

BfG-1892

# Bericht



## **Erweiterte Echtzeit- und Postprocessing- Verfahren zur Optimierung der GNSS-Ortung in Abschattungsbereichen an BWaStr**

Annette Scheider, IIGS  
Aiham Hassan, IIGS  
Volker Schwieger, IIGS

Marc Breitenfeld, BfG  
Thomas Brüggemann, BfG

27.04.2016

Auftraggeber:	Bundesanstalt für Gewässerkunde
SAP-Nr.:	M39610504062
Anzahl der Seiten:	83
DOI:	10.5675/BfG-1892
URL:	<a href="http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1892.pdf">http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1892.pdf</a>



Hydros

Integriertes hydrographisches  
Ortungssystem

Bundesanstalt für  
Gewässerkunde

Referat M5  
Geodäsie

HydrOs

# Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation und Ziele der Kooperation .....	1
2	Auswertung in Echtzeit .....	3
2.1	Realisierung der Echtzeit .....	3
2.2	Evaluierung der Echtzeitergebnisse .....	4
2.2.1	Messprogramm .....	4
2.2.2	Bewertungskriterien .....	6
2.2.3	Evaluierung .....	6
2.3	Fazit .....	8
3	Weiterentwicklung des Ausreißermodells .....	9
3.1	Detektion von Unverträglichkeiten im Kalman-Filter .....	10
3.2	Ausreißertest bei Unverträglichkeiten im Kalman-Filter .....	10
3.3	Robuste Parameterschätzung .....	12
3.3.1	Robuste M-Schätzung .....	12
3.3.1.1	Zielfunktion, Verlustfunktion und Gewichtsfunktion .....	13
3.3.1.2	Methode der iterativen regewichteten kleinsten Quadrate .....	13
3.3.2	Wahl der Verlustfunktion .....	16
3.3.3	Problematik der Hebelpunkte und Modifizierung des IRKQ .....	18
3.3.3.1	Hebelpunkte .....	18
3.3.3.2	Modifizierung des IRKQ .....	18
3.3.3.3	Detektion der Hebelpunkte .....	19
3.3.3.4	Einfluss der Hebelpunkte am Beispiel einer Regressionsgerade .....	21
3.3.4	Robuste M-Schätzung innerhalb des Kalman-Filter .....	22
3.4	Ablauf und Implementierung des Ausreißermodells .....	23
3.5	Evaluierung des Ausreißermodells .....	24
3.5.1	Messprogramm und Bewertungskriterien .....	24
3.5.2	Evaluierung .....	25
3.5.2.1	Einzelne und mehrere Ausreißer in einer Beobachtung .....	25
3.5.2.2	Ausreißer in mehreren Beobachtungen .....	26
3.6	Fazit .....	27
4	Integration und Evaluierung weiterer Sensoren .....	29
4.1	Photogrammetrisches System (Kamera) .....	29
4.1.1	Messprinzip .....	29
4.1.2	Aufbau eines photogrammetrischen Messsystems .....	34
4.1.3	Beobachtungsmodell für die kamerabasierten Beobachtungen .....	40
4.2	Terrestrischer Laserscanner .....	41
4.2.1	Messprinzip bei kinematischen Messungen .....	41
4.2.2	Ansätze zur Positionsbestimmung .....	43
4.2.3	Verwendung von TLS-Daten zur Evaluierung des photogrammetrischen Messsystems .....	44
4.3	DGNSS-Empfänger .....	47
4.3.1	Messprinzip .....	47
4.3.2	Beobachtungsmodell für DGNSS-Beobachtungen .....	48
4.4	Evaluierung der Sensoren .....	49
4.4.1	Evaluierung des photogrammetrischen Systems .....	49

4.4.1.1	Messprogramm.....	49
4.4.1.2	Bestimmung der Kamerakordinaten im Schiffskoordinatensystem .....	51
4.4.1.3	Evaluierung des photogrammetrischen Messsystems .....	51
4.4.1.4	Vergleich der Kamerapositionen.....	56
4.4.1.5	Integration in die HydrOs-Software .....	61
4.4.1.6	Punktwolkenvergleich .....	69
4.4.2	Integration des DGNSS-Empfängers .....	76
4.5	SLAM Verfahren .....	76
4.6	Fazit.....	78
5	Zusammenfassung.....	81
6	Ausblick .....	83
Literaturverzeichnis.....		a
A	Marktrecherche – Photogrammetrisches Messsystem .....	i
A.1	Kamera .....	i
A.2	Software: Kamerasteuerung .....	v
A.3	Software: Photogrammetrische Auswertung.....	vi
B	Simulation der Bildaufnahme für unterschiedliche Kamerastellungen.....	vii
C	Objekte für den Punktwolkenvergleich.....	ix
D	Kurzanleitung: Agisoft PhotoScan.....	xi
E	Datenaufbereitung zur Integration der photogrammetrischen Daten in HydrOs .....	xxi

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematischer Ablauf der Echtzeitrealisierung.....	4
Abbildung 2-2: Zeitreihe der Ostabweichungen des Messzeitraums 1.....	7
Abbildung 2-3: Ausschnitt der Zeitreihe der Ostabweichungen des Messzeitraums 1.....	7
Abbildung 2-4: Zeitreihe der Höhenabweichungen des Messzeitraums 1.....	7
Abbildung 2-5: Histogramm der Zeitreihe der Höhenabweichungen des Messzeitraums 1.....	7
Abbildung 3-1: Verlustfunktion bzgl. der Kleinsten Quadrate Schätzung sowie des „Huber“-Schätzer.....	16
Abbildung 3-2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bzgl. der kleinsten Quadrate Schätzung sowie des <i>Huber</i> -Schätzers.....	17
Abbildung 3-3: Gewichtsfunktion bzgl. der kleinsten Quadrate Schätzung sowie des <i>Huber</i> -Schätzers.....	17
Abbildung 3-4: Regressionsgerade mit der Methode der kleinsten Quadrate und vertikalen Ausreißern.....	21
Abbildung 3-5: Regressionsgerade mit der Methode der M-Schätzung nach Huber und vertikalen Ausreißern.....	21
Abbildung 3-6: Regressionsgerade mit der Methode der M-Schätzung nach Huber und Ausreißern in Hebelpunkten.....	22
Abbildung 3-7: Regressionsgerade mit der Methode der M-Schätzung nach Huber erweitert um die Projektionsstatistik und Ausreißern in Hebelpunkten.....	22
Abbildung 3-8: Ablaufschema des Ausreißermodells.....	24
Abbildung 3-9: Globaltest des ausgewählten Fahrtabschnitts.....	25
Abbildung 3-10: Globaltest des ausgewählten Fahrtabschnitts mit generiertem Ausreißer.....	25
Abbildung 3-11: Detektion einzelner Ausreißer in einer Beobachtung mithilfe des Ausreißertests.....	25
Abbildung 3-12: Detektion einzelner Ausreißer in einer Beobachtung mithilfe der robusten Parameterschätzung.....	25
Abbildung 3-13: Detektion mehrerer Ausreißer (20 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe des Ausreißertests.....	26
Abbildung 3-14: Detektion mehrerer Ausreißer (20 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe der robusten Parameterschätzung.....	26
Abbildung 3-15: Detektion mehrerer Ausreißer (40 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe des Ausreißertests.....	26
Abbildung 3-16: Detektion mehrerer Ausreißer (40 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe der robusten Parameterschätzung.....	26
Abbildung 3-17: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung Heading mithilfe des Ausreißertests.....	27
Abbildung 3-18: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung Heading mithilfe der robusten Parameterschätzung.....	27
Abbildung 3-19: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung ell. Höhe mithilfe des Ausreißertests.....	27
Abbildung 3-20: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung ell. Höhe mithilfe der robusten Parameterschätzung.....	27
Abbildung 4-1: Koordinatensystem einer Kamera.....	31

Abbildung 4-2: Ausschnitt der in Agisoft PhotoScan detektierten Features zur Verknüpfung der einzelnen Bilder .....	33
Abbildung 4-3: Kamera mit Adapter .....	38
Abbildung 4-4: Kamera mit Verkabelung und Spritzwasserschutz .....	38
Abbildung 4-5: Beispiele für Zielzeichen für die photogrammetrische Auswertung .....	39
Abbildung 4-6: Helixförmiges Punktmuster bei einer kinematischen Aufnahme mit einem Profilschanner .....	42
Abbildung 4-7: Erzeugung eines virtuellen Punkts $P_i$ durch Reflektion des Laserstrahls.	43
Abbildung 4-8: Messgebiet – Rhein bei Duisburg-Homberg .....	50
Abbildung 4-9: Betrachtung der Plausibilität im lokalen Koordinatensystem.....	52
Abbildung 4-10: Verknüpfungslinien (Matches) zwischen den Bildern DSC_0739 (oben) und DSC_0744 (unten) bei Fahrtabschnitt Tal 1; (a) ohne Masken, (b) mit Masken .....	56
Abbildung 4-11: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrtabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung mithilfe bekannter Kamerapositionen.....	58
Abbildung 4-12: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrtabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung über natürliche Zielpunkte .....	59
Abbildung 4-13: Vergleich von $U_{Kamera,k}^{UTM}$ für Fahrtabschnitt Berg 2 bei einer Georeferenzierung über natürliche Zielpunkte.....	59
Abbildung 4-14: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrtabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung über Zielmarken.....	59
Abbildung 4-15: Vergleich von $U_{Kamera,k}^{UTM}$ für Fahrtabschnitt Berg 2 bei einer Georeferenzierung über Zielmarken .....	59
Abbildung 4-16: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrtabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung über Zielmarken und bekannte Kamerapositionen .....	60
Abbildung 4-17: Vergleich von $U_{Kamera,k}^{UTM}$ für Fahrtabschnitt Berg 2 bei einer Georeferenzierung über Zielmarken und bekannte Kamerapositionen.....	60
Abbildung 4-18: Distanz zwischen zwei Kamerapositionen zur Epoche $k$ und $k+1$ (Ausschnitt aus Fahrtabschnitt Berg 2, 23.11.2015) .....	60
Abbildung 4-19: Differenz zwischen den jeweiligen Distanzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kamerapositionen.....	60
Abbildung 4-20: Ellipsoidische Höhen für Fahrtabschnitt Tal 1 (23.11.15), Szenario A-3; transformierte Messgrößen und EKF-Lösung.....	66
Abbildung 4-21: Ellipsoidische Höhen für Fahrtabschnitt Tal 1, Szenario B; transformierte Messgrößen und EKF-Lösung .....	67
Abbildung 4-22: Koordinatenoffsets zwischen der EKF-Lösung und der transformierten GNSS-Messdaten nach der GNSS-Lücke (Berg 2).....	68
Abbildung 4-23: Foto der Brücke, aufgenommen während des Fahrtabschnitts Tal 1 .....	69
Abbildung 4-24: Foto der Brücke, aufgenommen während des Fahrtabschnitts Berg2 ....	69
Abbildung 4-25: Verteilung der Scannerpositionen im Messgebiet .....	70
Abbildung 4-26: Mögliche Konfigurationen zur Anbringung von terrestrischen Laserscannern auf einem Vermessungsschiff .....	78
Abbildung C-1: Untersuchte Objekte am Rheinufer im Bereich Duisburg-Homberg .....	ix
Abbildung C-2: Untersuchte Objekte im Bereich der Hafeneinfahrt / Ruhrmündung .....	x

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Mittelwerte der Zeitreihen der Abweichungen.....	8
Tabelle 3-1: <i>Huber</i> -Konstante im Vergleich zum Ausreißeranteil nach Huber (1981) .....	17
Tabelle 4-1: Vergleich der Vor- und Nachteile von Industrie- und Spiegelreflexkameras .....	35
Tabelle 4-2: Fahrtabschnitte am 23. und 24. November 2015 .....	49
Tabelle 4-3: Kritische Szenarien für die photogrammetrische Auswertung .....	50
Tabelle 4-4: Kamerakoordinaten im Schiffskoordinatensystem (23. und 24.11.2015) .....	51
Tabelle 4-5: Plausibilisierungsmerkmale zur Evaluierung der Ergebnisse aus Agisoft PhotoScan (photogrammetrisches Messsystem) .....	53
Tabelle 4-5: Ergebnisse Plausibilitätsüberprüfung für die Auswertung im lokalen Koordinatensystem.....	54
Tabelle 4-6: Dauer der simulierten Lücken im Datensatz Tal 1 und Berg 2.....	57
Tabelle 4-7: Standardabweichungen der Beobachtungsgrößen Kamerakoordinaten.....	62
Tabelle 4-8: Auswertung des Fahrtabschnitt Berg 2 – Abschnitt (A) mit unterschiedlich langen simulierten Lücken für die Mercator-Konfiguration und für die erweiterte Konfiguration im Vergleich zum Soll-Wert .....	63
Tabelle 4-9: Auswertung des Fahrtabschnitt Berg 2 für Lücke A-3 mit der erweiterten Konfiguration im Vergleich zum Soll-Wert .....	65
Tabelle 4-10: Auswertung des Fahrtabschnitts Tal 1 – Abschnitt (A) mit unterschiedlich langen simulierten Lücken für die Mercator-Konfiguration und für die erweiterte Konfiguration im Vergleich zum Soll-Wert .....	65
Tabelle 4-11: Offset zwischen EKF-Lösung und den transformierten GNSS-Koordinaten (GNSS Position 1) am Ende der GNSS-Lücke – Fall B (Tal 1) .....	67
Tabelle 4-12: Offset zwischen EKF-Lösung und den transformierten GNSS-Koordinaten (GNSS Position 1) am Ende der GNSS-Lücke – Fall B (Berg 2).....	68
Tabelle 4-13: Scanregistrierung mit RiSCAN PRO.....	70
Tabelle 4-14: Ergebnisse des Punktwolkenvergleichs (zwischen TLS und Photoscan, georeferenziert mittels Kamerapositionen).....	71
Tabelle 4-15: Vergleich der Strecken zwischen den Punkten in den beiden Punktwolken .....	73
Tabelle 4-16: Ergebnisse des Punktwolkenvergleichs (zwischen TLS und PhotoScan, georeferenziert mittels Passpunkte (Zielzeichen) am Ufer).....	74
Tabelle 4-17: Ergebnisse des Punktwolkenvergleichs (zwischen TLS und PhotoScan, georeferenziert mittels bekannter Kamerapositionen und Passpunkte (Zielzeichen) am Ufer).....	75
Tabelle B-1: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme eines ebenen Objekts, $\omega = 90^\circ, \varphi = 5^\circ, \kappa = 0^\circ$ .....	vii
Tabelle B-2: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme einer Uferböschung, $\omega = 90^\circ, \varphi = 5^\circ, \kappa = 0^\circ$ .....	viii
Tabelle B-3: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme eines ebenen Objekts, $\omega = 85^\circ, \varphi = 10^\circ, \kappa = 0^\circ$ .....	viii
Tabelle B-4: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme einer Uferböschung, $\omega = 85^\circ, \varphi = 10^\circ, \kappa = 0^\circ$ .....	viii





# Algorithmenverzeichnis

Algorithmus 3.3-1: IRKQ mit gegebenen Skalierungsfaktor	14
Algorithmus 3.3-2: IRKQ mit unbekannten Skalierungsfaktor und Kovarianzmatrix	15
Algorithmus 3.3-3: modifizierter IRKQ	19



# Abkürzungsverzeichnis

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BB	Backbord
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BWaStr	Bundeswasserstraße
CCD	Charge-coupled device
CHDK	Canon Hacker Development Kit
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor (sich ergänzender Metalloxid-Halbleiter)
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DGPS	Differential Global Positioning System
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoG	Difference-of-Gaussian (Filter)
DVL	Doppler Velocity Log
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed
EKF	Erweitertes Kalman-Filter
ENU	East-North-Up
Exif	Exchange Image File Format
FAST	Features from IXccelerated segment test
GigE	Gigabit Ethernet
GLONASS	Global'naja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRS80	Geodätisches Referenzsystem 1980
GSM	Global System for Mobile Communication
HydrOs	Hydrographisches Ortungssystem
ICP	Iterative Closest Point Algorithmus
IIGS	Institut für Ingenieurgeodäsie Stuttgart
IMO	International Maritime Organisation
IMU	Inertial Measurement Unit
IRKQ	Iterative regelgewichtete kleinste Quadrate
IT	Informationstechnologie
JEITA	Japan Electronics and Information Technology Industries Association
KF	Kalman-Filter
LL	Local Level
LoG	Laplacian-of-Gaussian (Filter)
MAD	Median Absolute Deviation
NMEA	National Marine Electronics Association
OEM	Erstausrüster (Original Equipment Manufacturer)
PDGNSS	Precise Differential Global Navigation Satellite System
QI	Quality Indicator
RANSAC	Random Sample Consensus
RMS	Root Mean Square
RP	Referenzpunkt

RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SB	Steuerbord
SDK	Software Development Kit
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SLAM	Simultaneous Location and Mapping
SP	Sensorpunkt
SURF	Speeded Up Robust Features
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTC	Universal Coordinated Time
UTM	Universal Transverse Mercator
V-SLAM	Visual SLAM
WGS84	World Geodetic System 1984
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasser- und Schifffahrtverwaltung des Bundes

# 1 Ausgangssituation und Ziele der Kooperation

Die **Ausgangssituation dieses Vorhabens** lässt sich sehr gut mit den Ergebnissen des Vorgängerprojekts, welches von April 2012 bis Mai 2015 in Kooperation zwischen der BfG und dem Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart (IIGS) umgesetzt wurde, beschreiben. Aus diesem Grunde folgen die nächsten Zeilen in Auszügen dem damaligen Abschlussbericht (Breitenfeld et al., 2015).

Die im Zuge des damaligen Projekts entstandene Software HydOs ist ein funktionsfähiger Prototyp, mit dem deutlich bessere Ortungsergebnisse erzielt werden können, als mit der bisher eingesetzten Technik. Das entwickelte Multisensorsystem enthält zurzeit die folgenden Sensoren und zusätzlichen Informationen:

- Inertiale Messeinheit (IMU)
- bis zu zwei Kompass
- bis zu vier GNSS-Empfänger,
- Doppler-Velocity-Log (Geschwindigkeit über Grund und relative Geschwindigkeit),
- Schraubendrehzahl des Schiffsantriebs,
- Wasserspiegellage- und Squatmodell.

Des Weiteren sind folgende Sensoren im Prototyp implementiert, die jedoch zum jetzigen Zeitpunkt keine Verbesserung des Systems liefern:

- Motorisiertes, zielverfolgendes Tachymeter an Bord („Inverses Tachymeter“),
- digitales Barometer,
- Stellung der Schiffsschrauben,
- Windmesser.

Die Positionsschätzung gelingt mit Hilfe eines *Erweiterten Kalman-Filters*, der unterschiedliche situationsangepasste 3D-Prädiktionsmodelle für das Vermessungsschiff umfasst. Die wechselnde Dynamik der Schiffsbewegungen kann durch adaptive Anpassung des Störrauschens berücksichtigt werden. Weiterhin wurde eine empirische Squat-Funktion ermittelt und die Nutzung von Wasserspiegellagenmodellen integriert. Die anspruchsvollste Anforderung des Projekts, bei vollständigem Ausfall von GNSS mit 95 % Sicherheitswahrscheinlichkeit über einen Zeitraum von bis zu 60 Sekunden die Lage-Ortungsunsicherheit von maximal 30 cm in beiden Koordinatenkomponenten und die Höhenmessunsicherheit von maximal 10 cm einzuhalten, konnte im Postprocessing erfüllt werden.

Die statistische Auswertung der im Zuge des Verfahrens erhobenen Messdaten zeigt eindeutig, dass in der Praxis GNSS-Ausfälle auch außerhalb von abgeschatteten Bereichen weit häufiger vorkommen, als dies bisher bekannt war (bis zu 8 %). Mit HydOs werden aktuell bereits kleinere Sensorfehler mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit automatisch erkannt und durch das genauere Filterergebnis ersetzt. In nicht empfangskritischen Bereichen wird eine 100 %ige Verfügbarkeit der Ortung mit geprüfter und ausreichender Qualität erreicht. Bisher führten Abschattungsbereiche zum Systemausfall. Mit HydOs wird

unter der Voraussetzung, dass die GNSS-Lücken kleiner als 60 Sekunden sind, auch hier die Verfügbarkeit auf 100 % gesteigert.

Die **Ziele dieser Kooperation**, die direkt im Anschluss an das vorherige Vorhaben begann und Ende März 2016 abgeschlossen wurde, werden im Folgenden aufgeführt.

Bei dem bisher entwickelten Multisensorsystem können, wie oben aufgeführt, nur GNSS-Lücken von bis zu 60 Sekunden zuverlässig mit geeigneter Genauigkeit überbrückt werden. In dieser Kooperation soll daher untersucht werden, in wie weit durch verbesserte robuste Schätzmethode und die Integration weiterer Sensoren eine Verlängerung der GNSS-Überbrückung erreicht werden kann. Im Einzelnen sind für die folgenden Themenbereiche Untersuchungen notwendig:

- Verbesserung der Erkennung von Ausreißern durch robuste Verfahren, insbesondere vor GNSS-Lücken, um stabile Anfangsbedingungen für die Lücken-Überbrückung zu generieren.
- Integration weiterer Sensoren wie photogrammetrische Systeme und DGNSS Empfänger. Erreicht werden soll hiermit eine zuverlässigere und genauere Lösung für GNSS-Ausfälle von mehr als 60 Sekunden.
- Vergleichend sollen Terrestrische Laserscanner herangezogen werden.

Als Projektergebnis wird ein auf dem ursprünglichen Vorhaben aufbauender funktionsfähiger Prototyp erwartet, der um robuste Ausreißererkennung und einen integrierten DGNSS-Empfänger erweitert ist. Zusätzlich sollen verlässliche Aussagen vorliegen, ob ein um ein photogrammetrisches System erweitertes System die Zuverlässigkeit und Genauigkeit innerhalb von GNSS-Lücken größer 60 Sekunden steigert. Die bisher noch nicht integrierten Sensoren

- DGNSS Empfänger und
- photogrammetrisches System

sind in die Systemgleichungen des EKF zu integrieren. Dabei soll das photogrammetrische System als zusätzlicher Positionssensor genutzt werden. Die automatisch berechneten Kamerahauptpunkte sollen zur Stützung herangezogen werden. Die Informationen des DGNSS Empfängers, dessen Koordinaten durch Verwendung eines unabhängigen Korrekturdienstes ausgewertet werden, sollen gleichfalls zur Überbrückung von Lücken, die aufgrund fehlender PDGNSS Korrekturdaten entstehen, genutzt werden. Ein am IIGS verfügbarer Impulslaserscanner soll gleichfalls vergleichend zum photogrammetrischen System auf mögliche Integration hin überprüft werden, bzw. als Referenzsystem für die Untersuchung der Genauigkeit des photogrammetrischen Systems dienen.

Zum Abschluss der Kooperation sollen Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Integration der zusätzlichen Sensoren und Messsysteme sowie der robusten Ausreißerelimination abgeleitet werden.

## 2 Auswertung in Echtzeit

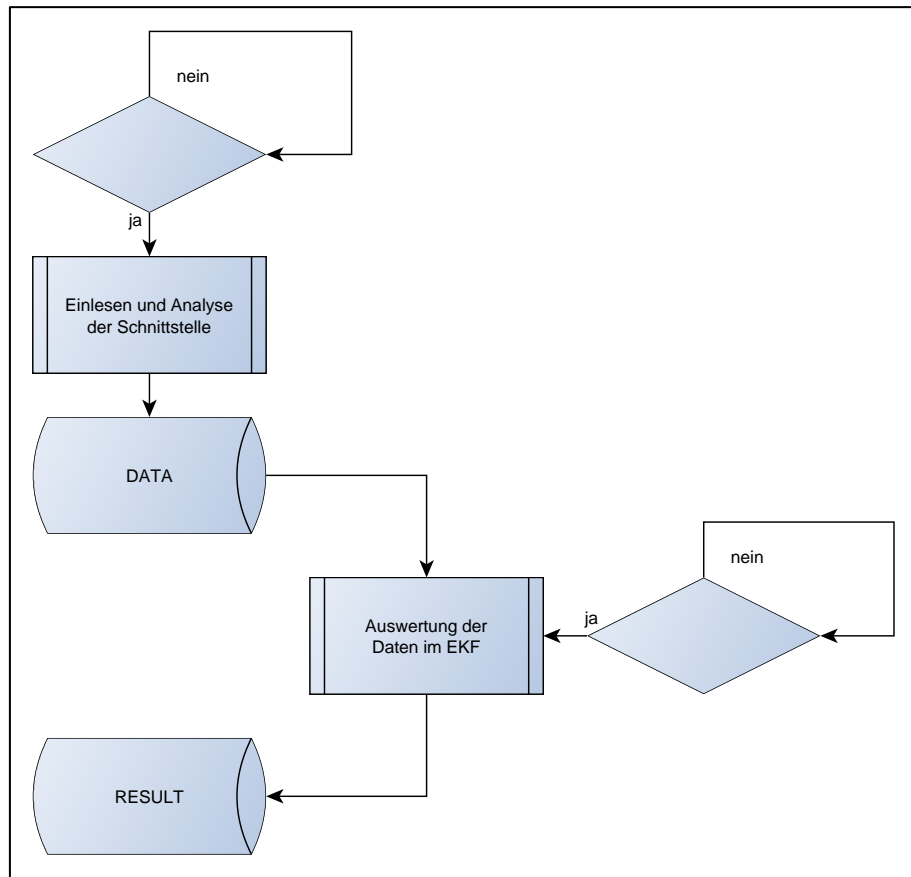
Die meisten in Breitenfeld et al. (2015) erprobten Methoden und Algorithmen können bei der entsprechenden IT-technischen Umsetzung für eine Echtzeit- sowie eine Postprocessing-Auswertung genutzt werden. Ausgenommen ist der Glättungsalgorithmus, der nur im Postprocessing genutzt werden kann.

Da in Breitenfeld et al. (2015) die Umsetzung und Evaluierung der Methoden und Algorithmen in Echtzeit aus zeitlichen Gründen nicht durchgeführt werden konnte, wird in den folgenden Abschnitten die Realisierung der Echtzeit-Auswertung beschrieben und untersucht.

### 2.1 Realisierung der Echtzeit

Die Auswertesoftware für Echtzeit und Postprocessing ist innerhalb dieser Arbeit in der Entwicklungsumgebung MATLAB realisiert. Das Vorgehen dieser Realisierung in Bezug auf die Echtzeitanwendung soll im Folgenden skizziert werden.

Die in Breitenfeld et al. (2015) aufgeführten möglichen Sensoren innerhalb des hydrographischen Ortungssystems (HydrOs) kommunizieren mittels serieller Schnittstellen mit der Rechnerhardware. Das Auslesen der seriellen Schnittstellen geschieht eventgesteuert. Dies bedeutet, dass der Prozess des Auslesens und Analysierens der Daten nur dann ausgeführt wird, wenn Daten an der Schnittstelle anliegen. Als Event wird hier ein frei wählbarer Terminator genutzt, der das Ende eines Datenstrings signalisiert. Für die Echtzeitanwendung werden die eingelesenen und analysierten Daten in einer Variablen fester Größe abgespeichert, damit der benötigte Arbeitsspeicher nicht kontinuierlich anwächst. Beim Überschreiten der allozierten Größe der Variablen werden ältere Beobachtungsdaten verworfen und durch neue ersetzt. Um die gesamten Beobachtungen zu sammeln und im Postprocessing auswerten zu können, kann der Nutzer die Speicherung der originalen und analysierten Daten der Schnittstellen in Dateien auf der Festplatte veranlassen.



**Abbildung 2-1: Schematischer Ablauf der Echtzeitrealisierung**

Die Auswertung der eingehenden Beobachtungsdaten geschieht innerhalb der Software ebenfalls eventgesteuert. Hierzu wird ein Timer initialisiert, der den Auswerteprozess für jede Epoche  $k$  ausführt. Der Abstand  $\Delta t$  zwischen den Epochen wird vom Nutzer vorgegeben. Innerhalb dieses Auswerteprozesses wird mit Hilfe der Beobachtungsdaten der Schnittstellen ein Beobachtungsvektor erzeugt, in dem die Daten auf den Zeitpunkt der Auswertung extrapoliert werden. Somit steht in jeder Epoche  $k$  ein Beobachtungsvektor  $\mathbf{I}_k$  zur Verfügung, der mit Hilfe des Extended Kalman-Filters (EKF) ausgewertet werden kann. Die Ergebnisse der Auswertung werden wiederum in eine Variable fester Größe abgelegt, um den Arbeitsspeicher nicht stetig anwachsen zu lassen. Beim Überschreiten der maximalen Variablengröße werden ältere Ergebnisse durch neuere ersetzt. Zur kontinuierlichen Weitergabe der Ergebnisse kann der Nutzer eine Ausgangsschnittstelle konfigurieren, an der frei wählbare Ergebnisdaten ausgesendet werden.

## 2.2 Evaluierung der Echtzeitergebnisse

### 2.2.1 Messprogramm

Für die Evaluierung der Echtzeitauswertung wurden im November 2015 mehrere längere Messfahrten bzw. Fahrabschnitte mit dem Messschiff „Mercator“ des WSA Duisburg-Rhein durchgeführt. Bei dem Vermessungsschiff handelt es sich um ein Schiff nach Katamaranbauart, d. h. es besteht aus zwei Rümpfen, die fest miteinander verbunden sind und für eine ruhige Schiffs-lage im Wasser sorgen. Als Antrieb dienen der Mercator zwei sogenannte Ruderpropeller.



Das Messgebiet befindet sich auf dem Rhein zwischen Flusskilometer 783,5 und 789,2 in der Stadt Duisburg zwischen den Stadtteilen Baerl und Meiderich. Es wurden drei Messzeiträume mit verschiedenen Konfigurationen durchgeführt:

**a) Messzeitraum 1:**

Der erste Messzeitraum mit mehreren Berg- und Talfahrten wurde am 25.11.2015 zwischen Rhein-Kilometer 783,7 und 786,5 zwischen 08:00 Uhr und 09:00 Uhr durchgeführt. Als Auswertefrequenz wurde 10 Hz gewählt. Folgende Sensoren und Beobachtungen werden innerhalb der Auswertung genutzt:

- 1x GNSS Empfänger: Länge, Breite, ell. Höhe
- 1x IMU: Roll, Pitch, Heading, Roll-, Pitch-, Headinggeschwindigkeit, Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit, Heave
- 1x Kompass: Heading
- 1x DVL: Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit, rel. Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit

**b) Messzeitraum 2:**

Der zweite Messzeitraum mit mehreren Berg- und Talfahrten wurde am 25.11.2015 zwischen Rhein-Kilometer 783,5 und 786,5 zwischen 09:30 Uhr und 11:15 Uhr durchgeführt. Die Auswertefrequenz betrug 2 Hz. Folgende Sensoren und Beobachtungen werden innerhalb der Auswertung genutzt:

- 3x GNSS Empfänger: Länge, Breite, ell. Höhe
- 1x IMU: Roll, Pitch, Heading, Roll-, Pitch-, Headinggeschwindigkeit, Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit, Heave
- 1x Kompass: Heading
- 1x DVL: Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit, rel. Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit

**c) Messzeitraum 3:**

Der dritte und letzte Fahrtabschnitt mit mehreren Berg- und Talfahrten wurde am 26.11.2015 zwischen Rhein-Kilometer 783,7 und 786,5 zwischen 08:00 Uhr und 09:00 Uhr durchgeführt. Als Auswertefrequenz wurde ebenfalls 2 Hz gewählt. Folgende Sensoren und Beobachtungen werden innerhalb der Auswertung genutzt:

- 3x GNSS Empfänger: Länge, Breite, ell. Höhe
- 1x IMU: Roll, Pitch, Heading, Roll-, Pitch-, Headinggeschwindigkeit, Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit, Heave
- 1x Kompass: Heading
- 1x DVL: Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit, rel. Längs-, Quer-, Vertikalgeschwindigkeit
- 2x Antrieb: Drehzahl zur Ableitung rel. Längsgeschwindigkeit

Während der Messzeiträume wurden die Sensordaten aufgezeichnet und in Echtzeit ausgewertet. Die in Echtzeit ausgewertete Position wurde über eine serielle Ausgangsschnittstelle ausgegeben und an einem anderen Rechner mit Hilfe eines einfachen Terminalpro-

gramms aufgezeichnet. Somit kann ein Vergleich zwischen der in Echtzeit prozessierten und der in Postprocessing berechneten Trajektorie durchgeführt werden.

### 2.2.2 Bewertungskriterien

Zur Beurteilung der in Echtzeit ausgewerteten Schiffstrajektorie können Abweichungen zwischen den Positionen und Höhen der in Echtzeit geschätzten Trajektorie (Ist) und den Positionen und Höhen einer Referenztrajektorie (Soll) berechnet werden. Als Solltrajektorie dient die im Postprocessing ausgewertete Schiffstrajektorie. Dabei werden die gleichen Einstellungen und Stochastiken wie bei der Echtzeitauswertung vorgenommen.

Liegen die Positionen als Ostwert  $E_k$ , Nordwert  $N_k$  sowie als ellipsoidische Höhe  $h_k$  in jeder Epoche  $k$  für die Echtzeit- und Postprocessingtrajektorie vor, so können folgende Differenzen in jeder Epoche gebildet werden.

$$\begin{aligned}dE_k &= E_{post,k} - E_{real,k} \\dN_k &= N_{post,k} - N_{real,k} \\dh_k &= h_{post,k} - h_{real,k}\end{aligned}\tag{2.2-1}$$

Die Echtzeitauswertung startet zu einem beliebigen Zeitpunkt, wohingegen in der Postprocessingauswertung eine Zeitachse mit vorgegebener Startzeit in Sekundenauflösung generiert wird. Aufgrund dessen haben die Echtzeit- und Postprocessinglösung verschiedene Zeitskalen und die Solltrajektorie wird auf die Zeitpunkte der Isttrajektorie interpoliert.

Die Zeitreihen der Abweichungen der verschiedenen Messzeiträume werden dann zur Analyse der Echtzeitauswertung herangezogen. Die Abweichungen können in einem Histogramm aufgetragen werden und bei entsprechender Verteilung kann dann der Mittelwert der Zeitreihe berechnet werden. Die Zeitreihe läuft dabei über alle Epochen bis zur Epoche  $J$ .

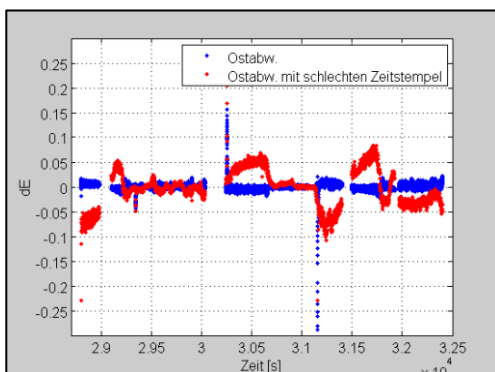
$$\begin{aligned}\overline{dE} &= \sum_{k=1}^J dE_k \\ \overline{dN} &= \sum_{k=1}^J dN_k \\ \overline{dh} &= \sum_{k=1}^J dh_k\end{aligned}\tag{2.2-2}$$

### 2.2.3 Evaluierung

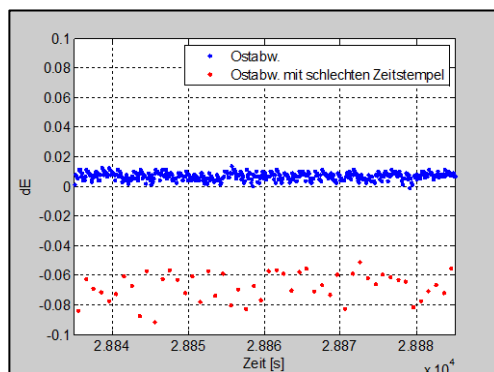
Während der Evaluierung werden alle vorhandenen GNSS-Abschattungsbereiche nicht berücksichtigt, da während der Echtzeitauswertung keine Positionsplausibilisierung durchgeführt werden kann.

Bei der Untersuchung der Zeitstempel der Echtzeitauswertung wurde festgestellt, dass die Zeitdifferenzen zwischen den Epochen nicht in jeder Epoche genau dem eingestellten  $\Delta t$

entsprechen. Dies ist eindeutig in den Differenzen erkennbar. In Abbildung 2-2 sind die Abweichungen in der Ostkomponente des ersten Messzeitraums gegen die Zeit aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass einige Abweichungen eher systematischen Charakter aufweisen (rot markierte Abweichungen). Genau in diesen Epochen entspricht die Differenz zur Vorepoche nicht dem eingestellten  $\Delta t$  von 0,1 Sekunden. In Abbildung 2-3 ist ein Ausschnitt des beschriebenen Sachverhalts aus Abbildung 2-2 dargestellt. Man erkennt, dass fehlerhafte Zeitstempel nicht in mehreren Epochen hintereinander sondern in regelmäßigen Abständen auftreten.

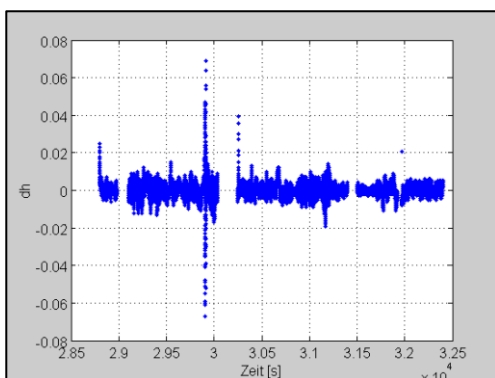


**Abbildung 2-2: Zeitreihe der Ostabweichungen des Messzeitraums 1**

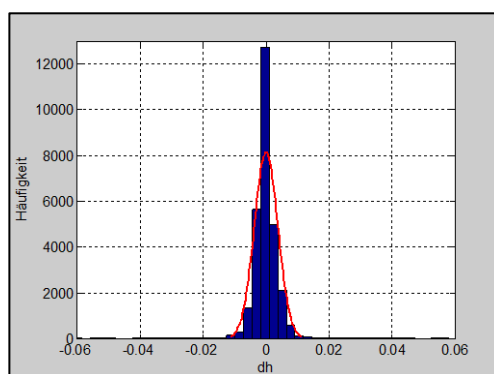


**Abbildung 2-3: Ausschnitt der Zeitreihe der Ostabweichungen des Messzeitraums 1**

Innerhalb des ersten Messzeitraums mit einer Auswertefrequenz von 10 Hz besitzen ca. 10 % der Daten einen fehlerhaften Zeitstempel. In den Messzeiträumen zwei und drei (2 Hz Auswertung) ist dieser Prozentsatz etwas geringer (Messzeitraum 2: ca. 6 %, Messzeitraum 3: ca. 2 %). Die Ursache dieser fehlerhaften Zeitstempelung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt unbekannt. Eine mögliche Ursache ist evtl. die gewählte Entwicklungsumgebung MATLAB, die für Echtzeitanwendungen nur eingeschränkt geeignet ist. Im weiteren Verlauf dieser Analyse werden die Differenzen mit fehlerhaften Zeitstempeln nicht mit betrachtet.



**Abbildung 2-4: Zeitreihe der Höhenabweichungen des Messzeitraums 1**



**Abbildung 2-5: Histogramm der Zeitreihe der Höhenabweichungen des Messzeitraums 1**

In Abbildung 2-4 sind die Abweichungen der ellipsoidischen Höhen zwischen der Post-processinglösung und der Echtzeitauswertung des ersten Messzeitraums gegen die Zeit

aufgetragen. Die Abweichungen enthalten keine Daten mit fehlerhaften Zeitstempeln und sind in Abbildung 2-5 in einem Histogramm aufgetragen.

Anhand der Verteilung der Häufigkeiten der Abweichungen erkennt man, dass die Abweichungen einer Normalverteilung mit Erwartungswert Null folgen. Dies trifft auf die anderen Komponenten und Messzeiträume ebenfalls zu. Daher werden im Folgenden die Mittelwerte der Zeitreihen der einzelnen Komponenten des jeweiligen Messzeitraums betrachtet. Die berechneten Mittelwerte sind in Tabelle 2-1 eingetragen.

**Tabelle 2-1: Mittelwerte der Zeitreihen der Abweichungen**

	Messzeitraum 1	Messzeitraum 2	Messzeitraum 3
$\overline{dE}$ [m]	-0,000136	-0,000386	-0,001027
$\overline{dN}$ [m]	-0,001291	0,000042	-0,000572
$\overline{dh}$ [m]	0,000018	-0,000538	-0,000844

In allen Komponenten jedes Messzeitraums beträgt die mittlere Abweichung zwischen der Postprocessinglösung und der Echtzeitlösung maximal 1,3 mm. Die Restabweichungen können durch die gewählte Methode der Zeitsynchronisation begründet werden. Im Postprocessing werden die Daten interpoliert wohingegen in Echtzeit extrapoliert wird. Dies bedeutet, dass die in Echtzeit ausgewertete Trajektorie im Mittel mit der im Postprocessing ermittelten Trajektorie übereinstimmt.

## 2.3 Fazit

Im Vergleich zu Breitenfeld et al. (2015) ist mit der innerhalb des Projektes entstandenen Software HydrOs generell eine Echtzeitauswertung möglich.

Im Mittel weichen die in Echtzeit und Postprocessing geschätzten Trajektorien um weniger als einen Millimeter voneinander ab. Allerdings treten kurzzeitig größere Abweichungen auf, die auf eine fehlerhafte Zeitstempelung innerhalb der Echtzeitprozessierung zurückzuführen sind.

Für erste Tests im Wirkbetrieb kann die Echtzeitanwendung mit Hilfe der prototypischen Software eingesetzt werden, um zu prüfen, ob die entwickelten Algorithmen und Methoden eine Verbesserung der Ortung von Vermessungsschiffen erreichen. Ist dies der Fall, kann die Software mit einer optimierten Zeitsteuerung in eine andere für Echtzeitanwendungen geeignetere Programmiersprache überführt werden.

### 3 Weiterentwicklung des Ausreißermodells

Das von Kalman (1960) entwickelte Kalman-Filter ist ein rekursiver Auswertalgorithmus, der sich aus zwei Modellen, den System- und den Messgleichungen, zusammensetzt. Für nichtlineare Systeme bietet sich die Verwendung eines Erweiterten Kalman Filters (EKF) an. Innerhalb dieses Algorithmus lässt sich ein Zustand  $\mathbf{x}_{k+1}$  zur Epoche  $k + 1$  aus dem Zustand  $\mathbf{x}_k$  der Epoche  $k$  und den augenblicklichen Messungen  $\mathbf{l}_{k+1}$  rekursiv schätzen (Ramm & Schwieger, 2004).

Unter der Annahme eines dynamischen Systemmodells lässt sich die nicht lineare System- und Messgleichung nach Ramm (2008) wie folgt formulieren:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_{k+1,k}(\mathbf{t}_{k+1,k}(\mathbf{x}_k), \mathbf{b}_{k+1,k}(\mathbf{u}_k), \mathbf{c}_{k+1,k}(\mathbf{w}_k)) \quad (3-1)$$

$$\mathbf{l}_{k+1} = \mathbf{a}_{k+1}(\mathbf{x}_{k+1}) + \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1} \quad (3-2)$$

Dabei steht  $\mathbf{x}_k$  für den Zustandsvektor zum Zeitpunkt  $k$ , mit  $k = 1, \dots, J$ , wobei  $J$  der Länge der Zeitreihe entspricht. Die Ursache für die zeitliche Veränderung des Zustands (z. B. eine Bewegung) ist im Vektor  $\mathbf{u}_k$  modelliert und wird Stellgröße genannt.  $\mathbf{w}_k$  ist die Störgröße, die stochastische Komponenten der Systemgleichung enthält und die Abweichungen des Bewegungsmodells von der Realität sowie die Genauigkeit des Systems beschreibt. Die beobachteten Messungen zu einer bestimmten Epoche  $k + 1$  sind im Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}_{k+1}$  zusammengefasst, die mit den gesuchten Zuständen bzw. Parametern  $\mathbf{x}_{k+1}$  in Verbindung gebracht werden können. Diese Darstellung entspricht der üblichen Beschreibung in der Ausgleichsrechnung nach vermittelnden Beobachtungen. Dabei sind die Beobachtungsabweichungen im Vektor  $\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}$  aufgenommen (Kuhlmann, 2004).

Der komplette Algorithmus des Kalman-Filters bzw. des EKF sowie die expliziten System- und Messgleichungen sind in Breitenfeld et al. (2015) beschrieben.

Das Kalman-Filter beruht auf der Methode der kleinsten Quadrate (Henin, 2005) und liefert nach Chen (2003) nur dann eine optimale<sup>1</sup> Schätzung, wenn das Systemrauschen  $\mathbf{w}_k$  sowie das Messrauschen  $\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1}$  normalverteilt mit Erwartungswert Null ist. Das heißt in den Beobachtungen dürfen keine systematischen Abweichungen und keine Ausreißer vorhanden sein (Henin, 2005).

Daher werden in den folgenden Kapiteln Methoden und Maßnahmen gezeigt, mit denen einer suboptimalen Schätzung bzw. einer Unverträglichkeit innerhalb des Kalman-Filters entgegengewirkt werden kann.

---

<sup>1</sup> Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang eine erwartungstreue Schätzung mit minimaler Varianz (Kuhlmann, 2004)

### 3.1 Detektion von Unverträglichkeiten im Kalman-Filter

Im Algorithmus des Kalman-Filters wird pro Epoche  $k$  der Innovationsvektor  $\mathbf{d}_k$  sowie dessen Kovarianzmatrix  $\Sigma_{\mathbf{d}\mathbf{d},k}$  berechnet (siehe z. B. in Breitenfeld et al. (2015)). Diese Größen können zur statistischen Modellüberprüfung genutzt werden.

Mit Hilfe der Innovationen und Gleichung (3.1-1) können empirische Varianzen in jeder Epoche  $k$  innerhalb des Kalman-Filters geschätzt werden.

$$s_{0,j...l}^2 = \frac{\sum_{i=j}^l \mathbf{d}_{k-i}^T \cdot \Sigma_{\mathbf{d}\mathbf{d},k-i}^{-1} \cdot \mathbf{d}_{k-i}}{\sum_{i=j}^l r_{k-i}} \quad (3.1-1)$$

Für  $j = l = 0$  kann eine lokale Varianz der Gewichtseinheit, für  $l = k - 1$  eine globale Varianz der Gewichtseinheit und für ein beliebiges  $j < k$  eine regionale Varianz der Gewichtseinheit aus  $l - j + 1$  Epochen berechnet werden (vgl. Breitenfeld et al. (2015)).

