p. 41).
- Gaisecker, Thomas, Ursula Riegl, Philipp Amon, and Martin Pfennigbauer (2017). “RIEGL LiDAR-Lösungen für die UAV-basierte Vermessung”. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Augsburg: Wißner-Verlag. ISBN: 978-3-95786-107-8 (cit. on pp. 2, 11).
- Garrido-Jurado, S., R. Muñoz-Salinas, F. J. Madrid-Cuevas, and M. J. Marín-Jiménez (2014). “Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion”. In: *Pattern Recognition* 47.6, pp. 2280–2292. ISSN: 00313203. DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005 (cit. on p. 81).
- Gauß, Carl Friedrich (1809). *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium* (cit. on p. 45).
- Genschow, Dieter (2017). “Anwendung von Radarsensoren in UAV”. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Augsburg: Wißner-Verlag. ISBN: 978-3-95786-107-8 (cit. on p. 2).
- Gerke, Markus and Heinz-Jürgen Przybilla (2016). “Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns”. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* 2016.1, pp. 17–30. ISSN: 14328364. DOI: 10.1127/pfg/2016/0284 (cit. on p. 53).
- Gerke, Markus, Claudia Stöcker, Sophie Crommelinck, and Mila Koeva (2018). “UAV für das Kataster - das EU-Projekt its4land”. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 89/2018. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 105–116. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on p. 19).

- Gilblom, David L., Sang Keun Yoo, and Peter Ventura (2003). "Operation and performance of a color image sensor with layered photodiodes". In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Ed. by Bjorn F. Andresen and Gabor F. Fulop. SPIE Proceedings. SPIE, p. 318. DOI: 10.1117/12.498557 (cit. on pp. 57, 58).
- González-Aguilera, D., J. Fernández-Hernández, J. Mancera-Taboada, P. Rodríguez-Gonzálvez, D. Hernández-López, B. Felipe-García, I. Gozalo-Sanz, and B. Arias-Perez (2012). "3D Modeling and Accuracy Assessment of Granite quarry using Unmanned aerial vehicle". In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I-3*, pp. 37–42. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprsannals-I-3-37-2012 (cit. on p. 52).
- Greiwe, A., R. Gehrke, Volker Spreckels, and Andreas Schlienkamp (2013). "Aspects of DEM Generation from UAS Imagery". In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W2*, pp. 163–167. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-163-2013 (cit. on pp. 19, 57, 61).
- Greiwe, Ansgar, Jonas Peters, Volker Spreckels, Andreas Schlienkamp, Michale Lösler, and Eschelbach Cornelia (2017). "Geeignete Kameras zur Geländeaufnahme durch UAS". In: *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*. Ed. by Thomas Luhmann and Christina Schumacher. Berlin and Offenbach: Wichmann, pp. 202–221. ISBN: 3879076251 (cit. on pp. 57, 58, 61, 70, 104).
- Grenzdörffer, Görres (2013). "UAS-based automatic bird count of a common gull colony". In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W2*, pp. 169–174. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-169-2013 (cit. on p. 19).
- Grenzdörffer, Görres (2016). "Unbemannte Flugroboter - aktuelle technologische Entwicklungen und die wichtigsten rechtlichen Rahmenbedingungen". In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 82. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 31–52. ISBN: 978-3-95786-067-5 (cit. on pp. 8, 11).
- Gülch, E. (2012). "Photogrammetric Measurements in fixed wing UAV Imagery". In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1*, pp. 381–386. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-381-2012 (cit. on p. 62).
- Haralick, R. M., C. Lee, K. Ottenberg, and M. Nölle (1991). "Analysis and Solutions of the Three Point Perspective Pose Estimation Problem". In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 592–598 (cit. on p. 38).
- Härpfer, A. (1914). "Die Hansen'sche Aufgabe mit überschüssigen Beobachtungen". In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen* 12.11, 12, pp. 225–230, 241–248 (cit. on p. 99).

