

## **3D Informationen aus Fernerkundungsdaten für den Bevölkerungsschutz –**

Nutzungsmöglichkeiten am Beispiel zweier  
Großveranstaltungen

Masterarbeit im Studiengang

### **Katastrophenvorsorge und Katastrophenmanagement**

Mathematisch – Naturwissenschaftliche Fakultät  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**vorgelegt von:**

Veronika Gstaiger  
Matrikel-Nr. 2529680

**Betreut von:** Prof. Dr.-Ing. Günter Strunz

**Zusätzlich betreut von:** Dr. Fabian Löw

Bonn, Oktober 2018

---

## ERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Fall als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Das Gleiche gilt auch für beigegebene Zeichnungen, Kartenskizzen und Abbildungen.

Bonn, den 15.10.2018

Veronika Gstaiger

---

# Inhalt

<b>Inhalt</b> .....	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Begriffe und Definitionen .....	1
1.2 Relevante Phasen des Katastrophen- und Veranstaltungsmanagements .....	2
1.3 Ziel der Arbeit .....	3
<b>2 Gewinnung und Nutzung von 3D Informationen - Stand der Technik</b> .....	<b>5</b>
2.1 Optische Aufnahmesysteme .....	5
2.2 Radarsysteme .....	7
2.3 LiDAR-Systeme .....	8
2.4 Veränderungsanalysen .....	9
2.5 Verwendung im Katastrophenmanagement .....	9
<b>3 Untersuchungsgebiete</b> .....	<b>11</b>
<b>4 Datengrundlage</b> .....	<b>12</b>
4.1 Das 4k Kamerasystem des DLR .....	12
4.2 Luftbilddaten .....	13
<b>5 Methodik</b> .....	<b>14</b>
5.1 Berechnung digitaler Oberflächenmodelle .....	14
5.2 3D Veränderungsanalyse .....	15
<b>6 Ergebnisse</b> .....	<b>17</b>
6.1 Digitale Oberflächenmodelle .....	17
6.2 Automatische Veränderungsberechnung .....	19
6.3 Einsatzmöglichkeiten der 3D Informationen .....	23
6.3.1 Standort- und Zufahrtsplanung .....	23
6.3.2 Gefahren-/ Risikoanalyse .....	24
6.3.3 Vorbereitung der Einsatzkräfte .....	25
6.3.4 Monitoring von Zufahrtswegen und Rettungsgassen .....	26
6.3.5 Schadensanalyse .....	27
<b>7 Diskussion</b> .....	<b>28</b>
<b>8 Ausblick</b> .....	<b>30</b>
<b>9 Danksagung</b> .....	<b>32</b>
<b>10 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>33</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen des Katastrophen- und Veranstaltungsmanagements.....	3
Abbildung 2: Beispiel für eine 2,5D und 3D Visualisierung: Schloss Elmau.....	5
Abbildung 3: Fotos des Wacken Festivals 2016 und den Feierlichkeiten zum Evangelischen Kirchentag 2017 in Wittenberg. ....	11
Abbildung 4: Das montierte 4k Kamerasystem und seine Komponenten.....	12
Abbildung 5: Arbeitsschritte zur Erstellung digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbildern.....	14
Abbildung 6: 3D Veränderungsanalyse .....	15
Abbildung 7: Übersicht der Luftbilder und berechneten Oberflächenmodelle des Wacken Open Air.....	17
Abbildung 8: Übersicht der Luftbilder und berechneten Oberflächenmodelle des Evangelischen Kirchentags. ....	18
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Analyseergebnisse.....	19
Abbildung 10: Wacken-1 (Wohnmobile und Camper).....	20
Abbildung 11: Wacken-2 (Fahrzeuge und Zelte, sowie eine Sanitäreinrichtung) .....	20
Abbildung 12: Wittenberg-1 (Zufahrt zum Festgelände).....	21
Abbildung 13: Wittenberg-2 (Bühnenbereich mit einem Teil der Besuchertribüne) .....	22
Abbildung 14: Staunässe auf tiefergelegenen Hauptwegen des Wacken Open Air zu erkennen im Luftbild und DOM. ....	23
Abbildung 15: Hochwassergefahrenkarte Wittenberg für ein Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit.....	24
Abbildung 16: Feier zum Evangelischen Kirchentag in Wittenberg am 28. Mai 2017 mit einem simulierten Pegelstand von 706cm und den entsprechenden Überflutungsflächen.....	25
Abbildung 17: Profile (in m) des DOM vom 24. Mai 2017 durch das Festgelände, sowie über die Elbe mit perspektivischer Ansicht des zweiten Profils .....	25
Abbildung 18: Traktor auf Fahrweg. Perspektivische Darstellung des möglichen Hindernisses, Luftbildausschnitt und Veränderungsanalyse des Wacken Open Air am 04. August 2016. ....	26
Abbildung 19: Profil des Hindernisses auf einem Fahrweg des Wacken Open Air .....	26

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: AUC Vergleich der vorgestellten Testgebiete .....	23
--	----