Um eventuelle Unverträglichkeiten aufzudecken wird die Homogenität der lokalen Varianz der Gewichtseinheit der Epoche  $k$  getestet. Hierfür wird in einem Globaltest geprüft, ob sich die aktuelle lokale Varianz der Gewichtseinheit von einer gemittelten empirischen globalen oder regionalen Varianz der Gewichtseinheit signifikant unterscheidet. Die Nullhypothese  $H_0$  und die Alternativhypothese  $H_A$  werden daher wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} H_0: E\{s_{0,k}^2\} &= E\{s_{0,j...l}^2\} \\ H_A: E\{s_{0,k}^2\} &\neq E\{s_{0,j...l}^2\} \end{aligned} \quad (3.1-2)$$

Die zugehörige Testgröße lässt sich nach Pelzer (1987) wie folgt formulieren:

$$T = \frac{s_{0,k}^2}{s_{0,j...l}^2} = \frac{\mathbf{d}_k^T \cdot \Sigma_{\mathbf{d}\mathbf{d},k}^{-1} \cdot \mathbf{d}_k}{r_k \cdot s_{0,j...l}^2} \sim F_{r_k, f, 1-\alpha} \quad (3.1-3)$$

Mit:	$f$ :	Anzahl der Freiheitsgrade in $s_{0,j...l}^2$
	$r_k = n_{k+1}$ :	Anzahl der Freiheitsgrade in $s_{0,k}^2$
	$F_{r_k, f, 1-\alpha}$ :	Quantil der Fisher-Verteilung mit Signifikanzniveau $\alpha$

Wird die Nullhypothese abgelehnt, ist dies ein Indiz auf eine suboptimale Schätzung und somit auf systematische Abweichungen und/oder Ausreißer im Beobachtungsmaterial.

### 3.2 Ausreißertest bei Unverträglichkeiten im Kalman-Filter

Aufbauend auf Caspary & Wang (1998) werden in Breitenfeld et al. (2015) für die Beobachtungsgruppen  $g = \{\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k, \mathbf{l}_{k+1}\}$  Gleichungen zur Berechnung von studentisierten Residuen  $v_{g,i,k}$  und deren Kovarianzen  $\sigma_{v_{g,i,k}}$  für jedes Element  $i$  einer Beobachtungsgruppe  $g$  hergeleitet. Unter der Annahme, dass sich ein Ausreißer in den Residuen niederschlägt, lautet die Formulierung des Hypothesentests zur Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung  $i$  der Beobachtungsgruppe  $g$  nach Koch (2004):

$$\begin{aligned} H_0: v_{g_i,k} &= 0 \\ H_A: v_{g_i,k} &\neq 0 \end{aligned} \quad (3.2-1)$$

Die allgemeine Testgröße für studentisierte Residuen lässt sich wie folgt aufstellen:

$$T = \frac{v_{g_i,k}}{\sigma_{v_{g_i,k}}} \sim \tau_{r_k, 1-\alpha} \quad (3.2-2)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r_k, 1-\alpha} & \quad \text{Quantilwert der Tau-Verteilung mit Signifikanzniveau } \alpha \\ r_k = n_{\mathbf{l}_{k+1}} & \quad \text{Anzahl der Freiheitsgrade / Anzahl der Beobachtungen} \\ & \quad \text{im Beobachtungsvektor } \mathbf{l}_{k+1} \end{aligned}$$

Innerhalb eines Ausreißertests möchte man jedoch nicht nur eine einzelne Beobachtung, sondern alle Beobachtungen auf Ausreißer testen. Hierfür muss nach Koch (2004) das Signifikanzniveau  $\alpha$  angepasst werden, sodass sich eine modifizierte Testgröße ergibt.

$$\alpha_0 \approx 1 - (1 - \alpha)^{1/n} \approx \frac{\alpha}{n} = \frac{\alpha}{(n_{\mathbf{s}_k} + n_{\mathbf{u}_k} + n_{\mathbf{w}_k} + n_{\mathbf{l}_k})} \quad (3.2-3)$$

$$T = \frac{v_{g_i,k}}{\sigma_{v_{g_i,k}}} \sim \tau_{r_k, 1-\alpha_0} \quad (3.2-4)$$

Der Ablaufplan bei der Detektion nach Ausreißern ergibt sich somit wie folgt: Nach Ablehnung der Nullhypothese des Global- oder Regionaltest werden nach Koch (2004) für alle Beobachtungen die Testgrößen berechnet. Wird die Nullhypothese des Ausreißertests für die maximale Testgröße abgelehnt, wird die entsprechende Beobachtung mit einem sehr geringen Gewicht versehen und die davon betroffenen Matrizen neu aufgestellt. Dieser Ablaufplan wird dann solange wiederholt bis die Nullhypothese der maximalen Testgröße des Ausreißertests angenommen wird. Dieses Vorgehen wird auch Data Snooping genannt.

Für detailliertere Ausführungen des hier beschriebenen und verwendeten Ausreißertests sei auf Breitenfeld et al. (2015) verwiesen.

Nachteilig an der Methode der Ausreißersuche mit Hypothesentests ist die Abstimmung des Signifikanzniveaus  $\alpha$ , d. h. es werden zu viele oder zu wenige Ausreißer detektiert. Es treten dabei zwei Effekte auf:

- Maskierungseffekt:  
Dieser von Pearson & Chandra Sekar (1936) beschriebene Effekt berücksichtigt die Tatsache, dass extreme Ausreißer die Existenz von weiteren Ausreißern, die einen geringeren Abstand zum Erwartungswert haben, maskieren. Dadurch ist das zu einer ausreißerbehafteten Beobachtung gehörende Residuum nicht auffallend groß, da der Ausreißertest für ein anderes Residuum anschlägt.
- Aufbläheffekt:  
Bei diesem Effekt, der von Fieller (1979) als *Swamping*-Effekt bezeichnet wird, verzerren auftretende Ausreißer die geschätzten Parameter, sodass die zu den sauberen Beobachtungen gehörenden Residuen stark anwachsen. Daraufhin werden

diese an sich zutreffenden Beobachtungen als Ausreißer detektiert (Rambold, 1999).

Aus diesen Gründen wird das Ausreißermodell in den folgenden Kapiteln um robuste Schätzverfahren weiterentwickelt.

### 3.3 Robuste Parameterschätzung

In Koch (2004) sind verschiedene Methoden zur Schätzung von unbekannten Parametern vorgestellt, z. B. die Methode der kleinsten Quadrate und die Maximum-Likelihood-Methode. Bei der Methode der kleinsten Quadrate wird eine sogenannte Zielfunktion minimiert. Im Vergleich dazu wird bei der Maximum-Likelihood-Methode eine Wahrscheinlichkeitsdichte der Beobachtungen in Abhängigkeit der gesuchten Parameter, die sogenannte Likelihoodfunktion, maximiert. Der Unterschied zwischen diesen Methoden liegt daher in der expliziten Angabe einer Wahrscheinlichkeitsdichte der Beobachtungen. Sie liefern nach Koch (2004) im Falle normalverteilter Beobachtungen identische Ergebnisse, sodass die Quadratsumme der Residuen minimal wird, welches jedoch zu den genannten Verschmierungseffekten durch Ausreißer führt. Beide Verfahren gehören nicht zu den robusten Schätzverfahren.

Die von Huber (1964) entwickelten robusten Schätzverfahren ersetzen in der zu minimierenden Quadratsumme der Residuen die Quadrate oder die Summe durch geeignetere Funktionen (Koch, 2004). Da sich die robusten Verfahren auch als Art Maximum-Likelihood-Schätzungen ableiten lassen, spricht man auch von sogenannten M-Schätzungen. Ziel der robusten Parameterschätzung ist es daher, geeignetere Zielfunktionen oder Wahrscheinlichkeitsdichten zu finden.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein allgemeiner Lösungsansatz für robuste M-Schätzer beschrieben und hergeleitet. Anschließend werden der M-Schätzer nach Huber (1964) erläutert und Probleme der robusten Schätzung beschrieben. Abschließend wird die Integration robuster Verfahren innerhalb der Kalman-Filterung gezeigt.

#### 3.3.1 Robuste M-Schätzung

Der robusten M-Schätzung liegt das folgende allgemein bekannte Gauß-Markov-Modell zugrunde.

$$\begin{aligned} \mathbf{l} + \mathbf{v} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \\ \Rightarrow \mathbf{v} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{l} \end{aligned} \quad \Sigma\{\mathbf{L}\} = \sigma^2 \cdot \mathbf{I} \quad (3.3-1)$$

Mit: $\mathbf{l}$ :	Beobachtungsvektor ( $n \times 1$ )
$\mathbf{v}$ :	Residuen ( $n \times 1$ )
$\mathbf{x}$ :	gesuchter Parametervektor ( $m \times 1$ )
$\mathbf{A}$ :	Designmatrix/Beobachtungsgleichungen ( $n \times m$ )
$\sigma^2$ :	unbekannter Varianzfaktor



### 3.3.1.1 Zielfunktion, Verlustfunktion und Gewichtsfunktion

Für die Herleitung robuster M-Schätzer wird zunächst eine allgemeine Zielfunktion  $\Phi(\mathbf{x})$  in Abhängigkeit der gesuchten Parameter bzw. mit Hilfe von Gleichung (3.3-1) in Abhängigkeit der Residuen definiert:

$$\begin{aligned}\Phi(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^n \rho(\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{x} - l_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \rho(v_i)\end{aligned}\quad (3.3-2)$$

Durch Division der Zielfunktion durch  $\sigma$

$$\frac{\Phi(\mathbf{x})}{\sigma} = \sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{v_i}{\sigma}\right) = \sum_{i=1}^n \rho(\bar{v}_i) \quad (3.3-3)$$

wird die Lage des Maximums bei der Optimierung nicht verändert.

Dabei wird die Funktion  $\rho(\cdot)$  Verlustfunktion genannt. Je nach zugrundeliegender Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion müssen die Residuen innerhalb dieser Verlustfunktion mit Hilfe des bekannten oder unbekannten Skalierungsfaktors  $\sigma^2$  normiert werden.

Diese Zielfunktion muss nun minimiert werden, d. h. die notwendige Bedingung für das Minimum ist das Verschwinden des Gradienten. Dabei entspricht  $A_{ij}$  den Einträgen in der Designmatrix  $\mathbf{A}$ .

$$\begin{aligned}\mathbf{0} = \nabla\Phi(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} \frac{\partial\Phi(\mathbf{x})}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial\Phi(\mathbf{x})}{\partial x_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\partial\rho(\bar{v}_i)}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial\rho(\bar{v}_i)}{\partial x_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\partial\rho(\bar{v}_i)}{\partial \bar{v}_i} \cdot \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \frac{\partial\rho(\bar{v}_i)}{\partial \bar{v}_i} \cdot \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \psi(\bar{v}_i) \cdot A_{i1} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \psi(\bar{v}_i) \cdot A_{im} \end{bmatrix} \\ \mathbf{0} &= \mathbf{A}^T \cdot \boldsymbol{\psi}\end{aligned}\quad (3.3-4)$$

Die Funktion  $\psi(\cdot)$  wird dabei Psi-Funktion genannt und es gilt folgender Zusammenhang zur Verlustfunktion:

$$\psi(\bar{v}_i) = \rho'(\bar{v}_i) = \frac{\partial\rho(\bar{v}_i)}{\partial \bar{v}_i} \quad (3.3-5)$$

### 3.3.1.2 Methode der iterativen regewichteten kleinsten Quadrate

Zur Schätzung der gesuchten Parameter innerhalb der robusten M-Schätzung muss Gleichung (3.3-4) gelöst werden. Hierzu wird zunächst um den Term  $\frac{v_i}{\sigma}$  erweitert und anschließend mit  $\sigma$  multipliziert:

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \cdot \begin{bmatrix} \frac{\psi\left(\frac{v_1}{\sigma}\right) \cdot \frac{v_1}{\sigma}}{\frac{v_1}{\sigma}} \\ \vdots \\ \frac{\psi\left(\frac{v_n}{\sigma}\right) \cdot \frac{v_n}{\sigma}}{\frac{v_n}{\sigma}} \end{bmatrix} \cdot \sigma = \begin{bmatrix} \frac{\psi\left(\frac{v_1}{\sigma}\right)}{\frac{v_1}{\sigma}} \cdot v_1 \\ \vdots \\ \frac{\psi\left(\frac{v_n}{\sigma}\right)}{\frac{v_n}{\sigma}} \cdot v_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\psi\left(\frac{v_1}{\sigma}\right)}{\frac{v_1}{\sigma}} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\psi\left(\frac{v_n}{\sigma}\right)}{\frac{v_n}{\sigma}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.3-6)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v}$$

Da innerhalb der Matrix  $\mathbf{P}$  über die Beziehung

$$p\left(\frac{v_i}{\sigma}\right) = \frac{\psi\left(\frac{v_i}{\sigma}\right)}{\frac{v_i}{\sigma}} = \frac{\psi\left(\frac{\mathbf{A}_i \cdot \hat{\mathbf{x}} - l_i}{\sigma}\right)}{\frac{\mathbf{A}_i \cdot \hat{\mathbf{x}} - l_i}{\sigma}} \quad (3.3-7)$$

die geschätzten Parameter in der Ausgleichungsrechnung enthalten sind, muss ein iteratives Rechenschema aufgestellt werden. Die Funktion  $p(\cdot)$  ist die Gewichtsfunktion. Nach Huber (1981) ergibt sich somit der folgende Algorithmus der iterativen regewichteten kleinsten Quadrate (IRKQ) Schätzung für die robuste M-Schätzung.

---

**Algorithmus 3.3-1: IRKQ mit gegebenen Skalierungsfaktor**

---

Input:  $\mathbf{A}, \mathbf{l}, \sigma$

Output:  $\hat{\mathbf{x}}$

**1. Berechnung von Startwerten**

- Berechne  $\hat{\mathbf{x}}^{(0)} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{l}$
- Berechne  $\hat{\mathbf{v}}^{(0)} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}^{(0)} - \mathbf{l}$

**2. Schätzung mit modifizierten Gewichten:**

- Berechne  $p_i^{(v+1)} = \frac{\psi\left(\frac{\hat{v}_i^{(v+1)}}{\sigma}\right)}{\frac{\hat{v}_i^{(v+1)}}{\sigma}}$
  - Berechne  $\mathbf{P}^{(v+1)} = \text{diag}([p_1^{(v+1)} \quad \dots \quad p_n^{(v+1)}])$
  - Berechne  $\hat{\mathbf{x}}^{(v+1)} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}^{(v+1)} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}^{(v+1)} \cdot \mathbf{l}$
  - Berechne  $\hat{\mathbf{v}}^{(v+1)} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}^{(v+1)} - \mathbf{l}$
- 

Falls der Skalierungsfaktor  $\sigma^2$  innerhalb der IRKQ Schätzung unbekannt ist, kann dieser nach Huber (1981) ebenfalls in jeder Iteration robust mit Hilfe der Median Absolute Deviation (MAD) wie folgt geschätzt werden.

$$\begin{aligned}\hat{\sigma} &= 1,4826 \cdot \text{median}(|\mathbf{v} - \text{median}(\mathbf{v})|) \\ \hat{\sigma} &= 1,4826 \cdot \text{mad}(\mathbf{v})\end{aligned}\tag{3.3-8}$$

Des Weiteren sind Kovarianzinformationen über die geschätzten Parameter innerhalb der M-Schätzung von Bedeutung. Nach Huber (1981) berechnet sich die Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter  $\hat{\mathbf{x}}$  mit Hilfe der folgenden Gleichung

$$\hat{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \hat{s}^2 \cdot (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1}\tag{3.3-9}$$

Es ist leicht zu erkennen, dass für die Berechnung der Kovarianzmatrix  $\hat{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$  der Varianzfaktor  $\hat{s}^2$  geschätzt werden muss. Der Varianzfaktor lässt sich nach Huber (1981) wie folgt schätzen:

$$\hat{s}^2 = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \psi\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma}}\right) \right]^2}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \psi'\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma}}\right) \right]^2} \cdot \hat{\sigma}^2 \cdot KF_{\psi}\tag{3.3-10}$$

$$\text{mit:} \quad KF_{\psi} = \frac{n}{n-m} \cdot \left( 1 + \frac{m}{n} \cdot \frac{\hat{\Sigma}\{\psi'\}}{[\hat{\mathbb{E}}\{\psi'\}]^2} \right)$$

$$\begin{aligned}\text{wobei:} \quad \hat{\mathbb{E}}\{\psi'\} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \psi'\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma}}\right) \\ \hat{\Sigma}\{\psi'\} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \psi'\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma}}\right) - \hat{\mathbb{E}}\{\psi'\} \right]^2\end{aligned}$$

Abschließend ergibt sich somit der Algorithmus des IRKQ für die allgemeine robuste M-Schätzung wie folgt:

---

**Algorithmus 3.3-2: IRKQ mit unbekannten Skalierungsfaktor und Kovarianzmatrix**

---

Input:  $\mathbf{A}, \mathbf{l}$

Output:  $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$

---

**1. Berechnung von Startwerten**

- Berechne  $\hat{\mathbf{x}}^{(0)} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{l}$
- Berechne  $\hat{\mathbf{v}}^{(0)} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}^{(0)} - \mathbf{l}$
- Berechne  $\hat{\sigma}^{(0)} = 1,4826 \cdot \text{mad}(\hat{\mathbf{v}}^{(0)})$

**2. Schätzung mit modifizierten Gewichten:**

- Berechne  $p_i^{(v+1)} = \frac{\psi\left(\frac{\hat{v}_i^{(v+1)}}{\hat{\sigma}^{(v+1)}}\right)}{\frac{\hat{v}_i^{(v+1)}}{\hat{\sigma}^{(v+1)}}}$
- Berechne  $\mathbf{P}^{(v+1)} = \text{diag}([p_1^{(v+1)} \quad \dots \quad p_n^{(v+1)}])$
- Berechne  $\hat{\mathbf{x}}^{(v+1)} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}^{(v+1)} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}^{(v+1)} \cdot \mathbf{l}$
- Berechne  $\hat{\mathbf{v}}^{(v+1)} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}^{(v+1)} - \mathbf{l}$

**3. Schätzung des Skalierungsfaktors:**

- Berechne:  $\hat{\sigma}^{(v+1)} = 1,4826 \cdot \text{mad}(\hat{\mathbf{v}}^{(v+1)})$

#### 4. Kovarianzinformationen

- Berechne  $\hat{s}^2$  mit Gleichung (3.3-10) und  $\hat{\Sigma}_{\hat{x}\hat{x}}$  mit Gleichung (3.3-9) nach der Iteration mit den Größen des letzten Iterationsschritts

### 3.3.2 Wahl der Verlustfunktion

Innerhalb des Algorithmus der robusten Parameterschätzung muss eine Ziel- bzw. Verlustfunktion gewählt werden, sodass die Schätzung durch evtl. vorhandene multiple Ausreißer nicht stark verzerrt wird, d. h. die Ausreißer sollen sich deutlich in den Residuen zeigen. Daher wird im Folgenden die von Huber (1981) vorgeschlagene und innerhalb dieser Arbeit verwendete Verlustfunktion im Vergleich zur Verlustfunktion der üblichen kleinsten Quadrate Schätzung vorgestellt.

Die Zielfunktion  $\Phi_{KQ}(\mathbf{x})$  bzw. die Verlustfunktion  $\rho_{KQ}(\bar{v}_i)$  bzgl. der kleinsten-Quadrate-Schätzung ist wie folgt definiert

$$\Phi_{KQ}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \rho_{KQ}(\bar{v}_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot \bar{v}_i^2 \quad (3.3-11)$$

und in Abbildung 3-1 graphisch dargestellt. Im Vergleich dazu schlägt Huber (1981) vor, eine Verlustfunktion zu wählen, die quadratisch über einen Bereich kleiner Residuen im Intervall  $[-k, k]$  und linear in den Intervallen  $(-\infty, -k]$  und  $[k, \infty)$ , das heißt im Bereich von großen Residuen, verläuft (vgl. Abbildung 3-1). Mathematisch ist diese Funktion wie folgt definiert:

$$\Phi_H(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \rho_H(\bar{v}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \bar{v}_i^2 & \text{für } |\bar{v}_i| \leq k \\ k \cdot |\bar{v}_i| - \frac{1}{2} \cdot k^2 & \text{für } |\bar{v}_i| > k \end{cases} \quad (3.3-12)$$

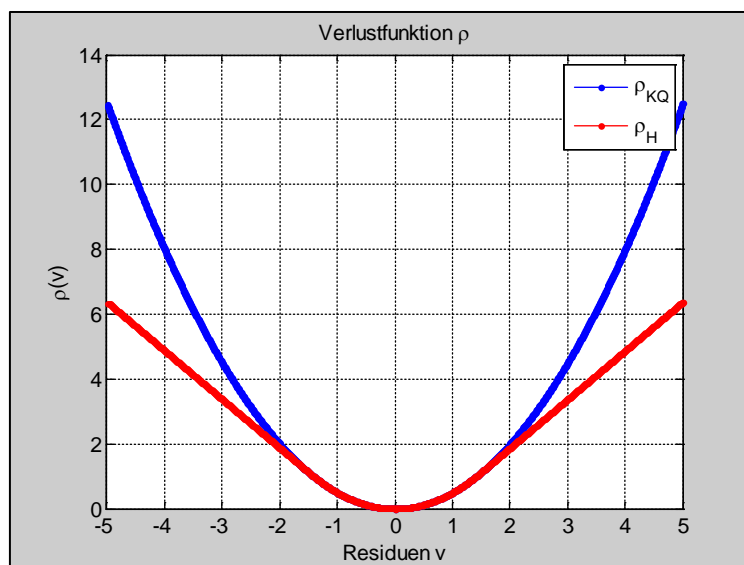
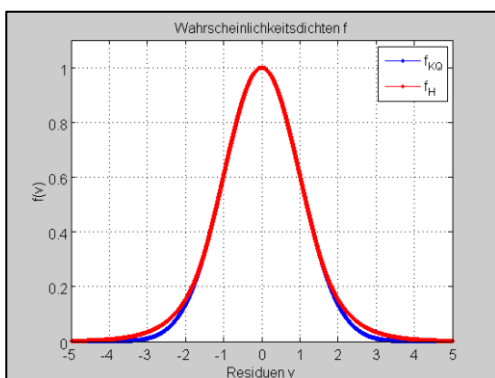
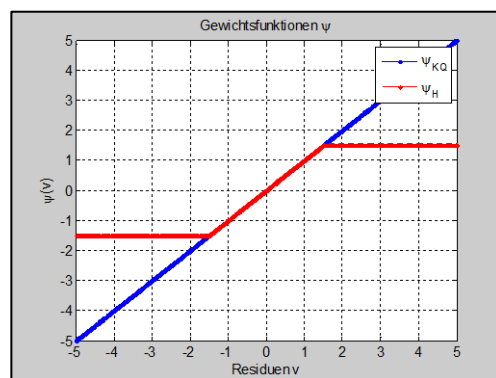


Abbildung 3-1: Verlustfunktion bzgl. der Kleinsten-Quadrate-Schätzung sowie des Huber-Schätzer

Anhand der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in Abbildung 3-2 lässt sich die Robustheit der vorgeschlagenen Verlustfunktion erklären. In der kleinsten-Quadrate-Schätzung folgen die Beobachtungen der Standardnormalverteilung. Im Vergleich dazu folgen die Beobachtungen innerhalb des *Huber*-Schätzers verschiedenen Verteilungen in den verschiedenen Intervallen. Im Bereich großer Residuen setzt Huber (1981) die Laplaceverteilung an, um großen Residuen eine höhere Wahrscheinlichkeit zu geben. Aus diesem Grund ist diese Schätzung robust.



**Abbildung 3-2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bzgl. der kleinsten-Quadrate-Schätzung sowie des *Huber*-Schätzers**



**Abbildung 3-3: Gewichtsfunktion bzgl. der kleinsten-Quadrate-Schätzung sowie des *Huber*-Schätzers**

Des Weiteren zeigt die Psi-Funktion in Abbildung 3-3 ebenfalls die Robustheit gegen Ausreißer. In der Psi-Funktion der kleinsten-Quadrate-Schätzung wird das jeweilige Residuum reproduziert. Mithilfe von Gleichung (3.3-7) ist leicht zu erkennen, dass die Gewichtsmatrix zur Einheitsmatrix wird. Dies bedeutet, dass Algorithmus 3.3-2 im Falle der Verlustfunktion  $\rho_{KQ}$  in einem Schritt konvergiert. Im Vergleich dazu werden große Residuen, welche auf Ausreißer hindeuten, in der Psi-Funktion des *Huber*-Schätzers ab einem Grenzwert  $k$  begrenzt und somit nach Gleichung (3.3-7) herabgewichtet.

Die *Huber*-Konstante  $k$  kann je nach vorhandenem Ausreißeranteil gewählt werden. Bei einem Ausreißeranteil von vier Prozent wird  $k = 1,5$  gewählt. Üblicherweise wird ein Wert zwischen 0,5 und 2 genutzt.

**Tabelle 3-1: *Huber*-Konstante im Vergleich zum Ausreißeranteil nach Huber (1981)**

<i>Huber</i> -Konstante $k$	Ausreißeranteil in %
$\infty$	0
2,630	0,001
1,945	0,01
1,500	0,04
1,140	0,1

In der Literatur sind auch zahlreiche andere Verlustfunktionen genannt, die innerhalb des Algorithmus 3.3-2 verwendet werden können. Beispielfhaft sei hier der *Hampel*- oder der  $L_1$ -Norm Schätzer genannt.

### 3.3.3 Problematik der Hebelpunkte und Modifizierung des IRKQ

#### 3.3.3.1 Hebelpunkte

Innerhalb der robusten Parameterschätzung bilden sogenannte Hebelpunkte ein besonderes Problem. Als Hebelpunkte bezeichnet man Beobachtungen, die aufgrund ihrer Geometrie weit entfernt von der Masse der restlichen Beobachtungen liegen (Koch, 2004).

Gandhi (2009) unterscheidet die Hebelpunkte noch nach guten und schlechten Hebelpunkten. Während die guten Hebelpunkte die Parameterschätzung nicht beeinflussen, haben die schlechten Hebelpunkte erheblichen negativen Einfluss auf die Schätzung. Anders formuliert führen nur ausreißerbehaftete Hebelpunkte zu einer verzerrten robusten Parameterschätzung.

Nach Koch (2004) können sich Hebelpunkte in kleinen Redundanzanteilen zeigen. Sind allerdings mehrere Hebelpunkte innerhalb der Beobachtungen enthalten, wachsen die Teilredundanzen der Hebelpunkte, da die Gesamtredundanz konstant bleibt. Die Wirkung der Hebelpunkte wird daher maskiert (Rousseeuw & Leroy, 1987).

Der Einfluss solcher Hebelpunkte auf die allgemeine und robuste Parameterschätzung wird in Kapitel 3.3.3.4 betrachtet.

#### 3.3.3.2 Modifizierung des IRKQ

Um ausreißerbehaftete Hebelpunkte innerhalb der robusten Parameterschätzung entdecken zu können, muss die M-Schätzung modifiziert werden. Hierzu wird die Zielfunktion  $\Phi(\mathbf{x})$  aus Gleichung (3.3-2) wie folgt abgeändert (vgl. Rousseeuw & Leroy (1987) oder Huber (1981)):

$$\begin{aligned}\Phi(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^n w_i \cdot \rho\left(\frac{\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{x} - l_i}{w_i}\right) \\ &= \sum_{i=1}^n w_i \cdot \rho\left(\frac{v_i}{w_i}\right)\end{aligned}\tag{3.3-13}$$

Innerhalb dieses Ansatzes werden Gewichte  $w_i$  eingeführt um den Einfluss von Hebelpunkten zu verringern. Durch Division der Zielfunktion durch  $\sigma$

$$\frac{\Phi(\mathbf{x})}{\sigma} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \rho\left(\frac{v_i}{\sigma \cdot w_i}\right)\tag{3.3-14}$$

wird die Lage des Maximums auch in diesem Fall bei der Optimierung nicht verändert. Wie in den Kapiteln 3.3.1.1 und 3.3.1.2 gezeigt wird, muss diese Zielfunktion minimiert werden. Damit ergibt sich folgende modifizierte Gewichtsfunktion:

$$p\left(\frac{v_i}{\sigma \cdot w_i}\right) = \frac{\psi\left(\frac{v_i}{\sigma \cdot w_i}\right)}{\frac{v_i}{\sigma \cdot w_i}} \cdot w_i = \frac{\psi\left(\frac{\mathbf{A}_i \cdot \hat{\mathbf{x}} - l_i}{\sigma \cdot w_i}\right)}{\frac{\mathbf{A}_i \cdot \hat{\mathbf{x}} - l_i}{\sigma \cdot w_i}} \cdot w_i \quad (3.3-15)$$

Durch die Einführung der Gewichte muss die Schätzung des Varianzfaktors  $\hat{\sigma}^2$  ebenfalls angepasst werden:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \psi\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma} \cdot w_i}\right) \right]^2}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \psi'\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma} \cdot w_i}\right) \right]^2} \cdot \hat{\sigma}^2 \cdot KF_\psi \quad (3.3-16)$$

$$\text{mit:} \quad KF_\psi = \frac{n}{n-m} \cdot \left( 1 + \frac{m}{n} \cdot \frac{\hat{\Sigma}\{\psi'\}}{[\hat{\mathbb{E}}\{\psi'\}]^2} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{wobei:} \quad \hat{\mathbb{E}}\{\psi'\} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \psi'\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma} \cdot w_i}\right) \\ \hat{\Sigma}\{\psi'\} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left[ \psi'\left(\frac{\hat{v}_i}{\hat{\sigma} \cdot w_i}\right) - \hat{\mathbb{E}}\{\psi'\} \right]^2 \end{aligned}$$

Die Modifizierung des Algorithmus der IRKQ ist in Algorithmus 3.3-3 zusammengefasst.

---

**Algorithmus 3.3-3: modifizierter IRKQ**

---

Input:  $\mathbf{A}, \mathbf{l}, \mathbf{w}$

Output:  $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$

---

**1. Berechnung von Startwerten**

- Berechne  $\hat{\mathbf{x}}^{(0)} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{l}$
- Berechne  $\hat{\mathbf{v}}^{(0)} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}^{(0)} - \mathbf{l}$
- Berechne  $\hat{\sigma}^{(0)} = 1,4826 \cdot \text{mad}(\hat{\mathbf{v}}^{(0)})$

**2. Schätzung mit modifizierten Gewichten:**

- Berechne  $p_i^{(v+1)} = \frac{\psi\left(\frac{\hat{v}_i^{(v+1)}}{\hat{\sigma}^{(v+1)} \cdot w_i}\right)}{\frac{\hat{v}_i^{(v+1)}}{\hat{\sigma}^{(v+1)} \cdot w_i}} \cdot w_i$
- Berechne  $\mathbf{P}^{(v+1)} = \text{diag}([p_1^{(v+1)} \quad \dots \quad p_n^{(v+1)}])$
- Berechne  $\hat{\mathbf{x}}^{(v+1)} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}^{(v+1)} \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P}^{(v+1)} \cdot \mathbf{l}$
- Berechne  $\hat{\mathbf{v}}^{(v+1)} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}^{(v+1)} - \mathbf{l}$

**3. Schätzung des Skalierungsfaktors:**

- Berechne:  $\hat{\sigma}^{(v+1)} = 1,4826 \cdot \text{mad}(\hat{\mathbf{v}}^{(v+1)})$

**4. Kovarianzinformationen**

- Berechne  $\hat{\sigma}^2$  mit Gleichung (3.3-16) und  $\hat{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$  mit Gleichung (3.3-9) nach der Iteration mit den Größen des letzten Iterationsschritts
- 

**3.3.3.3 Detektion der Hebelpunkte**

Für den modifizierten Algorithmus der IRKQ müssen Gewichte  $w_i$  für den gesamten Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  gefunden werden, mit denen die Hebelpunkte innerhalb des Beobach-

tungsvektors im Vergleich zu der Masse der anderen Beobachtungen herabgewichtet werden. Daher werden im Folgenden verschiedene Methoden zur Detektion von Hebelpunkten mithilfe eines Gewichtsvektors  $\mathbf{w}$  genannt.

Huber (1981) schlägt vor, die Redundanzanteile  $r_i$  der einzelnen Beobachtungen als Gewicht einzusetzen:

$$w_i = \sqrt{r_i} \quad (3.3-17)$$

Dies setzt allerdings voraus, dass sich die Hebelpunkte in kleinen Redundanzanteilen zeigen. Nach Koch (2004) ist dies durch den Maskierungseffekt vor allem dann nicht der Fall, wenn die Hebelpunkte in Gruppen auftreten.

Aus diesem Grund wählt Koch (1996) eine sehr viel drastischere Herabgewichtung:

$$w_i = \frac{r_i^8}{r_D} \quad (3.3-18)$$

$$\text{mit:} \quad r_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^8$$

Diese drastische Gewichtung führt allerdings zu einer Heraufgewichtung von Beobachtungen mit großen Redundanzanteilen, sodass diese Beobachtungen die Parameterschätzung erheblich beeinflussen und Ausreißer in diesen Beobachtungen nicht detektiert werden können. Liegen somit Ausreißer in Hebelpunkten sowie in Beobachtungen mit hohen Redundanzanteilen vor, so wird die robuste Schätzung mit den Gewichten aus Gleichung (3.3-18) die Ausreißer nicht aufdecken (vgl. Koch (2004)).

Gandhi (2009) diskutiert einen anderen Ansatz der Gewichtung. Hier werden die Hebelpunkte anhand von Abständen zu den anderen Beobachtungen detektiert. Die Grundidee dabei ist, den Schwerpunkt der Beobachtungen robust zu schätzen und die standardisierten Distanzen zu allen Beobachtungen zu berechnen. Gandhi (2009) diskutiert dafür die Mahalanobis-Distanz und die Projektionsstatistik. Der Vergleich der beiden Methoden ergibt eine bessere und robustere Detektion von Hebelpunkten mittels der Projektionsstatistik. Aus diesem Grund wird diese Methode im Folgenden näher beschrieben.

Die Projektionsstatistik wird mithilfe der Designmatrix  $\mathbf{A}$  berechnet. Die Matrix  $\mathbf{A}$  hat die Dimension  $n \times m$  sodass  $\mathbf{A}_i$  die  $i$ -te Zeile und  $\mathbf{A}_j$  die  $j$ -te Spalte von  $\mathbf{A}$  bezeichnet mit  $i = 1, \dots, n$  und  $j = 1, \dots, m$ . Im Folgenden wird der in dieser Arbeit verwendete Rechengang des Projektionsstatistik-Algorithmus nach Gandhi (2009) erläutert:

1. Zunächst wird ein Vektor  $\mathbf{m}$  berechnet, der die Mediane aller Spalten  $j$  der Designmatrix  $\mathbf{A}$  enthält:

$$\mathbf{m} = [\text{median}(\mathbf{A}_1) \quad \dots \quad \text{median}(\mathbf{A}_j) \quad \dots \quad \text{median}(\mathbf{A}_m)] \quad (3.3-19)$$

2. Mit Hilfe der Mediane  $\mathbf{m}$  und der Zeilen der Designmatrix  $\mathbf{A}_i$  lässt sich nun für jede Beobachtung  $i$  ein Einheitsvektor  $\mathbf{u}$  berechnen:



$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{A}_i - \mathbf{m}}{\|\mathbf{A}_i - \mathbf{m}\|} \quad (3.3-20)$$

sodass sich eine  $m \times n$  dimensionale Matrix  $\mathbf{U}$  mit den Einheitsvektoren  $\mathbf{u}$  ergibt.

3. Anschließend werden die Zeilen der Designmatrix auf die Einheitsvektoren projiziert:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U} \quad (3.3-21)$$

sodass sich eine standardisierte Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  aus den Spalten  $\mathbf{Z}_j$  der Matrix  $\mathbf{Z}$  ergibt:

$$\mathbf{P}_j = \frac{\mathbf{Z}_j - \text{median}(\mathbf{Z}_j)}{\text{mad}(\mathbf{Z}_j)} \quad (3.3-22)$$

Die MAD kann dabei Gleichung (3.3-8) entnommen werden.

4. Abschließend berechnet sich der Vektor der Projektionsstatistik durch die maximalen Werte ( $ps_i$ ) der Zeilen der Matrix  $\mathbf{P}$ , und die benötigten Vorgewichte  $w_i$  ergeben sich nach Gandhi (2009) wie folgt:

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{für } ps_i \leq k \\ \frac{k^2}{ps_i^2} & \text{für } ps_i > k \end{cases} \quad (3.3-23)$$

### 3.3.3.4 Einfluss der Hebelpunkte am Beispiel einer Regressionsgerade

Der Einfluss von Ausreißern und Hebelpunkten innerhalb der Ausgleichsrechnung soll an einer ausgleichenden Regressionsgeraden gezeigt werden. Des Weiteren kann an diesem einfachen Beispiel die Performance der robusten M-Schätzung sowie der Projektionsstatistik demonstriert werden.

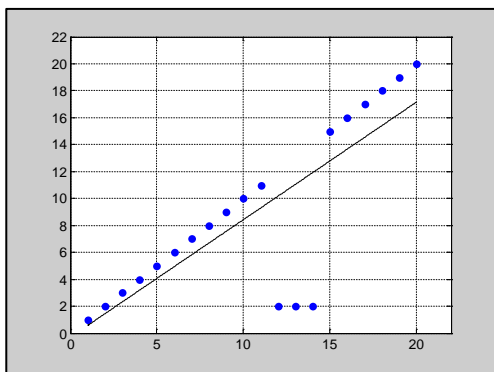


Abbildung 3-4: Regressionsgerade mit der Methode der kleinsten Quadrate und vertikalen Ausreißern

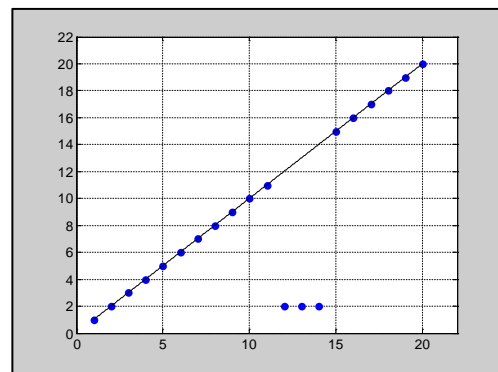
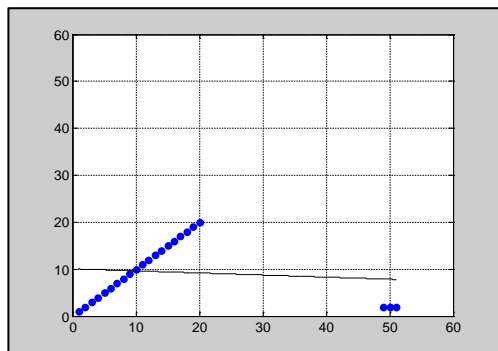
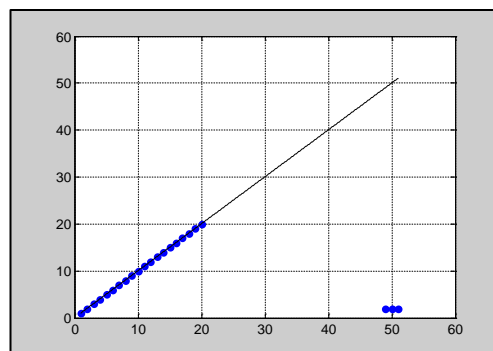


Abbildung 3-5: Regressionsgerade mit der Methode der M-Schätzung nach Huber und vertikalen Ausreißern

In Abbildung 3-4 sind die Daten einer linearen Geradengleichung dargestellt. Innerhalb dieser Daten befinden sich drei Ausreißer. Mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate wird eine Regressionsgerade in das Messmaterial geschätzt. Durch die Minimierung der Quadratsumme der Residuen erhält man eine durch die Ausreißer verursachte verzerrte Schätzung. Im Vergleich dazu liefert die robuste M-Schätzung nach der Methode der iterativen regewichteten kleinsten Quadrate (Algorithmus 3.3-2) ein nicht durch die Ausreißer beeinflusstes Ergebnis (vgl. Abbildung 3-5).



**Abbildung 3-6: Regressionsgerade mit der Methode der M-Schätzung nach Huber und Ausreißern in Hebelpunkten**



**Abbildung 3-7: Regressionsgerade mit der Methode der M-Schätzung nach Huber erweitert um die Projektionsstatistik und Ausreißern in Hebelpunkten**

Abbildung 3-6 zeigt die diskutierte Problematik der robusten Schätzung bei ausreißerbelasteten Hebelpunkten. Die Ausreißer werden auch durch die robuste Schätzung nicht detektiert. Wird die robuste Schätzung nun mit Vorgewichten modifiziert (Algorithmus 3.3-3), so werden die Hebelpunkte mit Hilfe der Projektionsstatistik entdeckt und die Schätzung wird nicht durch die ausreißerbelasteten Hebelpunkte beeinflusst (vgl. Abbildung 3-7).

### 3.3.4 Robuste M-Schätzung innerhalb des Kalman-Filter

Dem vorgestellten Algorithmus der robusten Parameterschätzung liegt das allgemein bekannte Gauß-Markov-Modell aus Gleichung (3.3-1) zugrunde. Daher müssen die System- und Messgleichung innerhalb des Ausgleichsverfahrens der Kalman-Filterung in das Gauß-Markov-Modell umgeformt werden. Mithilfe von Gleichung (3.1-1) kann der prädiizierte Zustandsvektor  $\bar{\mathbf{x}}_{k+1}$  berechnet werden. Durch Einführung eines Fehlervektors  $\boldsymbol{\delta}_{k+1}$  zwischen dem wahren Zustandsvektor und dem prädiizierten Zustandsvektor ergibt sich nach Gandhi (2009) folgende Gleichung:

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1} + \boldsymbol{\delta}_{k+1} \quad (3.3-24)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung und Gleichung (3.1-2) lässt sich nach Gandhi (2009) die System- und Messgleichung wie folgt in ein Gauß-Markov-Modell überführen:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_{k+1} \\ \mathbf{I}_{k+1} \end{bmatrix}}_{\bar{\mathbf{I}}_{k+1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{A}_{k+1} \end{bmatrix}}_{\bar{\mathbf{A}}_{k+1}} \cdot \mathbf{x}_{k+1} + \underbrace{\begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta}_{k+1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1} \end{bmatrix}}_{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{k+1}} \quad (3.3-25)$$

Die Kovarianzmatrix des Ersatzproblems

$$\tilde{\mathbf{I}}_{k+1} = \tilde{\mathbf{A}}_{k+1} \cdot \mathbf{x}_{k+1} + \tilde{\mathbf{\epsilon}}_{k+1} \quad (3.3-26)$$

ergibt sich nach Gandhi (2009) zu:

$$\Sigma_{\tilde{\mathbf{I}},k+1} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\tilde{\mathbf{x}}\tilde{\mathbf{x}},k+1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{I},k+1} \end{bmatrix} \quad (3.3-27)$$

Die Matrix  $\Sigma_{\tilde{\mathbf{x}}\tilde{\mathbf{x}},k+1}$  ist vollbesetzt und somit treten innerhalb der Kovarianzmatrix  $\Sigma_{\tilde{\mathbf{I}},k+1}$  Korrelationen zwischen den Beobachtungen  $\tilde{\mathbf{I}}_{k+1}$  auf. Daher muss das Modell dekorreliert werden. Hierfür schlägt Gandhi (2009) eine Cholesky-Zerlegung der Matrix  $\Sigma_{\tilde{\mathbf{I}},k+1}$  vor, sodass gilt:

$$\Sigma_{\tilde{\mathbf{I}},k+1} = \mathbf{S}_{k+1} \cdot \mathbf{S}_{k+1}^T \quad (3.3-28)$$

Mit:  $\mathbf{S}_{k+1}$ : untere Dreiecksmatrix (aus der Cholesky-Zerlegung)

Das Modell aus Gleichung (3.3-26) muss dann mit der Inversen der unteren Dreiecksmatrix  $\mathbf{S}_{k+1}^{-1}$  multipliziert werden:

$$\mathbf{S}_{k+1}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{I}}_{k+1} = \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{A}}_{k+1} \cdot \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{S}_{k+1}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{\epsilon}}_{k+1} \quad (3.3-29)$$

Das mithilfe der unteren Dreiecksmatrix gebildete Ersatzmodell (3.3-29) kann dann eingesetzt werden, wenn Algorithmus 3.3-2 oder Algorithmus 3.3-3 innerhalb des Kalman-Filters durchlaufen wird.

### 3.4 Ablauf und Implementierung des Ausreißermodells

In Abbildung 3-8 ist der Ablaufplan des Ausreißermodells pro Epoche innerhalb des Extended Kalman-Filters, wie er in dieser Arbeit genutzt wird, dargestellt. Innerhalb der Auswertesoftware kann der Nutzer alle notwendigen Schritte steuern. Wenn innerhalb der Software der Global- und/ oder der Regionaltest angewählt ist, wird mit Hilfe der Innovationen  $\mathbf{d}_k$  und den aufgestellten Hypothesentests in Kapitel 3.1 geprüft, ob eine Unverträglichkeit in der aktuellen Epoche  $k$  vorliegt. Diese Prüfung kann auch ohne weiteren Eingriff durchgeführt werden.

Wird die Nullhypothese  $H_0$  des Hypothesentests angenommen, liegt mit der vom Nutzer eingestellten Sicherheitswahrscheinlichkeit keine Unverträglichkeit vor und die Schätzung des Zustandsvektor  $\hat{\mathbf{x}}_k$  sowie dessen Kovarianzmatrix  $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}$  wird im Algorithmus des klassischen Extended Kalman-Filters (z. B. in Breitenfeld et al. (2015)) mit folgenden Gleichungen geschätzt:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \bar{\mathbf{x}}_{k+1} + \mathbf{K}_{k+1} \cdot \mathbf{d}_{k+1} \quad (3.4-1)$$

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k+1} = \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}},k+1} - \mathbf{K}_{k+1} \cdot \Sigma_{\mathbf{d}\mathbf{d},k+1} \cdot \mathbf{K}_{k+1}^T \quad (3.4-2)$$

Mit:  $\mathbf{K}_{k+1} = \Sigma_{\bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}},k+1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \Sigma_{\mathbf{d}\mathbf{d},k+1}^{-1}$

Wird die Nullhypothese  $H_0$  verworfen, hat der Nutzer in der Auswertesoftware die Wahl zwischen der Durchführung eines Ausreißertests, einer robusten Parameterschätzung oder dem Verzicht auf einen Eingriff innerhalb der Schätzung.