- Hartley, Richard and Andrew Zisserman (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd ed. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press. ISBN: 0511811683 (cit. on pp. 3, 33, 65, 82).
- Harwin, Steve and Arko Lucieer (2012). “Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery”. In: *Remote Sensing* 4.12, pp. 1573–1599. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs4061573 (cit. on p. 52).
- Heiss, Christian (2017). “Überlegungen zur Sicherung von Personen und Infrastrukturbauwerken gegen Steinschlag im alpinen Bereich unter besonderer Berücksichtigung flexibler Steinschlagschutzsysteme - Modellierung flexibler Steinschlagschutzsysteme im Labormaßstab zur Beurteilung nichtgenormter Lastfälle”. PhD thesis. Montanuniversität Leoben (000) (cit. on p. 89).
- Hennes, Maria (2007). “Konkurrierende Genauigkeitsmaße aus der Sicht des Anwenders”. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten : AVN* 7, pp. 136–146. ISSN: 0002-5968 (cit. on p. 49).
- Hirschmueller, H. (2005). “Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information”. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (cit. on p. 41).
- Homajnejad, N. and C. Rizos (2015). “Application of multiple Categories of unmanned Aircraft Systems (UAS) in different airspaces for Bushfire Monitoring and response”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4*, pp. 55–60. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-55-2015 (cit. on p. 19).
- Inkonova (2019). *Aerial Robotics for Underground Mines*. URL: <http://inkonova.se/> (cit. on p. 20).
- INTERGEO Press (2015). *INTERGEO positioniert UAS-Aussteller neu: Integrierte Themenplattform „INTERAERIAL SOLUTIONS“ und Zusammenarbeit mit dem Verband „UAV DACH“ vorgestellt*. URL: [https://www.interaerial-solutions.com/interaerial-solutions/presse-medien/downloads/pressemeldungen/pm\\_2015\\_04\\_23.php](https://www.interaerial-solutions.com/interaerial-solutions/presse-medien/downloads/pressemeldungen/pm_2015_04_23.php) (cit. on p. 7).
- Irschara, Arnold, Christopher Zach, and Horst Bischof (2007). “Towards wiki-based dense city modeling”. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (cit. on p. 35).
- Irschara, Arnold, Markus Rumpler, P. Meixner, T. Pock, and Horst Bischof (2012). “Efficient and Globally Optimal Multi View Dense Matching for Aerial Images”. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (cit. on p. 41).
- Ivanova, Radoslava, Finn Ouchterlony, and Peter Moser (2015). “Influence of distorted blast hole patterns on fragmentation as well as roughness of and blast damage behind remaining

- bench face in model scale blasting”. In: *Fragblast 11, 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Ed. by Alex Spathis et al. Vol. 7/2015, pp. 693–705. ISBN: 978 1 925100 32 7 (cit. on p. 89).
- James, Mike R. and Stuart Robson (2014). “Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks”. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 39.10, pp. 1413–1420. ISSN: 01979337. DOI: 10.1002/esp.3609 (cit. on pp. 60, 63, 70, 110, 121, 171).
- Javernick, L., J. Brasington, and B. Caruso (2014). “Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry”. In: *Geomorphology* 213, pp. 166–182. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.01.006 (cit. on p. 70).
- Kahmen, Heribert (2006). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. 20., völlig neu bearbeitete Aufl. De Gruyter Lehrbuch. Berlin: Walter de Gruyter. ISBN: 978-3-11-018464-8 (cit. on pp. 30, 43, 46, 78, 177).
- Kemper, G., B. Melykuti, and C. Yu (2016). “Calibration Procedures on oblique camera setups”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B1, pp. 205–209. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-205-2016 (cit. on p. 59).
- Kleine Zeitung (22.12.2017). “Als plötzlich eine Drohne vom Himmel fiel”. In: *Kleine Zeitung*. URL: [https://www.kleinezeitung.at/sport/wintersport/skialpin/5342938/Rueckblick\\_Als-ploetzlich-eine-Drohne-vom-Himmel-fiel](https://www.kleinezeitung.at/sport/wintersport/skialpin/5342938/Rueckblick_Als-ploetzlich-eine-Drohne-vom-Himmel-fiel) (cit. on pp. 14, 15).
- Kleppmann, Wilhelm (1998). *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. Praxisreihe Qualitätswissen. München: Hanser. ISBN: 3-446-19271-9 (cit. on pp. 73, 74, 83, 87).
- Klingbeil, Lasse, Christian Eling, and Heiner Kuhlmann (2016). “Zur Georeferenzierung von UAV-Bildflügen: Direkt oder indirekt, was braucht man dafür?”. In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 82/2016. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 119–134. ISBN: 978-3-95786-067-5 (cit. on p. 65).
- Kosmatin Fras, M., A. Kerin, M. Mesarič, V. Peterman, and D. Grigillo (2016). “Assesment of the Quality of Digital terrain Modell produced from unmanned aerial system imagery”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B1, pp. 893–899. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-893-2016 (cit. on pp. 53, 64).
- Kraus, Karl (1994). *Photogrammetrie*. 5. durchgesehene und erw. Aufl. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag. ISBN: 3-427-78645-5 (cit. on pp. 22–24, 28, 31–33, 64, 65, 69, 168, 170, 171, 173).
- Krause, Erik (2019). *Schärfentiefe-, Abbildungsmaßstab- und Nahlinsenrechner*. URL: <http://www.erik-krause.de/schaerfe.htm> (cit. on p. 96).

- Küng, O., Christoph Strecha, A. Beyeler, J.-C. Zufferey, D. Floreano, P. Fua, and F. Gervais (2011). “The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/C22*, pp. 125–130. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-125-2011 (cit. on p. 52).
- Labatut, P., J. P. Pons, and R. Keriven (2007). “Efficient Multi-View Reconstruction of Large-Scale Scenes using Interest Points, Delaunay Triangulation and Graph Cuts”. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (cit. on p. 41).
- Lehmann, Rüdiger (2019). *Tutorium : Hansensche Aufgabe*. URL: <http://www.in-dubio-pro-geo.de/index.php?file=tutorial/hansen> (cit. on p. 100).
- Lélégard, L., E. Delaygue, M. Brédif, and B. Vallet (2012). “Detecting and Correcting Motion Blur from Images shot with channel-dependent exposure time”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I-3*, pp. 341–346. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprsannals-I-3-341-2012 (cit. on p. 62).
- Lindstaedt, Maren and Thomas P. Kersten (2018). “Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge”. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 89/2018. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 81–104. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on pp. 67, 71, 79, 179).
- Lobnig, Katharina, Alexander Tscharf, and Gerhard Mayer (2015). “Einfluss der Georeferenzierung auf die absolute Rekonstruktionsgenauigkeit der photogrammetrischen UAV-gestützten Tagebauvermessung”. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 160.8, pp. 373–378. ISSN: 0005-8912. DOI: 10.1007/s00501-015-0388-8 (cit. on p. 66).
- Lösch, Robert, Steve Grehl, Marc Donner, Claudia Buhl, and Bernhard Jung (2018). “Design of an Autonomous Robot for Mapping, Navigation, and Manipulation in Underground Mines”. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, pp. 1407–1412. DOI: 10.1109/IROS.2018.8594190 (cit. on p. 21).
- Lowe, David G. (2004). “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”. In: *International Journal of Computer Vision* 60.2, pp. 91–110. ISSN: 0920-5691. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94 (cit. on pp. 27, 36, 170).
- Luhmann, Thomas (2018a). “Bildbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion - Möglichkeiten und Grenzen”. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 89/2018. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 31–46. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on pp. 9, 11, 55, 63, 64, 76, 104).
- Luhmann, Thomas (2018b). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen - Methoden - Beispiele*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin and Offenbach: Wichmann. ISBN: 9783879076406 (cit. on pp. 17, 18, 22, 24, 26, 28–32, 35, 64, 68, 69, 82, 91, 169, 171).

- Martinez-Camara, M., B. Béjar Haro, A. Stohl, and M. Vetterli (2014). “A robust method for inverse transport modelling of atmospheric emissions using blind outlier detection”. In: *Geoscientific Model Development Discussions* 7.3, pp. 3193–3217. DOI: 10.5194/gmdd-7-3193-2014 (cit. on p. 39).
- Maurer, Michael, Manuel Hofer, Friedrich Fraundorfer, and Horst Bischof (2018). “Automatische Inspektion von Hochspannungsleitungen durch UAV-basierte Bilddaten”. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 89/2018. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 139–156. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on p. 19).
- Mayr, W. (2011). “Unmanned aerial systems in use for mapping at blom”. In: *53rd Photogrammetric Week*, pp. 125–134 (cit. on p. 12).
- Montgomery, Douglas C. (2013). *Design and analysis of experiments*. International student version, eighth edition. [Singapore]: John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-1-118-09793-9 (cit. on pp. 73, 74, 87, 163).
- Moser, Peter, M. Wimmer, and Finn Ouchterlony (2008). “The fragment size distribution of Kiruna magnetite, from model-scale to run of the mine”. In: *5th International Conference and Exhibition on Mass Mining*. Luleå Univ. of Technology, pp. 691–703 (cit. on p. 89).
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden (De Gruyter Lehrbuch)*. De Gruyter. ISBN: 978-3-11-019055-7 (cit. on pp. 26, 30, 31, 39, 42–46, 78, 85).
- Nistér, D. (2003). “An efficient solution to the five-point relative pose problem”. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 195–202 (cit. on p. 38).
- Nistér, D. and H. Stewenius (2006). “Scalable Recognition with a Vocabulary Tree”. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2161–2168 (cit. on p. 38).
- Nocerino, Menna, Remondino, and Saleri (2013). “Accuracy and Block Deformation analysis in automatic UAV and terrestrial photogrammetry - lesson learnt”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-5/W1, pp. 203–208. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-203-2013 (cit. on pp. 52, 63).
- Peppas, M. V., J. P. Mills, P. Moore, P. E. Miller, and J. E. Chambers (2016). “Accuracy assessment of UAV-based landslide monitoring system”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B5, pp. 895–902. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-895-2016 (cit. on p. 53).
- Peterson, S., J. Lopez, and R. Munjy (2019). “Comparison of UAV imagery derived point cloud to terrestrial laser scanner point cloud”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* IV-2/W5, pp. 149–155. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-149-2019 (cit. on p. 54).