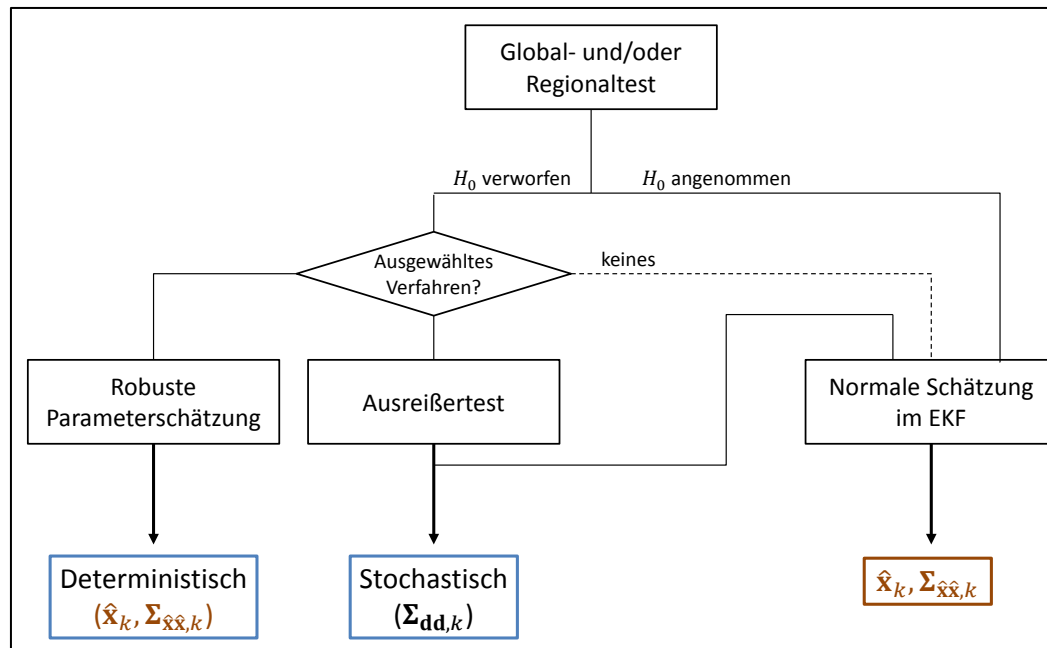


Abbildung 3-8: Ablaufschema des Ausreißermodells

Bei der Durchführung des Ausreißertests wird in Gleichung (3.4-1) und (3.4-2) die Kovarianzmatrix der Innovationen  $\Sigma_{\mathbf{d}\mathbf{d},k}$  modifiziert. Der genaue Ablauf der Ausreißersuche wird in Kapitel 3.2 skizziert und in Breitenfeld et al. (2015) detailliert beschrieben.

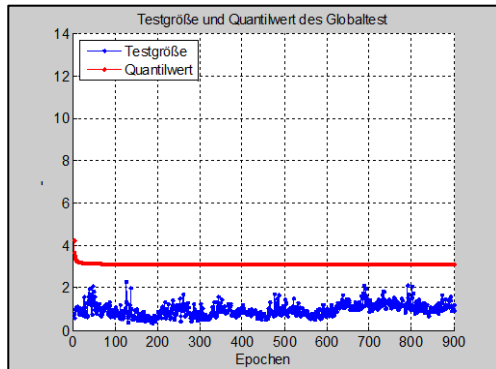
Alternativ wird der Zustandsvektor  $\hat{\mathbf{x}}_k$  sowie dessen Kovarianzmatrix  $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}},k}$  innerhalb einer robusten Parameterschätzung, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben ist, geschätzt.

## 3.5 Evaluierung des Ausreißermodells

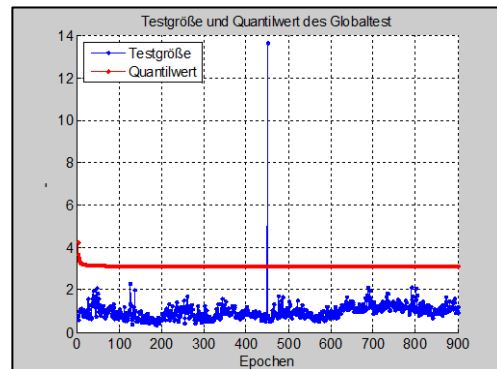
### 3.5.1 Messprogramm und Bewertungskriterien

Um das Ausreißermodell evaluieren zu können, wird ein Ausschnitt einer Messfahrt mit dem Vermessungsschiff „Mercator“ des WSA Duisburg-Rhein im November 2015 ausgewählt. Innerhalb dieses Ausschnitts wird die Nullhypothese des Global- und Regionaltests mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % in jeder Epoche angenommen (vgl. Abbildung 3-9). Für die Evaluierung werden dann einzelne oder mehrere Ausreißer in unterschiedlichen Beobachtungen generiert, sodass eine Unverträglichkeit zwischen System- und Messgleichung vom Global- bzw. Regionaltest detektiert wird (vgl. Abbildung 3-10).

Um der Unverträglichkeit entgegenzuwirken, werden zum einen der Ausreißertest und zum anderen die robuste Parameterschätzung durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Methoden zur Detektion von Ausreißern innerhalb der Beobachtungen wird dann als Bewertungskriterium herangezogen.



**Abbildung 3-9: Globaltest des ausgewählten Fahrtabschnitts**

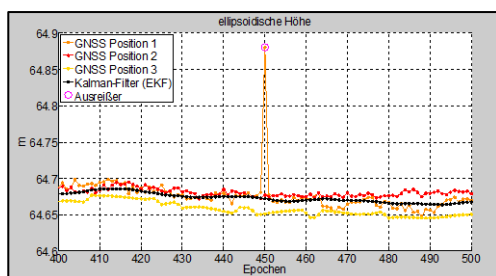


**Abbildung 3-10: Globaltest des ausgewählten Fahrtabschnitts mit generiertem Ausreißer**

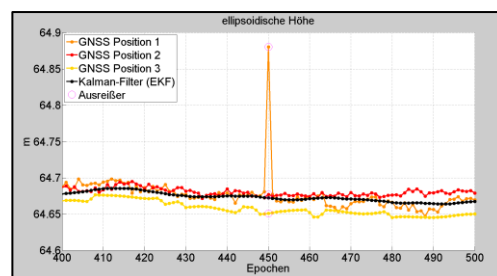
### 3.5.2 Evaluierung

#### 3.5.2.1 Einzelne und mehrere Ausreißer in einer Beobachtung

Innerhalb der ellipsoidischen Höhe eines GNSS-Sensors wurde in Epoche 450 ein Ausreißer generiert (vgl. Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12). In Abbildung 3-11 wird der generierte Ausreißer mit dem Ausreißertest detektiert. Mithilfe der robusten Parameterschätzung wird der Ausreißer ebenfalls entdeckt, allerdings werden in der gleichen Epoche ebenfalls die ellipsoidischen Höhen der anderen, nicht ausreißerbehafteten GNSS Sensoren herabgewichtet (vgl. Abbildung 3-12).

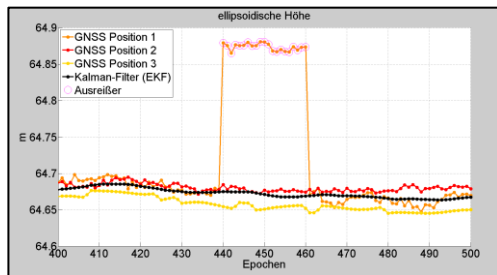


**Abbildung 3-11: Detektion einzelner Ausreißer in einer Beobachtung mithilfe des Ausreißertests**

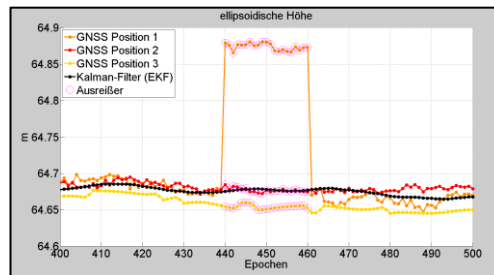


**Abbildung 3-12: Detektion einzelner Ausreißer in einer Beobachtung mithilfe der robusten Parameterschätzung**

Um den Einfluss mehrerer Ausreißer innerhalb einer einzelnen Beobachtung zu untersuchen, wurden in Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 zwanzig Ausreißer zwischen den Epochen 440 und 460 in der ellipsoidischen Höhe eines GNSS-Sensors generiert. Im Vergleich der beiden Methoden zeigt sich wiederum, dass zwar alle Ausreißer detektiert werden, allerdings innerhalb der robusten Parameterschätzung auch andere nicht ausreißerbehafteten Beobachtungen gleicher Art ebenfalls herabgewichtet werden.

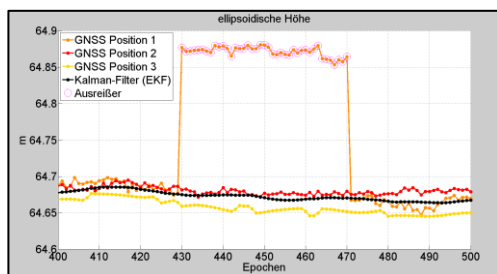


**Abbildung 3-13: Detektion mehrerer Ausreißer (20 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe des Ausreißertests**

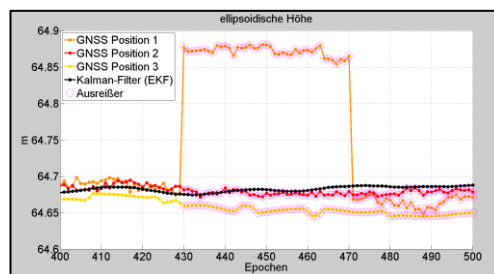


**Abbildung 3-14: Detektion mehrerer Ausreißer (20 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe der robusten Parameterschätzung**

Wird die Anzahl der mehreren generierten Ausreißer innerhalb einer Beobachtung weiter erhöht, weist der Ausreißertest gegenüber der robusten Parameterschätzung wiederum einen Vorteil auf.



**Abbildung 3-15: Detektion mehrerer Ausreißer (40 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe des Ausreißertests**



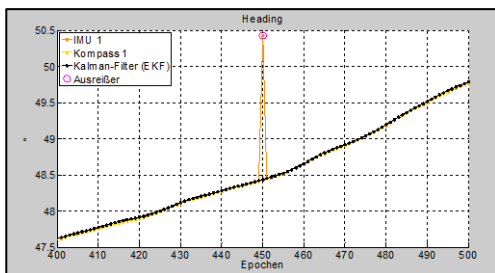
**Abbildung 3-16: Detektion mehrerer Ausreißer (40 Epochen) in einer Beobachtung mithilfe der robusten Parameterschätzung**

In Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 wurden vierzig Ausreißer zwischen den Epochen 430 und 470 in der ellipsoidischen Höhe eines GNSS-Sensors generiert. Innerhalb der robusten Parameterschätzung werden ab Epoche 471 alle nicht ausreißerbehafteten ellipsoidischen Höhen aller drei GNSS-Empfänger bis zum Ende des Messzeitraums als Ausreißer markiert.

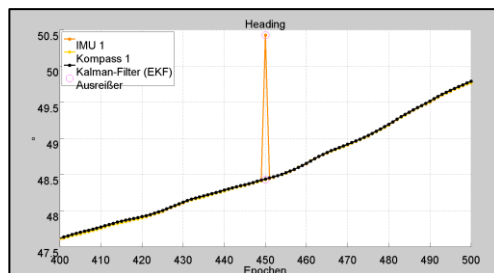
### 3.5.2.2 Ausreißer in mehreren Beobachtungen

Zur weiteren Evaluierung werden im Folgenden Ausreißer in mehreren verschiedenen Beobachtungen erzeugt. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 3-17 bis Abbildung 3-20) ist ein Ausreißer innerhalb der ellipsoidischen Höhe eines GNSS-Sensors sowie ein Ausreißer im Heading der IMU in Epoche 450 generiert.

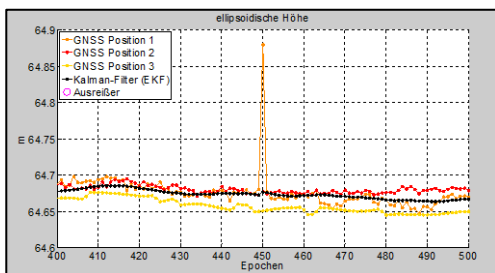
Der Ausreißertest detektiert nur den Ausreißer im Heading (vgl. Abbildung 3-17 und Abbildung 3-19), wohingegen die robuste Parameterschätzung sowohl den Ausreißer im Heading als auch den Ausreißer innerhalb der ellipsoidischen Höhe aufdeckt. Allerdings werden innerhalb der robusten Parameterschätzung wiederum Beobachtungen gleicher Art ebenfalls herabgewichtet (vgl. Abbildung 3-18 und Abbildung 3-20).



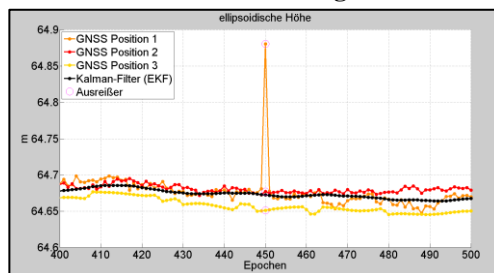
**Abbildung 3-17: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung Heading mithilfe des Ausreißertests**



**Abbildung 3-18: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung Heading mithilfe der robusten Parameterschätzung**



**Abbildung 3-19: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung ell. Höhe mithilfe des Ausreißertests**



**Abbildung 3-20: Detektion eines Ausreißers in der Beobachtung ell. Höhe mithilfe der robusten Parameterschätzung**

### 3.6 Fazit

Die hier beschriebene robuste Parameterschätzung ist innerhalb des hydrographischen Ortungssystems HydOs implementiert und kann vom Anwender der Software eingesetzt werden. Es kann nun bei auftretenden Unverträglichkeiten zwischen dem Ausreißertest und der robusten Parameterschätzung gewählt werden (vgl. Abbildung 3-8).

Generell lassen sich mit beiden Verfahren Ausreißer gut aufdecken. Im Vergleich zum Ausreißertest bietet die robuste Parameterschätzung eine Verbesserung bei der Detektion von Ausreißern in verschiedenen Beobachtungen. Allerdings werden innerhalb der robusten Parameterschätzung saubere Beobachtungen ebenfalls detektiert und aus der Auswertung herausgenommen.

Aus diesem Grund sind die Parameter zukünftig mithilfe großer Datenmengen anzupassen, um die unbegründete Herabgewichtung von Beobachtungen zu verhindern. Auf Basis der bisherigen Daten lässt sich keine Präferenz für den gewählten Ansatz der bisherigen Parameterschätzung erkennen.





## 4 Integration und Evaluierung weiterer Sensoren

Um die EKF-Lösung für Bereiche, in denen über längere Zeit keine GNSS-Signale empfangen werden können oder keine RTK-Lösung bestimmt werden kann, zu verbessern, wird der Einsatz von ergänzenden Positionssensoren untersucht.

Die Positionsbestimmung mittels eines photogrammetrischen Systems oder mittels eines terrestrischen Laserscanners ist prinzipiell unabhängig von GNSS-Signalen und kann somit auch unter Brücken oder in Bereichen mit dichter Uferbebauung eingesetzt werden. Ein DGNSS-Empfänger hingegen, der mit unabhängigen Korrekturdaten arbeitet, kann vor allem in Bereichen, in denen keine RTK-Lösung bestimmt werden kann, eine Option zur Überbrückung der Lücke darstellen.

### 4.1 Photogrammetrisches System (Kamera)

#### 4.1.1 Messprinzip

Im Bereich Photogrammetrie werden Fotos von einem Objekt aufgenommen, um darüber vermessungstechnisch relevante Informationen zu gewinnen. Dazu werden aus den zweidimensionalen Bildkoordinaten dreidimensionale Informationen abgeleitet. Diese Methodik wurde zunächst vor allem für die Auswertung von Luftbildern eingesetzt, welche mit speziellen Luftbildkameras aufgenommen wurden. Mittlerweile kommt diese Technik im Zuge der Nahbereichsphotogrammetrie auch für Fotos, die von kommerziell verfügbaren Kameras am Boden aufgenommen werden, zum Einsatz.

Wie bereits in Breitenfeld et al. (2015) beschrieben wurde, sind verschiedene Kamerakonfigurationen für die photogrammetrische Objekterfassung geeignet:

- Eine einzelne, bewegte Kamera,
- Stereokamerasysteme und
- Multikamerasysteme.

In diesem Kapitel wird lediglich die erste Kamerakonfiguration betrachtet, da diese Konfiguration im Zuge dieses Projekts eingesetzt werden soll. Prinzipiell kann jedoch auch ein aus mehreren Kameras bestehendes photogrammetrisches System zur Bestimmung von Positions- oder Geschwindigkeitsinformationen eingesetzt werden. Die Auswertung der Bilddaten, die mit einer der anderen Konfigurationen erfasst werden, beruht auf denselben Prinzipien wie für eine einzelne, bewegte Kamera. Eine genaue Beschreibung hierzu findet sich beispielsweise in Kraus (2004) oder in Luhmann (2010). Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit den Anwendungsmöglichkeiten für solche Multi-Kamera-Systeme, exemplarisch seien hier D'Apuzzo (2002), Boochs et al. (2010) oder Wenzel et al. (2011) genannt.

Für diese Anwendungen werden heutzutage die verschiedensten Kameras eingesetzt, wie etwa hochklassige Spiegelreflexkameras, Industriekameras und einfache Handyskameras.

Die damit aufgenommenen Fotos werden im Zuge des Auswerteprozesses zunächst relativ zueinander ausgerichtet, so dass dreidimensionale Informationen abgeleitet werden können. Abhängig davon welche Ergebnisse benötigt werden, wird eine geeignete Auswertestrategie gewählt:

- *Structure from Motion (SfM)*: Bestimmung einer Punktwolke des Objekts, wobei auch die Kamerakoordinaten und -orientierung bestimmt werden können
- *Visual Odometry*: Bestimmung der von der Kamera zurückgelegten Strecke bzw. ihrer Geschwindigkeit (Scaramuzza & Fraundorfer, 2011; Fraundorfer & Scaramuzza, 2011).

Da für den *Visual Odometry*-Ansatz bisher noch keine kommerziell verfügbare Software zur Verfügung steht, wird im Folgenden auf die Bestimmung der Kamerakoordinaten im Zuge des SfM-Konzepts eingegangen.

Im Zuge des SfM-Konzepts werden in den Bildern mehrfach auftauchende markante Objekte bzw. Passpunkte (*features*) detektiert und zur Bestimmung der relativen Ausrichtung der einzelnen Bilder zueinander verwendet. Dies kann, wie in Cefalu & Fritsch (2014) beschrieben, mithilfe einer Bündelblockausgleichung geschehen. Die dabei geschätzten oder bereits bekannten Parameter der *inneren* und *äußeren Orientierung* werden genutzt, um aus den einzelnen Bildpixeln eine dreidimensionale Punktwolke des Objekts zu erzeugen. Da diese ohne zusätzliche Informationen in einem willkürlichen und damit schwer interpretierbaren Koordinatensystem bestimmt wird, ist es sinnvoll, eine Georeferenzierung durchzuführen. Liegen bekannte Kamerakoordinaten und -orientierungen vor, welche von externen Sensoren bestimmt wurden, so können diese direkt in die Ausgleichung eingeführt werden. Eine Alternative stellt die Nutzung von koordinatenmäßig bekannten Festpunkten dar. Für diese müssen, soweit möglich, in den einzelnen Fotos die Bildkoordinaten bestimmt werden, sodass auch in diesem Fall die Parameter der äußeren Orientierung abgeleitet werden können.

Bei den Parametern der äußeren Orientierung handelt es sich um:

- $X_0, Y_0, Z_0$  : Objektkoordinaten des Projektionszentrums der Kamera und
- $\omega, \phi, \kappa$  : Räumliche Orientierungswinkel des Bildsensors.

Somit sind diese Parameter zeitlich variabel, i. A. unterscheiden sie sich von Bild zu Bild. Werden sie direkt bei der Bildaufnahme erfasst, so geschieht dies mittels zusätzlicher Sensoren (GNSS, IMU).

Für die Parameter der inneren Orientierung hingegen wird angenommen, dass sie bei unveränderten Kamera- und Objektiveneinstellungen konstant bleiben. Deshalb sollten sie mittels einer Kamerakalibrierung bestimmt werden. Dazu werden in Luhmann (2010) und Kraus (1996) verschiedene Ansätze vorgestellt. Bei den Parametern der inneren Orientierung handelt es sich um:

- $x_0^{Kamera}, y_0^{Kamera}$  : Bildkoordinaten des Bildhauptpunkts und
- $c$  : Kamerakonstante

Zudem können für ein Objektiv noch Korrekturkurven (Verzeichnungskurven) bestimmt werden, mit denen die radiale-symmetrische Verzeichnung  $\Delta x^{Kamera}, \Delta y^{Kamera}$  korrigiert werden kann (Kraus, 2004).

Liegen keine Daten zur Kamerakalibrierung vor, so werden diese ebenfalls im Zuge einer Bündelblockausgleichung geschätzt (siehe Gleichung (4.1-4)).

Um die genannten Parameter berechnen zu können, muss zunächst der Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten beschrieben werden. Dies geschieht mithilfe der Kollinearitätsgleichungen (4.1-1).

$$\begin{aligned} x^{Kamera} &= x_0^{Kamera} - c \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x^{Kamera} \\ y^{Kamera} &= y_0^{Kamera} - c \frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y^{Kamera} \end{aligned} \quad (4.1-1)$$

Mit:  $x^{Kamera}, y^{Kamera}$  - Bildkoordinaten eines Objekts  
 $X, Y, Z$  - Objektkoordinaten im Zielkoordinatensystem  
 $r_{ij}$  - Elemente der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{Kamera}^{LL}(\phi, \omega, \kappa)$ , siehe (4.1-3)  
mit  $i = 1,2,3$  und  $j = 1,2,3$

Zudem wird für den Bildhauptpunkt angenommen, dass

$$z = -c \quad (4.1-2)$$

gilt.

Die Kollinearitätsgleichungen können für die terrestrische Photogrammetrie nicht in ihrer allgemein gültigen Form angewendet werden, da es aufgrund der horizontalen Aufnahme-richtung ansonsten zu Singularitäten kommt (Luhmann, 2010). Luhmann (2010) schlägt deshalb vor, entweder die Rotationsreihenfolge zu ändern oder eine andere Definition des Bildkoordinatensystems zu verwenden. In diesem Fall liegt die durch die  $x^{Kamera}$ - und die  $z^{Kamera}$ -Achse aufgespannte Ebene parallel zur Bildebene.

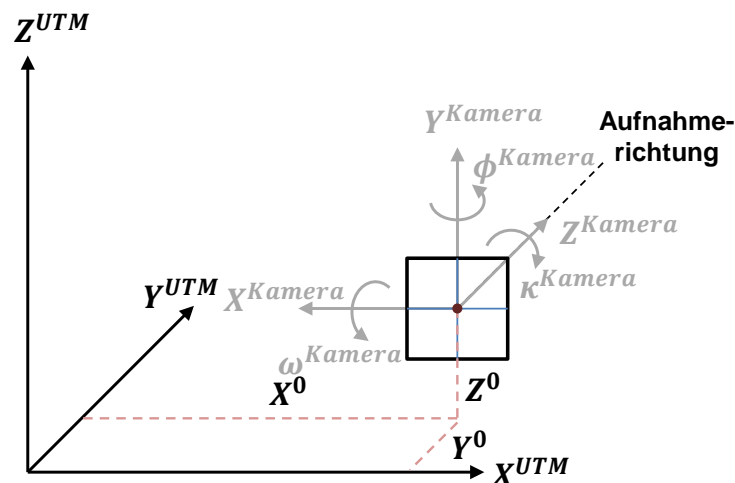


Abbildung 4-1: Koordinatensystem einer Kamera

Für die hier beschriebene Vorgehensweise wird die Rotationsreihenfolge angepasst (Abbildung 4-1). Luhmann (2010) definiert die dazugehörige Rotationsmatrix mit der Rotationsreihenfolge  $\phi^{Kamera} - \omega^{Kamera} - \kappa^{Kamera}$  (bzw.  $\phi, \omega, \kappa$ ):

$$\mathbf{R}_{Kamera}^{LL}(\phi, \omega, \kappa) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa - \sin \phi \sin \omega \sin \kappa & -\sin \phi \cos \omega & \cos \phi \sin \kappa + \sin \phi \sin \omega \cos \kappa \\ \sin \phi \cos \kappa + \cos \phi \sin \omega \sin \kappa & \cos \phi \cos \omega & \sin \phi \sin \kappa - \cos \phi \sin \omega \cos \kappa \\ -\cos \omega \sin \kappa & \sin \omega & \cos \omega \cos \kappa \end{bmatrix} \quad (4.1-3)$$

Für die Bündelblockausgleichung werden die Kollinearitätsgleichungen linearisiert und es wird eine Ausgleichung mit dem Gauß-Markov-Modell (siehe Gleichung (3.1-3)) durchgeführt. Als Unbekannte werden dabei die Orientierungsparameter sowie die Objektkoordinaten betrachtet (Luhmann, 2010). Hier wird davon ausgegangen, dass für die photogrammetrische Aufnahme eine einzelne Kamera verwendet wird.

$$\begin{bmatrix} x_i^{Kamera} + vx_i^{Kamera} \\ y_i^{Kamera} + vy_i^{Kamera} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi(X_0^{Kamera}, c, \Delta x^{Kamera}, X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \phi_j, \kappa_j, X_i, Y_i, Z_i) \\ \Phi(Y_0^{Kamera}, c, \Delta y^{Kamera}, X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \phi_j, \kappa_j, X_i, Y_i, Z_i) \end{bmatrix} \quad (4.1-4)$$

Die Bündelblockausgleichung kann somit als Erweiterung eines räumlichen Rückwärtschnitts verstanden werden (Luhmann, 2010), wobei durch Schätzung der Parameter der äußeren Orientierung für jedes Foto die Kameraposition bestimmt wird.

Zunächst müssen jedoch die für die Ausgleichung benötigten Initialwerte der unbekannten Parameter definiert werden. Ist die innere Orientierung bereits vorab bestimmt worden, können feste Parameter in die Ausgleichung eingeführt werden. Sind diese Parameter a-priori nicht bekannt, so müssen sie aus bekannten Informationen näherungsweise bestimmt werden. Näherungswerte für die Parameter der inneren Orientierung können den Metadaten eines Fotos (Exif<sup>2</sup>-Datei) entnommen werden, welche von hochwertigen Digitalkameras gespeichert werden. Die darin enthaltene Kamerakonstante  $c$  beispielsweise wird in vielen Fällen mit der Brennweite  $f$  approximiert.

Müssen die Parameter der inneren Orientierung ebenfalls bestimmt werden, so sind neben den sechs unbekannten Parametern der äußeren Orientierung (pro Bild) drei oder mehr Parameter der inneren Orientierung zu bestimmen. Zur Überwindung des Rangdefekts bei dieser Ausgleichung müssen die Koordinaten von mehreren Features herangezogen werden.

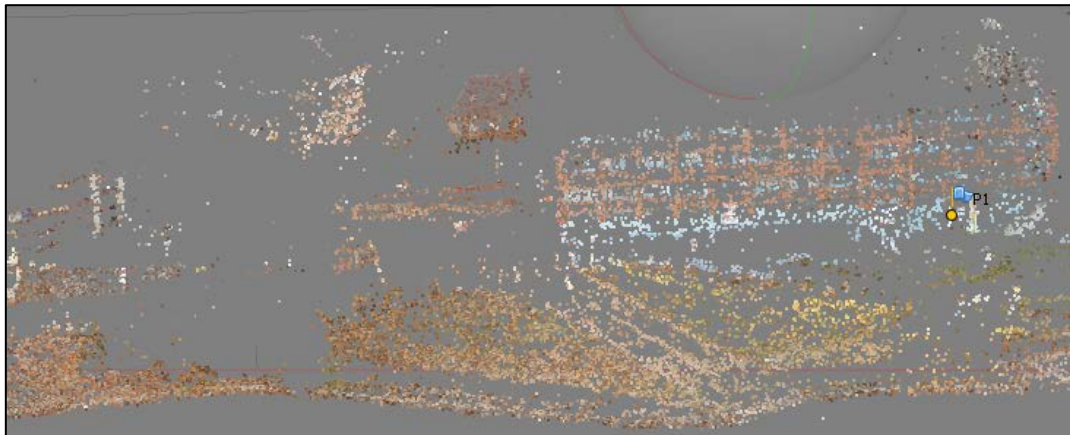
Die Bildkoordinaten ( $\mathbf{x}_i^{Kamera}$ ) dieser Features können auf unterschiedlichen Wegen gefunden werden:

- **Manuell:** Manueller Abgriff der Koordinaten aus den Bildern
- **Feature Detection:** Mithilfe geeigneter Algorithmen zur Featuredetektion werden geeignete Punkte in einer Auswertesoftware detektiert und ihre Bildkoordinaten

<sup>2</sup> Exchange Image File Format (Exif): Standardformat für den Austausch von Metadaten von digitalen Bildern nach (JEITA, 2010)

abgegriffen. Dabei kann es sich um natürliche oder künstliche Ziele (z. B. codierte Zielzeichen) handeln.

Bei den detektierten Features kann es sich um markante Punkte (Eckpunkte oder Merkmale, die sich von der Umgebung abheben) oder um definierte Kanten handeln. Für die Featureerkennung wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen Algorithmen entwickelt, für die wiederum unterschiedliche Operatoren zum Einsatz kommen. Eine Übersicht dazu findet sich beispielsweise in Luhmann (2010) oder in Fraundorfer & Scaramuzza (2012).



**Abbildung 4-2: Ausschnitt der in Agisoft PhotoScan detektierten Features zur Verknüpfung der einzelnen Bilder.**

Der *Scale-invariant feature Transform* (SIFT)- Algorithmus und der *Speeded Up Robust Features* (SURF)-Algorithmus zählen mit zu den bekanntesten dieser Algorithmen. Der in Lowe (1999) beschriebene SIFT-Operator kombiniert verschiedene Filteransätze. Dabei werden für jedes Bild zunächst mit dem *Difference-of-Gaussian* (DoG)-Filter, einer Approximation des Ableitungsfilters erster Ordnung, die Extremwerte (Kanten) in einer Bildpyramide bestimmt (Luhmann, 2010). Die so detektierten Merkmale sind invariant bezüglich Maßstab und Bildorientierung (Lowe 2004). Die stabilsten Merkmale werden als *Keypoints* klassifiziert. Für diese Merkmale werden die Gradientenrichtungen in einem Histogramm zusammengeführt, so dass die Merkmale bezüglich der lokalen Bildgradienten beschrieben werden können (Lowe, 2004). Dieser patentgeschützte Algorithmus detektiert somit weniger reale markante Punkte, sondern Features, die in mehreren benachbarten Bildern erscheinen (Luhmann, 2010). Aufgrund seiner Invarianz gegenüber Rotationen, Maßstabsänderungen und Rauschunempfindlichkeit (Lowe, 2004) eignet sich dieser Algorithmus gut für Bilder, die von einer stark bewegten Plattform aufgenommen wurden. Mit dem SURF-Operator schlagen Bay et al. (2006) einen dem SIFT-Operator ähnlichen Algorithmus vor. Dabei wird statt des DoG-Filters der *Laplacian-of-Gaussian* (LoG)-Operator verwendet. Dieser stellt eine wenig rauschempfindliche Version eines Ableitungsfilters zweite Ableitung unter Verwendung der Gauß-Funktion dar (Luhmann, 2010). Anschließend werden mithilfe der Determinanten der Hessematrix die Merkmale extrahiert (Khan et al., 2011).

Auch die im Folgenden eingesetzte Software Agisoft PhotoScan verwendet nach Agisoft (2011) einen dem SIFT-Operator ähnlichen Algorithmus zur Detektion von markanten

Punkten. Abbildung 4-2 zeigt anhand eines Beispiels die mit dieser Software detektierten Merkmale.

Um eine zuverlässige Bestimmung der Orientierungsparameter zu gewährleisten, müssen mögliche Falschzuordnungen von Passpunkten vermieden werden. In vielen Ansätzen kommt für die merkmalsbasierte Zuordnung der *Random Sample Consensus* (RANSAC) - Algorithmus zum Einsatz (Luhmann, 2010).

Nach der Bestimmung der Orientierungsparameter und der erfolgten Bildzuordnung, können die dreidimensionalen Koordinaten der aufgenommenen Objekte bestimmt werden.

Die zu Projektbeginn verfügbaren kommerziellen Softwares berechnen eine SfM-Lösung im Postprocessing-Modus. Eine echtzeitfähige kommerzielle Software stand nicht zur Verfügung.

Ansätze für Visual SLAM Algorithmen unter Verwendung mehrerer Kameras finden sich beispielsweise in Kaess & Dellaert (2006) und Heng et al. (2015). Bei den darin vorgestellten Systemen kommen teilweise, neben den Kameras, noch weitere Sensoren wie etwa Odometer zum Einsatz.

#### **4.1.2 Aufbau eines photogrammetrischen Messsystems**

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben wurde, können aus Fotos Informationen bezüglich der Geschwindigkeit der Kamera, ihrer räumlichen Orientierung und ihrer Position gewonnen werden. Da viele dieser beschriebenen Ansätze jedoch noch nicht in kommerziell verfügbaren Softwares realisiert sind, soll im Zuge dieses Projekts ein photogrammetrisches Messsystem aufgebaut werden, das die Kamerakoordinaten als zusätzliche Beobachtungen für die HydrOs-Software zur Verfügung stellt.

Ein solches System besteht aus zwei Komponenten: Eine Kamera und ein Rechner stellen die Hardwarekomponente dar, während kommerziell bzw. frei verfügbare Softwares die Bildaufnahme auslösen und für die Auswertung der Fotos eingesetzt werden. Um eine Integration in HydrOs zu ermöglichen müssen die Fotos mit einem Zeitstempel zum Aufnahmezeitpunkt versehen werden. Erfolgt die Aufnahme-Steuerung von einem zusätzlichen Rechner aus, muss sichergestellt werden, dass dessen Rechneruhr mit der HydrOs-Systemzeit (UTC-Zeit) synchronisiert werden kann.

Zunächst sollen an dieser Stelle die Anforderungen an die beiden Komponenten des Messsystems genannt werden.

##### **Kamera / Objektiv:**

- Die Kamera muss vom Rechner aus steuerbar sein. Hierzu muss eine Hardware-Schnittstelle vorhanden sein.
- Die interne Uhr der Kamera muss sich bezüglich einer externen Uhr synchronisieren lassen.
- Die aufgenommenen Fotos müssen mit einem Zeitstempel versehen werden, der idealerweise eine Auflösung im Sub-Sekundenbereich hat.

- Die Kamera muss über einen kompletten Fahrtabschnitt bzw. für Abschnitte Bilderfolgen in einem geringen zeitlichen Abstand aufnehmen.
- Die Kamera sollte gegen Umwelteinflüsse (z. B. Spritzwasser) geschützt sein.
- Es muss eine Möglichkeit zur Versorgung der Kamera mit Netzspannung vorhanden sein.
- Es sollen sowohl Aufnahmen von Objekten im Nahbereich (< 50 m) als auch von Objekten in großer Entfernung (> 300 m) möglich sein. Die Auflösung der Fotos muss dabei hoch genug sein, dass immer noch eindeutig identifizierbare Punkte an feststehenden Objekten detektiert werden können.
- Die Fotos müssen auch bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen aufgenommen werden können.

**Tabelle 4-1: Vergleich der Vor- und Nachteile von Industrie- und Spiegelreflexkameras**

	<b>Spiegelreflexkamera</b>	<b>Industriekamera</b>
<b>Preis</b>	-	+
<b>Nutzerfreundlichkeit</b>	++	-
<b>Individualisierbarkeit</b>	--	++
<b>Anpassung an unterschiedliche Bedingungen</b>	+	-
<b>Schutz vor Umwelteinflüssen</b>	o / +	kameraspezifisch
<b>Sensorgröße</b>	++	-
<b>Auflösung / Pixelgröße</b>	+	kameraspezifisch
<b>Verbindungsmöglichkeit</b>	+	++
<b>Programmierbarkeit</b>	-- (Canon: ++)	++

Für die Kameras werden hier die beiden Bautypen *Spiegelreflexkamera* und *Industriekamera* unterschieden. Jeder der beiden Typen hat Vor- und Nachteile für den Einsatz im Messsystem, die in Tabelle 4-1 gegenübergestellt werden. Hierbei handelt es sich allerdings nur um eine sehr allgemeine Gliederung, die für einzelne Modelle nicht zwingendermaßen zutreffen muss. Generell ist anzumerken, dass bei Integration einer Spiegelreflexkamera in das photogrammetrische Messsystem hauptsächlich Kameras der Hersteller Nikon und Canon infrage kommen, da für diese Kameras Software zur Steuerung mittels Rechner verfügbar ist. Für Canon steht mit dem Canon Hacker Development Kit (CHDK) (CHDK, 2016) zudem noch eine Bibliothek zur Erstellung von eigenen Steuerprogrammen zur Verfügung. Diese Programme können entweder mit uBasic oder mit Lua programmiert werden (CHDK, 2016). Mit Magic Lantern (Magic Lantern, 2016) steht eine weitere Umgebung zur Verfügung, innerhalb derer Programme erstellt werden können, die dann direkt auf die Speicherkarte der Kamera aufgespielt werden können. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass es sich dabei um freie Projekte unter GNU-Lizenz handelt und die offiziell nicht von Canon unterstützt werden. Bei Spiegelreflexkameras anderer Hersteller kann die eigentliche Bildaufnahme zwar über einen trigger-gesteuerten Fernauslöser ausgeführt werden, die Kameraeinstellungen müssen jedoch direkt an der Kamera vollzogen werden.

Prinzipiell können Kameras mit verschiedenen Kabeltypen an einen Rechner angeschlossen werden. Spiegelreflexkameras können i. A. mittels USB (USB 2 oder USB 3), HDMI

und neuerdings auch WLAN angebunden werden. In Anhang A.1. werden die momentan verfügbaren Kameras verschiedener Hersteller mit den verfügbaren Verbindungsmöglichkeiten aufgelistet. Industriekameras bieten in den meisten Fällen nur eine Verbindungsmöglichkeit. Fintel (2013) vergleicht mit USB 2.0, FireWire, Gigabit Ethernet (GigE), USB 3.0 und CameraLink verschiedene Optionen die in der Vergangenheit und gegenwärtig zu Einsatz kommen. Serielle RS232-Schnittstellen, wie sie im HydrOs-System verwendet werden, werden für Kameras nicht angeboten.

Bei Industriekameras sind, im Gegensatz zu den Spiegelreflexkameras, auch nutzerspezifische Kameraadaptionen möglich (bei herstellenseitig vertriebenen OEM-Lösungen).

#### **Software:**

- Es muss eine Schnittstelle zur Kommunikation mit der Kamera vorhanden sein (Kamerasteuerung, zeitliche Synchronisierung, etc.)
- Die Software muss die Aufnahme von Bildreihen mit geringem zeitlichem Abstand unterstützen. Idealerweise sollten Fotos mit einem zeitlichen Abstand von 1 s oder geringer möglich sein.
- Die Fotos müssen entweder auf der Speicherkarte oder auf dem Rechner abgespeichert werden.
- Zu jedem Foto müssen Metadaten mit Zeitstempel und der inneren Orientierung abgespeichert werden, idealerweise in Form einer Exif-Datei.
- Für die Fotos müssen sich Informationen (Kameraposition, Geschwindigkeit der Kamera, etc.) ableiten lassen, die als Beobachtungen in die HydrOs-Software eingegeben werden können.
- Bestimmung von Genauigkeitsinformationen für die abgeleiteten Informationen.
- Ausgabe der abgeleiteten Informationen als NMEA-String (z. B. NMEA-GGA).

Es ist momentan keine kommerzielle Software verfügbar, die all diese Anforderungen erfüllt. Aus diesem Grund müssen für diese Untersuchung mehrere Softwares gewählt und als einzelne Systemmodule betrachtet werden. Ein erstes Softwaremodul wird für die Steuerung der Kamera und der Bildaufnahme benötigt, wozu eine Kommunikation zwischen Kamera und Rechner erforderlich ist. Geeignete Softwares werden in Anhang A.2 aufgeführt. Das zweite Modul wertet die Fotos aus und berechnet Informationen zur Kamerabewegung, welche als Beobachtungen für das HydrOs-System geeignet sind, sowie, soweit möglich, deren zugehörige Genauigkeitsangaben (siehe Anhang A.3). In einem letzten Modul werden die erzeugten Daten für den Einleseprozess in die HydrOs-Software aufbereitet. Für diese Aufgabenstellung ist keine kommerzielle Software verfügbar, aus diesem Grund wird dieses Softwaremodul selbst programmiert.

Da das System aus mehreren unabhängigen Komponenten aufgebaut wird, muss insbesondere auf die Kompatibilität der einzelnen Teile geachtet werden. So eignen sich beispielsweise einige der in Anhang A.2 aufgelisteten Softwares nicht zur Steuerung von Industriekameras.



Aufgrund der Nutzerfreundlichkeit (große Anzahl von bereits installierten Programmen), der guten Auflösung und der ausreichenden Anpassbarkeit des Systems wurde für diese Untersuchung eine Spiegelreflexkamera ausgewählt. Hierfür wurde die am IIGS verfügbare Kamera Canon EOS 600D gewählt, die mit einem USB 2.0-Kabel an einen Rechner angeschlossen wird. Die zeitl. Synchronisierung der Kamera mit dem Rechner wird mittels der herstellereigenen Software EOS Utility (im Lieferumfang enthalten) realisiert. Hier ist anzumerken, dass keine Informationen zur zeitlichen Genauigkeit dieser Synchronisierung vorliegen. Da der Zeitstempel der Kamera im Allgemeinen auf ganze Sekunden gerundet ist, ist anzunehmen, dass die zeitl. Genauigkeit aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung ca. 1 s beträgt. Für eine Rechneruhr (Windows-Systemzeit) kann mit  $\sigma_{\text{Zeitstempel}} \approx 30 \text{ ms}$  eine höhere Genauigkeit des Zeitstempels erreicht werden (Breitenfeld et al., 2015). Aus diesem Grund sollte zum einen eine regelmäßige zeitliche Synchronisierung erfolgen und zum anderen eine Korrekturfunktion erstellt werden. Um eine solche Korrekturfunktion zu bestimmen, kann beispielsweise der NMEA-ZDA String eines der installierten Empfänger aufgezeichnet werden. Damit kann sowohl ein zeitlicher Offset als auch eine Drift der Rechneruhr bestimmt werden.

Zusätzlich können mit der Software die Kameraeinstellungen für die jeweils vorliegenden Umgebungsbedingungen getroffen werden. Die Software EOS Utility ist außerdem dazu fähig, Reihenaufnahmen mit einem am Rechner einzustellenden Zeitintervall auszuführen. Allerdings können mit dieser Software nur Fotos mit einem minimalen zeitlichen Abstand von ca. 5 s aufgenommen werden. Aus diesem Grund wurde eine weitere Software installiert: Die Freeware digiCamControl (siehe Anhang A.2). Mit dieser Software kann für aufzunehmende Bildreihen eingestellt werden, dass das jeweils nächste Bild 1 s nachdem die letzte Aufnahme beendet wurde, aufgenommen wird. Aufgrund von Totzeit und der Aufnahmedauer kommen somit zeitliche Abstände von durchschnittlich 1,1 s zustande. Dies hängt jedoch wiederum von den an der Kamera getroffenen Einstellungen ab (Auto Fokus oder manueller Fokus, Belichtungszeit, Übertragungszeit, etc.). Die Fotos werden direkt auf dem Rechner gespeichert, wobei für jedes Bild auch Metadaten in Form einer Exif-Datei abgespeichert werden.

Zur Befestigung der Kamera wurde am IIGS ein geeigneter Adapter entwickelt. Die Grundplatte des Kamera-Mounts des Laserscanners Leica HDS7000 kann auf einem Leica-/ Wild-Dreifuß befestigt werden. Der darauf angebrachte, neue Adapter (siehe Abbildung 4-3) hat einen um 90° schwenkbaren Kopf. Die Kamera selbst kann in beliebiger Ausrichtung auf dem Adapterkopf angebracht werden. Es bietet sich jedoch an, die Kanten des Kameragehäuses parallel zu Kanten des Adapterkopfs auszurichten. Zudem lässt sich die Ausrichtung der Kamera noch durch die gewählte Position der Adaptergrundplatte im Dreifuß variieren.