- Pfeifer, N., P. Glira, and Christian Briese (2012). “Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms”. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (cit. on p. 40).
- Pillai, Prashant, Kandeepan Sithamparanathan, Giovanni Giambene, Miguel Ángel Vázquez, Paul Daniel Mitchell, Manlio Bacco, Stefano Chessa, Marco Di Benedetto, Davide Fabbri, Michele Girolami, Alberto Gotta, Davide Moroni, Maria Antonietta Pascali, and Vincenzo Pellegrini, eds. (2018). *UAVs and UAV Swarms for Civilian Applications: Communications and Image Processing in the SCIADRO Project: Wireless and Satellite Systems*. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-76571-6 (cit. on p. 21).
- Pix4D S.A. (2019). *Pix4D*. URL: <https://www.pix4d.com/> (cit. on pp. 65, 77).
- Przybilla, Heinz-Jürgen (2016). “Unmanned Aerial Systems im Messeinsatz: Über die Systemkonfiguration zur Qualität des geodätischen Endprodukts”. In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 82/2016. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 85–96. ISBN: 978-3-95786-067-5 (cit. on pp. 53, 63).
- Przybilla, Heinz-Jürgen (2017). “Kameras für UAS - Eine Marktübersicht”. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 51–66. ISBN: 978-3-95786-107-8 (cit. on pp. 55, 56, 59).
- Przybilla, Heinz-Jürgen and Wilfried Wester-Ebbinghaus (1979). “Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug”. In: *Bildmessung und Luftbildwesen, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* 47.5, pp. 137–142 (cit. on pp. 5, 6).
- Przybilla, Heinz-Jürgen, Christian Reuber, Manfred Bäumker, and Markus Gerke (2015). “Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen”. In: *Bridging Scales - Skalenübergreifende Nah- und Fernerkundungsmethoden*. Ed. by Thomas P. Kersten. Hamburg (cit. on pp. 59, 63, 65, 66, 70).
- Raeva, P. L., S. L. Filipova, and D. G. Filipov (2016). “Volume Computation of a stockpile - a study case comparing GPS and UAV Measurements in an open pit quarry”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B1*, pp. 999–1004. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-999-2016 (cit. on p. 19).
- Rosnell, Tomi and Eija Honkavaara (2012). “Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 12.1, pp. 453–480. DOI: 10.3390/s120100453 (cit. on pp. 60, 63, 77, 121, 169).
- Rosten, Edward and Tom Drummond (2006). “Machine Learning for High-Speed Corner Detection”. In: *European Conference on Computer Vision*. Vol. 3951 (cit. on p. 36).

- Ruffer, Albrecht von and Simon Mondry (2018). “Fortstwirtschaft 4.0 - Inventur und Schädlingsfrüherkennung mit Drohne, Photogrammetrie und Multispektralanalyse”. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 89/2018. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 157–161. ISBN: 978-3-95786-146-7 (cit. on p. 19).
- Rumpler, Markus, Christof Hoppe, Andreas Wendel, Gerhard Mayer, and Horst Bischof (2013). “Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bilddatenerfassung und exakte, automatisierte Mehrbildauswertung.” In: *VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 101.2+3/2013, pp. 88–100 (cit. on pp. 1, 12–14).
- Rumpler, Markus, Shreyansh Daftry, Alexander Tscharf, Rudolf Prettenhaler, Christof Hoppe, Gerhard Mayer, and Horst Bischof (2014). “Automated End-to-End Workflow for Precise and Geo-accurate Reconstructions using Fiducial Markers”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-3, pp. 135–142. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprsannals-II-3-135-2014 (cit. on pp. 2, 35, 40, 52, 53, 64, 69, 81, 88, 92, 98, 104, 105, 123, 169).
- Rumpler, Markus, Alexander Tscharf, Christian Mostegel, Shreyansh Daftry, Christof Hoppe, Rudolf Prettenhaler, Friedrich Fraundorfer, Gerhard Mayer, and Horst Bischof (2016). “Evaluations on multi-scale camera networks for precise and geo-accurate reconstructions from aerial and terrestrial images with user guidance”. In: *Computer Vision and Image Understanding*. ISSN: 10773142. DOI: 10.1016/j.cviu.2016.04.008 (cit. on p. 12).
- Salach, Adam, Krzysztof Bakula, Magdalena Pilarska, Wojciech Ostrowski, Konrad Górski, and Zdzisław Kurczyński (2018). “Accuracy Assessment of Point Clouds from LiDAR and Dense Image Matching Acquired Using the UAV Platform for DTM Creation”. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7.9, p. 342. ISSN: 2220-9964. DOI: 10.3390/ijgi7090342 (cit. on p. 64).
- Sanz-Ablanedo, Enoc, Jim Chandler, José Rodríguez-Pérez, and Celestino Ordóñez (2018). “Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used”. In: *Remote Sensing* 10.10, p. 1606. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs10101606 (cit. on pp. 67, 68, 70).
- Schimek, Peter, Finn Ouchterlony, and Peter Moser (2015). “Influence of blasthole delay times on fragmentation as well as characteristics of and blast damage behind a remaining bench face through model-scale blasting”. In: *Fragblast 11, 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Ed. by Alex Spathis et al. Vol. 7/2015, pp. 257–265. ISBN: 978 1 925100 32 7 (cit. on p. 89).
- Schmechtig, Oliver (2017). “UAV in der Ingenieurvermessung - Anwendungen, Möglichkeiten und Erfahrungswerte aus der Praxis gesehen”. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 86/2017. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 95–110. ISBN: 978-3-95786-107-8 (cit. on p. 19).

- Shah, C. A. and W. Schickler (2012). “AUTOMATED BLUR DETECTION AND REMOVAL IN AIRBORNE IMAGING SYSTEMS USING IMU DATA Automated Blur Detection and Removal in airborne imaging systems using IMU Data”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1*, pp. 321–323. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-321-2012 (cit. on p. 62).
- Shay Hostens, Daniel (2019). “Determining the Effect of Mission Design and Point Cloud Filtering on the Quality and Accuracy of SfM Photogrammetric Products Derived from sUAS Imagery”. Master Thesis. The Graduate College of Missouri State University (cit. on p. 64).
- Sieberth, T., R. Wackrow, and J. H. Chandler (2015). “UAV image blur - it’s influence and ways to correct it”. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-1/W4*, pp. 33–39. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-33-2015 (cit. on pp. 61, 62).
- Siebertz, Karl, David van Bebber, and Thomas Hochkirchen (2010). *Statistische Versuchspaltung: Design of Experiments (DoE)*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-05493-8 (cit. on pp. 73, 74, 83, 86, 87, 163, 165, 166).
- Sivic, J. and Andrew Zisserman (2003). “Video google: A text retrieval approach to object matching in videos”. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1470–1477 (cit. on p. 38).
- Smith, Stephen M. and J. Michael Brady (1997). “SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing”. In: *International Journal of Computer Vision* 23.1, pp. 45–78. ISSN: 0920-5691. DOI: 10.1023/A:1007963824710 (cit. on p. 36).
- SPH Engineering (2019). *UgCS: Universal ground Control Software*. URL: <https://www.ugcs.com/> (cit. on p. 96).
- Strecha, Christoph (2017). “Photogrammetrische Auswertung von Drohnen-Bildflügen”. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 86/2017. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 85–94. ISBN: 978-3-95786-107-8 (cit. on pp. 53, 61, 62, 64).
- Strohmayr, Andreas (2017). “Unmanned Aerial Systems - Auslegung, Einsatzbereiche und operative Rahmenbedingungen”. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Ed. by DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Vol. 86/2017. Augsburg: Wißner-Verlag, pp. 27–44. ISBN: 978-3-95786-107-8 (cit. on p. 16).
- Triggs, B., P. McLauchlan, Richard Hartley, and A. Fitzgibbon (2000). “Bundle Adjustment - A Modern Synthesis”. In: *Vision Algorithms: Theory and Practice*, pp. 298–375 (cit. on p. 38).
- Tscharf, Alexander (2016). “Potentiale und Herausforderungen neuer Vermessungstechnologien im Bergbau – Der Einsatz unbemannter Flugkörper zur Erfassung von Geodaten”. In: *BHM*

*Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. ISSN: 0005-8912. DOI: 10.1007/s00501-016-0527-x (cit. on pp. 1, 6, 7, 10, 12–15, 20, 33, 64, 69, 76, 77).