**Abbildung 4-3: Kamera mit Adapter**



**Abbildung 4-4: Kamera mit Verkabelung  
und Spritzwasserschutz**

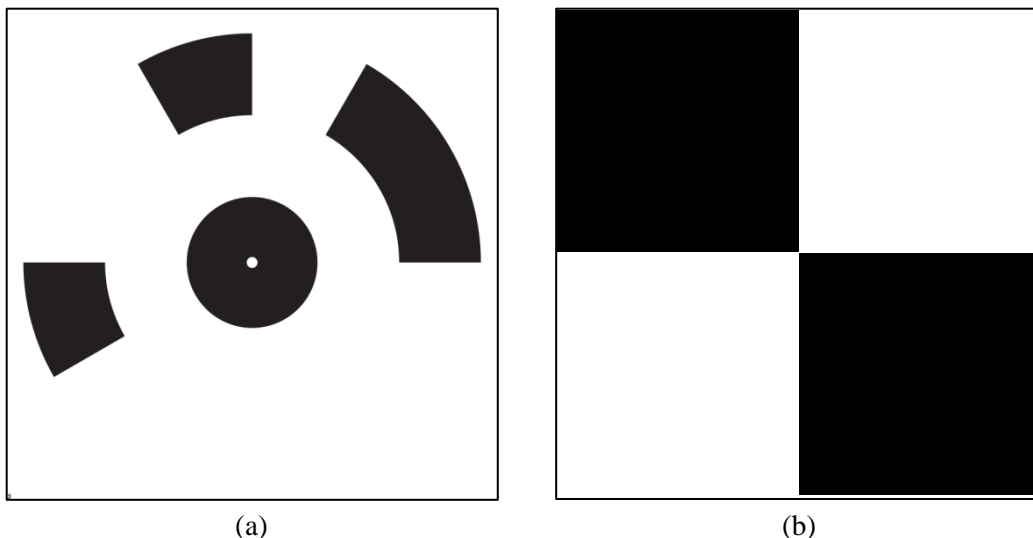
Um während der Fahrt einen möglichst maximalen Überlappungsbereich zwischen den einzelnen Fotos zu gewährleisten und gleichzeitig möglichst viele Objekte am Ufer zu erfassen, sollte die Kamera idealerweise in einem Winkel von  $\phi^{Kamera} = |55^\circ|$  bis  $\phi^{Kamera} = |90^\circ|$  zur Schiffslängsachse ausgerichtet werden ( $\omega^{Kamera} = 0^\circ$ ). Wird der Kippwinkel  $\omega^{Kamera}$  geändert, so vergrößert sich der minimale Wert für  $\phi^{Kamera}$  unter Umständen. Eine rückwärtsgerichtete Aufnahmerichtung ist nur dann realisierbar, wenn keine Schiffsaufbauten im Sichtfeld der Kamera liegen. Zudem sollte der Vertikalwinkel der Kamera so gewählt werden, dass die verfügbaren Objekte möglichst vollständig dargestellt werden können. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Bereiche im Foto, die für die Auswertung nicht nutzbar sind (z. B. Wasser und Himmel) minimiert werden.

Wird die Kamera an einer exponierten Stelle auf dem Schiff befestigt, so sollte sie außerdem mit einem Regenschutz versehen werden, sodass sie auch gegen Spritzwasser geschützt ist. Da sich bei Regen oder sehr hoher Luftfeuchtigkeit Tropfen auf dem Objektiv bilden, sollten bei solchen Bedingungen keine Fotos aufgenommen werden.

Für die photogrammetrische Auswertung wird die Software Agisoft PhotoScan (Professional Edition) genutzt, da diese Software eine einfache Bedienung anbietet. Wie bei allen in Anhang A.3 aufgelisteten Softwares müssen keine Kalibrierungsdaten für die verwendete Kamera bzw. Kamera-/Objektiv-Verbindung vorliegen. Eine Kalibrierung würde zwar die Genauigkeit der Ergebnisse weiter steigern, allerdings müsste dann stets dasselbe Objektiv mit der für die Kalibrierung verwendeten Brennweite verwendet werden. Ohne Kalibrierungsdaten kann, bei Verwendung eines Zoomobjektivs, die Fokussierung bei einer kurzen Messunterbrechung den Umgebungsbedingungen angepasst werden.

Die Software erzeugt aus den aufgenommenen Fotos eine 3D-Punktwolke des Uferbereichs. Die Kameraposition und -orientierung (äußere Orientierung) wird dabei in einem Zwischenschritt mitberechnet und ausgegeben. Diese Punktwolke und die zugehörigen Kamerastandpunkte liegen zunächst in einem willkürlichen, lokalen Koordinatensystem  $\mathbf{x}^{lokal}$  vor. Zur Georeferenzierung der Daten können die (interpolierten) bekannten Koordinaten der Kamera in einem übergeordneten Koordinatensystem eingelesen werden. Alternativ können auch bekannte Festpunkte am Ufer mit entsprechenden Zielzeichen signa-

lisiert werden (Abbildung 4-5) oder natürliche markante Punkte bestimmt werden. Diese können in der Software manuell oder automatisch detektiert (*Marker*) und mit den Punktkoordinaten versehen werden. Sind mindestens 3 Festpunkte vorhanden, kann eine Transformation in das übergeordnete Koordinatensystem durchgeführt werden.



**Abbildung 4-5: Beispiele für Zielzeichen für die photogrammetrische Auswertung: (a) Koordiniertes Zielzeichen, generiert in Agisoft PhotoScan, (b) Schachbrettzielmarke**

Agisoft PhotoScan gibt die berechneten Kamerakoordinaten und die bestimmte Orientierungswinkel der Kamera in einer ASCII-Datei aus, wodurch die Datenaufbereitung für die HydrOs-Software stark vereinfacht wird. Diese Datei (\*.dat) enthält folgende Informationen:

- Dateiname (Foto)
- Kameraposition  $(x_k^{lok}, y_k^{lok}, z_k^{lok})$  bzw.  $(E_{Kamera,k}^{UTM}, N_{Kamera,k}^{UTM}, U_{Kamera,k}^{UTM})$
- Kameraorientierung  $(\varphi_k^{lok}, \theta_k^{lok}, \psi_k^{lok})$
- Kamera-ID

Eine Kurzanleitung für die Bedienung der Software Agisoft PhotoScan findet sich in Anhang D.

Um diese Daten als Beobachtungen in der HydrOs Software nutzen zu können, sollen sie als NMEA-GGA String formatiert werden. Dazu muss zunächst jeder Kamerastandpunkt mit einem Zeitstempel versehen werden. Die zugehörige Zeitinformation kann aus der Exif-Datei abgegriffen und in UTC-Zeit ausgedrückt werden. Liegen die Kamerakoordinaten als UTM-Koordinaten oder als lokale Koordinaten vor, so müssen diese in ellipsoidische Koordinaten  $L, B, h$  (ECEF-Koordinatensystem) transformiert werden. Im ersten Fall erfolgt die Transformation unter Verwendung der bereits in HydrOs genutzten Transformationsfunktion (Breitenfeld et al., 2015). Der zweite Fall erfordert zusätzlich Festpunkte, deren Koordinaten sowohl im genutzten lokalen Koordinatensystem als auch im Zielsystem vorliegen. Mithilfe einer Helmert-Transformation können auch diese Punkte transformiert werden. Die Höhen müssen als ellipsoidische Höhen vorliegen.

Diese Informationen können in einen NMEA-GGA-String eingefügt werden, so dass eine NMEA-Datei mit den Kamerapositionen abgespeichert werden kann.

Zur schnellen Umwandlung der von Agisoft PhotoScan ausgegebenen Ergebnisse (UTM-Koordinaten) wurden die beschriebenen Schritte in einem Ergänzungsmodul zur HydrOs-Software implementiert. Dieses wird in Anhang E beschrieben.

#### 4.1.3 Beobachtungsmodell für die kamerabasierten Beobachtungen

Bei dem hier untersuchten Ansatz zur Auswertung der Fotos mit Agisoft PhotoScan werden die Kamerapositionen bestimmt. Nach dem Import in die HydrOs-Software werden diese Informationen zurück ins UTM-Koordinatensystem transformiert (Breitenfeld et al., 2015), somit ergeben sich folgende Beobachtungen:

$$\mathbf{l}_{Kamera,k+1} = \begin{bmatrix} E_{Kamera,k+1}^{UTM} \\ N_{Kamera,k+1}^{UTM} \\ U_{Kamera,k+1}^{UTM} \end{bmatrix}, \quad (4.1-5)$$

$$\Sigma_{ll,Kamera} = \begin{bmatrix} \sigma_{E_{Kamera}}^{2,UTM} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{N_{Kamera}}^{2,UTM} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{U_{Kamera}}^{2,UTM} \end{bmatrix}$$

Mit:  $\begin{bmatrix} E_{Kamera,k+1}^{UTM} \\ N_{Kamera,k+1}^{UTM} \\ U_{Kamera,k+1}^{UTM} \end{bmatrix}$ : UTM-Koordinaten und ellipsoidische Höhe der Kamera zur Epoche  $k+1$

Die zugehörigen Varianzen müssen aus den Informationen in PhotoScan abgeschätzt werden.

Alternativ könnten die UTM-Koordinaten auch direkt in einem noch zu spezifizierenden Format eingelesen werden.

Das Beobachtungsmodell für das EKF ergibt sich analog zu dem für die GNSS-Koordinaten bestimmten Beobachtungsmodell in Breitenfeld et al. (2015):

$$\mathbf{a}_{Kamera,k+1}(\bar{\mathbf{x}}_{k+1}) = \begin{bmatrix} \bar{E}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{N}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{U}_{RP,k+1}^{UTM} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_B^{LL}(\bar{\varphi}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\theta}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\psi}_{k+1}^{B,LL} + c) \cdot \begin{bmatrix} x_{Kamera}^B - x_{RP}^B \\ y_{Kamera}^B - y_{RP}^B \\ z_{Kamera}^B - z_{RP}^B \end{bmatrix} \quad (4.1-6)$$

Mit:  $\begin{bmatrix} \bar{E}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{N}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{U}_{RP,k+1}^{UTM} \end{bmatrix}$  - prädierte UTM-Koordinaten und ellipsoidische Höhe des Referenzpunkts RP zur Epoche  $k+1$  (Zustandsgrößen)

$\bar{\varphi}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\theta}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\psi}_{k+1}^{B,LL}$  - prädierte Orientierungswinkel zur Epoche  $k+1$  (Zustandsgrößen)

$c$  - Meridiankonvergenz

$\begin{bmatrix} x_{Kamera}^B \\ y_{Kamera}^B \\ z_{Kamera}^B \end{bmatrix}$  - Kamerakoordinaten im Schiffskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^b$ )

$\begin{bmatrix} x_{RP}^B \\ y_{RP}^B \\ z_{RP}^B \end{bmatrix}$  - Koordinaten des Referenzpunkts RP (Prädiktionspunkt) im Schiffskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^b$ )

Die notwendigen Ableitungen zur Bestimmung der Designmatrix  $\mathbf{A}_{k+1}$  finden sich im Anhang E.6 in Breitenfeld et al. (2015).

## 4.2 Terrestrischer Laserscanner

### 4.2.1 Messprinzip bei kinematischen Messungen

Terrestrische Laserscanner, die für Vermessungszwecke eingesetzt werden, können auch als tachymetrische Scanner bezeichnet werden (Staiger, 2003), da bei der Erfassung der Umgebung oft dieselben Messgrößen wie bei einem Tachymeter erfasst werden. Das Messergebnis wird in Form einer Punktwolke ausgegeben, wobei für die einzelnen Punkte neben den Koordinaten  $(x_i^{TLS}, y_i^{TLS}, z_i^{TLS})$  auch Informationen zur Intensität des reflektierten Signals bestimmt werden.

Gegenwärtig sind verschiedene Bauformen von terrestrischen Laserscannern erhältlich (siehe Breitenfeld et al. (2015)). Um sie zu klassifizieren, werden unterschiedliche Kriterien angewendet. Prinzipiell muss zunächst unterschieden werden, ob Daten im 2D- oder 3D Raum erfasst werden sollen. Im ersten Fall handelt es sich um Zeilen- bzw. Profils Scanner, bei dem 2D-Profil der Umgebung erfasst werden. Diese Scanner besitzen im Allgemeinen lediglich eine Rotationsachse, während bei 3D-Scannern Rotationen um die Stehachse und um die Kippachse möglich sind. In vielen Fällen besteht auch für 3D-Scanner eine Applikation zur Messung im Profilmodus.

In den meisten Fällen werden Laserscanner nach dem eingesetzten Verfahren zur Streckenmessung kategorisiert (Joeckel et al., 2008): Entweder kommt das Phasenvergleichsverfahren oder das Laufzeitverfahren (Impulsmessung) zum Einsatz, so dass man von Phasenscannern und (Im-)Pulsscannern sprechen kann.

Phasenscanner erreichen eine höhere Streckenmessgenauigkeit als Impulsscanner, haben jedoch mit gegenwärtig maximal 187 m eine begrenzte Reichweite. Innerhalb dieses Bereichs kann eine sehr dichte Objektabtastung erreicht werden.

Beim Impulsscanner ist die Streckenmessgenauigkeit geringer als bei einem Phasenscanner, wird bei neueren Produkten jedoch immer weiter der Streckenmessgenauigkeit von Phasenscannern angepasst. Die maximale Reichweite eines solchen Scanners ist wesentlich größer als bei einem Phasenscanner, sie reicht gegenwärtig bis zu 4000 m (Riegl VZ-4000). Aufgrund des Messverfahrens und um bei den großen Entfernungen noch eine ausreichende Objektabtastung zu gewährleisten, ist die Messdauer dabei höher als bei einem Phasenscanner.

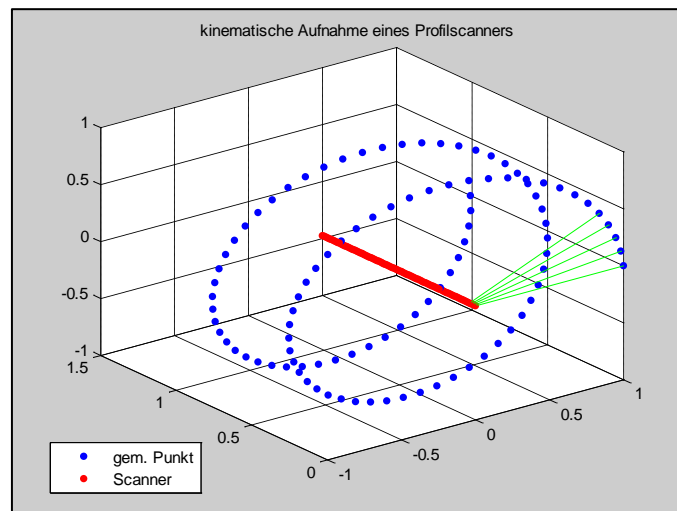
Staiger (2003) definiert ein weiteres Klassifizierungskriterium entsprechend zum Erfassungsbereich eines Laserscanners. Hierbei wird zwischen:

- Kamera-Scannern (in Vertikal- und in Horizontalrichtung begrenztes Sichtfeld),
- Panorama-Scannern (der gesamte Raum mit Ausnahme des Instrumentensockels kann erfasst werden) und
- Hybrid-Scannern (für eine Rotationsachse ist der Aufnahmebereich begrenzt, in der zweiten Richtung kann der komplette Bereich aufgenommen werden)

unterschieden.

Beim kinematischen Laserscanning werden Scanner auf einer bewegten Plattform befestigt, so dass der Scanner selbst bewegt wird. Je nach Bautyp des Scanners, unterscheidet sich die Aufnahme der Umgebung: Während für Kamerascanner ein Zick-Zack-förmiges, einseitiges Muster des Laserpunkts entsteht, erfassen Profils Scanner die Umgebung in einem helixförmigen Muster (siehe Abbildung 4-6).

Kinematisches Laserscanning wird vor allem für sogenannte **Mobile-Mapping** Anwendungen eingesetzt. Um die Umgebung schnellstmöglich in Form einer Punktwolke zu erfassen, ist der Laserscanner dabei in den meisten Fällen Bestandteil eines Multisensorsystems. Durch die zusätzlich erfassten Sensordaten (Position und Orientierung des Scanners) können die einzelnen Punkte, die zum Zeitpunkt  $t_j$  erfasst werden, direkt in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden. Wie in Breitenfeld et al. (2015) beschrieben, werden solche Mobile Mapping Systeme heutzutage von zahlreichen Laserscannerherstellern und Ingenieurbüros angeboten. Als mobile Plattformen dienen dabei i. A. Autos oder Schienenfahrzeuge. Mittlerweile sind jedoch auch tragbare Systeme am Markt erhältlich (p3dsystems).

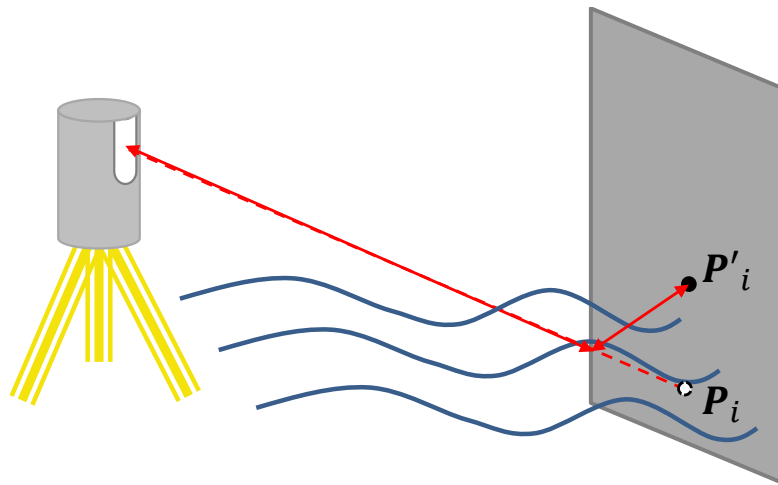


**Abbildung 4-6: Helixförmiges Punktmuster bei einer kinematischen Aufnahme mit einem Profils Scanner**

Böder et al. (2010) beschreiben den Aufbau eines solchen Mobile Mapping Systems auf einem Vermessungsschiff, mit dem die Umgebung gleichzeitig über und unter Wasser erfasst werden kann. Die Anwendungsmöglichkeiten eines solchen Systems werden beispielsweise in Thies (2013) und Rieger et al. (2008) aufgezeigt. Riegl bietet ein solches Mobile Mapping-System in den USA bereits explizit für hydrographische Aufnahmen an (Riegl, 2016a).

Neben den grundlegenden Fehlereinflüssen beim Laserscanning, die in Gordon (2008) und Kauker (2016) näher beschrieben werden, kommen bei Messungen über Wasser zusätzliche Einflüsse zum Tragen. Durch Totalreflexionen des Laserstrahls an der Wasseroberfläche und anschließender Reflektion an einem dahinterliegenden Objekt, ordnet der Laserscanner die Messdaten falsch zu, sodass in der Punktwolke virtuelle Punkte enthalten sein können (Abbildung 4-7). Zur Eliminierung dieser Punkte aus dem Datensatz müssen

effiziente Filteralgorithmen angewendet werden. Außerdem ist anzunehmen, dass sich der Refraktionseinfluss aufgrund der Nähe zum Wasser wesentlich stärker als bei Messungen über Land auswirkt.



**Abbildung 4-7: Erzeugung eines virtuellen Punktes  $P'_i$  durch Reflexion des Laserstrahls**

Wird ein Laserscanner auf einem Schiff eingesetzt, ist zudem zu beachten, dass passieren-  
de Schiffe Abschattungen verursachen: Die dahinterliegenden Objekte am Ufer können in  
diesem Moment nicht erfasst werden. Die dabei erfassten 3D-Punkte müssen durch Filte-  
rung aus der Punktwolke entfernt werden.

#### 4.2.2 Ansätze zur Positionsbestimmung

Nimmt ein terrestrischer Laserscanner seine Umgebung in einem instrumentenbezogenen  
lokalen Koordinatensystem auf, so wird die Position des Scanners im Allgemeinen als  
Ursprung dieses lokalen Koordinatensystems angenommen. Das Zusammenführen der  
Scanpunkte von mehreren Standpunkten in einem (willkürlichen) lokalen Koordinatensys-  
tem wird als Registrierung bezeichnet. Für die Georeferenzierung werden die bestimmten  
Punkte (Scanpunkte und Standpunkte) nach Vennegeerts (2011) in einen absoluten Raum-  
bezug gebracht und somit in ein vordefiniertes Koordinatensystem transformiert. Im stati-  
schen Fall wird angenommen, dass der Scanner für die gesamte Aufnahmedauer auf einer  
Position verbleibt, während im kinematischen Fall von einer zeitlich veränderlichen Scan-  
nerposition ausgegangen wird. Kutterer (2010) unterscheidet für den kinematischen Fall  
wiederum zwischen zwei Aufnahmemodi:

- Stop-and-Go Modus: Es wird angenommen, dass die Scannerposition für einen  
Scannerumlauf (ein Profil) konstant bleibt.
- On-the-fly Modus: Der Laserscanner wird während der Aufnahme als kontinuier-  
lich bewegt angesehen.

Da bei einer kinematischen Aufnahme von umgebenden Objekten nicht die komplette  
Umgebung von einem Standpunkt erfasst wird (Kapitel 4.2.1), kann eine solche Georefe-  
renzierung nur mithilfe von ergänzenden Informationen durchgeführt werden.

Aus diesem Grund wurden in vielen verschiedenen Forschungsprojekten unterschiedliche  
Ansätze zur Positionsbestimmung mittels terrestrischen Laserscannern entwickelt. Prinzi-

piell werden dabei zwei Auswertungsmodi unterschieden: Echtzeitfähige Auswerteverfahren und Verfahren, die im Postprocessing-Modus angewendet werden.

In beiden Fällen werden die mittels Laserscanner erfassten 3D-Punkte mit Umgebungsinformationen (*Karte*) abgeglichen, wozu sie in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden müssen. Dies geschieht in den meisten Ansätzen mithilfe unterstützender Sensorik (z. B. IMU). Die Umgebungskarte kann dabei Informationen von einzelnen bekannten Landmarken (Hofmann et al., 2012) oder aber auch ein komplettes Geländemodell enthalten.

Um die Messdaten der einzelnen Sensoren miteinander verarbeiten zu können, müssen die Daten in solchen Systemen mit einem Zeitstempel versehen werden, der sich auf eine einheitliche Zeitskala bezieht. Hierfür ist eine sorgfältige zeitliche Synchronisierung des Systems erforderlich.

Eine solche Lösung könnte beispielsweise mithilfe eines Mobile-Mapping-Systems, wie es beispielsweise in p3dsystems (2015), Leica (2016) oder Riegl (2016b) vorgestellt wird, entwickelt werden. Ein auf dem Schiff befestigter Laserscanner erfasst die Umgebung, wobei die Scanpunkte mithilfe der von HydrOs bestimmten Ergebnisse georeferenziert werden. Bei einem durch einen längeren GNSS-Ausfall verursachten Abdriften der Trajektorie wird auch ein Fehler in der Punktwolke ersichtlich sein. Durch eine Verbesserung der Punktwolke könnte wiederum die Position des Sensors und damit die des Schiffs neu berechnet werden. Diese neuen Positionen könnten in einer Auswertung mit HydrOs als Beobachtungen eingeführt werden, sodass die Drift in der aus dem Filterergebnis resultierenden Trajektorie minimiert wird.

Um eine aus Laserscanner-Daten abgeleitete Position in HydrOs integrieren zu können, muss beachtet werden, dass ein solcher Ansatz nicht in jedem Messgebiet realisiert werden kann. Findet sich im Uferbereich eine starke Vegetation bzw. sehr homogene Objekte (z. B. glatte Mauern ohne Strukturen), so ist eine Bestimmung der Sensor- bzw. Plattformposition nur schwer möglich. Soll das integrierte kinematische TLS-System auch in solchen Bereichen eingesetzt werden, so ist das Anbringen von künstlichen Landmarken (Zielzeichen) erforderlich.

#### **4.2.3 Verwendung von TLS-Daten zur Evaluierung des photogrammetrischen Messsystems**

Neben der Einsatzmöglichkeit eines Terrestrischen Laserscanners als kinematisch aufnehmender Sensor, kann er auch zur Unterstützung und zur Evaluierung der photogrammetrisch erfassten Daten verwendet werden. Hierzu werden Messungen im statischen Messmodus durchgeführt: Der Laserscanner wird auf mehreren Punkten am Ufer aufgebaut, sodass der gewünschte Uferbereich erfasst werden kann. Zur Verknüpfung der einzelnen Scans und auch zur Georeferenzierung der Punktwolken werden Festpunkte benötigt, die durch gerätespezifische Zielzeichen signalisiert werden.

Ebenso wie bei kinematischen Messungen ist auch bei statischen Messungen zu beachten, dass bei Messungen über Wasser die Strecken- und Vertikalwinkelmessungen durch Refraktion beeinflusst werden.



Die Messplanung hängt stark von dem verwendeten terrestrischen Laserscanner ab. Im Zuge dieses Projekts kommt ein Impulsscanner (VZ-2000) der Firma Riegl zum Einsatz (Riegl, 2015). Dieser Scanner hat eine maximale Reichweite von 2000 m und ermöglicht eine Streckenmessgenauigkeit von 8 mm auf 180 m. Dadurch kann das Messgebiet mit verhältnismäßig wenigen Standpunkten nahezu komplett erfasst werden.

Die erfassten Messdaten werden zur Auswertung in eine herstellerspezifische Software (RiScan) eingelesen und registriert. Die Koordinaten der zur Georeferenzierung verwendeten signalisierten Passpunkte wurden vorab mittels statischer GNSS-Messungen bestimmt. Bei einer Registrierung der Punktwolken werden die Passpunkte für eine Koordinatentransformation genutzt. Zur Verbesserung der relativen Ausrichtung der einzelnen Punktwolken zueinander kann in einem zweiten Schritt der *Iterative Closest Point* (ICP) Algorithmus verwendet werden. Mithilfe dieses Algorithmus werden die Abstände der Punkte, die von verschiedenen Scannerstandpunkten aufgenommen wurden, iterativ über die komplette Punktwolke minimiert (Besl & McKay, 1992).

Aus einer registrierten Punktwolke können Koordinaten von markanten Punkten abgegriffen werden, welche dann als Festpunktkoordinaten für die photogrammetrische Auswertung verwendet werden können. Aufgrund der, im Vergleich zur photogrammetrischen Aufnahme, geringeren Punktdichte muss jedoch sichergestellt werden, dass sowohl in der TLS-Punktwolke als auch in der photogrammetrischen Punktwolke bzw. in den Fotos tatsächlich ein identischer Punkt ausgewählt wird. Da die beiden Systeme normalerweise nicht denselben Punkt erfassen, muss ein solcher Punkt als Schnittpunkt von rekonstruierbaren Kanten oder Flächen gebildet werden. Dabei ist zu beachten, dass die geometrische Genauigkeit von (konstruierten) Punkten in großer Entfernung von einem Laserscannerstandpunkt als geringer einzuschätzen ist als wenn diese mit einer statischen GNSS- bzw. mit einer RTK-Messung bestimmt und anschließend mit einem Zielzeichen signalisiert werden.

Eine Evaluierung der photogrammetrisch erfassten Kamerapositionen erfolgt auf indirektem Weg über die erzeugten Punktwolken, da die Kamerapositionen selbst nicht vom Laserscanner erfasst werden.

Anhand von eindeutig identifizierbaren identischen Punkten, die möglichst gleichmäßig über die gesamte Punktwolke verteilt sein sollten, können die Klaffungen zwischen den Punktwolken bestimmt werden. Diese werden als geometrisches Genauigkeitsmerkmal herangezogen. Ebenso können eindeutig identifizierbare Kanten und Flächen betrachtet werden. In diesem Fall wird der minimale räumliche Abstand im Bereich des realen Objekts sowie die räumliche Ausrichtung des Objekts als Genauigkeitsmaß betrachtet.

Systematisch verteilte räumliche Abstände deuten auf eine nicht-ausreichende Bestimmung der Translationsparameter oder des Maßstabsfaktors hin. Unterschiedliche räumliche Ausrichtungen von Objekten deuten hingegen auf einen Fehler in der Rotationsmatrix hin.

Eine detektierte Kante kann in der Vektorform (4.2-1) beschrieben werden. Der Abstand zweier nicht-paralleler Geraden ( $G_1, G_2$ ) wird als Höhe eines Spats betrachtet und ergibt

sich als Quotient aus dem Volumen eines Spats und dessen Grundfläche (Merziger & Wirth, 2010):

$$G_i: \mathbf{a}_i + t \cdot \mathbf{b}_i \quad \text{mit } i = 1, 2 \quad (4.2-1)$$

$$d(G_1, G_2) = \frac{|(\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1), \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2|}{|\mathbf{b}_1 \times \mathbf{b}_2|} \quad (4.2-2)$$

Wird dieser minimale Abstand jedoch für einen Geradenabschnitt bestimmt, der außerhalb der realen Kanten liegt, so wird stattdessen der minimale orthogonale Abstand der Kantenanfangs- bzw. Endpunkte berechnet.

Um die Ausrichtung zweier nicht-paralleler Kanten relativ zueinander zu beschreiben, kann der Winkel zwischen ihnen bzw. zwischen ihren Richtungsvektoren  $\mathbf{b}_i$  berechnet werden.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\mathbf{b}_1 \cdot \mathbf{b}_2}{|\mathbf{b}_1| \cdot |\mathbf{b}_2|}\right) \quad (4.2-3)$$

Werden Ebenen (z. B. eine Wand) untersucht, so muss zunächst für jede Ebene der jeweilige Normalenvektor  $\mathbf{n}_i$  berechnet werden. Die räumliche Orientierung wird in diesem Fall durch den Raumwinkel zwischen den beiden Normalenvektoren repräsentiert (siehe Gleichung (4.2-3)). Um den minimalen Abstand der beiden Ebenen zu bestimmen, muss zunächst untersucht werden, ob sich die betrachteten Flächen im definierten Bereich schneiden. In diesem Fall beträgt der minimale Abstand der beiden Ebenen  $E_1$  und  $E_2$  Null ( $d(E_1, E_2) = 0$ ).

Die Ebenengleichungen der beiden untersuchten Ebenen werden in der Hesseschen Normalenform ausgedrückt (4.2-4). Wird der Normalenvektor einer der beiden Ebenen normiert und wird ein Punkt, der auf der jeweils anderen Ebenen liegt, in die entsprechende Ebenengleichung eingesetzt, so kann der Abstand zwischen Punkt und Ebene bestimmt werden (4.2-5).

$$E_i: \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{n}_i = u_i \quad \text{mit } i = 1, 2 \quad (4.2-4)$$

$$d(E_1, P_2) = \mathbf{x}_{P_2}^T \cdot \frac{\mathbf{n}_1}{|\mathbf{n}_1|} - u_1 \quad (4.2-5)$$

Im Falle von parallelen Ebenen handelt es sich dabei gleichzeitig um den Abstand der Ebenen zueinander. Für nicht-parallele Ebenen, die sich außerhalb des definierten Bereichs schneiden, wird der Abstand aller Eckpunkte einer der definierten Flächen zur jeweils anderen Ebene bestimmt. Der Minimalwert der berechneten Abstände wird als zu betrachtender Abstand der beiden Ebenen definiert.

Zur Überprüfung des Maßstabsfaktors  $\lambda_{ph}$ , der für die Skalierung der photogrammetrischen Punktwolke bestimmt wurde, wird jeweils der Abstand zwischen zwei definierten Punkten innerhalb einer Punktwolke berechnet. Werden diese beiden Distanzen aus der TLS-Punktwolke und aus der photogrammetrisch bestimmten Punktwolke verglichen, lässt sich die Abweichung des Maßstabsfaktors  $\lambda_{ph}$  beurteilen. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Maßstabsfaktor der TLS-Punktwolke  $\lambda_{TLS} = 1$  ist.

$$\Delta\lambda_{ph} = \lambda_{ph} - 1$$

(4.2-6)

## 4.3 DGNSS-Empfänger

### 4.3.1 Messprinzip

Das Messprinzip beim differentiellen GNSS (DGNSS) verlangt zwei GNSS-Empfänger: Eine Referenzstation, die auf einem koordinatenmäßig bereits bekannten Punkt aufgebaut ist, und eine Rover-Station, deren Position bei der Messung bestimmt werden soll. Beide Empfänger beobachten zeitgleich dieselben Satelliten. Für die Referenzstation kann ein Korrektursignal bestimmt werden, mit dessen Hilfe auch die gemessenen Pseudostrecken (*pseudoranges*) für den Rover verbessert werden können. Eine ausführliche Beschreibung des Messprinzips findet sich bereits in Breitenfeld et. al (2015).

In der Gewässervermessung der WSV wird anstelle einer eigenen Referenzstation bzw. eines eigenen Referenzstationennetzes der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) eingesetzt. Dieser Service erstellt aus einem Netz von kontinuierlich betriebenen Referenzstationen Korrektursignale für verschiedene Genauigkeitsanforderungen und stellt diese dem Nutzer kostenpflichtig zur Verfügung. Bei Ausfall dieses Korrekturdatendienstes entstehen auch außerhalb von Abschattungsbereichen GNSS-Ortungslücken.

Zur Verkehrsicherung betreibt die WSV allerdings aufgrund internationaler Verpflichtungen der IMO (International Maritime Organisation) einen eigenen, auf der Seefunkfrequenz (Radio Beacons) basierenden Korrekturdatendienst. Die mit diesem Korrekturdatendienst erreichbare Genauigkeit erfüllt zwar die Anforderungen für die Navigation der Berufsschifffahrt, jedoch aber nicht die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit in der Gewässervermessung. Der Korrekturdatendienst der WSV hat jedoch eine höhere Verfügbarkeit als der SAPOS-Korrekturdatendienst. Der Einsatz eines DGNSS-Empfängers begründet sich daher durch den unabhängigen Korrekturdatendienst.

Die mit einem DGNSS-Empfänger gemessene Position hat typischerweise eine Unsicherheit von 2,5 m. Dieses Genauigkeitspotential liegt zwar absolut gesehen deutlich über den Anforderungen an HydrOs, allerdings ist das kurzzeitige Rauschen bei hochwertigen Empfängern sehr viel kleiner. Die Positionen in den erfassten Messreihen sind bei einer stabilen Satellitenkonfiguration zwar parallel zu einer Solltrajektorie versetzt, aber formtreu.

Daher werden in HydrOs die gemessenen Koordinaten des DGNSS-Empfängers mit der Summe der jeweiligen Innovation korrigiert, bevor diese als Beobachtungen integriert werden. Bei Satellitenkonstellationswechseln ändern sich die DGNSS-Positionen sprunghaft und somit auch die Innovationen. Daher wird bei Veränderung der Satellitenanzahl die Standardabweichung der DGNSS-Position angepasst, sodass diese in der Auswertung einen geringen Einfluss haben.

### 4.3.2 Beobachtungsmodell für DGNSS-Beobachtungen

Wie in Breitenfeld et al. (2015) dargestellt wird, werden in HydrOs für DGNSS-Empfänger nur die UTM-Koordinaten (zweidimensionale Position) als Beobachtungsgrößen integriert. Die beobachteten ellipsoidische Koordinaten  $(L, B, h)$  werden dazu zunächst aus dem WGS84-System ins UTM-Koordinatensystem transformiert, sodass

$$\mathbf{l}_{DGNSS,k+1} = \begin{bmatrix} E_{DGNSS,k+1}^{UTM} \\ N_{DGNSS,k+1}^{UTM} \\ COG_{DGNSS,k+1}^{B,LL} \\ SOG_{DGNSS,k+1}^{LL} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Sigma}_{ll,DGNSS} = \begin{bmatrix} \sigma_{E_{DGNSS}^{UTM}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{N_{DGNSS}^{UTM}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{COG_{DGNSS}^{B,LL}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{SOG_{DGNSS}^{LL}}^2 \end{bmatrix} \quad (4.3-1)$$

als Beobachtungen mit den zugehörigen Varianzen  $\sigma_{E_{DGNSS}^{UTM}}^2$  und  $\sigma_{N_{DGNSS}^{UTM}}^2$  für die Epoche  $k+1$  eingeführt werden. Zusätzlich liegen noch Informationen zum Kurs über Grund ( $COG_{DGNSS,k+1}^{B,LL}$ ) und zur Geschwindigkeit über Grund ( $SOG_{DGNSS,k+1}^{LL}$ ) vor, die ebenfalls als Beobachtungsgrößen im EKF verwendet werden können.

Die zugehörigen Beobachtungsgleichungen lauten:

$$\mathbf{a}_{DGNSS,k+1}(\bar{\mathbf{x}}_{k+1}) = \begin{bmatrix} \bar{E}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{N}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{U}_{RP,k+1}^{UTM} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_B^{LL}(\bar{\varphi}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\theta}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\psi}_{k+1}^{B,LL} + c) \cdot \begin{bmatrix} x_{DGNSS}^B - x_{RP}^B \\ y_{DGNSS}^B - y_{RP}^B \\ z_{DGNSS}^B - z_{RP}^B \end{bmatrix} \quad (4.3-2)$$

$$\mathbf{a}_{SOG,k+1}(\bar{\mathbf{x}}_{k+1}) = \sqrt{\bar{v}_{x,DGNSS}^{LL*2} + \bar{v}_{y,DGNSS}^{LL*2}} \quad (4.3-3)$$

$$\mathbf{a}_{COG,k+1}(\bar{\mathbf{x}}_{k+1}) = \bar{\psi}_{k+1}^{B,LL} + \text{atan}\left(\frac{-\bar{v}_{y,DGNSS}^{LL*}}{\bar{v}_{x,DGNSS}^{LL*}}\right) \quad (4.3-4)$$

Mit:

- |  |   |
|--|---|
| $\begin{bmatrix} \bar{E}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{N}_{RP,k+1}^{UTM} \\ \bar{U}_{RP,k+1}^{UTM} \end{bmatrix}$ | - prädierte UTM-Koordinaten und ellipsoidische Höhe des Referenzpunkts RP zur Epoche $k+1$ (Zustandsgrößen)                                 |
| $\bar{\varphi}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\theta}_{k+1}^{B,LL}, \bar{\psi}_{k+1}^{B,LL}$                           | - prädierte Orientierungswinkel zur Epoche $k+1$ (Zustandsgrößen)   |
| $c$  | - Meridiankonvergenz  |
| $\begin{bmatrix} x_{DGNSS}^B \\ y_{DGNSS}^B \\ z_{DGNSS}^B \end{bmatrix}$                                  | - Koordinaten im Schiffskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^b$ )  |
| $\begin{bmatrix} x_{RP}^B \\ y_{RP}^B \\ z_{RP}^B \end{bmatrix}$   | - Koordinaten des Referenzpunkts RP (Prädiktionspunkt) im Schiffskoordinatensystem ( $\mathbf{x}^b$ )                                       |
| $\bar{v}_{x,DGNSS}^{LL*}, \bar{v}_{y,DGNSS}^{LL*}$   | - ins Local-Level-Loordiantensystem ( $\mathbf{x}^{LL}$ ) projizierte Geschwindigkeitskomponenten in Schiffslängsrichtung und -querrichtung |

Die notwendigen Ableitungen zur Bestimmung der Designmatrix  $\mathbf{A}_{k+1}$  finden sich im Anhang E.6 in Breitenfeld et al. (2015).

## 4.4 Evaluierung der Sensoren

### 4.4.1 Evaluierung des photogrammetrischen Systems

#### 4.4.1.1 Messprogramm

Um die Leistungsfähigkeit eines photogrammetrischen Messsystems zu testen, werden Messungen mit dem Messschiff *Mercator* im Bereich des Duisburger Hafens auf dem Rhein durchgeführt. Dieses Gebiet bietet sich dafür an, da die Umgebung (Bebauung und Vegetation) hier variiert. Prinzipiell können folgende Uferbereiche definiert werden:

- Flacher Uferbereich ohne bzw. mit wenigen Objekten,
- Vegetation und
- Bebauung mit Gebäuden unterschiedlicher Höhe.

Als Sonderfall für den letzten Fall lässt sich hier noch die Rheinbrücke zwischen Duisburg-Homberg und Duisburg-Ruhrort hinzufügen.

Die Kamera wurde dabei an der Bugreling der *Mercator* befestigt (Abbildung 4-3).

Am 23. und 24. November 2015 wurden insgesamt 15 Bildreihen erfasst, wobei der Abstand der abgefahrenen Trajektorie zum Ufer zwischen 50 m, 100 m und 200 m variiert. Die dabei im Messgebiet absolvierten Berg- und Talfahrten sind in Abbildung 4-8 dargestellt. Die einzelnen Messszenarien werden in Tabelle 4-2 beschrieben. Die näherungsweise Orientierung der Kamera relativ zum Schiffskoordinatensystem  $\mathbf{x}^B$  wurde anhand der Simulationsergebnisse in Anhang B gewählt.

**Tabelle 4-2: Fahrabschnitte am 23. und 24. November 2015**

Tag	Bezeichnung	Abstand zum Ufer [m]	Kameraausrichtung Az. [°] / Elev. [°]
23.11.2015	Berg 1	50	ca. -85° / ca. 0°
	Tal 1	100	ca. -85° / ca. 0°
	Berg 2	50	ca. -85° / ca. 0°
	Tal 2	50	ca. -85° / ca. 0°
	Berg 3	100	ca. -85° / ca. 0°
	Tal 3	100	ca. -85° / ca. 0°
	Berg 4	200	ca. -85° / ca. 0°
	Tal 4	200	ca. -85° / ca. 0°
24.11.2015	Berg 5	50	ca. -70° / ca. 5°
	Tal 5	50	ca. -70° / ca. 5°
	Berg 6	100	ca. -70° / ca. 5°
	Tal 6	100	ca. -70° / ca. 5°
	Berg 7	verschieden	ca. -70° / ca. 5°
	Tal 7	verschieden	ca. -70° / ca. 5°
	Berg 8	verschieden	ca. -70° / ca. 5°

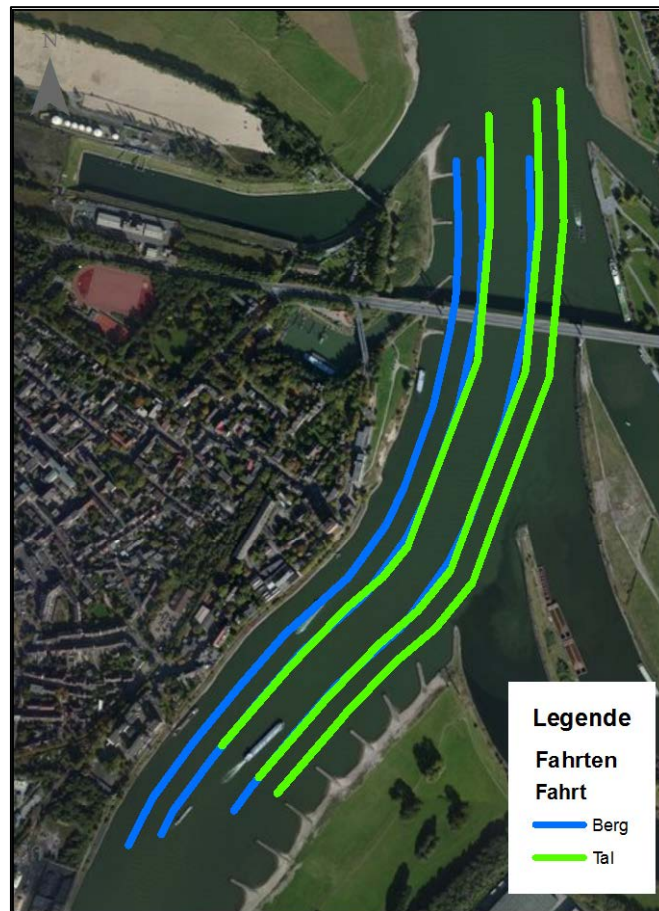


Abbildung 4-8: Messgebiet – Rhein bei Duisburg-Homberg

Aufgrund eines Softwarefehlers wurde während des Fahrtabschnitts Berg 3 keine Bildreihe über die gesamte Fahrt aufgenommen. Stattdessen liegen für diesen Fahrtabschnitt lediglich drei kurze, abschnittsweise Bildreihen (A, B und C) vor.

Tabelle 4-3: Kritische Szenarien für die photogrammetrische Auswertung

<b>1. bewegte Objekte im Bild</b>
a) anderes Schiff fährt parallel zur eigenen Fahrtrichtung
b) anderes Schiff fährt entgegen der eigenen Fahrtrichtung
<b>2. unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen</b>
a) überbelichtet
b) Sonne scheint ins Objektiv
c) trübes Wetter / schattige Bereiche
d) Dämmerung
e) wechselnde Beleuchtungszustände
<b>3. geringe Überlappung zwischen den einzelnen Bildern</b>
a) großer Abstand zwischen den Aufnahmezeitpunkten
b) Bilder enthalten wenig Objekte
<b>4. extreme Entfernungen zum Ufer</b>
a) große Entfernung
b) sehr geringe Entfernung

Für die Fahrabschnitte lassen sich problematische Szenarien (siehe Tabelle 4-3) identifizieren, anhand derer sich die Leistungsfähigkeit des photogrammetrischen Systems zunächst in einem lokalen Koordinatensystem evaluieren lässt. Dabei ist zu bemerken, dass einige der betrachteten Bildfolgen nicht nur einem der genannten Szenarien zugeordnet werden können.

Die mittels photogrammetrischen Messsystems ermittelten Kamerakoordinaten werden anhand ihrer geometrischen Abweichung zu einer Soll-Trajektorie bewertet. Als Soll-Trajektorie dienen die auf den Referenzpunkt transformierten Koordinaten, die von einem der GNSS-Empfänger (RTK-Lösung) bestimmt wurden (hier: GNSS Position 1).

#### 4.4.1.2 Bestimmung der Kamerakoordinaten im Schiffskoordinatensystem

Zur Bestimmung der Koordinaten der Kamera im Schiffskoordinatensystem  $\mathbf{x}_{Kamera}^B$  wurden auf dem Schiff Zielmarken angebracht und mit einem Tachymeter eingemessen. Die Marken wurden anschließend von verschiedenen Kamerastandpunkten fotografiert, wobei einer dieser Standpunkte der Kameraposition während der definierten Messungen entsprach. Da jedoch anzunehmen ist, dass der Kamerahauptpunkt nicht zentrisch über der Befestigung liegt und die Kamera für die Aufnahmen während der eigentlichen Messung jedoch um ca. 90 ° gedreht wurde, muss für diese Koordinaten (Tabelle 4-4) eine Genauigkeit von mehreren Zentimetern angenommen werden.

**Tabelle 4-4: Kamerakoordinaten im Schiffskoordinatensystem (23. und 24.11.2015)**

$x_{Kamera}^B$ [m]	$y_{Kamera}^B$ [m]	$z_{Kamera}^B$ [m]
26,075	-0,821	2,446

Wird im Zuge eines Kalibriervorgangs die Lage des Kamerahauptpunkts im Sensorkoordinatensystem (innerhalb des Kameragehäuses) definiert, so können die Kamerakoordinaten, unter Berücksichtigung der vorliegenden Kameraausrichtung, noch präziser bestimmt werden.