Tscharf, Alexander (2018). “Stand der Technik in der Tagbauvermessung”. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 163.2, pp. 57–63. ISSN: 0005-8912. DOI: 10.1007/s00501-018-0700-5 (cit. on pp. 2, 13, 14, 19).

Tscharf, Alexander, Markus Rumpler, Friedrich Fraundorfer, Gerhard Mayer, and Horst Bischof (2015). “On the use of UAVs in Mining and Archaeology - Geo-accurate 3D Reconstructions using various platforms and terrestrial views”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-1/W1, pp. 15–22. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprsannals-II-1-W1-15-2015 (cit. on pp. 9, 33, 34, 40, 65, 98).

Tscharf, Alexander, Gerhard Mayer, Markus Rumpler, Friedrich Fraundorfer, and Horst Bischof (2016a). “Potentiale und Herausforderungen der UAV-Vermessung im Bergbau – Stand der Forschung und Ausblick”. In: *Markscheidewesen* 123.(2016), Nr.2-3, pp. 33–40 (cit. on pp. 80, 81).

Tscharf, Alexander, Markus Rumpler, Gerhard Mayer, Friedrich Fraundorfer, and Horst Bischof (2016b). “UAV Vermessung im Bergbau - Stand der Forschung und Ausblick”. In: *17. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 12. und 13. Mai 2016 in Freiberg*. Ed. by Anton Sroka. Vol. 2016-1. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, pp. 250–264. ISBN: 978-3-938390-17-7 (cit. on pp. 94, 96).

Tscharf, Alexander, Fabian Schenk, Gerhard Mayer, Friedrich Fraundorfer, and Horst Bischof (2018). “UAV-Anwendungen im Bergbau - Modellversuche als Beitrag zur photogrammetrischen Forschung und Entwicklung”. In: *Geokinematischer Tag in Freiberg*. Ed. by Dr.-Ing Jörg Benndorf. Geokinematischer Tag in Freiberg. Wilsdruff: mediartist, pp. 30–43. ISBN: 3938390212 (cit. on pp. 89, 97, 165).

Tscharf, Alexander, Robert Wenighofer, Lukas Stift, Gerhard Mayer, and Robert Galler (2019a). “Monitoring von Naturgefahren mittels UAV - Analysen zu Genauigkeit sowie automatischer Passpunktdetektion anhand ausgewählter Fallbeispiele”. In: *20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019*. Ed. by Klaus Hanke and Thomas Weinold. Berlin: Wichmann, H and Wichmann Verlag, pp. 219–221. ISBN: 3879076596 (cit. on pp. 81, 82).

Tscharf, Alexander, Fabian Schenk, Gerhard Mayer, Friedrich Fraundorfer, and Horst Bischof (2019b). “UAV-gestützte Vermessung im Bergbau: Abschätzung der Genauigkeit bei Verwendung von Structure from Motion”. In: *20. Geokinematischer Tag- Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg*. Ed. by Jörg Dr.-Ing. Benndorf. Geokinematischer Tag in Freiberg. Wilsdruff: mediartist, pp. 78–92. ISBN: 3938390239 (cit. on pp. 109, 110, 132, 164).

Tuttas, S., A. Braun, A. Borrmann, and U. Stilla (2016). “Evaluation of Acquisition strategies for image-based construction site monitoring”. In: *ISPRS - International Archives of the Pho-*

- togrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B5, pp. 733–740. ISSN: 2194-9034. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-733-2016 (cit. on p. 64).
- van Blyenburgh, Peter (1999). “UAVs: An overview”. In: *Air & Space Europe* 1.5-6, pp. 43–47. ISSN: 12900958. DOI: 10.1016/S1290-0958(00)88869-3 (cit. on pp. 5, 8, 12).
- van Blyenburgh, Peter (2018). *2018 RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems - The Global Perspective 2018*. 15th Annual edition. RPAS Yearbook. Paris, France: Blyenburgh & Co (cit. on pp. 8–10, 12, 16).
- Vautherin, Jonas, Simon Rutishauser, Klaus Schneider-Zapp, Hon Fai Choi, Venera Chovancova, Alexis Glass, and Christoph Strecha (2016). “Photogrammetric Accuracy and modeling of Rolling Shutter Cameras”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* III-3, pp. 139–146. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprsannals-III-3-139-2016 (cit. on pp. 61, 62).
- Verhoeven, G. J. J. (2010). “It’s all about the format – unleashing the power of RAW aerial photography”. In: *International Journal of Remote Sensing* 31.8, pp. 2009–2042. ISSN: 0143-1161. DOI: 10.1080/01431160902929271 (cit. on pp. 56, 57, 61).
- Vozikis, E. (1983). “Analytical Methods and Instruments for Mapping from Balloon Photography”. In: *The Photogrammetric Record* 11.61, pp. 83–92. ISSN: 0031868X. DOI: 10.1111/j.1477-9730.1983.tb00192.x (cit. on p. 7).
- Wackrow, Rene and Jim H. Chandler (2008). “A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model”. In: *The Photogrammetric Record* 23.121, pp. 6–18. ISSN: 0031868X. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2008.00467.x (cit. on pp. 60, 63, 171).
- Wackrow, Rene and Jim H. Chandler (2011). “Minimising systematic error surfaces in digital elevation models using oblique convergent imagery”. In: *The Photogrammetric Record* 26.133, pp. 16–31. ISSN: 0031868X. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2011.00623.x (cit. on pp. 60, 63).
- Wenninger, Helmut and Michael Wenninger (2019). “Erstellung von hochpräzisen 3D-Modellen aus Luftbildern mit Konsumerdrohnen (Leicht-UAV)”. In: *20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019*. Ed. by Klaus Hanke and Thomas Weinold. Berlin: Wichmann, H and Wichmann Verlag, pp. 232–241. ISBN: 3879076596 (cit. on pp. 61, 62).
- Wester-Ebbinghaus, Wilfried (1980). “Aerial Photography by radio controlled model helicopter”. In: *The Photogrammetric Record* 10.55, pp. 85–92. ISSN: 0031868X. DOI: 10.1111/j.1477-9730.1980.tb00006.x (cit. on p. 6).
- Wikipedia (2019). *Bildsensor*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bildsensor#/media/Datei:Sensorformate.svg> (cit. on p. 56).

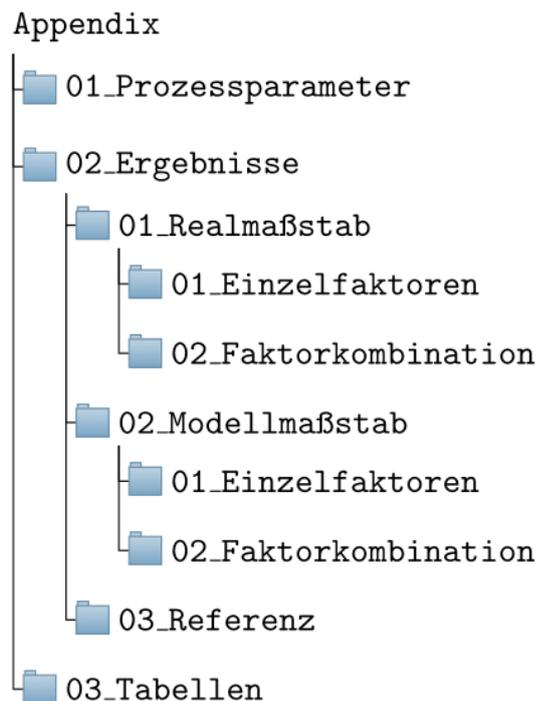
- Zeisl, Bernhard, Pierre Fite Georgel, Florian Schweiger, Eckehard Steinbach, and Nassir Navab (2009). “Estimation of Location Uncertainty for Scale Invariant Feature Points”. In: *British Machine Vision Conference (BMVC)*, pp. 57.1–57.12. DOI: 10.5244/C.23.57. URL: <http://www.bmva.org/bmvc/2009/index.htm> (cit. on pp. 36, 63, 71, 132, 170, 175, 178, 179).
- Zhang, Zhengyou (2000). “A flexible new technique for camera calibration”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* 22.11, pp. 1330–1334 (cit. on p. 35).
- Zhou, Y., E. Rupnik, C. Meynard, C. Thom, and M. Pierrot-Deseilligny (2019). “Simulation and Analysis of photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Camera Calibration Error”. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W5*, pp. 195–200. ISSN: 2194-9050. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-195-2019 (cit. on pp. 60, 88, 121).
- Zurhorst, A. and M. Zurhorst (2015). “Einsatz UAV-basierter Fotogrammetrie für Liegenschaftsvermessung”. In: *18. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2015*. Ed. by Klaus Hanke and Thomas Weinold. Berlin: Wichmann, H and Wichmann Verlag (cit. on p. 20).