#### 4.4.1.3 Evaluierung des photogrammetrischen Messsystems

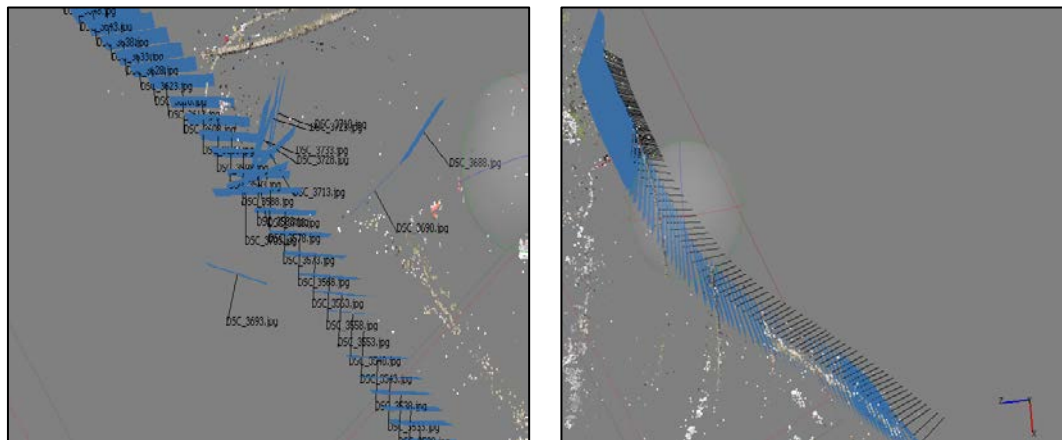
Einen ersten Eindruck über die Qualität der photogrammetrischen Lösung vermittelt der Vergleich zwischen der Anzahl der eingelesenen Bilder und der Anzahl der ausgerichteten Bilder. Bei diesen Bildern konnten die Parameter der äußeren Orientierung durch den Auswertungsprozess berechnet werden. Können nicht alle Bilder ausgerichtet werden, weist dies auf einen Mangel in einem oder mehreren der folgenden Faktoren hin:

- Bildqualität (Beleuchtung, Auflösung, Schnittkonfiguration, Unschärfe),
- Anordnung der in den Bildern enthaltenen Objekte (Verteilung im Bild, Art des Objekts) oder
- zu geringe Überlappungsbereiche zwischen den einzelnen Bildern.

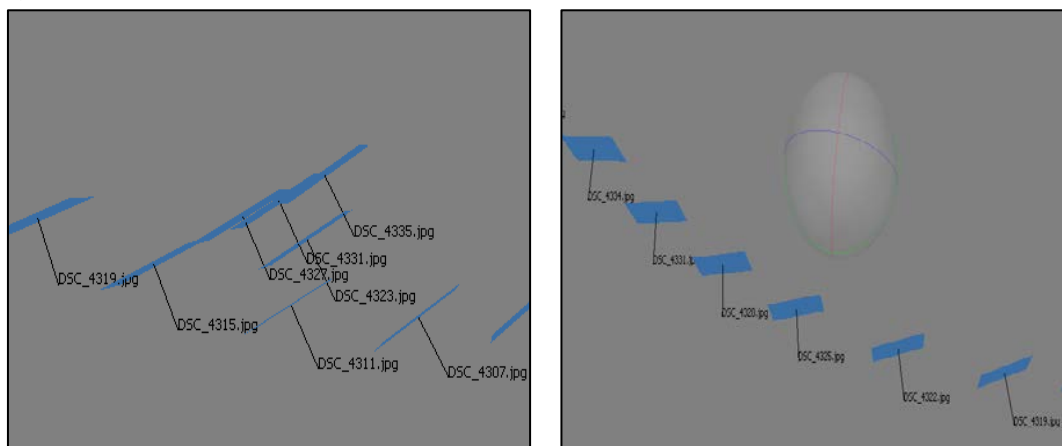
In der Praxis lassen sich die ersten zwei Faktoren nur selten steuern (z. B. durch Auswahl der Aufnahmezeit und -ort). Im Gegensatz dazu kann die Überlappung durch geeignete Auswahl der Aufnahmezeit, des Kameraobjektives und des Abstands zum Ufer optimiert werden. Hierbei muss man jedoch beachten, dass eine höhere Aufnahmezeit, ein Objektiv

mit einem weiten Öffnungswinkel und ein großer Abstand zum Ufer die Bildqualität beeinträchtigen.

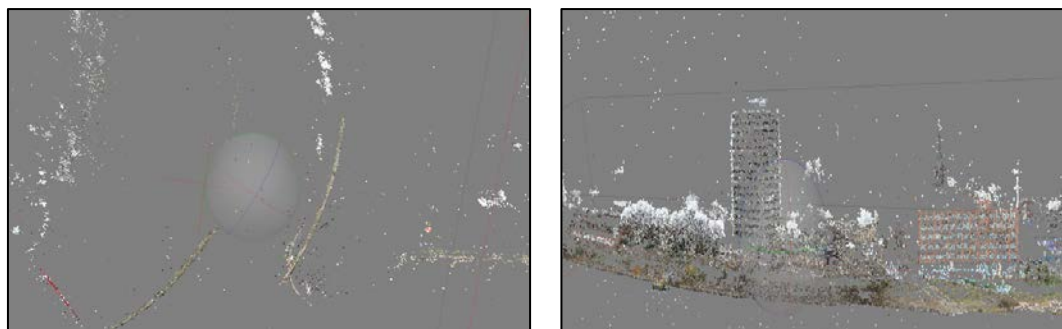
a)



b)



c)



**Abbildung 4-9: Betrachtung der Plausibilität im lokalen Koordinatensystem: a) links: Nicht plausibler Trajektorienverlauf (Tal 5). Rechts: Plausibler Trajektorienverlauf (Tal 5). b) Links: Nicht plausible Bilderreihenfolge (Tal 6). Rechts: Plausible Bilderreihenfolge (Tal 6). c) Links: Schlechte Verteilung der Verknüpfungspunkt mit vielen Ausreißern (Tal 5). Rechts: Gute Verteilung der Verknüpfungspunkte (Berg 6)**

Die berechneten Parameter der äußeren Orientierung (insbesondere die Kamerapositionen) der ausgerichteten Bilder werden zunächst auf Plausibilität im lokalen Koordinatensystem überprüft. Da diese Daten ohne weitere Information maßstablos sind, kann die Plausibili-



tät nur visuell durch Betrachtung einiger Plausibilitätsmerkmale durchgeführt werden. Daraus lässt sich jedoch keine Aussage über ihre tatsächliche Genauigkeit ableiten. Ein aussagekräftiges Ergebnis kann nur durch einen Vergleich der photogrammetrisch ausgewerteten, georeferenzierten Trajektorien mit GNSS-Trajektorien erzielt werden.

Als Plausibilitätsmerkmale werden die folgenden Faktoren herangezogen.

**Tabelle 4-5: Plausibilisierungsmerkmale zur Evaluierung der Ergebnisse aus Agisoft PhotoScan (photogrammetrisches Messsystem)**

<b>Merkmal</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Verlauf der Trajektorie</b>	Eine homogene, parallel zum Ufer verlaufende Trajektorie wird aufgrund der Vorkenntnisse über die Schiffsbewegung als plausibel betrachtet. Ein sprunghafter Verlauf der Trajektorie wird dementsprechend als nicht realistisch angesehen.
<b>Bilderreihenfolge</b>	Eine Trajektorie wird als plausibel angenommen, wenn die Bilderreihenfolge im Trajektorienverlauf erhalten bleibt.
<b>Verknüpfungspunkte und deren Verteilung</b>	Die Anordnung der Verknüpfungspunkte sollte die Realität und die Struktur des Ufers widerspiegeln. Weiterhin sollten diese über den ganzen aufgenommenen Uferbereich verteilt sein. Ist das nicht der Fall, so weist dies auf eine fehlerhafte Verknüpfung hin, was die berechneten Kamerapositionen verfälschen kann. Das Gleiche gilt auch, wenn diese Punkte im Wasser oder Himmel liegen; solche Verknüpfungspunkte sind immer als Ausreißer anzusehen.

Teilweise wirken sich die oben genannten Faktoren für eine fehlerhafte Bildzuordnung gleichzeitig auf mehrere dieser Plausibilitätsmerkmale aus. So können beispielsweise falsche Verknüpfungspunkte zur Verfälschung der Trajektorie und der Bilderreihenfolge führen. Abbildung 4-9 verdeutlicht die Bedeutung der drei Plausibilitätsfaktoren

Die Auswertung der aufgenommenen Bilder erfolgt mit der Software Agisoft PhotoScan. Da die Software nur eine begrenzte Anzahl an Bildern (abhängig von der Rechnerleistung) in einem Projekt auswerten kann, können nicht alle Bilder eines Fahrtabschnitts auf einmal ausgewertet werden. Deswegen werden sie entweder abschnittsweise oder ausgedünnt ausgewertet. Dabei werden insbesondere die in Tabelle 4-3 beschriebenen problematischen Szenarien betrachtet. Tabelle 4-6 fasst die Ergebnisse der Auswertung im lokalen Koordinatensystem zusammen. Dabei steht  $\Delta t$  für den zeitlichen Abstand zwischen zwei Aufnahmen in Sekunden, KP für die Anzahl der berechneten Kamerapositionen bzw. der ausgerichteten Bilder, T für den Verlauf der Trajektorie, BR für die Bilderreihenfolge und VP für die Verteilung der Verknüpfungspunkte.

**Tabelle 4-6: Ergebnisse Plausibilitätsüberprüfung für die Auswertung im lokalen Koordinatensystem**

Fall	Fahrta- bschnitt	Bilder	$\Delta t$ [s]	KP	Plausibilität			Aufnahmebedingungen vgl. Tabelle 4-3
					T	BR	VP	
1	Berg 1	87	5	12	+	+	-	2.a), 2.b) und 3.a)
2	Tal 1	63	5	44	+	+	+	2.a), 3.a) und 3.b)
3		61	1	61	-	+	-	2.a) und 3.b)
4		78	1	78	+	+	+	2.a)
5		126	1	126	-	+	-	2.a) und 3.b)
6	Berg 2	123	1	123	+	+	+	Gut
7		52	1	52	+	+	+	2.b), 2.e) und 1.b)
8		27	1	27	+	+	+	2.a)
9	Berg 4	55	1	55	-	+	-	1.a) , 2.d) und 4.a)
10	Berg 5	101	5	101	+	+	+	3.a)
11	Tal 5	68	5	68	-	-	-	3.a), 4.b)
12		112	1-5	112	+	+	+	4.b)
13		106	1	106	+	+	+	2.c) und 4.b)
14	Berg 6	142	1	142	+	+	+	Gut
15	Tal 6	18	4	18	-	-	-	3.a), 3.b)
16		24	3	24	-	+	-	3.a), 3.b)
17		34	2	34	+	+	+	3.b)
18	Tal 7	46	4	46	+/-	+	+	1.a)
19		84	1	84	+	+	+	1.a)

Aus der Tabelle 4-6 ist ersichtlich, dass bei größeren zeitlichen Abständen zwischen den Aufnahmezeitpunkten nicht immer alle Bilder ausgerichtet bzw. plausibel ausgerichtet werden konnten. Für Fall 1 kann lediglich für 14 % der Bilder eine Kameraposition bestimmt werden, während in Fall 2 70 % der Bilder ausgewertet werden können. Eine Ausnahme dazu stellt der Fall 10 dar, da hier alle Bilder plausibel ausgerichtet werden können. Das liegt zum einen daran, dass die Beleuchtungsverhältnisse und damit die Bildqualität bei diesem Fahrabschnitt (Berg 5) sehr gut sind. Außerdem finden sich an dem Ufer, das während der Bergfahrten aufgenommen wurde, wesentlich mehr Objekte (Gebäude) als am gegenüberliegenden Ufer (Talfahrten). Die relativ kurze Entfernung zum Ufer bei diesen Fahrabschnitten (50 m) verringert zwar die Überlappung zwischen den Bildern, erhöht aber die Bildqualität und minimiert die Bilderbereiche, in denen nur Himmel oder Wasser zu sehen sind.

Die Bilder, die nicht (plausibel) ausgerichtet werden können, liegen vorwiegend in Bereichen, in denen nur sehr wenige Objekte vorhanden sind (Fälle Nr. 2, 11, 15 und 16) oder wo die Beleuchtungsverhältnisse schlecht sind (Nr. 1 und 2). Eine Verdichtung der Bilder in solchen Gebieten, d. h. die Verwendung aller aufgenommenen Fotos, führt zur Ausrichtung aller Bilder (Nr. 3, 4, 5, 12, 13 und 17). Allerdings ist diese nicht immer plausibel. Das ist besonders in den Bereichen zu sehen, die am Ufer nur Vegetation enthalten. In den Fällen 3 und 5 wird dies besonders deutlich. Hier werden Aufnahmen vom Anfangsbereich der Talfahrt ausgewertet. In diesem Bereich ist am Ufer nur Vegetation vorhanden.

Im Gegensatz dazu ist die Auswertung der Bilder im Fall 4 plausibel, da die Aufnahmen hier am Ende desselben Fahrabschnitts (Tal 1) aufgenommen wurden. In diesem Bereich enthalten die Bilder mehr Objekte wie z. B. eine Brücke und Gebäude.

Die Fälle 11 und 12 stellen hier einen Sonderfall dar, da hier Objekte mit einer geringen Entfernung zur Kamera (Brückenpfeiler) vorhanden sind und es zu einem abrupten Wechsel zwischen den nahen und den entfernteren Objekten am Ufer kommt. Bei einer ausgedünnten Bildfolge (Fall 11) werden zwar alle Bilder ausgerichtet, diese Ausrichtung ist jedoch fehlerhaft wodurch die resultierende Kameratrajektorie verfälscht wird. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache begründet, dass der Überlappungsbereich zwischen den einzelnen Bildern beim Wechsel von nahen zu entfernten Objekten zu gering ist. Verdichtet man die Bilderfolge nur im Bereich der Brückenpfeiler (Fall 12), werden die Ergebnisse plausibel.

Am Ufer festgemachte Schiffe beeinträchtigen die Ergebnisse nicht, was durch Fall 7 bewiesen wird. Auch andere parallel fahrende Schiffe haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse gezeigt; diese werden einfach ignoriert. Bei Betrachtung der Fälle 18 und 19 ist ersichtlich, dass keine Verknüpfungspunkte auf diesen beweglichen Objekten gefunden werden.

Im Gegensatz dazu beeinträchtigen die Dämmerung und eine größere Entfernung zum Ufer die Ergebnisse der Auswertung (Fall 9). Das Messschiff fährt hier ca. 200 m entfernt vom Ufer und die Bildaufnahme erfolgte kurz vor Sonnenuntergang. Hier können lediglich in einem schmalen Bildbereich Verknüpfungspunkte gefunden werden, weshalb die Trajektorie außerhalb dieses Bereichs nicht stimmig ist (unrealistische Kurvenform der Trajektorie).

In allen ausgewerteten Fällen sind noch Ausreißer unter den Verknüpfungspunkten vorhanden. Dabei handelt es sich meistens um fälschlicherweise erkannte Punkte im Wasser oder am Himmel. Sie können zu einer nicht plausiblen Lösung führen, wobei der Einfluss der falsch zugeordneten Verknüpfungspunkte durch eine gute Bildqualität, eine ausreichende Bildüberlappung und zahlreiche Objekte am Ufer minimiert wird.

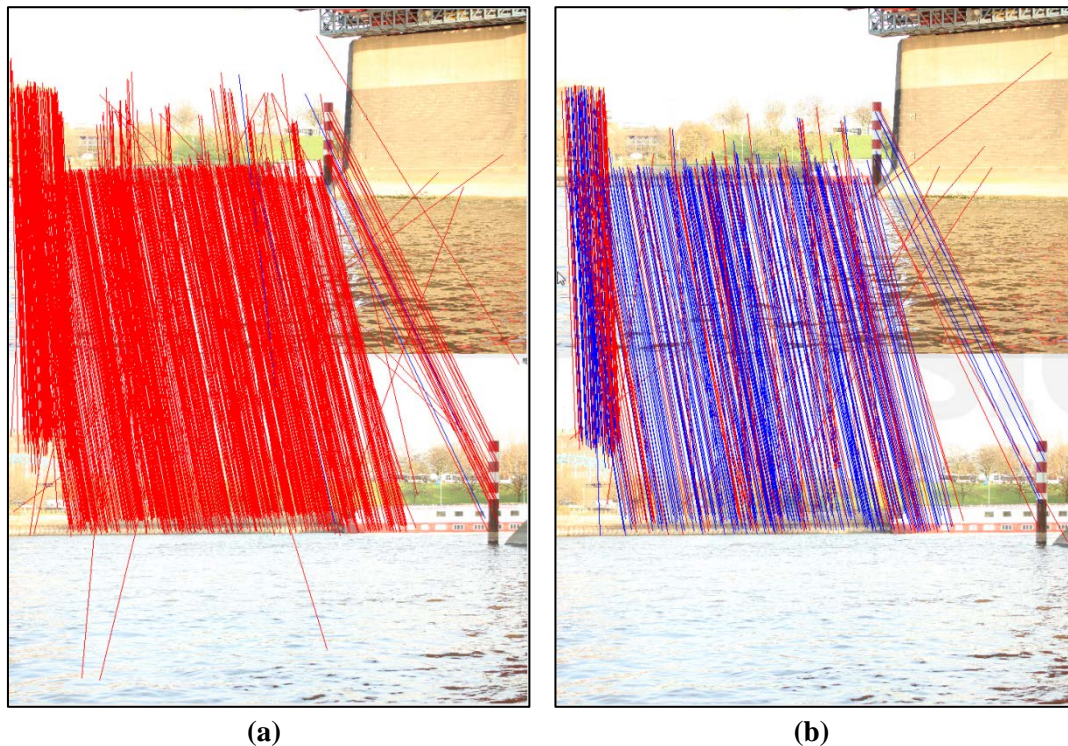
Die hier vorgestellten Fälle umfassen, aufgrund der Aufnahmekonfiguration, größere Bildbereiche mit Wasser oder Himmel. Dieses Problem darf nicht vernachlässigt werden. Um dem entgegenzuwirken, kann eine Maskierung der Bilder erfolgen. Das bedeutet, dass Wasser- und Himmelsbereiche durch eine Maske gesperrt und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Dieser Vorgang kann in PhotoScan momentan nur manuell erfolgen und ist mit großem zeitlichem Aufwand verbunden, deswegen wird hier auf die Fälle, die mit GNSS-Trajektorien verglichen werden können, beschränkt.

Abbildung 4-10 zeigt die Korrespondenzen zwischen den detektierten Verknüpfungspunkten (Matches) zwischen den Bildern DSC\_0739 und DSC\_0744 (Tal 1). Die roten Linien werden von der Software als fehlerhafte Zuordnungen klassifiziert. Die blauen Linien stehen für korrekte Korrespondenzen.

In diesem Beispiel konnte die Software für eine Auswertung ohne Bildmasken 1067 Verknüpfungspunkte zwischen den beiden Bildern finden; davon werden von der Software

nur 4 Linien als korrekt klassifiziert. Betrachtet man diese jedoch genauer, so fällt auf, dass zwei davon Punkte im Bereich des Himmels verbinden.

Mit Maske konnte die Software zwar weniger Verknüpfungspunkte erkennen (nur 442), davon werden aber mehr Punkte richtig zugeordnet (273): Keiner davon liegt im Wasser oder Himmel.



**Abbildung 4-10: Verknüpfungslinien (Matches) zwischen den Bildern DSC\_0739 (oben) und DSC\_0744 (unten) bei Fahrabschnitt Tal 1; (a) ohne Masken, (b) mit Masken**

#### **4.4.1.4 Vergleich der Kamerapositionen**

Um die mithilfe der photogrammetrischen Daten bestimmten Kamerapositionen als Beobachtungen in die HydrOs-Software einführen zu können, muss zunächst eine Georeferenzierung der maßstabslosen Daten erfolgen. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, bietet die Software Agisoft PhotoScan zwei Optionen:

##### **Verwendung von (signalisierten) Passpunkten am Ufer**

Bei einer vorab erfolgten Untersuchung am Neckar wurde festgestellt, dass die codierten Zielzeichen von Agisoft über größere Entfernungen nicht mehr automatisch erkannt werden können. Die Passpunkte müssen somit in den einzelnen Fotos manuell definiert werden. Um diese manuelle Auswahl zu vereinfachen, wurde während einigen der in Kapitel 4.4.1.1 beschriebenen Fahrabschnitte Schachbrettzielmarken und runde Zielmarken am Ufer aufgestellt. Diese Zielmarken haben ein klar definiertes Zentrum und sind für die manuelle Auswahl zu bevorzugen. Hier werden die Punkte I, II, G und H (siehe Abbildung 4-25) verwendet.

Da diese Zielzeichen bei der Auswertung nicht in ausreichender Zahl in den Bildern identifiziert werden konnten, werden alternativ auch natürliche Ziele verwendet. Die UTM-Koordinaten dieser rekonstruierten Punkte können aus der georeferenzierten TLS-Punktwolke entnommen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Genauigkeit dieser Punkte geringer als bei mit GNSS eingemessenen Zielzeichen ist. Um die Auswirkung einer weichen Lagerung der Punkte während der Auswertung in Agisoft PhotoScan zu reduzieren, wurde hierbei eine Punktgenauigkeit von 1 cm verwendet.

### Import der Kamerapositionen

Da die Kamerakoordinaten nicht direkt während der Aufnahmen erfasst wurden, werden sie für die Auswertung in Agisoft PhotoScan aus den aufgezeichneten GNSS-RTK Messdaten abgeleitet. Für die Bestimmung der Koordinaten zum Aufnahmezeitpunkt wurden die Messdaten eines GNSS-Empfängers (GNSS Position 1) auf den Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahme interpoliert und auf den Kamerastandpunkt transformiert. Dazu werden die in Kapitel 4.4.1.2 bestimmten Kamerakoordinaten verwendet.

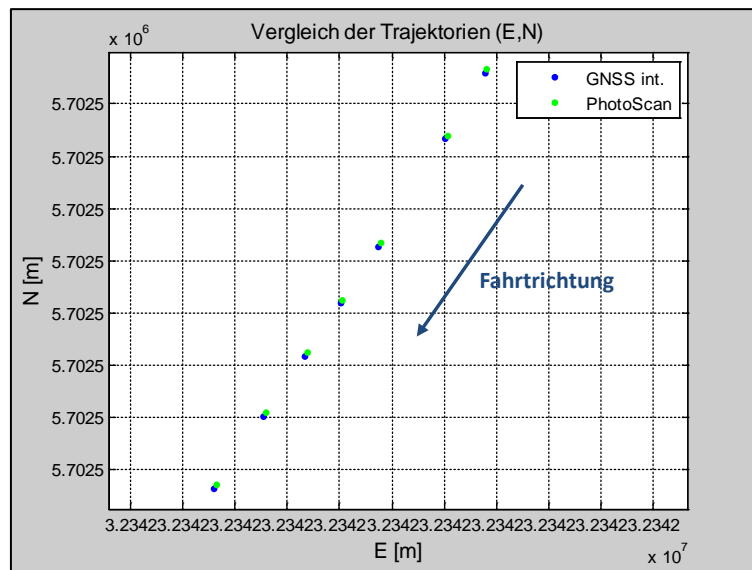
Die mit Agisoft PhotoScan bestimmten georeferenzierten Kamerapositionen werden im Folgenden als Ist-Trajektorie betrachtet, wohingegen die GNSS-Messdaten, die interpoliert und auf den Kamerastandpunkt transformiert werden, als Soll-Werte dienen.

**Tabelle 4-7: Dauer der simulierten Lücken im Datensatz Tal 1 und Berg 2**

Lücke		1	2	3	4a, 4b
Dauer [s]	Tal 1	86	75	57	25 und 28
	Berg 2	92	80	54	24 und 23

Für die Georeferenzierung mittels bekannter Kamerapositionen wird angenommen, dass diese lediglich am Anfang und am Ende einer Trajektorie vorliegen. Im Zwischenbereich werden unterschiedlich lange Lücken simuliert (siehe Tabelle 4-7) um, wie in der Projektbeschreibung gefordert, das Potenzial dieser Sensorkonfiguration auch für Lücken mit einer Dauer von mehr als 60 s zu testen. Wie in Abbildung 4-11 zu sehen ist, liegt die mit Agisoft PhotoScan bestimmte Lösung zeitlich immer hinter der aus den GNSS-Messungen bestimmten Kameraposition. Die Differenz in der Lage liegt in den meisten Fällen bei ca. 20 cm. Dieser Offset entspricht, bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 3 – 4 m/s, einem zeitlichen Synchronisierungsfehler von 67 ms bis 50 ms, der durch die Synchronisierungs-genauigkeit zwischen dem HydrOs-Rechner und dem für die Kamerasteuerung verwendeten Rechner erklärt werden kann. Für Fahrabschnitt Berg 2 kommt es in der Höhenkomponente zu einem maximalen Offset von ebenfalls ca. 20 cm. In diesem Bereich der Trajektorie vergrößert sich die Lageabweichung für die Lücken 1, 3 und 4 auf bis zu 45 cm und im Fall von Lücke 2 sogar auf 60 cm. Diese großen Abweichungen sind teilweise auch auf eine fehlerhafte Ausrichtung der Bilder zurückzuführen, wodurch es zu einem Sprung in der 3D-Trajektorie der Kamerapositionen kommt.

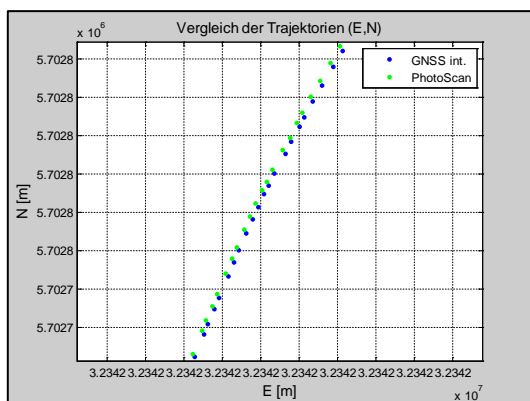
Bei der Talfahrt hingegen kommt es zu keiner Fehlzuordnung der Bilder. In diesem Fall betragen die Abweichungen in der Höhenkomponente maximal 2 cm.



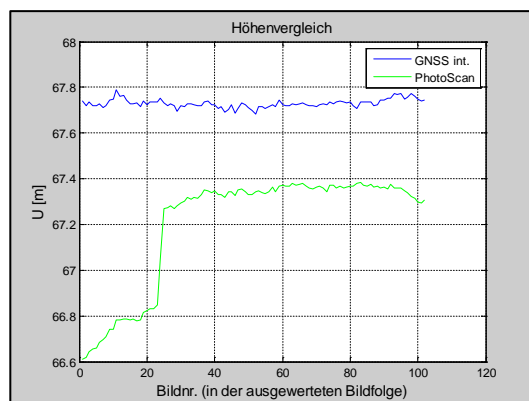
**Abbildung 4-11: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrtabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung mithilfe bekannter Kamerapositionen**

Eine Georeferenzierung unter Verwendung natürlicher Punkte bzw. unter Verwendung von Zielzeichen am Ufer konnte nur für die Bergfahrt durchgeführt werden. In diesen Fällen schwanken die Abweichungen zu den Soll-Werten wesentlich stärker und nehmen auch größere Werte an. Es ist daher davon auszugehen, dass hier die Bildzuordnung für die Bilder 23-25 wieder fehlerbehaftet ist (siehe Abbildung 4-13). Bei der Georeferenzierung mithilfe von natürlichen Punkte, die aus der TLS-Punktwolke rekonstruiert wurden, beträgt die mittlere Abweichung für die Lagekomponente 65 cm und in der Höhe 52 cm. Wie in Abbildung 4-12 zu sehen ist, wirkt die Ist-Trajektorie im Vergleich zur Soll-Trajektorie verschoben und mit einem Maßstabsfehler behaftet. Auch in der Höhe tritt, nach einem deutlich erkennbaren Sprung zu Anfang, ein nahezu konstanter Offset auf (Abbildung 4-13).

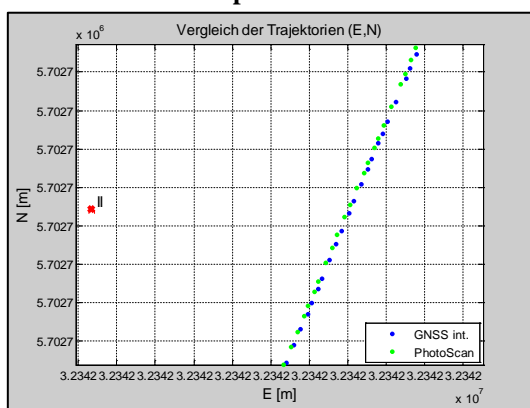
Werden mit GNSS eingemessene Zielzeichen für die Georeferenzierung verwendet, so fallen die Abweichungen in der Lagekomponente zu Beginn der Trajektorie mit 3,5 m sehr groß aus, da sich in diesem Bereich keinerlei Passpunkte befinden. In Abbildung 4-14 ist erkennbar, dass sich die Abweichungen zur Soll-Trajektorie deutlich verringern, sobald Passpunkte am Ufer mit der Kamera erfasst werden. Wird ein Trajektorienabschnitt mit Passpunkten erreicht, so sinken die Abweichungen langsam auf 50 cm in der Ostkomponente und 5 cm in der Nordkomponente. Für die Höhenkomponente vergrößern sich die Abweichungen von ca. 50 cm auf nahezu 1 m (siehe Abbildung 4-15).



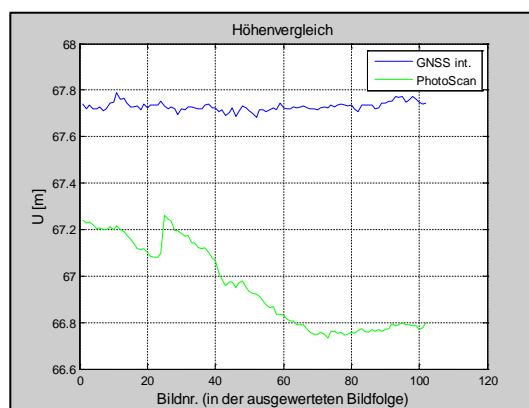
**Abbildung 4-12: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrtabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung über natürliche Zielpunkte**



**Abbildung 4-13: Vergleich von  $U_{Kamera,k}^{UTM}$  für Fahrtabschnitt Berg 2 bei einer Georeferenzierung über natürliche Zielpunkte**



**Abbildung 4-14: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrtabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung über Zielmarken**



**Abbildung 4-15: Vergleich von  $U_{Kamera,k}^{UTM}$  für Fahrtabschnitt Berg 2 bei einer Georeferenzierung über Zielmarken**

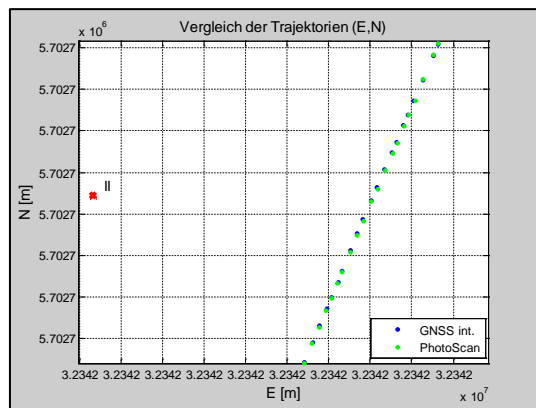
Grund hierfür ist zum einen die geringe Genauigkeit der aus den TLS-Messdaten extrahierten Festpunkte und die ungleichmäßige Verteilung der verwendeten Passpunkte im Messgebiet.

Zum andere müssen die Parameter der inneren Orientierung aufgrund der nicht erfolgten Kamerakalibrierung in Agisoft PhotoScan mitbestimmt werden. Die bestimmten Parameter können durch Ausreißer fehlerbehaftet sein. Auch ist die Aufnahmekonfiguration der Kamera für eine photogrammetrische Aufnahme nicht optimal, da Objekte stets nur aus einer Aufnahmerichtung erfasst werden. Die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung wird dadurch stark beeinflusst. Dies spiegelt sich auch in den mit Agisoft PhotoScan erzeugten Punktwolken wieder (siehe auch Kapitel 4.4.1.6).

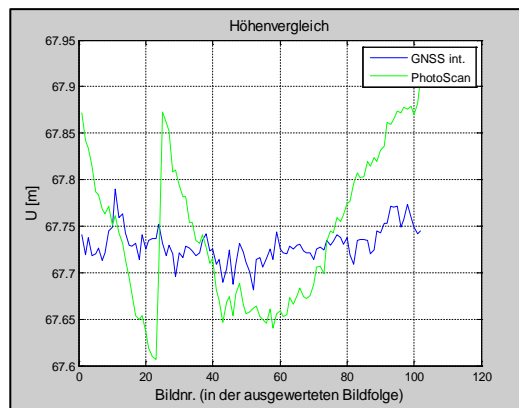
Außerdem wird hier ein optisch-messendes System eingesetzt. Bei Aufnahmen über Wasseroberflächen kann es aufgrund der unterschiedlichen Luftschichten stets zu einer Brechung des Lichtstrahls kommen.

Eine höhere Objektgenauigkeit und eine höhere Genauigkeit der bestimmten Kamerakordinaten ließen sich durch eine Kalibrierung der Kamera und des zugehörigen Objektivs sowie durch rund um ein Objekt verteilte Kamerastandpunkte erreichen.



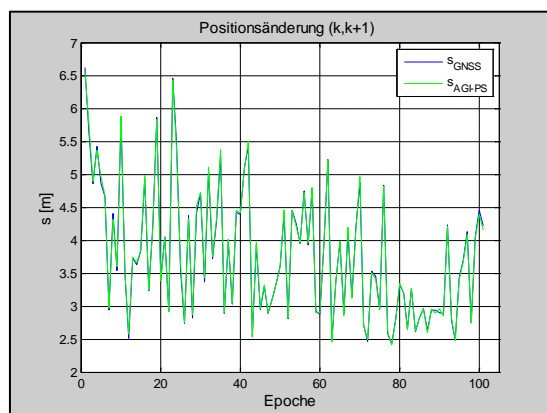


**Abbildung 4-16: Vergleich der bestimmten Kamerapositionen für Fahrabschnitt Berg 2 (Ausschnitt) bei einer Georeferenzierung über Zielmarken und bekannte Kamerapositionen**

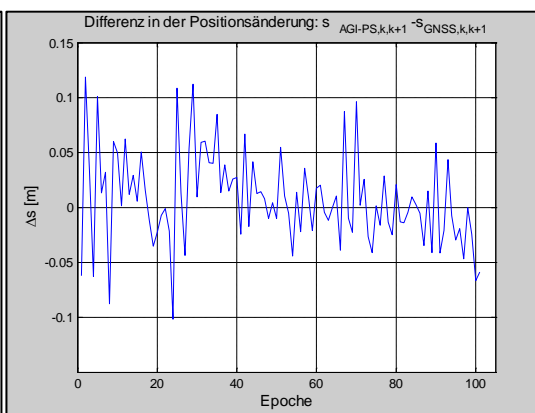


**Abbildung 4-17: Vergleich von  $U_{Kamera,k}^{UTM}$  für Fahrabschnitt Berg 2 bei einer Georeferenzierung über Zielmarken und bekannte Kamerapositionen**

Um eine bessere Verteilung der Passpunkte im Messgebiet zu realisieren, werden in einem weiteren Auswerteschritt sowohl bekannte Kamerapositionen als auch die mit Zielmarken signalisierte Punkte im Ufer für die Georeferenzierung verwendet. In der Lagekomponente werden so maximale Abweichungen von 45 cm und durchschnittliche Abweichungen von 21 cm bestimmt. In der Höhenkomponente betragen die maximalen Abweichungen am Ende des ausgewerteten Fahrabschnitts 16 cm (Abbildung 4-17).



**Abbildung 4-18: Distanz zwischen zwei Kamerapositionen zur Epoche  $k$  und  $k+1$  (Ausschnitt aus Fahrabschnitt Berg 2, 23.11.2015)**



**Abbildung 4-19: Differenz zwischen den jeweiligen Distanzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kamerapositionen**

Werden hingegen die Strecken zwischen der Position zur Epoche  $k$  und der zu Epoche  $k+1$  für die Soll- und die Ist-Trajektorie berechnet, so fällt auf, dass die Unterschiede wesentlich geringer ausfallen. Wie in Abbildung 4-18 und in Abbildung 4-19 dargestellt, schwanken die Distanzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Positionen für die beiden Fälle maximal in einem Bereich von  $\pm 15$  cm. Dieses Ergebnis bestätigt sich auch für andere Fahrabschnitte, bei denen eine Georeferenzierung durchgeführt wurde. Werden die Koordinatenänderungen in den einzelnen Koordinatenkomponenten betrachtet, so treten in der Ostkomponente mit bis zu 20 cm die größten Abweichungen auf. In der Nordkompo-



nente und der Höhenkomponente schwanken die Koordinatenänderungen wesentlich weniger. Bei einer guten Zuordnung der einzelnen Bilder liegen die Abweichungen der Koordinatenänderungen deutlich unter 10 cm.

Daraus lässt sich schließen, dass die aus den Koordinatendifferenzen berechnete Streckendifferenz  $s_{Kamera,k|k+1}^{UTM}$  oder, besser noch, die relativen Koordinatenänderungen potentielle Beobachtungsgrößen sind, über die die bestimmten Kamerakoordinaten in die HydrOs-Software integriert werden können.

#### 4.4.1.5 Integration in die HydrOs-Software

Für zwei der in Tabelle 4-2 beschriebenen Fahrtabschnitte wird eine Auswertung mit der HydrOs-Software durchgeführt: Tal 1 und Berg 2. Für diese Fahrtabschnitte sollen jeweils zwei Trajektorienabschnitte betrachtet werden:

- (A) mit guten GNSS-Empfangsbedingungen (keine oder nur geringe Datenlücken, Quality Indicator = 4) und
- (B) mit schlechtem GNSS-Empfang (unter einer Brücke).

Die für die Auswertung verwendete Sensorkonfiguration verwendet folgende Sensoren bzw. Beobachtungsgrößen (**Mercator-Konfiguration**):

##### Sensoren und Sensorbeobachtungen:

3x GNSS-Position:	Länge, Breite, ellipsoidische Höhe Speed over Ground (SOG) Course over Ground (COG) Quality Indicator (QI) Satellitenanzahl (SV) HDOP, PDOP, VDOP RMS Standardabweichungen für Länge, Breite, Höhe
Kompass:	Heading
IMU:	Roll, Pitch, Heading Rollgeschwindigkeit / Roll-Drehrate Pitchgeschwindigkeit / Pitch-Drehrate Headinggeschwindigkeit / Heading-Drehrate Geschwindigkeit in Schiffslängsrichtung Geschwindigkeit in Schiffquerrichtung Geschwindigkeit in vertikale Richtung Heave
Antrieb Drehzahl:	Schraubendrehzahl der beiden Schiffsschrauben

##### Daten und Modelle:

- Bestandsdaten
- Wasserspiegellagenmodell
- Squatmodell
- Geoidmodell
- GNSS Abschattungsgebiete

### Einstellungen:

Bei den Einstellungen müssen mindestens folgende Angaben gemacht werden:

- Auswahl des Modell (z.B. Geradenmodell)
- Eingabe der Sensorlagerung
- Auswahl von abgestimmten Schwellwerten für die GNSS Überprüfung
- Vorgabe der Ausgabefrequenz (z.B. 0,1 Sekunde)

Werden die von Agisoft PhotoScan mithilfe einer externen Georeferenzierung berechneten Kamerakoordinaten direkt in die HydrOs-Software eingelesen, so müssen sie aufgrund des in Kapitel 4.4.1.2 beschriebenen Trajektorienoffsets mit einer geringen Positionsgenauigkeit versehen werden. Aus der Evaluierung der georeferenzierten Kamerakoordinaten im Vergleich zu GNSS-Messungen lassen sich, nach Ausschluss von Ausreißern, für die verschiedenen Georeferenzierungsarten die in Tabelle 4-8 aufgeführten Standardabweichungen für die Kamerakoordinaten ableiten.

**Tabelle 4-8: Standardabweichungen der Beobachtungsgrößen Kamerakoordinaten**

Georeferenzierung über	$\sigma_{\text{Breite}}$ in [m]	$\sigma_{\text{Länge}}$ in [m]	$\sigma_{\text{Höhe}}$ in [m]
<b>Kamerakoordinaten</b>	0,12	0,16	0,09
<b>Natürl. Passpunkte am Ufer</b>	0,50	0,55	0,58
<b>Passpunkte (Zielzeichen) am Ufer</b>	1,02	1,08	0,80
<b>Passpunkte (Zielzeichen) am Ufer + Kamerakoordinaten</b>	0,11	0,40	0,15

Die Datensätze werden mit den in Tabelle 4-7 beschriebenen simulierten Lücken in der HydrOs-Software ausgewertet. Dazu werden die ausgewerteten Daten in einen NMEA-GGA String eingefügt und als weitere Positionslösung (GNSS Position 4) in HydrOs importiert.

Zum Vergleich der Genauigkeitssteigerung durch Einsatz eines photogrammetrischen Messsystems werden die von der HydrOs-Software ausgegebenen Positionsgenauigkeiten für die simulierte Lücke 3 im Bereich des Trajektorienabschnitts A angegeben (Berg 2, A-3), da sie eine Dauer von nahezu einer Minute hat. Werden die EKF-Lösungen für die Mercator-Sensorkonfiguration bestimmt, so werden am Ende der Lücke Koordinatengenauigkeiten von  $\sigma_{E,EKF} \approx 3,15$  cm,  $\sigma_{N,EKF} \approx 3,10$  cm und  $\sigma_{U,EKF} \approx 0,89$  cm erreicht. Bei Verwendung der photogrammetrischen Beobachtungsgrößen können diese verbessert werden: Werden diese Daten mithilfe von Passpunkten am Ufer georeferenziert, so nehmen die bestimmten Genauigkeiten im schlechtesten Fall Werte von  $\sigma_{E,EKF} \approx 2,50$  cm,  $\sigma_{N,EKF} \approx 2,57$  cm und  $\sigma_{U,EKF} \approx 0,89$  cm am Ende der Lücke an. Erfolgt die Georeferenzierung hingegen mithilfe von bekannten Kamerapositionen, so werden im Fall der Lücke 3 Genauigkeiten von  $\sigma_{E,EKF} \approx 1,31$  cm,  $\sigma_{N,EKF} \approx 1,51$  cm und  $\sigma_{U,EKF} \approx 0,81$  cm am Ende der Lücke bestimmt.

**Tabelle 4-9: Auswertung des Fahrtabschnitt Berg 2 – Abschnitt (A) mit unterschiedlich langen simulierten Lücken für die Mercator-Konfiguration und für die erweiterte Konfiguration im Vergleich zum Soll-Wert**

Lücke / Konfiguration	RMS der Differenzen zum SOLL [cm]				Maximale Abweichung [cm]			
	$RMS_E$	$RMS_N$	$RMS_U$	$RMS_{3D}$	$\max(dE_k)$	$\max(dN_k)$	$\max(dU_k)$	$\max \mathbf{d}_k $
<b>A-1 (92 s)</b>								
Ohne Kamera	32,3	1,8	2,4	32,5	82,5	4,9	5,4	82,7
Mit Kamera (Kamerapos.)	8,4	8,8	5,0	13,1	18,0	19,3	10,4	26,0
Mit Kamera (na- türl. Punkte)	7,1	9,1	1,7	11,7	14,7	20,6	4,0	24,0
Mit Kamera (Zielzeichen)	11,8	8,2	1,9	14,5	23,8	19,8	4,3	31,2
<b>A-2 (80 s)</b>								
Ohne Kamera	25,8	1,5	2,3	26,0	73,3	4,2	5,6	73,5
Mit Kamera (Kamerapos.)	9,8	20,4	3,7	22,9	22,2	42,6	7,9	46,7
Mit Kamera (na- türl. Punkte)	8,0	6,3	1,8	10,3	16,7	14,8	4,4	21,6
Mit Kamera (Zielzeichen)	12,0	5,4	1,9	13,3	27,0	16,3	4,6	31,8
<b>A-3 (54 s)</b>								
Ohne Kamera	12,3	1,4	1,8	12,5	45,8	4,3	5,2	46,0
Mit Kamera (Kamerapos.)	10,1	4,6	3,1	11,5	25,5	11,8	7,3	27,7
Mit Kamera (na- türl. Punkte)	5,9	2,8	1,5	6,8	16,8	7,9	4,5	18,5
Mit Kamera (Zielzeichen)	7,7	1,3	1,6	7,9	26,0	6,9	4,5	27,0
<b>A-4 (24 s, 23 s)</b>								
Ohne Kamera	4,3	0,9	1,1	4,6	20,3	2,8	3,6	20,8
Mit Kamera (Kamerapos.)	4,5	1,8	1,2	5,0	14,3	9,5	4,0	16,6
Mit Kamera (na- türl. Punkte)	3,6	1,3	0,9	3,9	15,3	6,3	3,2	15,8
Mit Kamera (Zielzeichen)	3,9	0,9	1,0	4,2	18,3	4,6	3,2	19,0

Da im Bereich der simulierten Lücke tatsächlich zuverlässige GNSS-Messdaten vorliegen, kann eine Soll-Lösung für diesen Abschnitt definiert werden. Dazu werden die Beobachtungen der Mercator-Sensorkonfiguration zunächst ohne simulierte Lücken mit HydrOs prozessiert. Anhand dieser Soll-Lösung werden die Filterergebnisse bei einer Prozessierung in der Mercator-Konfiguration und in der erweiterten Konfiguration (Mercator-Konfiguration und Kamera) bewertet. Für die Auswertung mit der erweiterten Konfigura-

tion wird zusätzlich noch zwischen den verschiedenen Arten unterschieden, die für die Georeferenzierung der photogrammetrischen Daten verwendet werden. Dabei werden sowohl die maximale Abweichungen in den einzelnen Koordinatenkomponenten  $dE_k$ ,  $dN_k$  und  $dU_k$  innerhalb der Lücke als auch der Root Mean Square (*RMS*) der Abweichungen zur Soll-Trajektorie im Zeitraum 14:25:00 Uhr – 14:28:00 Uhr analysiert. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 4-9 aufgeführt.

Es zeigt sich, dass die Verwendung von photogrammetrischen Beobachtungsgrößen vor allem für längere Lücken sinnvoll ist. Für das Lückenszenario A-1 (Georeferenzierung über bekannte Kamerapositionen) mit einer GNSS-Lücke von ca. 92 s sinkt der  $RMS_E$ -Wert, der hier hauptsächlich die Querabweichung zur Fahrtrichtung repräsentiert, um nahezu 74 % auf 8,4 cm. Bei einer simulierten GNSS-Lücke von 54 s verringert sich der  $RMS_E$ -Wert nur um ca. 18 %. Der  $RMS_N$ -Wert, der für dieses Szenario hauptsächlich die Abweichung in der Längskomponente widerspiegelt, wird hier durch die Integration der photogrammetrischen Beobachtungsgrößen stark erhöht. Im Fall des Lückenszenarios A-3 steigt er um mehr als das Dreifache. Diese Steigerung kann zum Teil durch einen zeitlichen Synchronisierungsfehler erklärt werden. Da der Zeitstempel der Kamera ungenauer als bei den anderen Sensoren im Messsystem ist, kommt es nahezu zwangsläufig zu einer Verschiebung der Trajektorie in Längsrichtung. Dies lässt sich auch bei Betrachtung der maximalen Abweichungen zur Solltrajektorie  $\max(dN_k)$  erkennen.

Auch bei einer Georeferenzierung über Passpunkte am Ufer (natürliche Punkte oder Zielzeichen) lässt sich, trotz der geringeren Genauigkeit der einzelnen Beobachtungsgrößen, eine Verbesserung der  $RMS_E$ -Werte feststellen. Auch in diesem Fall nehmen die Abweichungen der Nordkomponente im Vergleich zum Soll-Wert zu. Neben der fehlerbehafteten Zeitsynchronisierung wirkt sich hier die Lage der verwendeten Passpunkte mit aus (siehe Kapitel 4.4.1.4).

Für die Höhenkoordinaten wiederum kann durch Einsatz des photogrammetrischen Messsystems stets eine geringfügige Verbesserung erreicht werden, wenn die Georeferenzierung mithilfe von Passpunkten am Ufer erfolgt. Die maximalen Abweichungen  $\max(dU_k)$  verbessern sich durchschnittlich um 0,9 cm. Werden hingegen bekannte Kamerapositionen zur Georeferenzierung der Kamera-Messdaten verwendet, so steigen die maximalen Abweichungen in der Höhenkomponente an.

Exemplarisch wird hier für das Lückenszenario A-3 auch eine Georeferenzierung mithilfe von bekannten Kamerapositionen und am Ufer aufgestellten Zielzeichen untersucht (Tabelle 4-10). In diesem Fall wird die einzelnen RMS-Werte gegenüber den korrespondierenden Werten in Tabelle 4-9 weiter verbessert. Der  $RMS_E$ -Wert verbessert sich gegenüber dem aus der Mercator-Konfiguration berechneten Wert um 75 % und der  $RMS_{3D}$ -Wert um 59 %.

**Tabelle 4-10: Auswertung des Fahrtabschnitt Berg 2 für Lücke A-3 mit der erweiterten Konfiguration im Vergleich zum Soll-Wert**

Lücke / Konfiguration	RMS der Differenzen zum SOLL [cm]				Maximale Abweichung [cm]			
	$RMS_E$	$RMS_N$	$RMS_U$	$RMS_{3D}$	$\max(dE_k)$	$\max(dN_k)$	$\max(dU_k)$	$\max \mathbf{d}_k $
<b>A-3 (54 s)</b>								
Mit Kamera u. Zielpunkte	3,1	3,7	1,5	5,1	12,0	11,0	4,1	12,7

Auch für Fahrtabschnitt Tal 1 kann ein Vergleich zu einer Soll-Lösung durchgeführt werden. Hierzu wurden die Daten im Zeitintervall 14:17:00 Uhr – 14:19:00 Uhr ausgewertet und die zugehörigen Ergebnisse in Tabelle 4-11 dargestellt.

**Tabelle 4-11: Auswertung des Fahrtabschnitts Tal 1 – Abschnitt (A) mit unterschiedlich langen simulierten Lücken für die Mercator-Konfiguration und für die erweiterte Konfiguration im Vergleich zum Soll-Wert**

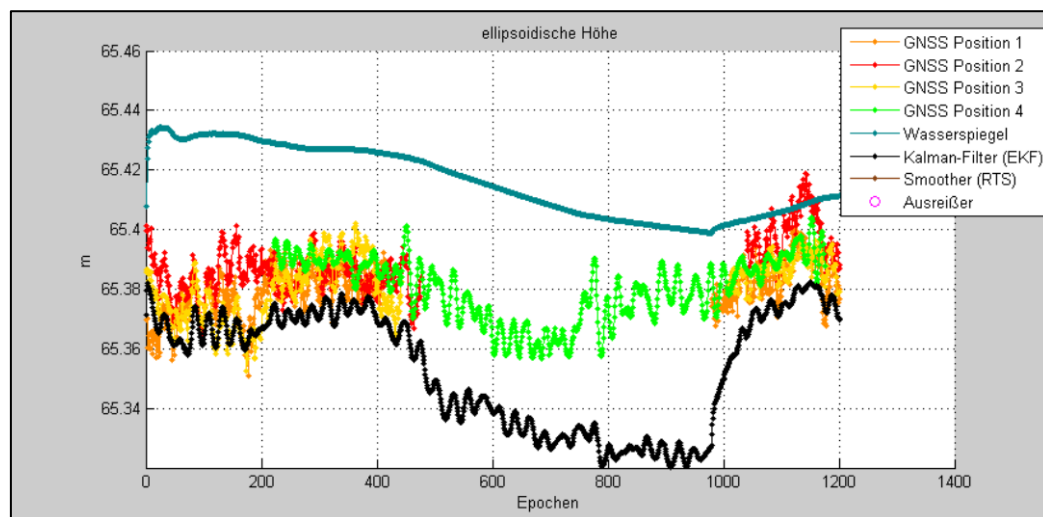
Lücke / Konfiguration	RMS der Differenzen zum Soll- Wert [cm]				Maximale Abweichung [cm]			
	$RMS_E$	$RMS_N$	$RMS_U$	$RMS_{3D}$	$\max(dE_k)$	$\max(dN_k)$	$\max(dU_k)$	$\max \mathbf{d}_k $
<b>A-1 (86 s)</b>								
Ohne Kamera	44,2	8,0	4,2	45,2	87,7	13,3	8,6	89,2
Mit Kamera (Kamerapos.)	23,6	4,8	1,4	24,1	40,1	8,7	3,3	40,8
<b>A-2 (75 s)</b>								
Ohne Kamera	36,5	7,5	3,5	37,4	76,9	13,0	7,4	78,2
Mit Kamera (Kamerapos.)	6,1	4,8	2,6	8,2	13,3	9,3	5,2	16,9
<b>A-3 (57 s)</b>								
Ohne Kamera	21,2	4,4	2,4	21,8	53,1	9,0	5,8	54,1
Mit Kamera (Kamerapos.)	9,0	4,0	1,7	10,0	18,3	8,7	4,0	18,7
<b>A-4 (25 s, 28 s)</b>								
Ohne Kamera	7,6	2,2	2,2	8,2	23,8	6,7	5,6	24,8
Mit Kamera (Kamerapos.)	6,6	1,5	1,6	7,0	18,1	5,1	4,0	18,6

In diesem Fall zeigt sich ebenfalls, dass die Abweichungen in der Ost- bzw. Querkomponente durch Einsatz des photogrammetrischen Messsystems am deutlichsten verbessert werden können. Bei einer simulierten GNSS-Lücke von 87 s verringert sich die maximale Abweichung in der Ost-Koordinate um 54 %. In diesem Fall kann auch die Abweichung in der Nordkoordinate um 35 % und in der Höhe um 62 % verringert werden.

Betrachtet man den Fall A-3, der einer simulierten GNSS-Lückendauer von nahezu 60 s entspricht, so kann die maximale Abweichung der Ostkoordinate um 65,5 % vermindert werden, während die Verbesserung in der Nordkoordinate und der Höhe geringer ausfallen. Auch beim RMS-Wert kann für die Ostkoordinate mit 57,5 % eine deutliche Steige-

nung erreicht werden, während es für  $RMS_N$  und  $RMS_U$  nur zu einer geringfügigen Verbesserung kommt. Bei deutlich kürzeren GNSS-Lücken, wie sie im Szenario A-4 bestimmt wurden, liegt die Verbesserung bei den maximalen Koordinatenabweichungen für alle drei Komponenten bei lediglich wenigen Zentimeter. Die Änderung der drei  $RMS$ -Werte liegt maximal bei 1 cm.

Für diese Auswertung ist davon auszugehen, dass der in Abbildung 4-20 dargestellte Verlauf der Höhenkomponente (EKF-Lösung) durch Verwendung von detaillierten Daten zum Wasserspiegel zu einer weiteren Verbesserung der Lösung führen würde, da die mithilfe der photogrammetrischen Lösung (grüne Höhenganglinie, GNSS Position 4) bestimmten Höhen  $U_{Kamera,k}^{UTM}$  am Ende der simulierten Lücke gut mit den gemessenen GNSS-RTK Höhen übereinstimmen. Sie weisen in diesem Bereich eine maximale Differenz von 4 cm zur Soll-Höhe auf, während das Driftverhalten in den geschätzten Koordinaten  $\hat{U}_{EKF,k}^{UTM}$  parallel zum Absinken des Wasserspiegels verläuft.



**Abbildung 4-20: Ellipsoidische Höhen für Fahrtabschnitt Tal 1 (23.11.15), Szenario A-3; transformierte Messgrößen und EKF-Lösung**

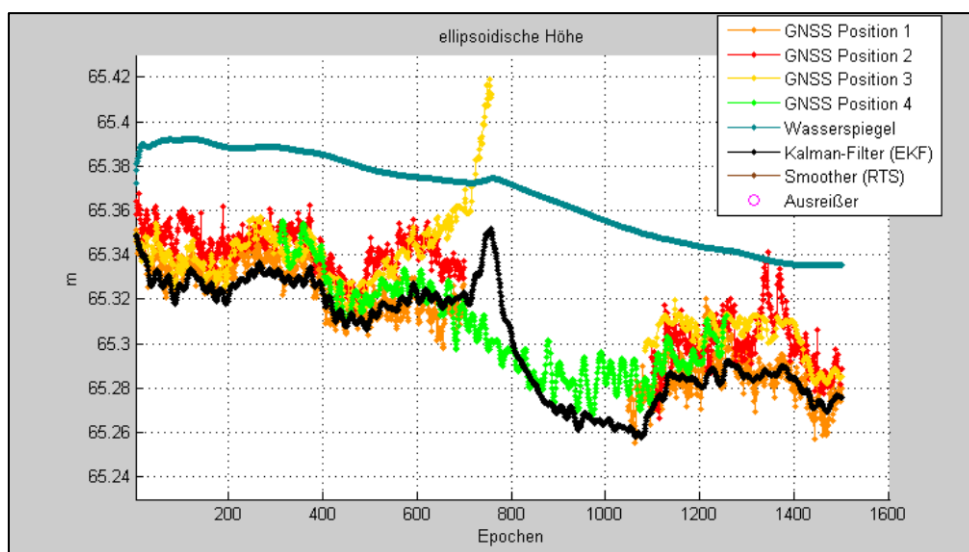
Neben den simulierten GNSS-Lücken soll im Trajektorienbereich B auch ein Bereich betrachtet werden, in dem in der Realität problematische Bedingungen für den Einsatz von GNSS-Messungen vorliegen.

Bei Fahrtabschnitt Tal 1 wird die Brücke aufgrund einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 4 m/s innerhalb von 3,3 s passiert. Um eine höhere Aussagekraft über die Leistungsfähigkeit der erweiterten Sensorkonfiguration machen zu können und um fehlerbehaftete GNSS-Messungen zu eliminieren, wird die Lücke künstlich um 50 m vergrößert. Damit beträgt die Dauer der GNSS-Lücke 34,8 s. Wie in Abbildung 4-21 zu erkennen ist, müsste der Bereich noch weiter vergrößert werden, um alle fehlerhafte Höhen des dritten GNSS-Empfängers (Seapath-System) zu eliminieren. Diese Abweichungen in der Höhe führen auch beim gefilterten  $\hat{U}_{EKF,k}^{UTM}$  zu Schwankungen. Für diesen Bereich kann angenommen werden, dass  $U_{Kamera,k}^{UTM}$  tatsächlich mit einer höheren Genauigkeit als der in Tabelle 4-8 dargestellte Wert vorliegt.

Am Ende der Lücke ist die Lageabweichung zu einer vorliegenden GNSS-Lösung (auf RP bezogen) für Epoche 1047 bei Verwendung des Kamerasystems um 3,9 cm geringer. Die Abweichungen in den einzelnen Koordinatenkomponenten werden in Tabelle 4-12 dargestellt.

**Tabelle 4-12: Offset zwischen EKF-Lösung und den transformierten GNSS-Koordinaten (GNSS Position 1) am Ende der GNSS-Lücke – Fall B (Tal 1)**

	$ \Delta E $ [cm]	$ \Delta N $ [cm]	$ \Delta U $ [cm]
Mercator-Konfiguration	23,0	6,2	0,7
Mercator-Konfiguration + Kamera	9,7	17,4	1



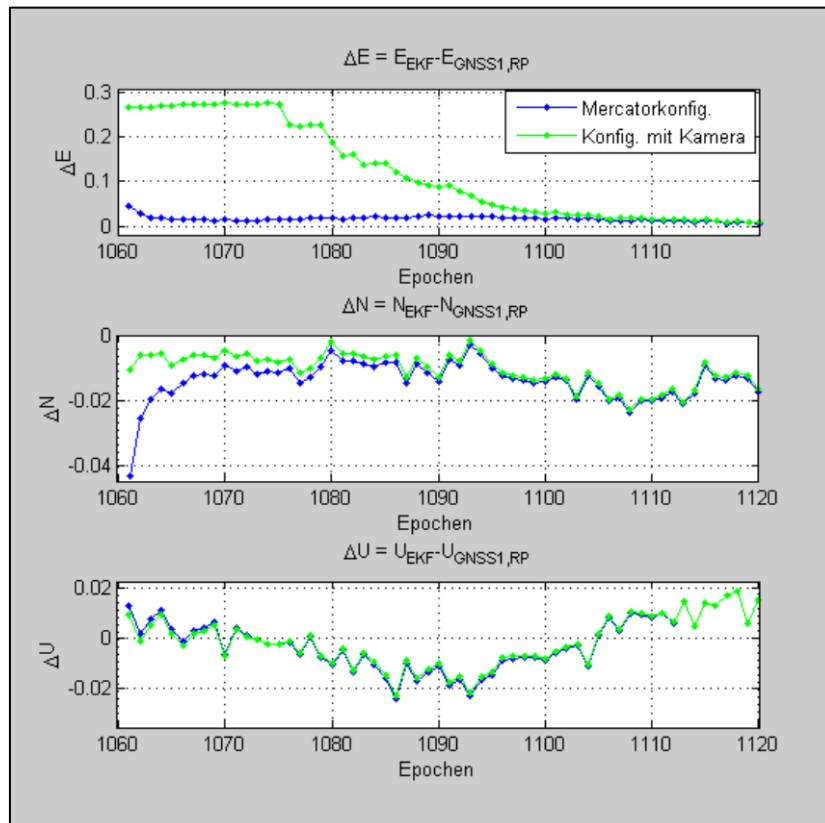
**Abbildung 4-21: Ellipsoidische Höhen für Fahrabschnitt Tal 1, Szenario B; transformierte Messgrößen und EKF-Lösung**

Für Fahrabschnitt Berg 2 wird die dabei auftretende GNSS-Lücke ebenfalls um einen Bereich von 50 m vor und nach der Brücke vergrößert; die Lückendauer beträgt 41,1 s. Die erhaltenen EKF-Lösungen werden mit einem Soll-Wert zur Epoche 1060 (GNSS Position 1, RP) verglichen. Da die betrachtete Epoche noch innerhalb der GNSS-Lücke liegt, wird dieser Soll-Wert nicht zur Schätzung der EKF-Lösung herangezogen.

Wird der Filterprozess lediglich für die Messdaten aus der Mercator Konfiguration durchgeführt, beträgt die Abweichung in der Lagekomponente am Ende der Lücke 18 cm. Demgegenüber vergrößert sich die Abweichung durch Integration einer Kamera auf 26,4 cm. (Tabelle 4-13). Für die Sensorkonfiguration mit Kamera bleiben die Koordinatenoffsets  $\Delta E$  nach der Lücke mit ca. 26 cm jedoch für einige Epochen noch relativ groß (siehe Abbildung 4-22, ab Epoche 1061).

**Tabelle 4-13: Offset zwischen EKF-Lösung und den transformierten GNSS-Koordinaten (GNSS Position 1) am Ende der GNSS-Lücke – Fall B (Berg 2)**

	$ \Delta E $ [cm]	$ \Delta N $ [cm]	$ \Delta U $ [cm]
Mercator-Konfiguration	13,0	12,4	1,8
Mercator-Konfiguration + Kamera	26,3	1,9	1,4



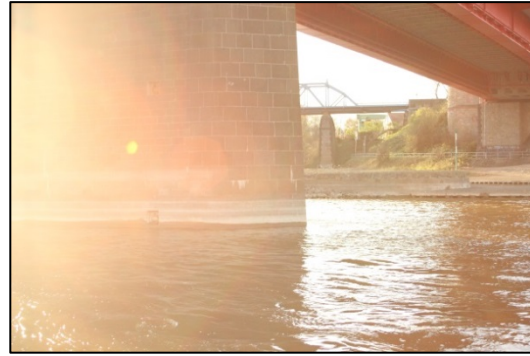
**Abbildung 4-22: Koordinatenoffsets zwischen der EKF-Lösung und der transformierten GNSS-Messdaten nach der GNSS-Lücke (Berg 2)**

Der Grund hierfür lässt sich vor allem in der Aufnahmekonfiguration suchen: Aufgrund der vorab definierten Trajektorie, wurden während des Fahrtabschnitts Berg 2 die Brückenpfeiler wesentlich dichter passiert als während des Fahrtabschnitts Tal 1, so dass im ersten Fall weniger Details aus der Brückenumgebung erfasst werden konnten (Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24). Außerdem ergab sich in dem hier untersuchten Bereich (B) des Fahrtabschnitts Berg 2 ein bereits beschriebenes Problem: Die Sonne scheint ins Objektiv. Durch diese Überbelichtung können weniger korrekte Features in den aufeinanderfolgenden Fotos bestimmt werden und die Genauigkeit der bestimmten Kamerakoordinaten nimmt stark ab.





**Abbildung 4-23: Foto der Brücke, aufgenommen während des Fahrtabschnitts Tal 1**



**Abbildung 4-24: Foto der Brücke, aufgenommen während des Fahrtabschnitts Berg2**

Aufgrund der teilweise ungünstigen Aufnahmebedingungen und eines ungünstigen Verhältnisses zwischen den Strecken zweier Kamerapositionen (*Basis*) zur Distanz Kamera – Objekt, kann in diesem Fall nicht das volle Potential einer photogrammetrischen Messung ausgeschöpft werden.

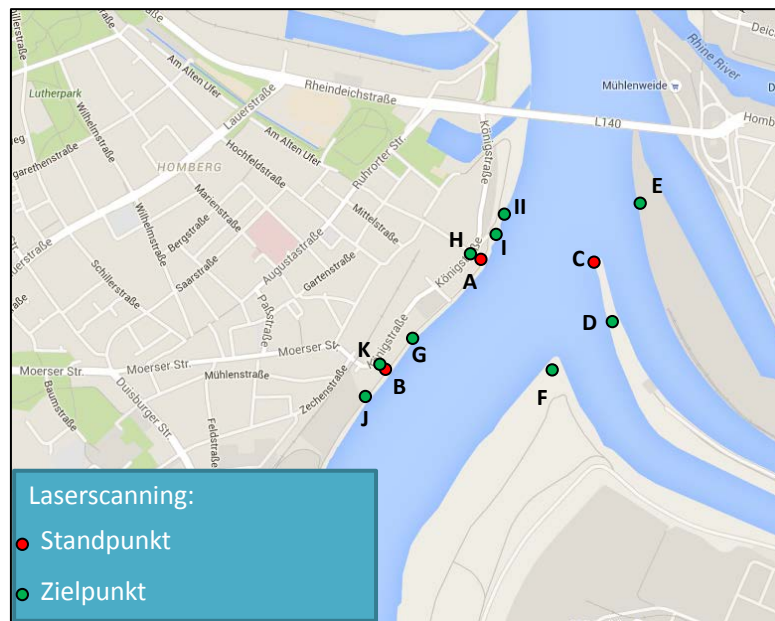
Da das photogrammetrische Messsystem sehr sensitiv auf die wechselnden Umgebungsbedingungen, die bei einer normalen Messfahrt auftreten, reagiert und da die teilweise erreichbare Genauigkeitssteigerung mit einem sehr großen Arbeitsaufwand verbunden ist, kann auf den Einsatz des Messsystems bei regulären Messfahrten in der hier dargestellten Aufnahmekonfiguration verzichtet werden. Eine Ausnahme hiervon stellen Messfahrten in stark bebauten Uferbereichen dar, wobei die Entfernung zum Ufer geringer als 100 m sein sollte.

Alternativ können stattdessen andere Aufnahmekonfigurationen (Stereo- oder Multikamerasysteme) verwendet oder ein anderes Auswertekonzept (z. B. Visual Odometry) gewählt werden.

#### **4.4.1.6 Punktwolkenvergleich**

Insgesamt werden für die Erfassung des Uferbereichs drei Scannerpositionen benötigt. Zum Einsatz kommt dabei der Laserscanner Riegl VZ-2000. Die resultierenden Punktwolken müssen zunächst registriert und georeferenziert werden. Zu diesem Zweck werden koordinatenmäßig bekannte Passpunkte benötigt. Diese wurden so geplant, dass sie von möglichst vielen Scannerpositionen aus sichtbar sind und dass sie bestmöglich im gescannten Bereich verteilt liegen. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten (Bebauung, Zugangsmöglichkeiten) konnte jedoch keine optimale Verteilung erreicht werden: Die Punkte können nur entlang des Rhein-Ufers verteilt werden (siehe Abbildung 4-25).

Vor Messbeginn wurden die Passpunkte und die Standpunkte markiert. Ihre Koordinaten wurden durch statische GNSS-Messungen bestimmt.



**Abbildung 4-25: Verteilung der Scannerpositionen im Messgebiet**

Während des Scannens wurden die Passpunkte mit herstellerspezifischen Zielzeichen signalisiert. Dabei handelt es sich um runde Reflektorfolien mit einem Durchmesser von 5 cm. Aufgrund ihrer guten Reflektivität werden sie vom Riegl VZ-2000 automatisch erkannt. Während der Messung zeigte sich jedoch, dass die Zielzeichen, die auf dem gegenüberliegenden Ufer angebracht wurden, nicht automatisch erkannt werden konnten. Der Grund hierfür liegt vermutlich darin, dass der reflektierende Bereich über die große Entfernung zu klein ist.

Die Registrierung und die Georeferenzierung der Punktwolken erfolgt mit der Software RiSCAN PRO. Dabei wurden die nicht automatisch erkannten Punkte auf dem gegenüberliegenden Ufer bei Bedarf manuell angeklickt. Diese Vorgehensweise reduziert jedoch die Genauigkeit der Registrierung und die der Georeferenzierung. Aus diesem Grund wurden die Passpunkte, die die größte Abweichung aufwiesen, iterativ entfernt und die Registrierung neu durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-14 zusammengefasst.

**Tabelle 4-14: Scanregistrierung mit RiSCAN PRO**

Scanposition	Standpunkt	Passpunkte	Registrierungsgenauigkeit [cm]
1	A	H, G, I	3,7
2	C	E, A, D, I	4,6
3	B	G, J, K	1,7

Die Scanausrichtung kann dadurch mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmt werden, ist aber noch nicht ausreichend. Um sie weiter zu verbessern und der schlechten Verteilung der Passpunkte entgegenzuwirken, wird in einem weiteren Schritt der ICP-Algorithmus eingesetzt, um die Punktwolkenregistrierung zu optimieren. Als Ergebnis wurde eine Standardabweichung von 1,85 cm ausgegeben.

Wie schon in Kapitel 4.2.3 erwähnt wurde, werden für den Vergleich zwischen der TLS-Punktwolke und der von Agisoft PhotoScan berechneten Punktwolke Elemente (Punkte, Kanten und Ebenen) aus den Punktwolken extrahiert und miteinander verglichen. Die Extraktion dieser Elemente wurde in der Software Cyclone von Leica Geosystems durchgeführt. Aus den Fotos wurden für die Fahrtabschnitte Tal 1 und Berg 2 jeweils eine Punktwolke erzeugt. Diese Messdaten wurden mithilfe bekannter Kamerapositionen georeferenziert (Fall A-3, dargestellt in Tabelle 4-9 und Tabelle 4-11).

Der Vergleich selbst wurde mit MATLAB durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Tabelle 4-15 zusammengefasst. In Anhang C wird die Lage der darin aufgeführten einzelnen Elemente dargestellt.

**Tabelle 4-15: Ergebnisse des Punktwolkenvergleichs (zwischen TLS und PhotoScan, georeferenziert mittels Kamerapositionen)**

Objektart	Objekt Nr.	Distanz $d$ [m]	Neigung $\alpha$ [°]	Verschiebungsvektor		
				$dE$ [m]	$dN$ [m]	$dU$ [m]
Punkt	1	1,977	-	1,145	0,570	1,507
	2	2,008	-	1,151	0,562	1,547
	3	2,045	-	1,176	0,608	1,559
	4	1,295	-	0,600	-0,210	1,128
	5	1,257	-	0,548	-0,335	1,081
	6	1,356	-	0,509	-0,290	1,223
	7	1,391	-	0,640	-0,152	1,226
	8	1,458	-	0,598	-0,376	1,275
	9	1,394	-	0,588	-0,356	1,213
Kante	1	1,677	0,3091	-1,662	-0,227	0,022
	2	1,759	1,8197	-1,696	-0,465	-0,031
	3	0,993	0,1255	0,899	0,129	0,400
	4	0,763	2,8224	-0,727	-0,233	0,006
	5	0,749	3,1357	0,680	0,313	-0,035
	6	0,805	2,0410	0,760	0,264	-0,020
Ebene	1	1,323	1,4363	-1,253	0,414	0,089
	2	1,268	1,1969	-1,170	0,488	0,021
	3	1,640	1,4611	-1,623	-0,228	0,015
	4	0,325	0,5068	-0,059	0,007	0,319
	5	1,667	4,4227	-1,656	-0,190	-0,009
	6	0,750	7,6016	-0,511	0,533	0,136
	7	1,727	0,4729	-1,715	-0,199	-0,035
	8	1,500	1,2392	-1,485	-0,208	-0,027
	9	1,758	2,1828	-1,731	-0,274	-0,130
	10	1,817	10,5174	-1,790	-0,298	-0,095
	11	0,842	1,0396	-0,479	0,068	0,689
	12	0,933	0,1209	-0,923	0,130	0,051
	13	0,987	1,1992	-0,981	0,103	0,030
	14	0,979	5,6521	-0,973	0,102	0,029

Objektart	Objekt Nr.	Distanz $d$ [m]	Neigung $\alpha$ [°]	Verschiebungsvektor		
				$dE$ [m]	$dN$ [m]	$dU$ [m]
Ebene	15	1,195	2,8965	-1,194	0,036	0,006
	16	0,941	2,5492	0,916	-0,213	-0,007
	17	0,888	2,5406	0,865	-0,202	-0,005
	18	0,348	4,9278	0,342	-0,065	0,001
	19	0	2,0058	0	0	0
	20	0,942	2,3435	0,918	-0,212	-0,005
	21	1,178	0,1809	1,152	-0,230	0,066
	22	1,259	2,2681	1,231	-0,261	0,042
	23	1,142	1,3301	1,108	-0,279	-0,008
	24	0,754	0,6353	0,466	-0,574	0,144
	25	0,660	1,4697	0,416	-0,513	0,004
	26	0,457	0,6473	0,452	-0,065	0,006

Durch Betrachtung der Abweichungen der Punkte können diese in zwei Gruppen mit ähnlichen Abweichungen zur TLS-Punktwolke unterteilt werden:

- Gruppe 1: Punkte 1, 2 und 3 sowie
- Gruppe 2: Punkte 4,5,6,7,8 und 9.

Es fällt auf, dass die Abweichungen für die zweite Gruppe kleiner als bei der ersten Gruppe ausfallen. Auch sind die Abweichungen  $dN$  in der ersten Gruppe positiv, während sie in der zweiten negativ sind. Das entspricht auch der räumlichen Verteilung der Punkte. Die Punkte der ersten Gruppen liegen auf der Fassade eines Gebäudes während sich die Punkte der zweiten Gruppen ca. 260 m flussaufwärts am gleichen Ufer relativ nah beieinander befinden.

Auch die Abweichung zwischen den aus den beiden Punktwolken extrahierten Kanten und Ebenen fallen, sowohl bei Betrachtung der Abstände (bis 1,759 m) als auch bei Betrachtung der Neigung (bis 10,5174°), groß aus.

Um die Ursache dieser Abweichungen näher bestimmen zu können, werden die Transformationsparameter einer 7-Parameter-Transformation bestimmt, mit denen die mit Agisoft PhotoScan erzeugte Punktwolke auf die TLS-Punktwolke transformiert werden kann. Es zeigt sich, dass die Rotationswinkel in allen Fällen kleiner als 1° sind, während der berechnete Maßstabsfaktor  $m = 0,996105655$  eine deutliche Abweichung zum idealen Maßstabsfaktor  $m = 1$  aufweist.

Um die lokalen Unterschiede im Maßstabsfaktor vergleichen zu können, werden einige Strecken in beiden Punktwolken berechnet und miteinander verglichen (Tabelle 4-16).

**Tabelle 4-16: Vergleich der Strecken zwischen den Punkten in den beiden Punktwolken**

Kante	Länge aus TLS-Punktwolke [m]	Länge aus Photo-Scan-Punktwolke [m]	Differenz [m]	Maßstab
P1P2	0,793	0,830	0,037	0,955422
P1P3	0,765	0,831	0,066	0,920578
P2P3	0,783	0,833	0,050	0,939976
P4P5	3,638	3,762	0,124	0,967039
P5P6	1,482	1,632	0,150	0,908088
P6P7	3,585	3,774	0,189	0,949921
P7P4	1,517	1,616	0,099	0,938738
P1P7	258,398	259,270	0,872	0,996637

HydrOs

Die aus der Photogrammetrie-Punktwolke abgeleiteten Strecken sind immer größer als die Strecken in den TLS-Messdaten, was auf einen möglichen Maßstabsfehler hindeutet. Die lokalen Abweichungen in den Streckenlängen und die daraus folgenden unterschiedlichen Maßstabsfaktoren kommen zum einen dadurch zustande, dass in den beiden Punktwolken nicht exakt die gleichen Punkte ausgewählt werden können. Dieser Fehler beeinflusst das Ergebnis der Suche nach einem einheitlichen Maßstab besonders stark bei kurzen Strecken. Zum anderen beeinflussen fehlerhafte Bildausrichtungen das Ergebnis ebenfalls, was sich auch bereits bei der Bestimmung der Kameratrajektorie in Kapitel 4.4.1.4 gezeigt hat.

Diese wiederum resultiert aus dem ungünstigen Verhältnis zwischen *Basisstrecke* (Strecke zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kamerapositionen) und der Strecke Kamera – Objekt, der teilweise schlechten Bildqualität und den lediglich geschätzten Parameter der inneren Orientierung.

Alternativ werden die entsprechenden Elemente in einer weiteren Punktwolke (Agisoft PhotoScan), die mittels Zielzeichen (Festpunkte am Ufer) georeferenziert wurde, extrahiert und mit den zugehörigen Elementen aus der TLS-Punktwolke verglichen. Da diese Kontrollpunkte lediglich für die Messzeiträume der Bergfahrten vorhanden sind, werden nur die Elemente in diesem Bereich betrachtet. Tabelle 4-17 fasst die Ergebnisse zusammen.

**Tabelle 4-17: Ergebnisse des Punktwolkenvergleichs (zwischen TLS und PhotoScan, georeferenziert mittels Passpunkte (Zielzeichen) am Ufer)**

Objektart	Objekt Nr.	Distanz $d$ [m]	Neigung $\alpha$ [°]	Verschiebungsvektor		
				$dE$ [m]	$dN$ [m]	$dU$ [m]
Punkt	1	1,273	-	0,378	-1,000	0,692
	2	1,280	-	0,352	-1,006	0,709
	3	1,269	-	0,383	-0,972	0,720
	4	0,069	-	0,067	-0,005	0,016
	5	0,107	-	-0,018	-0,104	-0,018
	6	0,138	-	0,040	-0,080	0,107
	7	0,146	-	0,078	0,058	0,109
	8	0,211	-	0,045	-0,140	0,151
	9	0,179	-	0,076	-0,117	0,112
Kante	4	0,261	0,9960	0,252	-0,066	-0,006
	5	0,114	3,6463	0,042	-0,106	-0,001
	6	0,198	4,3391	0,195	-0,031	-0,013
Ebene	16	0,516	0,9720	0,503	-0,117	-0,004
	17	0,460	0,9229	0,448	-0,105	-0,003
	18	0	5,7304	0	0	0
	19	0,586	1,2568	0,571	-0,133	-0,001
	20	0,504	0,5420	0,491	-0,113	-0,003
	21	0,703	1,5477	0,688	-0,138	0,039
	22	0,997	1,8290	0,974	-0,207	0,033
	23	0,984	1,5218	0,955	-0,240	-0,007
	24	0,045	0,6214	0,028	-0,034	0,009
	25	0,141	1,1422	0,089	-0,109	0,001

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass die Abstände zwischen den extrahierten Elementen im Vergleich zu Tabelle 4-15 kleiner geworden sind. Die Neigung der einzelnen Elemente ist allerdings an einigen Stellen größer geworden, was höchstwahrscheinlich am starken Rauschen in der Punktwolke aus der photogrammetrischen Auswertung liegt. Ausreißer im Bereich der extrahierten Ebenen weisen beispielsweise Abstände von bis zu 20 cm zur ausgleichenden Ebene auf. Dies führt zur Verfälschung der Ausrichtung der daraus geschätzten Ebenen bzw. Kanten.

Weiterhin ist zu bemerken, dass die Abstände der Punkte aus der zweiten Gruppe auf maximal 21 cm gesunken sind. Im Gegensatz dazu sind die Abweichungen der Punkte erster Gruppe zwar gesunken aber immer noch größer als 1 m. Das kann durch Betrachtung der Lage der beiden Gruppen in Bezug auf die Passpunkte begründet werden: Die zweite Gruppe liegt nahe (Abstand: 6-20 m) am Passpunkt G. Im Gegensatz dazu liegt der nächste Passpunkt II ca. 50 m von den Punkten der ersten Gruppe entfernt. Zudem tritt für den Trajektorienabschnitt, in dem die Punkte der ersten Gruppe liegen, eine Fehlzuordnung der Bilder auf.

Betrachtet man dieses Ergebnis und das Ergebnis aus Kapitel 4.4.1.4, woraus hervorgeht, dass die Georeferenzierung mittels Kamerapositionen bessere Trajektorienenergebnisse als die mittels Zielzeichen liefert, so kann man diese Abweichungen neben den bereits ge-

nannten Ursachen vor allem auf die Verteilung der verwendeten Passpunkte zurückführen. Die Abweichungen nehmen mit zunehmendem Abstand zu den Passpunkten zu.

Um eine großflächigere Verteilung der Passpunkte zu erreichen, werden hier in einem weiteren Auswerteschritt die eingemessenen Zielzeichen am Ufer und die bekannten Kamerapositionen zur Georeferenzierung der Punktwolke verwendet. Die Abweichungen der aus dieser Punktwolke extrahierten Elemente gegenüber der TLS-Punktwolke sind in Tabelle 4-18 zusammengefasst:

**Tabelle 4-18: Ergebnisse des Punktwolkenvergleichs (zwischen TLS und PhotoScan, georeferenziert mittels bekannter Kamerapositionen und Passpunkte (Zielzeichen) am Ufer)**

Objektart	Objekt Nr.	Distanz $d$ [m]	Neigung $\alpha$ [°]	Verschiebungsvektor		
				$dE$ [m]	$dN$ [m]	$dU$ [m]
Punkt	1	0,838	-	-0,355	-0,623	0,434
	2	0,857	-	-0,337	-0,640	0,458
	3	0,837	-	-0,353	-0,598	0,469
	4	0,056	-	0,002	-0,014	-0,054
	5	0,152	-	-0,052	-0,110	-0,090
	6	0,111	-	-0,078	-0,077	0,018
	7	0,041	-	0,006	0,040	0,008
	8	0,095	-	0,034	-0,081	-0,036
	9	0,100	-	0,089	0,007	-0,046
Kante	4	0,147	1,1798	0,147	0,009	-0,004
	5	0,034	1,4843	0,005	0,034	-0,0002
	6	0,025	1,3949	0,002	-0,024	0,0001
Ebene	16	0	1,0874	0	0	0
	17	0,011	0,6205	-0,011	0,003	0,0001
	18	0	3,5361	0	0	0
	19	0,012	1,1756	0,012	-0,003	-0,000
	20	0,044	0,4707	-0,042	0,010	0,000
	21	0,410	1,3667	-0,402	0,085	-0,023
	22	0,408	1,7539	-0,398	0,085	-0,014
	23	0,407	1,8025	-0,395	0,099	0,003
	24	0	0,5933	0	0	0
	25	0,054	0,5279	0,034	-0,042	0,000

Es ist ersichtlich, dass die Abweichungen der einzelnen Elemente durch die bessere Verteilung der Passpunkte weiter verringert wurden. Die maximale Abweichung im Objekt- abstand ( $d$ ) beträgt nun 0,857 m und die maximale Neigung beträgt 3,5361°. Der Zusammenhang zwischen der Lage der Elemente und den zugehörigen Abweichungen zwischen den beiden Punktwolken ist immer noch zu erkennen. Die Abweichungen der Punkte 1 bis 3 sind mit einem Punktabstand von 84 cm bzw. 86 cm immer noch groß, was jedoch auf die bereits beschriebene, problematische Bildausrichtung sowie die geringere Anzahl an Passpunkten in diesem Bereich zurückzuführen ist. Auch die Ebenen 21 – 23, die ebenfalls relativ große Objektdistanzen aufweisen, befinden sich in der Nähe dieses Bereichs

(siehe Anhang C). Alle anderen Objekte haben einen Objektabstand von maximal 15 cm. Diese Ergebnisse zeigen, dass die photogrammetrische Auswertung in den jeweiligen Trajektorienabschnitten, unter Verwendung von gleichmäßig verteilten Passpunkten für die Georeferenzierung, verlässliche Ergebnisse liefert.

Auch hier ist zu erwarten, dass eine Kalibrierung der Kamera im Vorfeld und eine gleichmäßige Verteilung der Passpunkte im Messgebiet das Ergebnis verbessert.

#### 4.4.2 Integration des DGNSS-Empfängers

Eine ausführliche Analyse der Ergebnisse, die durch Integration eines DGNSS- bzw., eines DGPS-Empfängers erreicht werden kann, findet sich in Breitenfeld et al. (2015). Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung über die erreichten Ergebnisse gegeben:

Wird zusätzlich zu der in Breitenfeld et al. (2015) beschriebenen Grundkonfiguration ein DGPS-Empfänger an die HydrOs-Software angeschlossen, so können in Bereichen, in denen aufgrund eines SAPOS®-Ausfalls keine RTK-Daten verfügbar sind, bessere Ergebnisse als bei einer reinen Dead Reckoning Lösung erreicht werden. In dem von Breitenfeld et al. (2015) aufgezeigten Beispiel werden in Streckenabschnitten mit einem simulierten SAPOS®-Ausfall die Abweichungen zu den Soll-Werten um durchschnittlich 10 cm verbessert. Die simulierten Lücken haben dabei eine Lückenlänge zwischen 35 s und 90 s. Die Lageabweichungen der EKF-Lösung für diese Lücken sind stets kleiner als 21 cm, wodurch die Anforderungen bezüglich der maximal tolerierten Lageabweichung von 30 cm erfüllt bleiben.

Allerdings verbessert die angebrachte Korrektur bei länger andauernden RTK-Lücken die DGPS-Lösung nicht mehr und die EKF-Lösung folgt mit der Zeit den bestimmten DGPS-Koordinaten (Drift).

### 4.5 SLAM Verfahren

Die in Kapitel 4.1 und 4.2 aufgezeigten Ansätze zur Positionsbestimmung mittels eines photogrammetrischen Messsystems und kinematischen Laserscannings sind hauptsächlich für eine Auswertung im Postprocessing-Modus geeignet. Für eine Auswertung dieser Messsysteme in Echtzeit stehen mit den *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) Algorithmen bereits Ansätze zur Verfügung. Jedoch sind zu diesem Zeitpunkt nur wenige dieser Ansätze als kommerzielle Softwares realisiert.

Bei echtzeitfähigen Verfahren kommen sogenannte „on-line SLAM“ (Grisetti et al., 2011) Algorithmen zum Einsatz. Dabei werden stets aus den Messdaten Informationen über die Umgebung extrahiert (Mapping), welche anschließend zur Positionierung des Sensors bzw. der Sensorplattform (Localization) in der aufgenommenen Umgebung genutzt werden. Im Allgemeinen werden auch bei diesen Verfahren mehrere Sensoren auf einer Plattform zu einem Messsystem kombiniert.

In vielen Fällen wird in aktuellen Forschungsprojekten der Ansatz *Graph-based SLAM* zur Positionsbestimmung von mobilen Plattformen (bzw. zur Kartierung der Umgebung) eingesetzt.

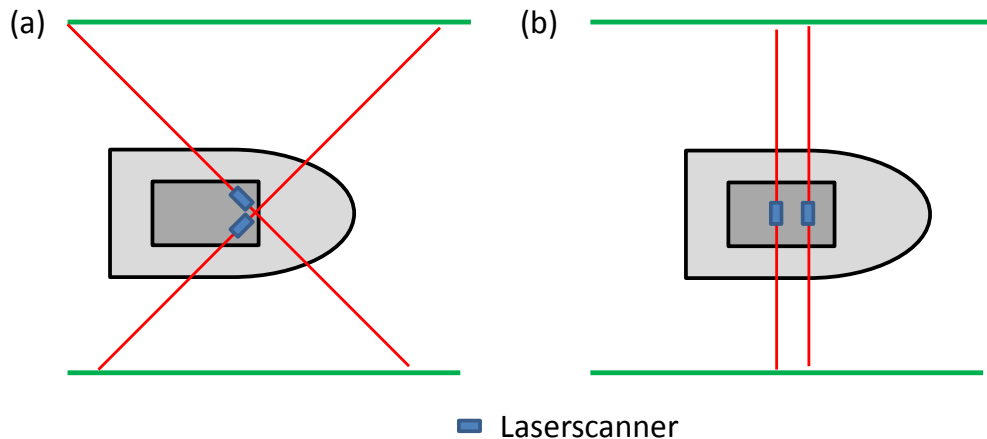


Dieser Ansatz basiert auf der Graphentheorie. Nach Grisetti et al. (2011) entspricht die Position und die Orientierung (*Pose*) der bewegten Plattform zur Epoche  $t_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) dem Knoten des Graphen  $\mathbf{x}_i$ . Die Kanten zwischen den Knoten beschreiben dementsprechend die räumlichen Beziehung zwischen zwei Knoten  $\mathbf{x}_i$  und  $\mathbf{x}_j$ . Wird die Umgebung der Plattform als Punktwolke erfasst, so kann die Beziehung zwischen den beiden Knoten aus dem Teil der Punktwolke abgeleitet werden, der von beiden Standpunkten aus erfasst wurde. Daraus lässt sich die wahrscheinlichste Pose der Plattform zum Zeitpunkt  $t_j$  ableiten. Unterstützend können dazu auch die Messdaten anderer Sensoren herangezogen werden. Nachdem die Pose  $\mathbf{x}_j$  bestimmt wurde, können die von diesem Standpunkt aus aufgenommenen Teile der Punktwolke genutzt werden, um die Umgebungskarte zu ergänzen. Anschließend wird für den kompletten Graphen eine optimale Knotenkonfiguration bestimmt, indem die aus den Messdaten (Kanten) stammenden Fehler minimiert werden (Methode der kleinsten Quadrate). Der gesamte Prozess lässt sich dazu in zwei iterativ ablaufenden Schritten beschreiben: Das Bilden des Graphen aus den Messdaten („graph construction“) und der Optimierung der Graphenknoten („graph optimization“) (Grisetti et al., 2011).

Eingesetzt wird ein solcher SLAM-basierter Algorithmus heutzutage oft bei Indoor-Anwendungen. Schroth (2015) beschreibt ein mobiles System, bei dem Laserscanner zur Bestimmung der Position der bewegten Plattform eingesetzt werden, wobei die Umgebung gleichzeitig mit Kameras erfasst wird. Dazu sind auf der Plattform mehrere, räumlich unterschiedlich orientierte 2D-Scanner angebracht (NavVis, 2016).

Basierend auf der Erkennung zylinderförmiger, bekannter Landmarken bestimmt der in Hofmann et al. (2012) beschriebene Roboter seine Position in einem Indoor-Testfeld in zwei Schritten: Zunächst wird mithilfe eines Map Matching Algorithmus bestimmt, welche der Landmarken vom Sensor erfasst wurden. Anschließend kann mithilfe der zugeordneten Landmarken ein Rückwärtsschnitt gerechnet werden.

Soll ein solches System auf einem Vermessungsschiff aufgebaut werden, so sollte es nicht in Bereichen mit uniformen Strukturen am Ufer eingesetzt werden. Für Uferbereiche mit extrahierbaren Strukturen bietet sich, aufgrund stark variierender Abstände zu den Objekten und unterschiedlicher Objektstrukturen, der Einsatz von mehreren 2D-Laserscannern auf einem Schiff an. Damit kann die *Umgebungskarte* zum einen um Objekte auf beiden Uferseiten ergänzt werden, während gleichzeitig eine ausreichende Punktüberlappung mit dem bereits erfassten Bereich entsteht, sodass eine Positionsbestimmung möglich wird. Diese Anordnung kommt bereits in zahlreichen Mobile-Mapping-Systemen zum Einsatz.



**Abbildung 4-26: Mögliche Konfigurationen zur Anbringung von terrestrischen Laserscannern auf einem Vermessungsschiff: (a) Kreuzende Anordnung, (b) Parallele Anordnung**

Prinzipiell sind zwei Anordnungen denkbar, die in Abbildung 4-26 für jeweils zwei Laserscanner dargestellt werden. Der in Abbildung 4-26 (a) dargestellte Aufbau wird in ähnlicher Weise bereits im Mobile Mapping-System RIEGL VMX-450 oder VMX-1HA (Riegl, 2016b) realisiert. Durch die kreuzenden Laserstrahlen werden die für den *Mapping*-Schritt verwendeten 3D-Punkte im selben Scannerumlauf wie die für den *Localization*-Schritt benötigten Punkte erfasst. Für den in Abbildung 4-26 (b) dargestellten Ansatz wird jeder dieser beiden Schritte jeweils von einem Laserscanner übernommen.