# Anhang A

## Appendix

Der Anhang der vorliegenden Dissertation liegt dem gedruckten Exemplar in digitaler Form bei. Dabei handelt es sich vordergründig um PDF- bzw. MS EXCEL-Dokumente, die zum besseren Verständnis in den folgenden Abschnitten näher beschrieben sind.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und um das Auffinden der entsprechenden Files zu erleichtern ist in Abb. A.1 die Datenstruktur des digitalen Anhangs auch grafisch illustriert



**Abb. A.1 – Der digitaler Anhang der Arbeit umfasst eine Darstellung der gewählten Prozessparameter, die zur Evaluierung verwendeten Ergebnis- und Referenzdateien, sowie tabellarische und grafische Zusammenfassungen aller Versuchsergebnisse.**

Neben den im Folgenden näher beschriebenen Ergebnisdarstellungen bzw. Tabellen umfasst der digitale Anhang auch die Rohdaten, bzw. die für die Evaluierung verwendeten Ergebnis- und Referenzdateien, sowie eine detaillierte Zusammenfassung der gewählten Prozessparameter.

## A.1 Prozessparameter

Um den Einfluss der Auswertesoftware bzw. Routine auf die Ergebnisse auszuschließen, erfolgten alle Bildauswertungen unter Einhaltung definierter Prozessparameter (siehe Ordner 01\_Prozessparameter). Von besonderer Bedeutung sind hier vor allem:

- Die maximale Anzahl an Feature Punkten, die pro Bild verwendet bzw. gespeichert werden sollen.

*Gewählt: 5000*

- Die für die Korrespondenzanalyse verwendete Methode.

*Gewählt: "Brute-Force"*

- Das zulässige Verhältnis zwischen bestem und zweitbestem Match bei der Korrespondenzanalyse.

*Gewählt: 0,7*

- Die Anzahl an RANSAC Iterationen bei der geometrischen Verifikation.

*Gewählt: 5000*

- Die im Rahmen der Simultankalibrierung angewandte Methodik zur Schätzung der inneren Orientierung bzw. der Linsenverzeichnung.

*Gewählt: "adjust-group" mit "optimize-radial-distortion = 1"*

Eine detaillierte Auflistung aller gewählten Prozessparameter kann, der zum Aufruf alle notwendigen Pipeline-Teile verwendeten Datei `parameters_windows.cfg` entnommen werden.

## A.2 Ergebnisse

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen können im Ordner 02\Ergebnisse die "Rohdaten" zu den einzelnen Versuchsdurchläufen gefunden werden. Wie auch bereits im Textteil der vorliegenden Dissertation sind die Dateien wiederum nach Real- und Modellmaßstab bzw. auch nach Versuchen zu Einzelfaktoren bzw. Faktorkombination geordnet. Konkret existieren zu jedem Versuch 3 Ergebnisdateien, wobei in manchen Fällen noch zusätzliche Evaluierungsergebnisse vorliegen:

- *\*\_markers\_transformed.txt*

Beinhaltet die Koordinaten der Evaluierungspunkte wie sie sich aus den Bildmessungen des jeweiligen Versuchs ergeben

- *\*\_markers\_reconstructed\_2.txt*

Beinhaltet die "Marker Visibility", bzw. eine Auflistung welcher Marker in welchem Bild detektiert wurde.

- *\*\_Output.txt*

Beinhaltet das Ergebnis der räumlichen Ähnlichkeitstransformation in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem.

Ergänzend umfasst der Ordner “03\_Referenz“ noch die Koordinatenlisten der Referenzvermessung (`gcp_reference_*.txt`) und Listen, die die zur Transformation verwendeten Passpunkte (`transformation_point_ids_*.txt`) bzw. die zur Analyse der verschiedenen Betrachtungszonen herangezogenen Kontrollpunkte (`cp_ids_*.txt`) enthalten.

### A.3 Tabellen

Die im Ordner `03\Tabellen` abgelegten MS EXCEL-Dokumente beinhalten die Datengrundlage für die im Textteil dargestellten Abbildungen und Analysen. Sie enthalten die Ergebnisse der inneren und äußeren Genauigkeit, und verdeutlichen zusätzlich die Parameterstellung bei den einzelnen Versuchsdurchläufen. Neben den tabellarischen Zusammenfassungen zu den Einzelfaktoren existiert auch jeweils eine Datei zu den Ergebnissen der Faktorkombination (siehe `DoE\*\_evaluation\2019\Faktorkombination.xlsx`).