Die in Abbildung 4-26 (a) dargestellte Messkonfiguration ist dabei zu bevorzugen, da mit ihr besser Objekte erfasst und verwendet werden können, die eine orthogonale Ausrichtung zur Fahrtrichtung haben.

Echtzeitfähige photogrammetrische Softwaremodule basieren meist auf dem *Visual SLAM* (V-SLAM) Ansatz. Mit V-SLAM werden aufgenommene Bilder direkt prozessiert, um die Position und die Orientierung der Kamera zu bestimmen. Exemplarisch für diesen Ansatz sei hier der Ansatz *Large-Scale Direct Monocular SLAM* (LSD-SLAM) genannt, der in Engel et al. (2013) und Engel et al. (2014) beschrieben wird. Die dazu entwickelte Software ist auch für Smartphone-Kameras lauffähig (FabliTec, 2016). Da die Software jedoch erst seit kurzem kommerziell vertrieben wird, liegen noch keine Informationen über ihre Eignung für ein präzises photogrammetrisches Messsystem vor.

Ein weiterer Ansatz, bei dem Smartphone-Kameras zum Einsatz kommen, wird in Priacariu et al. (2015) vorgestellt.

Ein weiteres Einsatzgebiet von Visual SLAM-Algorithmen liegt in der Navigation von UAVs (Steder et al., 2008; Steffen, 2013) oder in der Navigation von autonomen Robotern (Bennewitz et al., 2006).

## 4.6 Fazit

Die Integration von zusätzlichen Positionssensoren kann für Trajektorienabschnitte, in denen wiederholt und über mehrere Epochen keine GNSS-RTK Lösung verfügbar ist, eine Verbesserung darstellen. Die daraus resultierenden Beobachtungen können unter optimalen Bedingungen helfen, dem Driftverhalten einer rein IMU-basierten Lösung entgegen-

zuwirken. Es ist jedoch zu beachten, dass die aus den Ergänzungssystemen stammenden Beobachtungsgrößen ebenso sorgfältig auf Plausibilität (Ausreißer) überprüft werden müssen wie die GNSS-RTK-Lösungen.

In Bereichen, in denen GNSS-Signale empfangen werden können, jedoch keine RTK-Lösung vorliegt, kann der Einsatz eines DGNSS-Empfängers hilfreich sein. Werden für die Bestimmung der DGNSS-Lösung Korrekturdaten verwendet, die über einen Mittelwellenkanal übertragen werden, so kann sogar in Bereichen, in denen keine SAPOS®-Korrekturdaten über das GSM- bzw. UMTS-Netz empfangen werden können, eine Positionslösung bestimmt werden. Bei langen Lücken folgt die EKF-Lösung jedoch langsam der DGNSS- bzw. DGPS-Position (Breitenfeld et al., 2015).

Die Einbindung eines DGNSS-Empfängers in das HydrOs-System kann mit wenig Aufwand realisiert werden, da die Schnittstelle für die HydrOs-Software sowie die Messgleichungen bereits vollständig implementiert sind. Vor Messbeginn müssen lediglich die Koordinaten der zusätzlichen GNSS-Antenne im Schiffskoordinatensystem bestimmt werden.

Werden durch starke (Teil-)Abschattungen jedoch keine GNSS-Signale empfangen bzw. sind diese aufgrund von starken Mehrwege-Effekten nicht nutzbar, so sollte auch der DGNSS-Empfänger nicht genutzt werden.

Ein photogrammetrisches Messsystem verbessert bei guten Aufnahmebedingungen in GNSS-Lücken die quer zur Fahrtrichtung auftretenden Abweichungen. Allerdings wirken sich zeitliche Synchronisierungsfehler und die Genauigkeit der Zeitstempel teilweise negativ auf die Abweichungen in Fahrtrichtung aus. Außerdem treten während eines Fahrtabschnitts zahlreiche Störeinflüsse auf, die für die Bildaufnahme hinderlich sind (Beleuchtung, Abstand zum Ufer, Wetterbedingungen, etc.). Dies führt in Extremfällen zu einer falschen Bildzuordnung bzw. zu einer unplausiblen Schätzung der Kameratrajektorie.

Trifft ein solcher Störeinfluss (z. B. Sonne scheint ins Objektiv) mit Bildern, die mit schlechter Bildqualität aufgenommen wurden, zusammen, so kann es beispielsweise in der Höhenkomponente zu einer sprunghaften Änderung von mehreren Dezimetern kommen (siehe Abbildung 4-17, Bild 23 - 25).

Um die Kamerapositionen mit einer hohen Genauigkeit bestimmen zu können, sollte die Kamera mit dem zugehörigen Objektiv vor Messbeginn kalibriert werden. Handelt es sich beim Objektiv um ein Zoom-Objektiv, so ist dieses zu fixieren.

Die Steuerung einer Kamera und die Auswertung der Bilddaten erfolgte in diesem Fall nicht mit der HydrOs-Software, so dass ergänzende Softwares benötigt werden. Die Auswertung kann nur teilweise automatisiert erfolgen und ist mit großem zeitlichem Aufwand verbunden. Deshalb eignet sich das in diesem Bericht dargestellte Vorgehen nicht für eine automatische Integration von photogrammetrischen Daten in HydrOs.

Aus diesen Gründen kann das hier eingesetzte photogrammetrische Messsystem für das HydrOs-System nur eingeschränkt und im Postprocessing-Modus genutzt werden: Es kann nur dann eingesetzt werden, wenn am Ufer Objekte mit einer abwechslungsreichen

Oberflächenstruktur vorhanden sind. Bei Regen kann es überhaupt nicht verwendet werden.

Eine gute Einsatzmöglichkeit für die hier untersuchte photogrammetrische Auswertungsmethode und dessen Integration in HydrOs bietet sich auf Kanälen mit dichten Uferbebauungen. Falls bei solchen Fahrabschnitten in Teilbereichen korrekte GNSS-RTK Messdaten verfügbar sind, sollte die Georeferenzierung der photogrammetrischen Messdaten über bekannte Kamerapositionen vor und nach der GNSS-Lücke und idealerweise über koordinatenmäßig bekannte Passpunkte am Ufer erfolgen. Diese können mit speziellen, automatisch detektierbaren Zielzeichen signalisiert werden. Um die Zielmarken in den Bildern gut detektieren zu können, sollte der Abstand der Kamera zum Ufer geringer als 100 m sein.

Es ist darauf zu achten, dass eine ausreichende Anzahl an Festpunkten vorhanden ist, so dass diese möglichst gleichmäßig über das Messgebiet verteilt liegen.

Ist die Installation von Zielmarken am Ufer nicht möglich, so sollte die Georeferenzierung der Kameratrajektorie allein über die bekannten Kamerastandpunkte durchgeführt werden.

Trotz des ungünstigen Verhältnisses zwischen Basisstrecke (Abstand zwischen zwei Kamerastandpunkten) und der Strecke Kamera-Objekte sollten die Fotos mit einer möglichst hohen Aufnahmezeit ausgelöst werden, sodass die Bildüberlappung möglichst groß ist.

Es zeigt sich jedoch, dass die relativen Kamerakordinaten bzw. die dreidimensionalen Strecken zwischen den Kamerapositionen zur Epoche  $k$  und  $k + 1$  recht hohe Genauigkeiten aufweisen (Kapitel 4.4.1.2). Statt der absoluten Koordinaten  $(E_{Kamera,k}^{UTM}, N_{Kamera,k}^{UTM}, U_{Kamera,k}^{UTM})$  können zukünftig die zurückgelegte Strecke  $s_{Kamera,k,k+1}^{UTM}$  oder die Koordinatenunterschiede  $(\Delta E_{Kamera,k,k+1}^{UTM}, \Delta N_{Kamera,k,k+1}^{UTM}, \Delta U_{Kamera,k,k+1}^{UTM})$  als Beobachtungsgrößen in HydrOs verwendet werden.

## 5 Zusammenfassung

Der in Breitenfeld et al. (2015) vorgestellte Prototyp eines Multisensorsystems mit der zugehörigen Auswertesoftware (HydrOs) kann während eines GNSS-Ausfalls eine Orientierungs- und eine Positionslösung bestimmen. Allerdings kommt es besonders bei langen Trajektorienabschnitten ohne eine gültige RTK-Lösung zu einem Driftverhalten in der bestimmten Trajektorie. Diese wirkt sich insbesondere quer zur abgefahrenen Trajektorie aus. Aus diesem Grund wird in diesem Projekt untersucht, ob die Leistungsfähigkeit von HydrOs durch Integration zusätzlicher Software- und Hardwarekomponenten gesteigert werden kann.

In Kapitel 3 wird die Integration einer alternativen Methode zur Ausreißerdetektion untersucht: die robuste Parameterschätzung. Sie ist, ebenso wie der in Breitenfeld et al. (2015) vorgestellte Ausreißertest, gut für die Detektion von Ausreißern geeignet. Die hier untersuchte Methode reagiert jedoch sensibler auf Ausreißer, sodass einerseits mehr Ausreißer in den verschiedenen Beobachtungsgrößen entdeckt werden. Andererseits werden aber auch mehr korrekte Messwerte als ausreißerbehaftet klassifiziert. Es wurde für keinen der beiden Methoden ein klarer Vorteil identifiziert.

Beide Ansätze sind in der HydrOs-Software implementiert, sodass zukünftig der Nutzer entscheiden kann, welche Methode verwendet werden soll.

Eine weitere Option zur Überbrückung von GNSS (RTK)-Ausfällen ist die Integration von zusätzlichen Positionssensoren auf einem Messschiff. In diesem Bericht wurde deshalb untersucht, inwieweit die Einbindung eines photogrammetrischen Messsystems und eines DGNSS-Empfängers in das HydrOs-System die EKF-Lösung verbessern (Kapitel 4).

Ein DGNSS-Empfänger kann lediglich in Bereichen, in denen keine GNSS-RTK Lösung bestimmt werden kann, in denen aber auch keine GNSS-Abschattungen vorliegen, eine verbesserte Lösung liefern. In dieser Untersuchung wurden Lücken mit einer Dauer zwischen 35 s und 90 s simuliert. Die Abweichungen zur Soll-Lösung betrugen in fast allen Fällen maximal 21 cm (Lagekomponente). Die Abweichungen zum Sollwert sind damit in der Lagekomponente kleiner als 30 cm und in der Höhenkomponente kleiner als 10 cm.

Ein photogrammetrisches Messsystem hingegen ist unabhängig von GNSS-Abschattungen und kann theoretisch auch in diesen Gebieten Beobachtungsgrößen zur Verfügung stellen. In der Praxis zeigt es sich jedoch, dass die Qualität der bestimmten Lösungen stark von den Umgebungsbedingungen abhängt. Für gute Aufnahmebedingungen wird die am Ende einer längeren GNSS-Lücke auftretende Abweichung in Trajektorienquerrichtung deutlich reduziert. So konnten die RMS-Werte in der Ostkomponente, die bei diesen Messungen weitestgehend der Querkomponente entsprechen, für zwei simulierten Lücken mit einer Dauer von ca. 60 s um 18 % bzw. um 58 % verbessert werden. Um die Abweichungen in Längsrichtung zu minimieren, muss jedoch die zeitliche Synchronisierung der einzelnen Systeme verbessert werden. Auch sollte die Genauigkeit des Zeitstempels bei der Positi-

onsbestimmung berücksichtigt werden. Für eine Lücke mit einer Länge von ca. 60 s beträgt die Lageabweichung zu einer Solltrajektorie dennoch lediglich 28,1 cm im Maximalfall. Für die Höhenkomponente beträgt die entsprechende maximale Abweichung 7,3 cm.

Prinzipiell könnte statt der photogrammetrischen Positionsbestimmung auch eine aus kinematischem Laserscanning abgeleitete Sensorposition integriert werden. Dazu wurden einige Ansätze aus der Literatur vorgestellt. Für den Einsatz eines solchen Systems auf einem Messschiff ist jedoch noch kein praxistaugliches System vorhanden. Aus diesem Grund werden dessen Vorteile nicht im Rahmen dieses Projekts untersucht.

Neben der Erweiterung des HydrOs-Systems wurde auch dessen Leistungsfähigkeit bei Echtzeit-Anwendungen untersucht. Hier zeigt sich, dass das realisierte und implementierte System (ohne photogrammetrische Komponente) eine Auswertung in Echtzeit ermöglicht. Die Qualität der Lösung entspricht generell der einer Postprocessing-Lösung. Über eine Ausgabeschnittstelle kann die in Echtzeit bestimmte Lösung sofort in einem spezifizierten Ausgabeformat (z. B. NMEA GGA) an ein anderes (Mess-) System übergeben werden.

Der Prototyp HydrOs ist damit auch für eine Echtzeitauswertung einsetzbar. Durch Erzeugung einer Datei HydrOs.exe kann die Software auch auf Rechnern ohne MATLAB-Lizenz ausgeführt werden. Allerdings muss dazu auf dem ausgewählten Rechner die MATLAB *Runtime* Umgebung (R2013b) installiert werden.

## 6 Ausblick

Nachdem die grundsätzliche Echtzeitfähigkeit des HydrOs-Systems in diesem Bericht nachgewiesen wurde, kann der Prototyp nun für eine längere Probephase auf einem Vermessungsschiff der WSV getestet werden.

Während der Probephase sollten evtl. noch bestehende Probleme in der HydrOs-Software aufgedeckt und auf weitere notwendige Entwicklungen hingewiesen werden. Insbesondere müssten während dieser Probephase weitere Tests zur Leistungsfähigkeit der Echtzeitauswertung, zur Aureißerdetektion mittels robuster Parameterschätzung und zur Zeitsteuerung durchgeführt werden.

Nach einer erfolgreichen Probephase könnte der mit MATLAB entwickelte Software-Prototyp in einer anderen Programmierungsumgebung (z. B. C++, Java, etc.) realisiert werden. Eine solche Software wird komplett unabhängig von der MATLAB-Umgebung sein; es wird weder eine Lizenz noch eine MATLAB *Runtime* Umgebung benötigt. Dadurch ist die Software bei zukünftigen Updates komplett von der zur Programmierung verwendeten MATLAB Versionen unabhängig. Es ist zu erwarten, dass hierdurch die Leistungsfähigkeit bei der Echtzeitauswertung gesteigert werden kann. Insbesondere kann dabei überprüft werden, ob eine präzisere Zeitsteuerung der Rechneruhr möglich ist, sodass die Genauigkeit der einzelnen Zeitstempel verbessert wird.

Soll für spezielle Flussabschnitte ein photogrammetrisches System in das HydrOs-System eingesetzt werden, so kann die Bildauswertung zukünftig teilweise automatisiert werden. Bei Nutzung der Software Agisoft PhotoScan können beispielsweise Skripte mit der Programmierungsumgebung *Python* erstellt werden. Der Aufwand für die Erzeugung von Bildmasken würde deutlich reduziert und die einzelnen Auswerteschritte in PhotoScan könnten komplett automatisiert ablaufen. Eine manuelle Überprüfung der Ergebnisse sollte aber auf jeden Fall erfolgen. Außerdem ist zu erwarten, dass im Zuge aktueller und zukünftiger Forschungsprojekte Programme hervorgehen, die auf dem *Visual Odometry*-Ansatz oder sogar auf *V-SLAM* Algorithmen basieren. Bei Integration solch eines Programms können möglicherweise verbesserte relative Messdaten (z. B. Geschwindigkeitskomponenten) oder sogar eine Echtzeitlösung genutzt werden.

Auch sind weitere Untersuchungen zur Nutzung eines terrestrischen Laserscanners in einem Positionierungssystem sinnvoll. Wird dieser für eine SLAM-Lösung eingesetzt, so wird nicht nur die Sensorposition bestimmt, sondern es kann auch der direkte Uferbereich dokumentiert werden. Hierfür sollte ein Laserscanner mit hoher Reichweite ( $> 300$  m) eingesetzt werden. Für die Speicherung und Auswertung der damit erfassten Daten werden effiziente Verarbeitungsprogramme benötigt, die auch über Funktionen zur Filterung der Daten verfügen. Damit können fehlerhafte Punkte in einer Punktwolke eliminiert werden. Allerdings müssen die auftretenden Fehlereinflüsse vorab genau analysiert werden.





# Literaturverzeichnis

- Agisoft (2011): Agisoft: Community – Forum (Algorithms used in PhotoScan). Abgerufen am 21. März 2016 von <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=89.0>
- Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2006): SURF: Speeded Up Robust Features. *Proceedings on the ninth European Conference on Computer Vision, 7.-13. Mai 2006, Graz, Österreich.*
- Bennewitz, M., Stachniss, C., Burgard, W., Behnke, S. (2006): Metric Localization with Scale-Invariant Visual Features using a Single Perspective Camera. *Proc. European Robotics Symposium (EURO S), Palermo, Italien.*
- Besl, P. J., McKay, N. D. (1992): A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), S. 239 - 256.
- Böder, V., Kersten, T., Hesse, C., Thies, T., Ehm, M., Sauer, A. (2010): Scannen unter und über Wasser durch Sensorintegration von GNSS/IMU, Echolot und terrestrischen Laserscanner. *GNSS 2010 - Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert - Beiträge zum 100. DVW-Seminar* (S. 193 - 212). Augsburg: Wißner Verlag.
- Boochs, F., Schütze, R., Simon, C., Marzani, F., Wirth, H., Meier, J. (2010): Increasing the accuracy of untaught robot positions by means of a multi-camera system. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 15.-17. September 2010, Zürich, Schweiz*, (S. 1-9).
- Breitenfeld, M., Wirth, H., Brüggemann, T., Scheider, A., Schwieger, V. (2015): *Entwicklung von Echtzeit- und Postprocessingverfahren zur Verbesserung der bisherigen Ortung mit Global Navigation Satellite Systems (GNSS) durch Kombination mit weiteren Sensoren sowie hydrologischen Daten.* BfG Bericht 1856, Koblenz.
- Casparly, W., Wang, J. (1998): Redundanzanteile und Varianzkomponenten im Kalman Filter. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 128(4), S.121-128.
- Cefalu, A., Fritsch, D. (2014): Non-incremental Derivation of Scale and Pose from a Network of relative Orientations. *ISPRS Technical Commission III Symposium, 5.-7. September 2014, Zürich, Schweiz, Volume XL-3.* Zürich, Schweiz.
- CHDK (2016): *Canon Hacker Development Kit.* Abgerufen am 27. Januar 2016 von <http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>
- Chen, Z. (2003): *Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond.* McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
- D'Apuzzo, N. (2002): Modeling human faces with multi-image photogrammetry. *Proc. SPIE 4661, Three-Dimensional Image Capture and Applications V*, 13. März 2002, San Jose, CA, USA, (S. 191-197).
- Engel, J., Schöps, T., Cremers, D. (2014): LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM. In D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, & T. Tuytelaars, *Computer Vision - ECCV 2014, Part II* (S. 834 - 849). Springer: Heidelberg.

- Engel, J., Sturm, J., Cremers, D. (2013): Semi-Dense Visual Odometry for a Monocular Camera. *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Sydney, Australien, Dez. 2013.
- FabliTec (2016): *FabliTec 3D Scanning Technology*. Abgerufen am 21. Februar 2016 von <http://www.fablitec.com/products/lsd-slam/>
- Fieller, N. R. J. (1976): *Some Problems Related to the Rejection of Outlying Observations*. University of Hull, Imaging Service North, Wetherby, UK.
- Fintel, R. v. (2013): *White Paper: Vergleich der gängigsten digitalen Schnittstellentechnologien in der industriellen Bildverarbeitung*. Abgerufen am 27. Januar 2016 von [http://s.baslerweb.com/media/documents/BAS1303\\_White\\_Paper\\_Interface\\_Comparison\\_DE.pdf](http://s.baslerweb.com/media/documents/BAS1303_White_Paper_Interface_Comparison_DE.pdf)
- Fraundorfer, F., Scaramuzza, D. (2012): Visual Odometry - Part II: Matching, Robustness, Optimization, and Applications. *IEEE Robotics & Automation Magazine* (June 2012), S. 78 - 90.
- Gandhi, M. A. (2009): *Robust Kalman Filters Using Generalized Maximum Likelihood-Type Estimators*. Dissertation, Virginia State University, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute.
- Gordon, B. (2008): *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner*. (TU Darmstadt, Hrsg.) Abgerufen am 29. Februar 2016 von [http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1206/1/Dissertation\\_BGordon.pdf](http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/1206/1/Dissertation_BGordon.pdf).
- Grisetti, G., Kümmerle, R., Stachniss, C., Burgard, W. (2011): A Tutorial on Graph-Based SLAM. (IEEE, Hrsg.) *Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(4), S. 31 - 43.
- Heng, L., Lee, G. H., Pollefeys, M. (2015): Self-Calibration and Visual SLAM with a Multi-Camera System on a Micro Aerial Vehicle. *Autonomous Robots*, 39(3), S. 259-277.
- Henin, S. R. (2005): *Kalman-Filterung und Glättung bei dynamischen Modellen: Effiziente numerische Implementierung unter Berücksichtigung erweiterter statistischer Prüfmethoden*. Diplomarbeit, Bonn.
- Hofmann, S., Eggert, D., Kuntzsch, C., Sester, M. (2012): Low-cost Platform for Landmark-based Positioning and Navigation. *3rd International Conference on Machine Control & Guidance*, (S. 259 - 268). Stuttgart.
- Huber, P. J. (1981): *Robust Statistics*. New York: Wiley.
- Huber, P.-J. (1964): Robust estimation of location parameter. *Annals of Mathematical Statistics*, 35(1), S. 73-101.
- Jähne, B. (2012): *Digitale Bildverarbeitung und Gewinnung* (7. Ausg.). Berlin: Springer Vieweg.
- JEITA (2010): *Japan Electronics and Information Technology Industries Association; CP - 3451 C, Exchangeable image file format for digital cameras: Exif Version 2.3 (englisch)*. Abgerufen am 25. 01 2016 von <http://home.jeita.or.jp/tsc/std-pdf/CP3451C.pdf>
- Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008): *Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Heidelberg: Wichmann.
- Kaess, M., Dellaert, F. (2006): *Visual SLAM with a Multi-Camera Rig*. Abgerufen am 29. Januar 2016 von <http://www.cc.gatech.edu/~kaess/pub/Kaess06tr.pdf>

- Kalman, R.-E. (1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D), S. 34-45.
- Kauker, S., Schwieger, V. (2016): First investigations for a synthetic covariance matrix for monitoring by terrestrial laser scanning. *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Wien, Österreich, 30.03.-01.04.2016*.
- Khan, N. Y., McCane, B., Wyvill, G. (2011): SIFT and SURF Performance Evaluation Against Various Image Deformations on Benchmark Dataset. *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. Noosa, Australien, 6.-8.Dezember 2011*.
- Koch, K.-R. (1996): Robuste Parameterschätzung. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*.
- Koch, K.-R. (2004): *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen* (4. Auflage Ausg.). Bonn: Dümmler Verlag Bonn.
- Kraus, K. (1996): *Photogrammetrie Band 2 - Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. de Gruyter.
- Kraus, K. (2004): *Photogrammetrie Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Berlin: de Gruyter.
- Kuhlmann, H. (2004): Mathematische Modellbildung zu kinematischen Prozessen. *Kinematische Messmethoden - Vermessung in Bewegung. Beiträge zum 58. DVW-Seminar, 17./18. Februar 2004, Stuttgart. Band 45*, Augsburg: Wißner.
- Kutterer, H. (2010): Mobile Mapping. In G. Vosselman, & H.-G. Maas, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning* (S. 293 - 311). Caithness, Schottland, UK: Whittles Publishing.
- Leica Geosystems (2016): *Leica Geosystems*. Abgerufen am 10. März 2016 von [http://www.leica-geosystems.de/de/Leica-PegasusTwo\\_105371.htm](http://www.leica-geosystems.de/de/Leica-PegasusTwo_105371.htm)
- Lowe, D. G. (1999): *Object recognition from local scale-invariant features*. International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece.
- Lowe, D. G. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal on Computer Vision*, 2, S. 91-110.
- Luhmann, T. (2010): *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Berlin: Wichmann.
- Magic Lantern. (2016): *Magic Lantern*. Abgerufen am 25. Januar 2016 von <http://www.magiclantern.fm/>
- Merziger, G., Wirth, T. (2010): *Repetitorium Höhere Mathematik*. Barsinghausen: Binomi.
- NavVis (2016): *NavVis 3D Mapping Trolley*. Abgerufen am 7. März 2016 von <https://www.navvis.com/products/m3-trolley/>
- p3dsystems (2015): *p3dsystems*. Abgerufen am 13. 04 2015 von [p3dsystems.com/produkte.html](http://p3dsystems.com/produkte.html)
- Pearson, E. S., Chandra Sekar, C. (1936): The Efficiency of Statistical Tool and A Criterion for the Rejection of Outlying Observations. *Biometrika*, 28(3/4), Dec. 1936, S. 308-320.
- Pelzer, H. (1987): Deformationsuntersuchungen auf der Basis kinematischer Bewegungsmodelle. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 94, S. 49-62.
- Prisacariu, V. A., Kähler, O., Murray, D. W., Reid, I. D. (2015): Real-Time 3D Tracking and Reconstruction on Mobile Phones. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(5), S. 557-570.

- Rambold, A. (1999): *Ausgewählte Verfahren zur Identifikation von Ausreißern und einflußreichen Beobachtungen in multivarianten Daten und Verfahren*. Universität Passau. Herbert Utz Verlag, München.
- Ramm, K. (2008): *Evaluation von Filter-Ansätzen für die Positionsschätzung von Fahrzeugen mit den Werkzeugen der Sensitivitätsanalyse*. Universität Stuttgart, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie. DGK Reihe C Nr. 619.
- Ramm, K., Schwieger, V. (2004): Multisensorortung für Kraftfahrzeuge. *DVW Schriftenreihe*, 45, 75-94.
- Rieger, P., Studnicka, N., Ullrich, A. (2008): *"Mobile Laser Scanning" Anwendungen*. Abgerufen am 7. März 2016 von [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/\\_Mobile\\_Laser\\_Scanning\\_\\_Anwendungen.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/_Mobile_Laser_Scanning__Anwendungen.pdf)
- Riegl (2015): *Riegl VZ-2000*. Abgerufen am 21. Februar 2016 von [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/DataSheet\\_VZ-2000\\_2015-03-24.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_VZ-2000_2015-03-24.pdf)
- Riegl (2016a): *Riegl USA - Marine Scanners*. Abgerufen am 7. März 2016 von <http://products.rieglusa.com/category/marine-scanners>
- Riegl (2016b): *Mobile Laser Scanning*. Abgerufen am 7. März 2016 von <http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/>
- Rousseeuw, P. J., Leroy, A. M. (1987): *Robust Regression and Outlier Detection*. New York: Wiley.
- Scaramuzza, D., Fraundorfer, F. (2011): Visual Odometry - Part I: The First 30 Years and Fundamentals. *IEEE Robotics & Automation Magazine* (Dec. 2011), S. 80 - 92.
- Schroth, G. (2015): Indoor Mobile Mapping and Visualization. In J.-A. Paffenholz, & I. Neumann (Hrsg.), *Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015)*, Beiträge zu 147. DVW. Seminar, 7.-8. Dezember 2015, Fulda (S. 183-190). Augsburg: Wißner.
- Staiger, R. (2003): Terrestrial Laser Scanning - Technology, Systems and Applications. *2nd FIG Regional Conference, Marrakesch, Marokko, 2.-5. Dezember 2003*.
- Steder, B., Grisetti, G., Stachniss, C., Burgard, W. (2008): Visual SLAM for Flying Vehicles. *IEEE Transactions on Robotics*, Oct. 2008, Vol. 24(5), S. 1088-1093.
- Steffen, R. (2013): *Visual SLAM from image sequences acquired by unmanned aerial vehicles* (Bd. C 709). München: DGK, Bayrische Akademie der Wissenschaften.
- Thies, T. (2013): Objektvermessung mit kombinierten hydrographischen Vermessungssystemen - Erfahrungen mit mobilen Laserscannern im Hamburger Hafen. In BfG (Hrsg.), *Neue Entwicklungen in der Gewässervermessung, Kolloquium, 5/2013*, S. 73 - 80.
- Vennegeerts, H. (2011): *Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme*. München: DGK Reihe C.
- Wenzel, K., Abdel-Wahab, M., Cefalu, A., Fritsch, D. (2011): A Multi-Camera System for Efficient Point Cloud Recording in Close Range Applications. *LC3D Workshop, Berlin, Dezember 2011*.

# A Marktrecherche – Photogrammetrisches Messsystem

## A.1 Kamera

- Spiegelreflexkameras

Hersteller/ Produkt	Sensor- typ	Sensorgröße	Sensorauflösung	Max. Bildrate (Serienbilder)	Objektiv- anschluss	Schnittstelle	Temp.	Schutzklasse
		[mm]	[MegaPixel]	[Bilder/s]			[°C]	
<b>Canon</b>								
EOS 1200D		22,3 x 14,9	18	3	EF, EF-S	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	
EOS 100D	CMOS	22,3 x 14,9	18	4	EF, EF-S	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	
EOS 600D	CMOS	22,3 x 14,9	18	3,7	EF, EF-S	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	
EOS 700D	CMOS		18	5	EF, EF-S	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	
EOS 750D	CMOS	22,3 x 14,9	24,4	5	EF, EF-S	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	
EOS 760D	CMOS	22,3 x 14,9	24,4	5	EF, EF-S	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	
EOS 70D	CMOS	22,5 x 15	20,2	7	EF, EF-S	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 – 40	
EOS 6D	CMOS	36 x 24	20,2	4,5	EF	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	

Hersteller/ Produkt	Sensor- typ	Sensorgröße	Sensorauflösung	Bildrate (Serien- bilder)	Objektiv- anschluss	Schnittstelle	Temp.	Schutzklasse
		[mm]	[MegaPixel]	[Bilder/s]			[°C]	
<b>Canon</b>								
EOS 7D Mark II <sup>3</sup>	CMOS	22,4 x 15	20,2	10	EF, EF-S	USB 3 (SuperSpeed), HDMI-mini	0 - 40	
<b>Nikon</b>								
D3200	CMOS	23,2 x 15,4	24,2		Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 - 40	
D3300 <sup>3</sup>	CMOS	23,5 x 15,6	24,4	5	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 – 40	
D5200	CMOS	23,5 x 15,6	24,1	5	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 – 40	
D5300 <sup>4</sup>	CMOS	23,5 x 15,6	24,2	5	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI - mini, Wi-Fi	0 – 40	
D5500	CMOS	23,5 x 15,6	24,4	5	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI - mini, Wi-Fi	0 - 40	
D7100 <sup>4</sup>	CMOS	23,5 x 15,6	24,1	7	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 – 40	
D7200 <sup>4</sup>	CMOS, DX	23,5 x 15,6	24,2	7	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI, Wi-Fi	0 – 40	
D610 <sup>4</sup>	CMOS	35,9 x 24	24,3	6	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI - mini	0 – 40	

<sup>3</sup> Mit GPS

<sup>4</sup> GPS separat erhältlich

Hersteller/ Produkt	Sensor- typ	Sensorgröße	Sensorauflösung	Bildrate (Serien- bilder)	Objektiv- anschluss	Schnittstelle	Temp.	Schutzklasse
D750 <sup>4</sup>	CMOS	35,9 x 24	24,3	6,5	Nikon-F	USB (Hi-Speed), HDMI, Wi-Fi	0 - 40	

- Industriekameras

Hersteller/ Produkt	Sensor- typ	Sensorgröße	Sensorauflösung	Bildrate (Serien- bilder)	Objektiv- anschluss	Schnittstelle	Temp.	Schutzklasse
		[mm]	[MegaPixel]	[fps]			[°C]	
<b>Basler</b>								
aviator (avA1000-100gc)	CCD	5,6 x 5,6	1024 x 1024	101	C-mount	Gigabit Ethernet	0 - 50	IP30
aviator (svA2300-25gc)	CCD	12,8 x 9,6	2330 x 1750	26	C-mount	Gigabit Ethernet	0 - 50	IP30
ace (acA2500- 60um/uc)	CMOS	12,4 x 9,8	2590 x 2048	60	C-mount	USB 3.0	0 - 50	IP30
ace (acA2500- 20gm/gc)	CMOS	12,4 x 9,8	2590 x 2048	20	C-mount	Fast Ethernet, Gigabit Ethernet	0 - 50	IP30
<b>Baumer</b>								
LX (LXG-120C)	CMOSIS	22,5 x 16,9	4096 x 3072	9 (single GigE), 10 (dual GigE)		Dual Gigabit Ethernet	5 - 60	IP40
LX (LXG-200C)	CMOSIS	32,7 x 24,6	5120 x 3840	6 (single GigE), 12 (dual GigE)	M58- Mount <sup>5</sup>	Dual Gigabit Ethernet	5 - 50	IP40
TX (TXG50c-I7)	CMOS	8,4 x 7,1	2448 x 2050	15	C-mount	Gigabit Ethernet	5 - 50	IP40 (IP67)

<sup>5</sup> F-Mount, M42, C-Mount via Adapter

Hersteller/ Produkt	Sensor- typ	Sensorgröße	Sensorauflösung	Bildrate (Serien- bilder)	Objektiv- anschluss	Schnittstelle	Temp.	Schutzklasse
		[mm]	[MegaPixel]	[fps]			[°C]	
<b>IDS</b>								
uEye RE (UI-6280RE PoE)	CCD	8,4 x 7,1	2448 x 2048	8,5	C-mount	Gigabit Ethernet		IP65 oder IP67
<b>Point Grey</b>								
Grasshopper3 (GS3-PGE-91S6C-C)	CCD	12,4 x 10,0	3376 x 2704	9	C-mount	Gigabit Ethernet	0 – 50	
Grasshopper3 (GS3-U3-120S6C)	CCD	13,1 x 8,7	4240 x 2824	7	C-mount	USB 3.0	0 - 50	
<b>SVS-VISTEK</b>								
SVCam-ECO IP67 (eco655)	CCD	8,4 x 7,1	2448 x 2050	10	C-, CS- mount	Gigabit Ethernet	-10 - +45	IP67



## A.2 Software: Kamerasteuerung

Software	Firma	Lizenz	Skript-sprache	Unterstützte Kameras	Betriebs-system	Homepage
PhotoRemote	Brainlogical	kostenpfl.	Pascal	<sup>6</sup>	Windows	<a href="http://www.photoremove.de/">http://www.photoremove.de/</a>
Helicon Remote	HeliconSoft	kostenpfl.	C++ (SDK)	Canon, Nikon <sup>7</sup>	Windows, Mac (Android, IOS)	<a href="http://www.heliconsoft.com/heliconsoft-products/helicon-remote/">http://www.heliconsoft.com/heliconsoft-products/helicon-remote/</a>
Smart Shooter	Kuvacode	kostenpfl.	TCL	Canon, Nikon <sup>8</sup>	Windows, Mac	<a href="http://kuvacode.com/smart-shooter">http://kuvacode.com/smart-shooter</a>
DSLR Remote Pro NKRemote	Breeze systems	kostenpfl.	--	Canon EOS <sup>9</sup> , Nikon	Windows	<a href="http://www.breezesys.com/DSLRRemotePro/index.htm">http://www.breezesys.com/DSLRRemotePro/index.htm</a>
ControlMyNikon	Tetherscript Technology	kostenpfl.	--	Nikon	Windows	<a href="http://www.controlmynikon.com/">http://www.controlmynikon.com/</a>
Eos Utility	Canon	kostenpfl. (Paket mit Kamera)	--	Canon EOS		<a href="http://www.canon.de/support/camera_software/">http://www.canon.de/support/camera_software/</a>
digiCamControl	--	Freeware	C#	Canon, Nikon <sup>10</sup>	Windows	<a href="http://digicamcontrol.com/">http://digicamcontrol.com/</a>
Gphoto2	--	Freeware		Canon, Kodak, Nikon, Olympus, Sony <sup>11</sup>	UNIX, Mac	<a href="http://www.gphoto.org/">http://www.gphoto.org/</a>
CHDK	--	Freeware (SDK)	uBasic, Lua	Canon		<a href="http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK">http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK</a>

<sup>6</sup> Siehe auch <http://www.brainlogical.de/produkte/fototechnik/photoremove/kompatibilitaetsliste.html>

<sup>7</sup> Siehe auch <http://www.heliconsoft.com/supported-cameras/>

<sup>8</sup> Siehe auch <http://kuvacode.com/smart-shooter/supported-cameras>

<sup>9</sup> Siehe auch <http://www.breezesys.com/products.htm#remote>

<sup>10</sup> Siehe auch [http://digicamcontrol.com/supported\\_cameras](http://digicamcontrol.com/supported_cameras)

<sup>11</sup> Siehe auch <http://www.gphoto.org/doc/remote/>

### A.3 Software: Photogrammetrische Auswertung

Software	Firma	Ausgegebene Informationen	Genauigkeitsangaben	Georeferenzierung möglich?	Ausgabe als NMEA-String	Echtzeit-fähigkeit
PhotoScan (Professional Edition)	Agisoft	Äußere Orientierung (Position + Orientierungswinkel)	Ja (Ausgabe)	Ja	Nein	Nein
Pix4Dmapper Pro	Pix4D		(Ja) <sup>12</sup>	Ja	Nein	Nein
aSPECT3D	ArcTron			Ja	Nein	Nein

<sup>12</sup> Genauigkeitsangaben werden kumuliert ausgegeben, es gibt keine expliziten Informationen für jedes einzelne Foto

## B Simulation der Bildaufnahme für unterschiedliche Kamerastellungen

Zur Bestimmung der idealen Aufnahmekonfiguration wurden verschiedene Ausrichtungen der Kamera relativ zum Uferbereich simuliert. Es wird dabei angenommen, dass die Kamera 2,5 m oberhalb der Wasseroberfläche angebracht ist. Für den Uferbereich wurden zwei verschiedene Landschaftsszenarien angenommen: In einem Fall wurde von einem 20 m hohen, ebenen Objekt ausgegangen. Im anderen Fall wurde eine 3,5 m hohe Uferböschung simuliert. Das Objekt selbst wird durch ein Punktraster mit einer Rasterweite von 0,1 m repräsentiert.

Mit dieser Simulation wird, mithilfe der Kollinearitätsgleichung, bestimmt, welche Rasterpunkte auf dem Objekt von der Kamera erfasst werden, wobei die Fahrtgeschwindigkeit, die Kameraausrichtung und die Distanz zwischen Kamera und Ufer variiert werden. Anschließend wird die durch Rasterpunkte, welche in zwei aufeinanderfolgenden, simulierten Fotos sichtbar sind, definierte Fläche bestimmt (Überlappungsbereich). Aus dieser Fläche lässt sich der prozentuale Anteil berechnen, den der Überlappungsbereich an der Gesamtfläche eines Bildes einnimmt.

Für folgende Kamerastellungen (Aufnahme im Querformat) sind bei geeigneter Kombination von Fahrtgeschwindigkeit und Distanz zum Ufer ausreichende Objektüberlappung zu erwarten.

**Tabelle B-1: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme eines ebenen Objekts,  $\omega = 90^\circ$ ,  $\varphi = 5^\circ$ ,  $\kappa = 0^\circ$**

Fahrtgeschw./ Distanz	2 m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s
10 m	64,3 %	30,0 %	0,0 %	0,0 %
25 m	64,6 %	55,4 %	45,9 %	36,4 %
50 m	58,1 %	54,3 %	50,5 %	46,7 %
100 m	45,8 %	44,4 %	43,1 %	41,7 %
200 m	23,2 %	22,8 %	22,5 %	22,1 %
300 m	15,5 %	15,3 %	15,2 %	15,0 %
400 m	11,6 %	11,6 %	11,5 %	11,4 %

**Tabelle B-2: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme einer Uferböschung,  $\omega = 90^\circ$ ,  $\varphi = 5^\circ$ ,  $\kappa = 0^\circ$**

Fahrtgeschw./ Distanz	2 m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s
10 m	48,0 %	33,5 %	18,7 %	6,7 %
25 m	28,0 %	24,8 %	21,4 %	18,1 %
50 m	15,0 %	14,2 %	13,3 %	12,4 %
100 m	7,8 %	7,6 %	7,4 %	7,2 %
200 m	4,0 %	3,9 %	3,9 %	3,8 %
300 m	2,7 %	2,6 %	2,6 %	2,6 %
400 m	2,0 %	2,0 %	2,0 %	2,0 %

**Tabelle B-3: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme eines ebenen Objekts,  $\omega = 85^\circ$ ,  $\varphi = 10^\circ$ ,  $\kappa = 0^\circ$**

Fahrtgeschw./ Distanz	2 m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s
10 m	67,5 %	34,3 %	0,0 %	0,0 %
25 m	84,1 %	73,1 %	61,9 %	50,2 %
50 m	77,7 %	73,2 %	68,6 %	63,9 %
100 m	45,3 %	44,0 %	42,8 %	41,6 %
200 m	23,0 %	22,7 %	22,4 %	22,1 %
300 m	15,4 %	15,3 %	15,1 %	15,0 %
400 m	11,6 %	11,5 %	11,4 %	11,3 %

**Tabelle B-4: Prozentuale Objektüberlappung zwischen den Bildern bei Aufnahme einer Uferböschung,  $\omega = 85^\circ$ ,  $\varphi = 10^\circ$ ,  $\kappa = 0^\circ$**

Fahrtgeschw./ Distanz	2 m/s	4 m/s	6 m/s	8 m/s
10 m	33,6 %	25,3 %	16,5 %	7,7 %
25 m	28,4 %	25,4 %	22,2 %	19,0 %
50 m	15,1 %	14,3 %	13,5 %	12,7 %
100 m	7,8 %	7,6 %	7,4 %	7,2 %
200 m	4,0 %	3,9 %	3,9 %	3,8 %
300 m	2,7 %	2,7 %	2,6 %	2,6 %
400 m	2,0 %	2,0 %	2,0 %	2,0 %

## C Objekte für den Punktwolkenvergleich

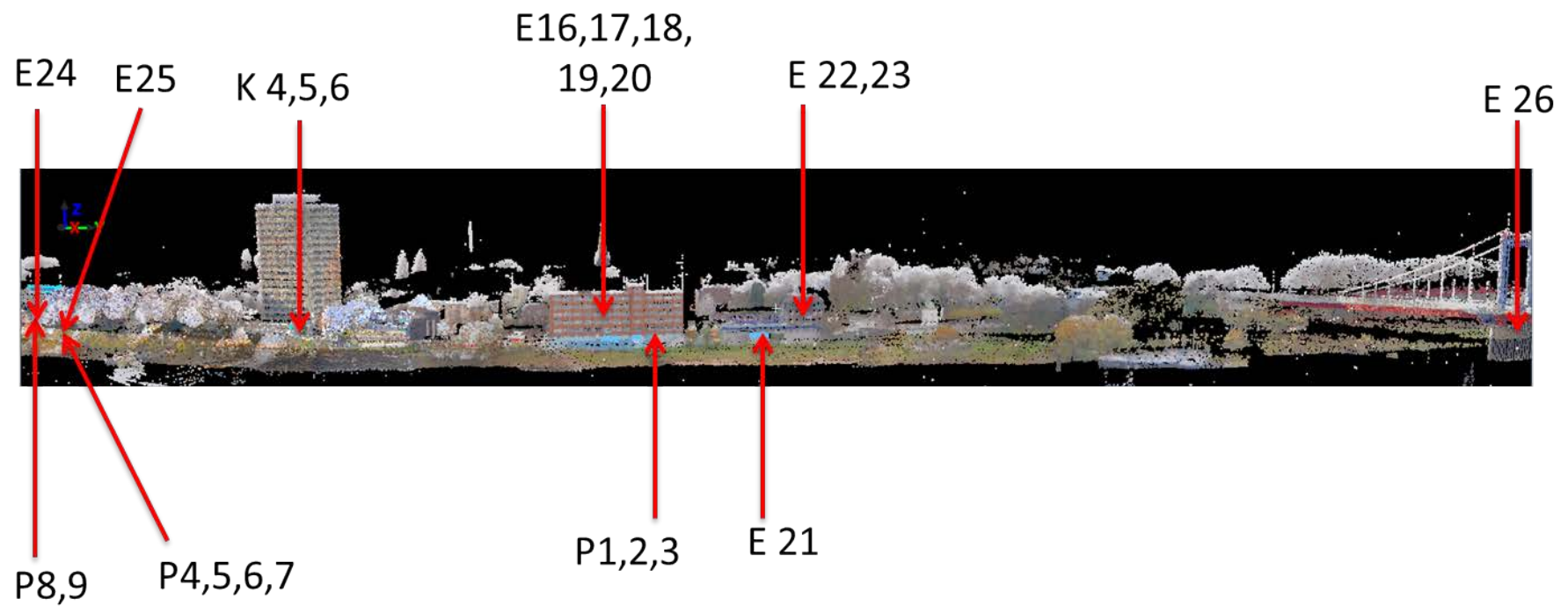


Abbildung C-1: Untersuchte Objekte am Rheinufer im Bereich Duisburg-Homberg

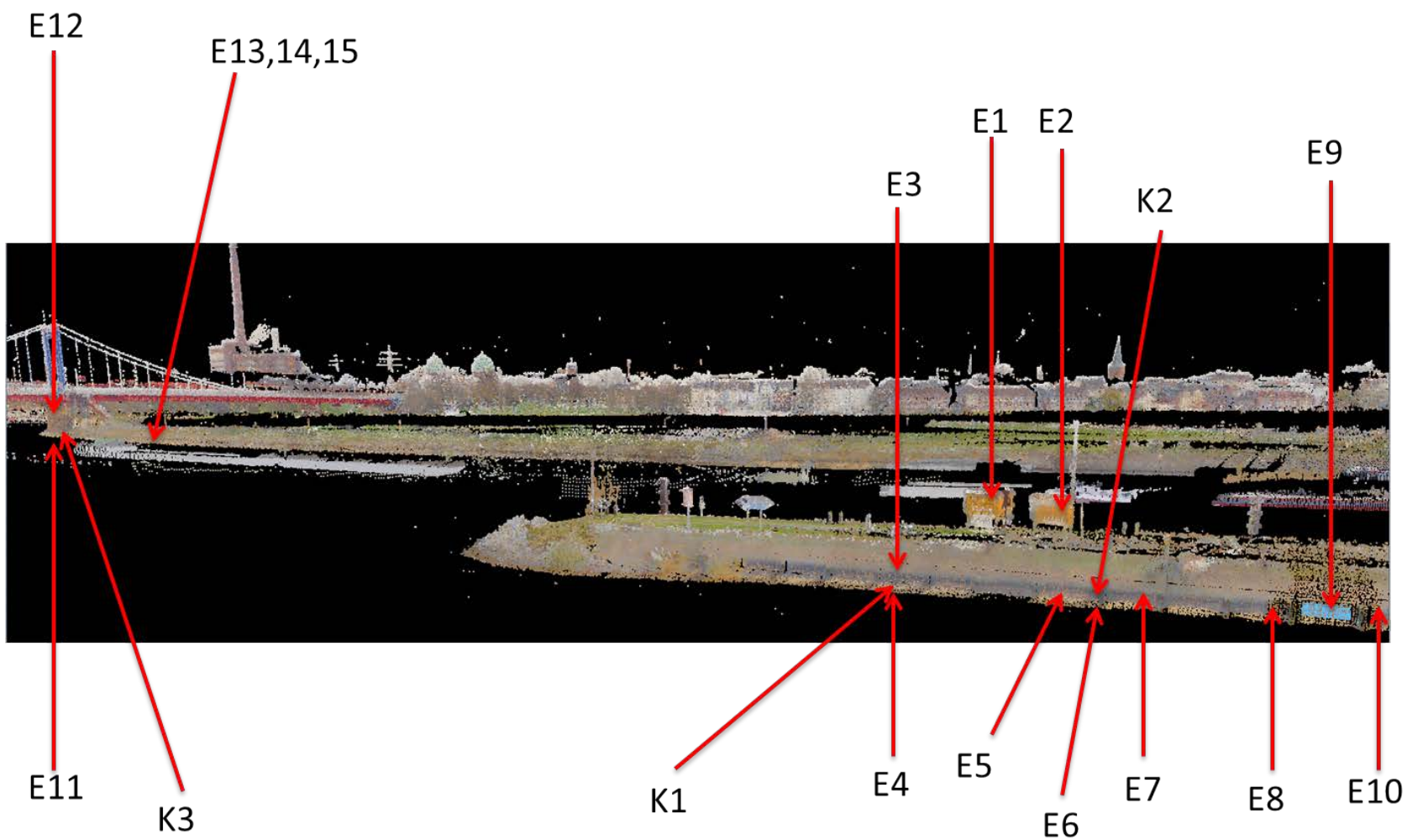
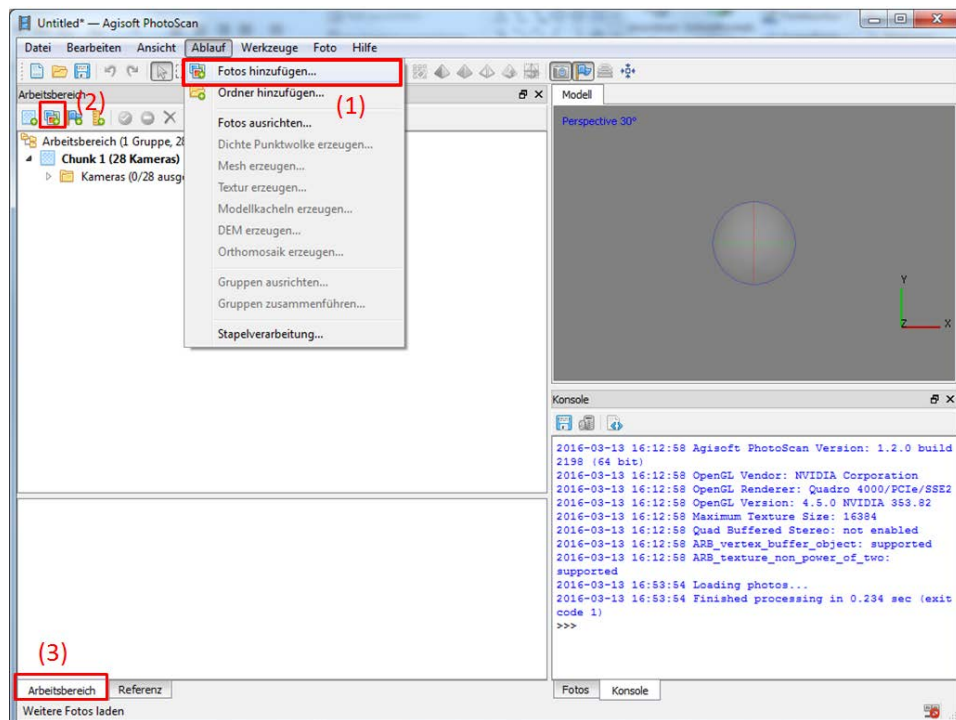


Abbildung C-2: Untersuchte Objekte im Bereich der Hafeneinfahrt / Ruhrmündung

# D Kurzanleitung: Agisoft PhotoScan

## 1. Fotos hinzufügen

Um Fotos hinzufügen zu können, wählen Sie den entsprechenden Befehl aus dem *Ablaufmenü* (1) oder klicken Sie auf *Fotos hinzufügen* (2) in der Arbeitsbereichssymbolleiste (3).

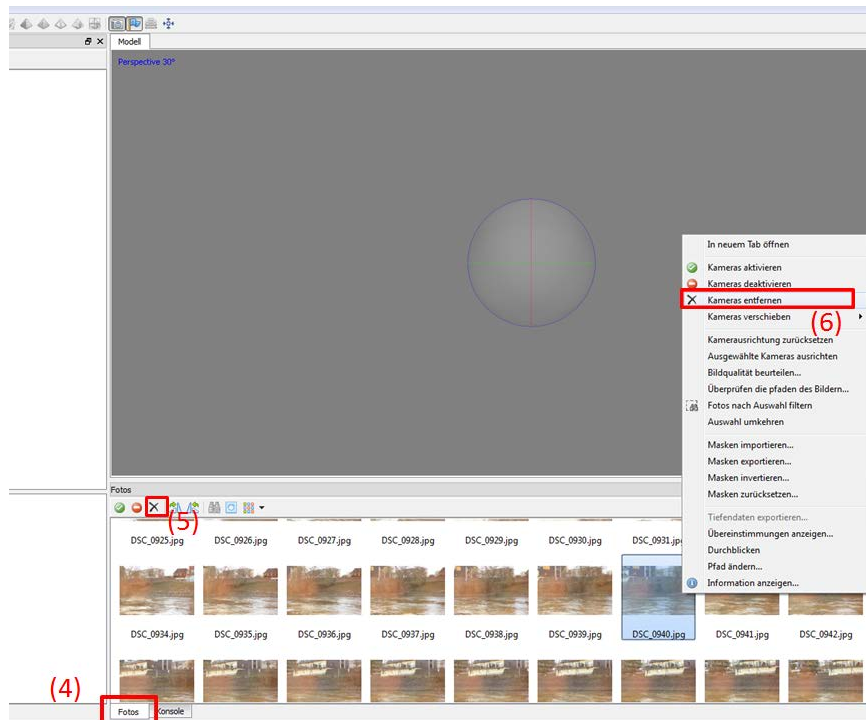


Im nächsten Schritt öffnet sich ein Dialogfenster; navigieren sie darin zum Quellordner mit den Fotos.

- Wählen Sie die Fotos aus, die verarbeitet werden sollen.
- Klicken Sie auf *Öffnen*.
- Ausgewählte Fotos erscheinen im Arbeitsbereich.

## 2. Eliminieren von ungeeigneten Fotos

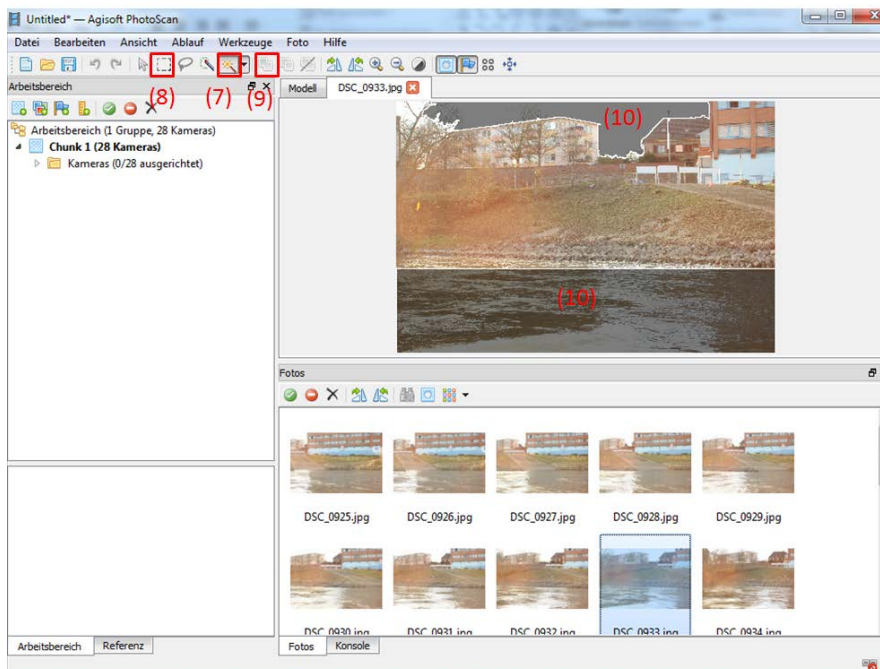
Im Fenster *Fotos* (4) kann man ungeeignete Bilder selektieren und entfernen. Dazu wird zunächst das entsprechende Foto ausgewählt. Anschließend kann durch einen Klick auf die Schaltfläche *Kameras entfernen* (5) das Foto entfernt werden. Alternative: Klick mit der rechten Maustaste auf das Bild → *Kamera entfernen* (6).



### 3. Maske (Optional)

Um Bildbereiche, die nicht in die Auswertung miteinbezogen werden sollen (z. B. Himmel oder Wasser), auszuschließen, kann eine *Maskierung* der Bilder durchgeführt werden. Diese Bereiche werden zuerst manuell mit der Schaltfläche *Zauberstab* (7) oder *Rechteckige Auswahl* (8) ausgewählt.

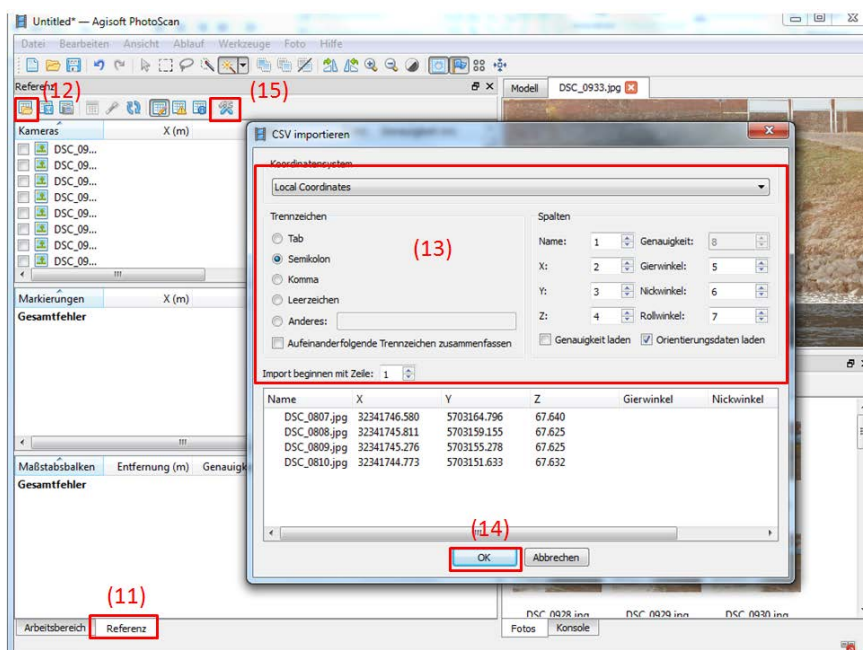
Durch Anklicken auf die Schaltfläche *Auswahl hinzufügen* (9) kann eine Maske auf die selektierten Bereiche gesetzt werden. Diese werden dann dunkler als andere Bilderbereiche erschienen (10).

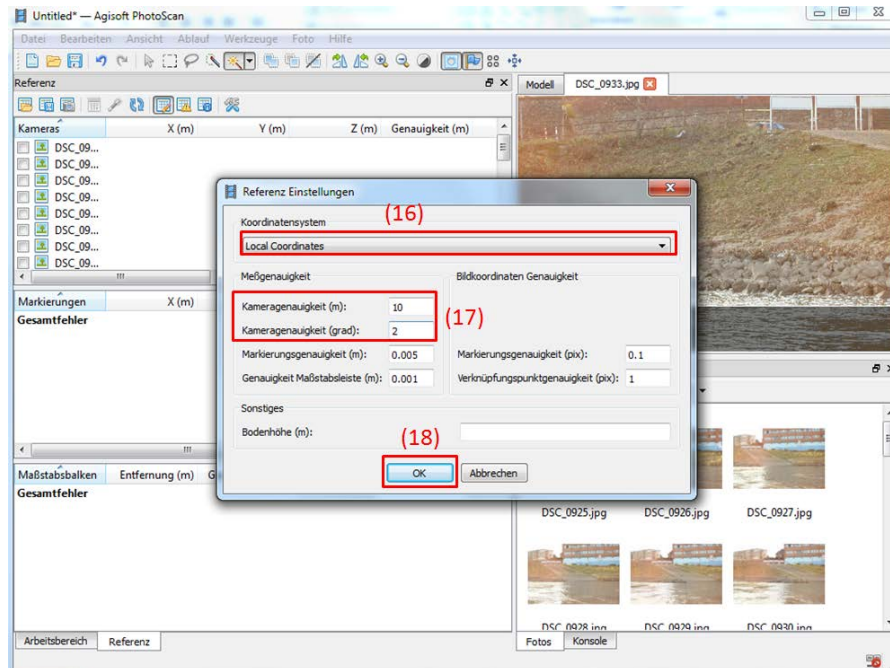




#### 4. Laden von bekannten Kamerapositionen (falls vorhanden)

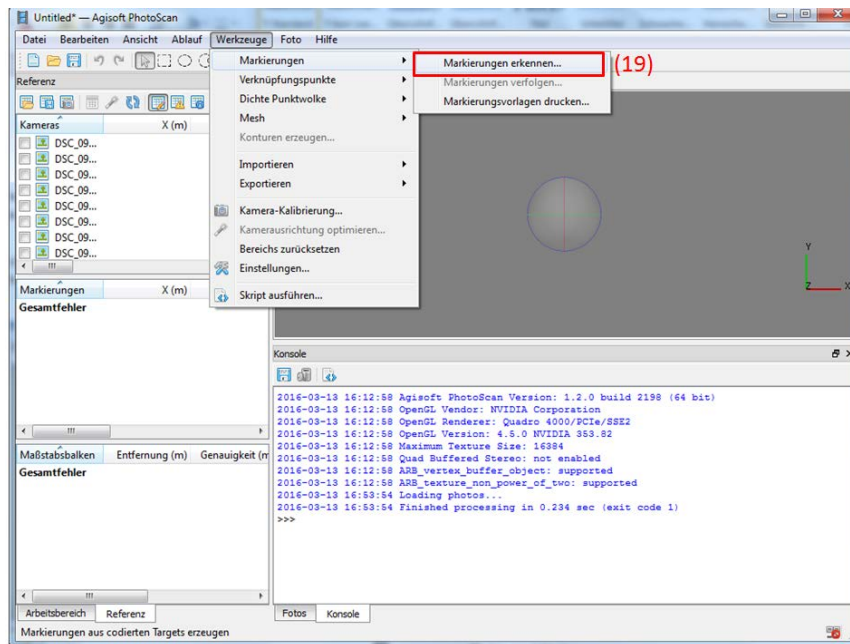
- Klicken Sie auf die Schaltfläche *Referenz* (11).
- Klicken Sie auf den *Import*-Button (12) in der Referenzwerkzeugliste und wählen Sie die Datei mit den Kamerapositionen.
- Passen Sie die Einstellungen an die Dateistruktur an, mit der die Positionen gespeichert sind (13).
- Klicken Sie auf OK (14). Die Daten werden in das Referenz-Feld geladen.
- Klicken Sie dann auf die Schaltfläche *Einstellungen* (15) in der Referenzebene und wählen Sie im Referenz-Dialogfenster das entsprechende Koordinatensystem (16) aus der Liste.
- Die Genauigkeit der bekannten Kamerapositionen kann hier ebenfalls angegeben werden (17).
- Klicken Sie auf OK (18).





## 5. Marken einfügen

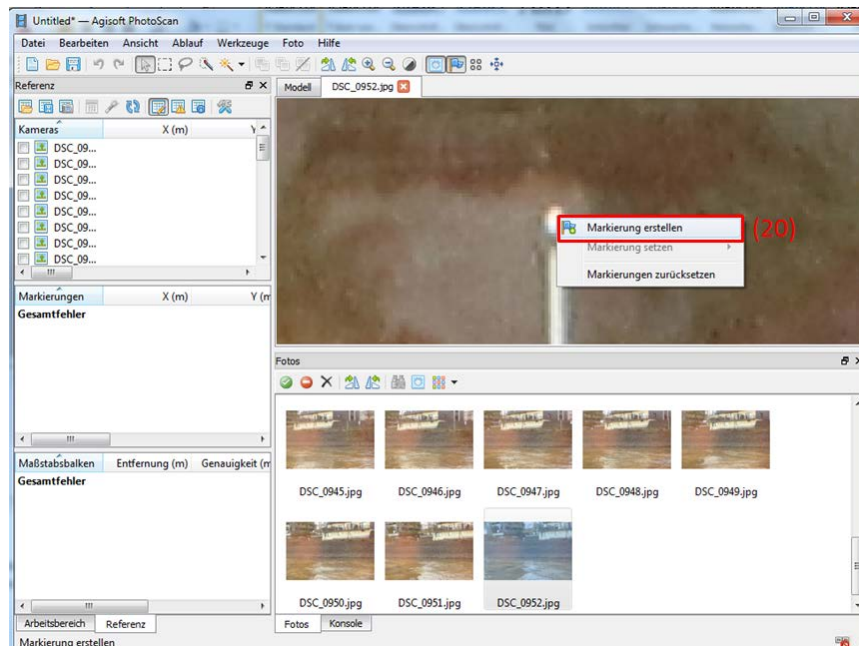
a) **Automatisch** (Nur beim Einsatz von softwarespezifischen, kodierten Marken):  
Menü *Werkzeuge* → *Markierungen* → *Markierungen erkennen* (19)



b) **Manuell:**

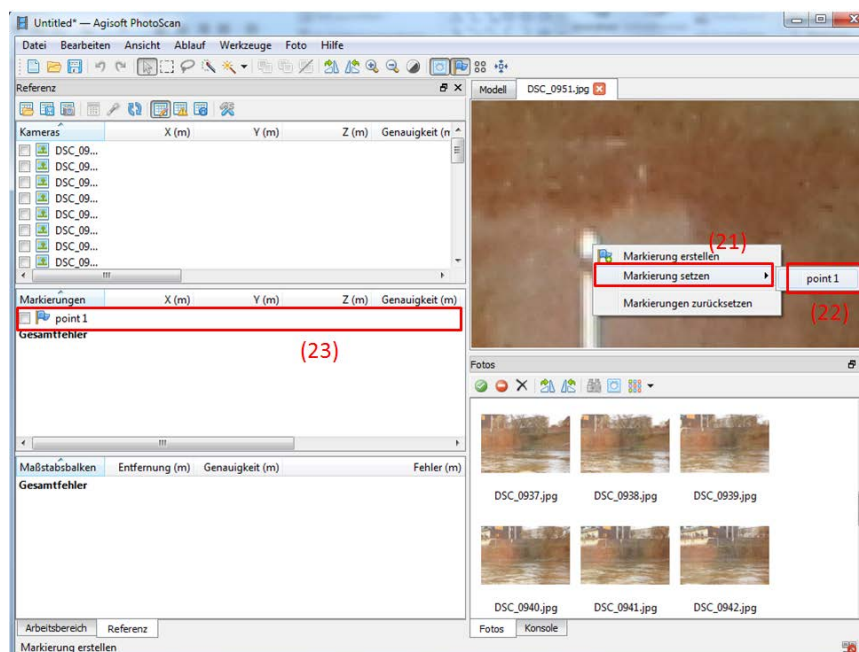
Suchen Sie in den Bildern nach den sichtbaren Markierungen (z. B. Zentrum einer Schachbrettzielmarke).

- Rechter Mausklick auf die Markierung → *Markierung erstellen* (20)



- Suchen Sie in allen anderen Bildern nach der gleichen Marke → Rechter Mausklick → *Markierung setzen* (21) → Auswahl des zugehörigen, definierten Ziels (22)

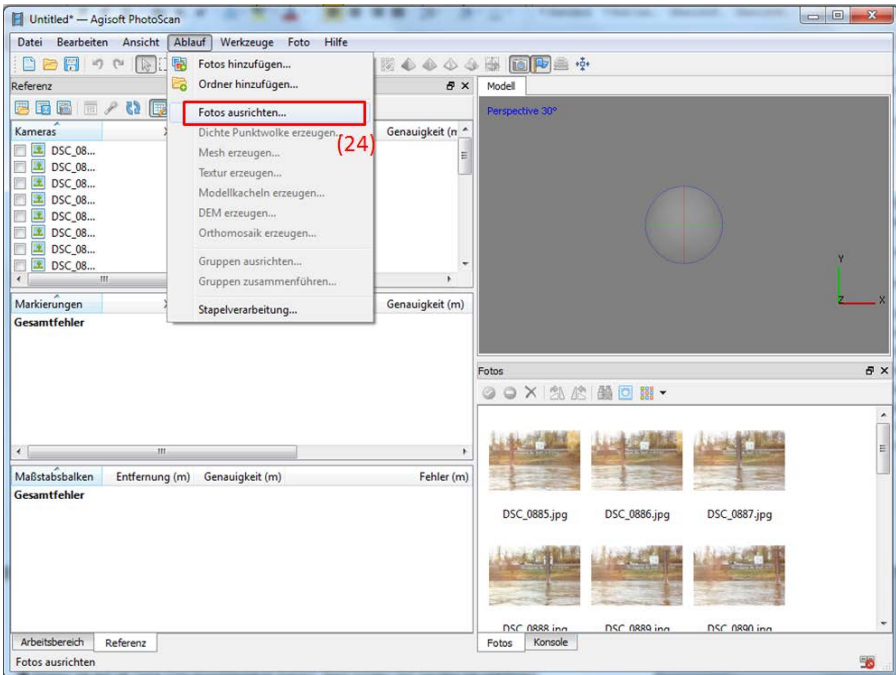
Die Koordinaten der gesetzten oder automatisch erkannten Marken können im Feld *Referenz* eingegeben werden (23).



## 6. Fotos ausrichten

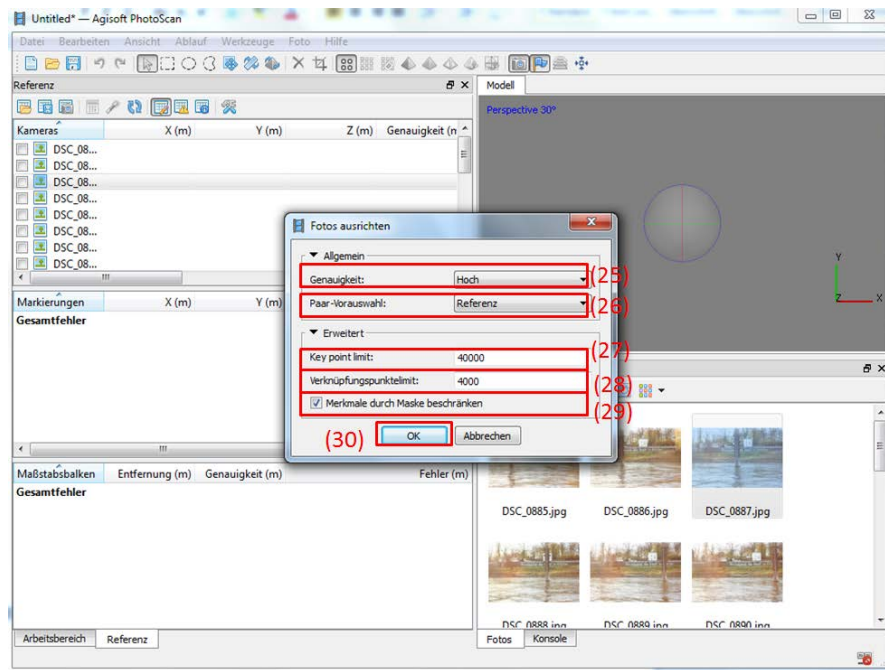
In dieser Phase sucht PhotoScan nach passenden Verknüpfungspunkten (Matchpunkten) zwischen den sich überlappenden Bildern. Dabei wird die Kameraposition für jedes Bild geschätzt.

Wählen Sie im Menüpunkt *Ablauf* die Funktion *Fotos ausrichten* (24) aus.

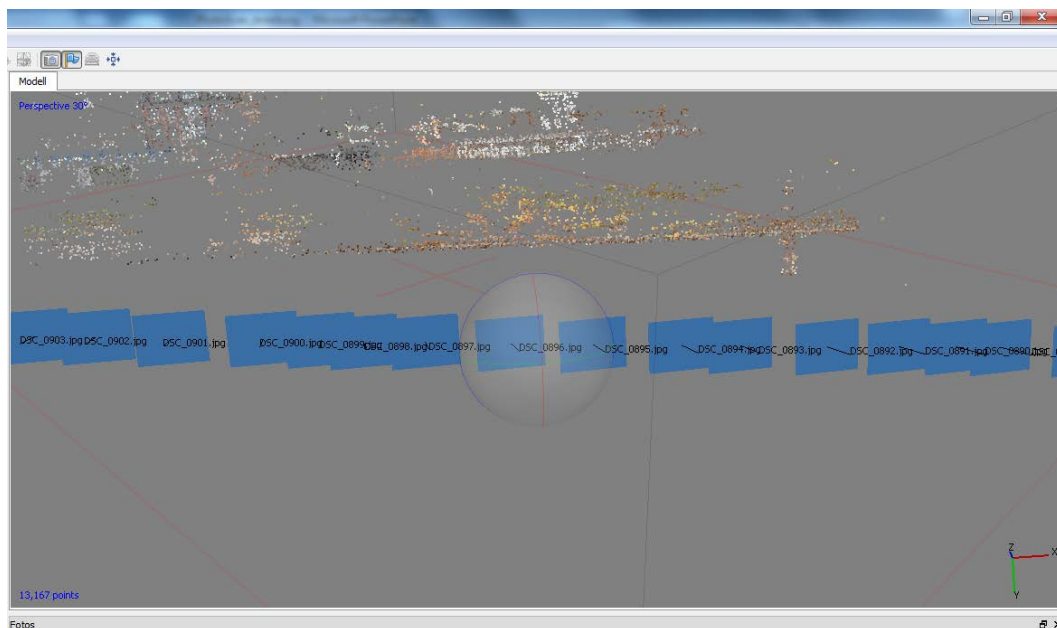


Definieren Sie die Parameter im Dialogfenster *Fotos ausrichten*. **Folgende Einstellungen werden empfohlen:**

Parameter	Einstellung	Bemerkung
Genauigkeit (25)	Hoch	Eine geringere Genauigkeitseinstellung berechnet in kürzerer Zeit grobe Näherungswerte für die Kamerapositionen.
Paar-Vorauswahl (26)	(a) Referenz (b) Allgemein	(a) bei vorliegenden bekannten Kamerapositionen (Schritt 4), (b) bei unbekannten Kamerapositionen
Key Point Limit (27)	40.000	
Verknüpfungspunkte-limit (28)	4.000	
Merkmale durch Maske beschränken (29)	(a) Aktivieren (b) nicht aktivieren	(a) nur nachdem Schritt 3 (Maske) durchgeführt wurde, ansonsten (b)



Klicken Sie auf OK (30), um die Fotosausrichtung zu starten. Nach einiger Zeit werden die Kamerapositionen und Orientierungen durch blaue Rechtecke im Modellfenster angezeigt.



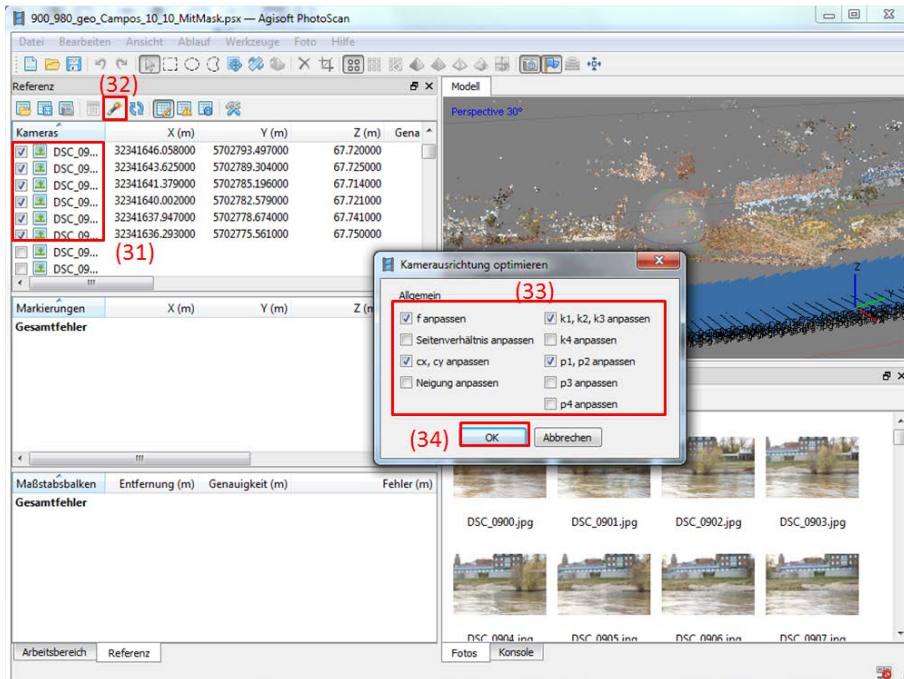
## 7. Optimierung der Kamera-Ausrichtung

Aktivieren Sie im Referenz-Feld alle Fotos (31), für die das Optimierungsverfahren angewendet werden soll.

- Klicken Sie auf die Schaltfläche *Optimieren* in der Referenzwerkzeugleiste (32).
- Wählen Sie im Dialogfenster *Kameraausrichtung optimieren* die Kameraparameter, die optimiert werden sollen (33)  
Empfohlene Parameter: Brennweite (f), Verzeichnung (cx, cy), (k1, k2, k3), (p1, p2)

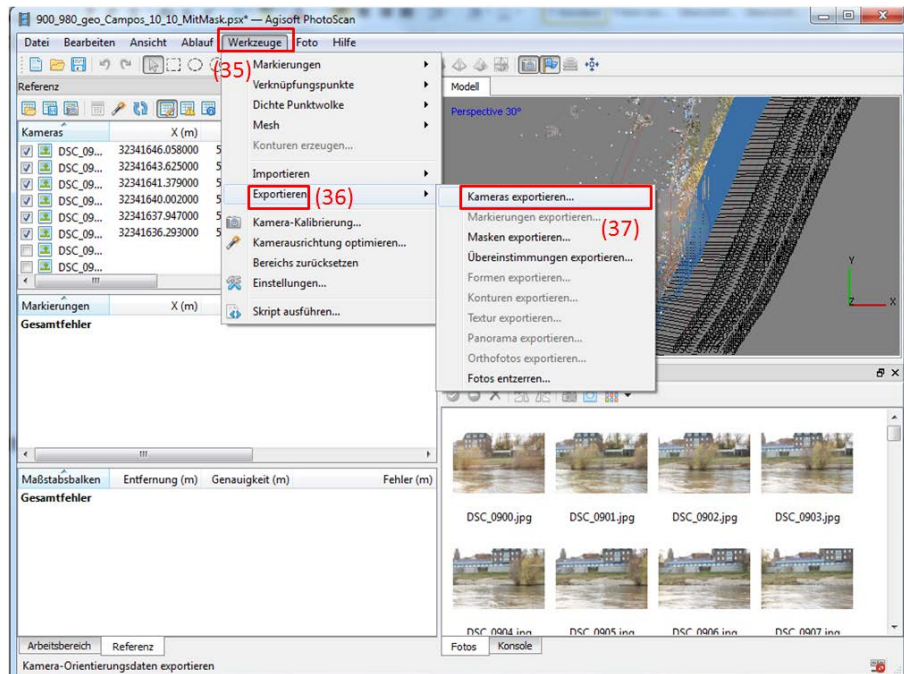


- Klicken Sie auf OK (34), um den Optimierungsprozess zu starten.

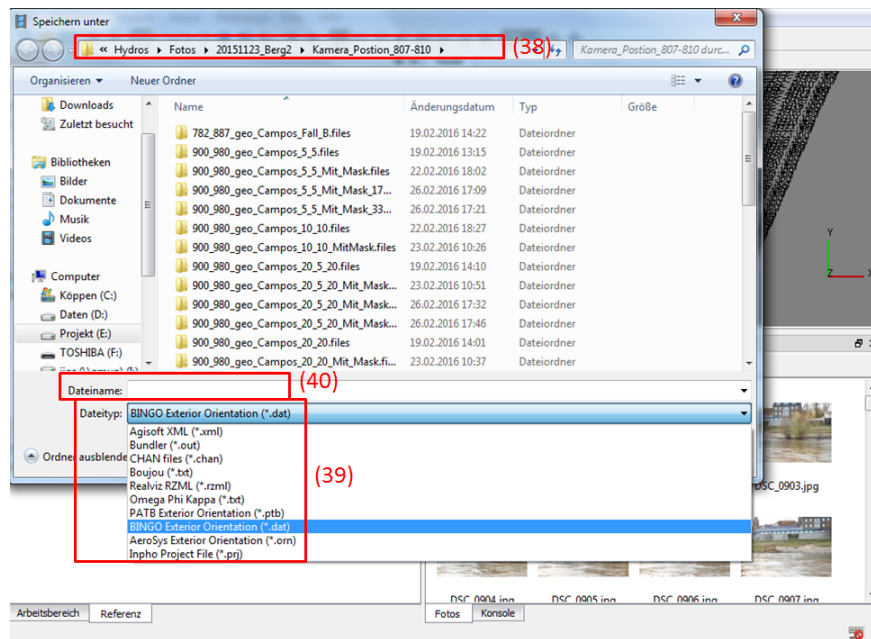


## 8. Export der Kameraposition

- Klicken Sie auf das Menü *Werkzeuge* (35) → *Exportieren* (36) → *Kameras exportieren* (37)



- Wählen sie einen passenden Pfad (38) zur Speicherung der Datei aus. → Wählen Sie das gewünschte Format (39) (z. B. BINGO Exterior Orientation) und einen Dateinamen aus (40). → Drücken Sie auf *Speichern*.



Weitere Infos unter:

[http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro\\_1\\_0\\_0\\_en.pdf](http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_1_0_0_en.pdf) (letzter Zugriff am 16.März 2016)





## E Datenaufbereitung zur Integration der photogrammetrischen Daten in HydrOs

Um die photogrammetrischen Messdaten in die HydrOs-Software integrieren zu können, sind einige vorbereitende Schritte durchzuführen. Dazu wurde ein Matlab-Ergänzungsmodul erstellt.

Zunächst muss das Skript **sort\_image.m** ausgeführt werden.

Um den zeitlichen Offset zwischen Kamera bzw. Kamera-Rechner (*Kamera*) und dem HydrOs-Rechner (*Systemzeit*) berücksichtigen zu können, muss dieser Wert bestimmt und in das entsprechende Feld eingegeben werden.

$$\Delta t = t_{\text{Kamera}} - t_{\text{System}} \quad (\text{E-1})$$

### Berechnung der Kamerakoordinaten aus GNSS-Koordinaten:

Soll eine Georeferenzierung mittels bekannter Kamerakoordinaten vorgenommen werden, so müssen die GNSS-Koordinaten zunächst auf den Zeitpunkt der Bildaufnahme interpoliert und anschließend auf den Kamerastandpunkt transformiert werden.

HydrOs+ (Photogrammetrie)

Fenster schließen Hilfe

**HydrOs Ergänzungsmodul**

Datenaufbereitung: Integration einer Kamera als zusätzlicher Positionssensor (Post-Processing)

Zeitlicher Offset zw. Kamera und Systemzeit [s]: 0

Interpoliere Kameraposition Positionsdatei erzeugen

	x [m]	y [m]	z [m]
Kamerakoordinaten (Schiffs-KS)	0	0	0
GNSS-Koordinaten (Schiffs-KS)	0	0	0

IMU-Messdaten laden  Browse

GNSS-Messdaten laden  Browse

Fotos laden  Browse

Speichern unter  Browse

EXE

Klicken Sie auf den Button **Interpoliere Kameraposition** und treffen Sie die notwendigen Einstellungen:

<b>Kamerakoordinaten (Schiffs-KS):</b>	Geben Sie die Standpunktkoordinaten der Kamera im Schiffskoordinatensystem ein.
<b>GNSS-Koordinaten (Schiffs-KS):</b>	Geben Sie die Standpunktkoordinaten des zu verwendenden GNSS-Empfängers im Schiffskoordinatensystem ein.
<b>IMU-Messdaten laden:</b>	Wählen Sie mit <i>Browse</i> die Datei mit den aufgezeichneten IMU-Messdaten aus (NMEA PSXN23), die während der photogrammetrischen Aufnahme mit HydrOs aufgezeichnet wurde.
<b>GNSS-Messdaten laden:</b>	Wählen Sie mit <i>Browse</i> die Datei mit den aufgezeichneten GNSS-Messdaten aus (NMEA GGA), die während der photogrammetrischen Aufnahme mit HydrOs aufgezeichnet wurde.
<b>Fotos laden:</b>	Wählen Sie mit <i>Browse</i> den Ordner aus, indem die aufgenommenen Fotos abgespeichert sind.
<b>Speicher unter:</b>	Geben Sie eine Dateibezeichnung für die zu erzeugende Datei mit den Kamerapositionen ein und navigieren Sie mit <i>Browse</i> zum gewünschten Verzeichnis.

Durch einen Klick auf **EXE** wird die Datenprozessierung gestartet. Die erzeugte Ausgabe-datei beinhaltet den Dateinamen jedes Fotos im ausgewählten Ordner und die dazugehörige Kameraposition im UTM-Koordinatensystem.

Am Ende der Datenprozessierung wird die Meldung *Interpolation erfolgt* ausgegeben.

Fotos deren aus GNSS-Daten bestimmte Koordinaten als nicht korrekt betrachtet werden müssen, können entweder vor der Datenprozessierung aus dem entsprechenden Ordner entfernt werden oder die zugehörigen Informationen werden in der Ausgabedatei manuell gelöscht.

#### **Beispiel** (Ausgabedatei):

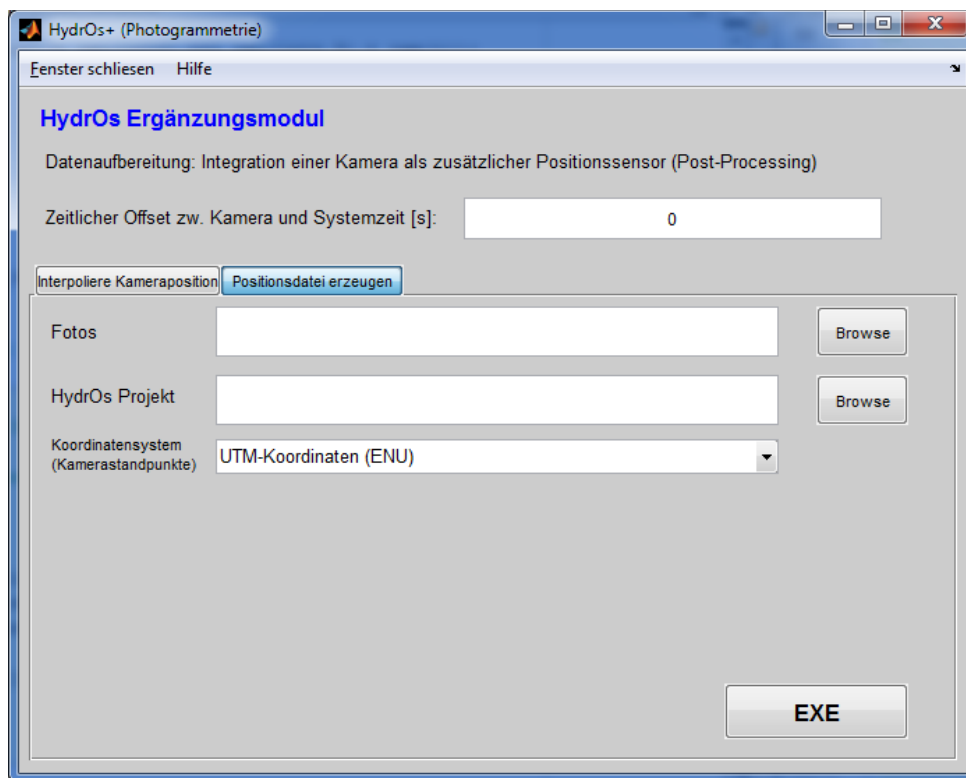
DSC\_0782.jpg; 32341759.548; 5703249.468; 67.673  
DSC\_0783.jpg; 32341758.886; 5703246.986; 67.673  
DSC\_0784.jpg; 32341758.214; 5703244.061; 67.665  
DSC\_0785.jpg; 32341757.375; 5703239.975; 67.693  
DSC\_0786.jpg; 32341756.938; 5703237.536; 67.692  
DSC\_0787.jpg; 32341756.542; 5703235.100; 67.692  
DSC\_0788.jpg; 32341756.166; 5703232.650; 67.682  
DSC\_0789.jpg; 32341755.498; 5703228.076; 67.678  
DSC\_0790.jpg; 32341754.789; 5703224.402; 67.673

Die Kamerakoordinaten in nicht abgeschatteten Bereichen können anschließend in Agisoft PhotoScan eingegeben werden.

### Erzeugen einer NMEA GGA Datei:

Nach Auswertung der Fotos mit Agisoft PhotoScan sollen die einzelnen Kamerakoordinaten in Form von NMEA GGA-Strings in die HydrOs-Software eingelesen werden.

Speichern Sie zunächst die von Agisoft PhotoScan erzeugte Ergebnisdatei im selben Ordner wie die Fotos.



Klicken Sie anschließend auf den Button **Positionsdatei erzeugen**.

Geben Sie die erforderlichen Einstellungen ein:

<b>Fotos</b>	Wählen Sie mit <i>Browse</i> den Ordner aus, indem die aufgenommenen Fotos abgespeichert sind.
<b>HydrOs Projekt</b>	Wählen Sie mit <i>Browse</i> den Projektordner, in welchem die zu erzeugende Datei (als NMEA GGA-Nachrichten) gespeichert werden soll. Die Datei wird automatisch im entsprechenden Unterordner abgelegt.
<b>Koordinatensystem</b>	Geben Sie an, ob die einzulesenden Kamerakoordinaten als UTM-Koordinaten oder als ellipsoidische Koordinaten vorliegen.

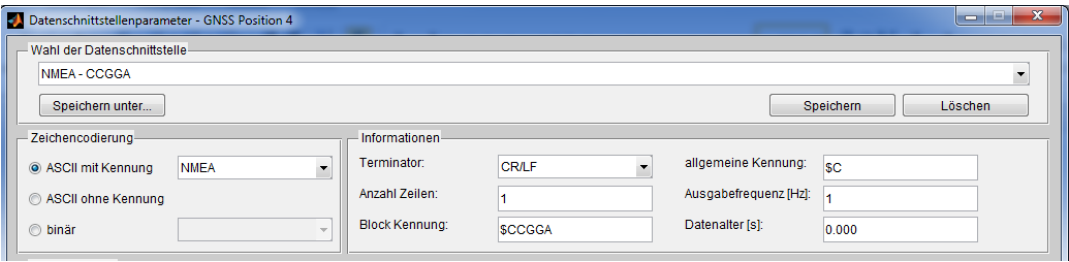
Klicken Sie auf **EXE** um die Erzeugung der Datei im NMEA-GGA Format zu starten. Die Nachricht wird mit dem Prefix *CC* als Kameraposition gekennzeichnet.

### Beispiel (Ausgabedatei):

```
20151123,141722.066,$CCGGA,141722.07,5126.99241154,N,00643.17736373,E,7,,67.833,M,0.000,M,,*5B
20151123,141723.016,$CCGGA,141723.02,5126.99376756,N,00643.17938778,E,7,,67.837,M,0.000,M,,*55
```

20151123,141724.116,\$CCGGA,141724.12,5126.99533560,N,00643.18171476,E,7,,,67.830,M,0.000,M,,\*53  
20151123,141725.166,\$CCGGA,141725.17,5126.99682102,N,00643.18392754,E,7,,,67.830,M,0.000,M,,\*52

Um die Datei in HydrOs-Software verwenden zu können, müssen die Daten zu Beginn einmal eingelesen und konvertiert werden. Dazu wird die HydrOs-Software gestartet und das gewünschte Projekt geöffnet. Unter **Sensorkonfiguration → Sensorkonfiguration bearbeiten → Eingangsschnittstellen** wird ein neuer Positionssensor angelegt (z. B. unter GNSS Position 4):



Die Ausgabefrequenz muss, je nach gewünschtem Wert, angepasst werden. Anschließend werden die vorliegenden Beobachtungen ausgewählt:

	UTC Zeit	Ell. Breite	Ell. Länge	Orthom./ ell. Höhe	Quality Indicator
Kennung	\$CCGGA	\$CCGGA	\$CCGGA	\$CCGGA	\$CCGGA
Trennzeichen	,	,	,	,	,
Position	1	2	4	9	6
Format / Einheit	hhmmss.ss	ddmm.mmm	ddmm.mmm		
Faktor	1	1	1	1	1
Addition	0	0	0	0	0
Beobachtung					

Mit dem Button **Start** kann die HydrOs interne Datenkonvertierung gestartet werden. Nach Abschluss können die photogrammetrischen Messdaten wie gewohnt in HydrOs in die Datenauswertung integriert werden.  
Eine Plausibilitätsüberprüfung der eingelesenen Daten ist jedoch nicht möglich.