---

## Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laser Scanner
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AUC	Area Under Curve
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
CVA	Change Vector Analyse CVA
DEM	Digital Elevation Model
DGM	Digitales Geländemodell
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DSM	Digital Surface Model
DOM	Digitales Oberflächenmodell
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IRMAD	Interactively Reweighted Multivariate Alteration Detection
LiDAR	Light Detection and Ranging
RMSE	Root-mean-square Error
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SAR	Synthetic Aperture Radar
SfM	Structure from Motion
SGM	Semi-Global-Matching
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TanDEM-X	TerraSAR-X-Add-on for Digital Elevation Measurements
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
ZKI	Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation
ZSKG	Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz

---

## Zusammenfassung

Um Gefahren- oder Schadenslagen bei Großveranstaltungen vorzubeugen und im Notfall schnell und effektiv handeln zu können, benötigen Entscheidungsträger Informationen mit Raumbezug für ein möglichst realitätsnahes Lagebild vor und während der Veranstaltung. Aufgrund der steigenden Verfügbarkeit von immer höher aufgelösten Fernerkundungsdaten und dem zunehmenden Bewusstsein über die Möglichkeit flächendeckende Informationen daraus abzuleiten, werden diese inzwischen immer häufiger in die Abläufe des Katastrophenmanagements eingebunden. Detaillierte, aus Fernerkundungsdaten abgeleitete 3D Informationen mit Höhenbezug bieten dem Lagemanagement wertvolle Zusatzinformationen zu Gelände- und Objekteigenschaften, sie werden jedoch bislang kaum operationell genutzt. Die vorliegende Arbeit analysiert und bewertet die Anwendung von 3D Change Detection (im Folgenden als Veränderungsanalyse bezeichnet) von Gelände- und Objektinformationen im Rahmen der Prävention und Sicherung von Großveranstaltungen.

Als Anwendungsbeispiele werden aus hochaufgelösten Luftbildern zweier Großveranstaltungen, dem Wacken Open Air 2016 und der Feier zum Evangelischen Kirchentag 2017, zunächst Oberflächenmodelle berechnet. Aus diesen Oberflächenmodellen, die sowohl vor als auch während der Veranstaltung aufgenommen wurden, werden 2D und 3D Veränderungen, also Veränderungen ohne und mit Berücksichtigung von Höheninformationen auf der Basis eines neuen und automatischen Verfahrens berechnet. Der potentielle Mehrwert der gewonnenen Gelände- und Veränderungsinformationen für die Praxis wird anhand von Anwendungsmöglichkeiten diskutiert. Ein Beispiel ist ein flächendeckendes und automatisiertes Monitoring von Verkehrs- und Rettungswegen, sowie die Möglichkeit erfasste Hindernisse schnell und präzise zu analysieren und so besser über Maßnahmen der Räumung entscheiden zu können. Ein weiterer Aspekt ist die Erkennung und Klassifikation von Fahrzeugen und mobilen Unterkünften, wie z.B. Zelten, da diese Aufschluss über die Personenzahl vor Ort geben, die im Notfall versorgt oder evakuiert werden müssen. Forschungsarbeiten zu Veranstaltungen wie diesen, die eine Errichtung mobiler Infrastruktur und Unterbringungsmöglichkeiten mit sich bringen, sind zudem auf den Zivilschutzfall übertragbar und somit ein Mehrwert für den Bevölkerungsschutz allgemein.

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Begriffe und Definitionen

Forschungsgegenstand der vorliegenden Studie sind Großveranstaltungen. Zunächst stellt sich die Frage, wie sich diese gegenüber regulären Veranstaltungen abgrenzen lassen. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BBK) definiert diese in seinen „Bausteinen für die Sicherheit von Großveranstaltungen“ als *„Veranstaltungen, bei denen ein erhöhtes Gefährdungspotenzial aufgrund der Art der Veranstaltung vorliegt oder bei denen die Zahl der Besucher größer als ein Drittel der Einwohnerzahl bzw. größer als 5.000 ist. Sie erfordern eine behördliche Genehmigung sowie eine qualifizierte Zusammenarbeit der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) mit den Veranstaltern und anderen Beteiligten“* (BBK, 2016).

Bzgl. der Verantwortlichkeiten beziehen sich die angesprochenen BOS hierbei auf die jeweilige Kommunal- bzw. Landesebene, da Katastrophenschutz und alltägliche Gefahrenabwehr in Deutschland länderspezifisch in den jeweiligen Katastrophenschutzgesetzen festgehalten sind (BBK, 2018a). Bundesbehörden werden nach Artikel 35, sowie Artikel 72 Absatz 1 Punkt 1 des Grundgesetzes der Bundesrepublik Deutschland lediglich bei Anfrage nach Amts- und Katastrophenhilfe, sowie im Verteidigungsfall aktiv (BfJ, 1949). Details sind im Gesetz über den Zivilschutz und die Katastrophenhilfe des Bundes (Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz - ZSKG) formuliert (BfJ, 2009).

Viele Forschungsaspekte um das Thema Management von Großveranstaltungen sind auch für den Zivilschutz/Verteidigungsfall relevant, da Forschungsergebnisse und Entwicklungen zum Management und zur Versorgung von großen Menschenmengen auch im Kriegsfall zum Schutz der Bevölkerung von Nutzen sein können. Großveranstaltungen, wie sie in dieser Arbeit untersucht werden, finden außerhalb der für solche Zwecke konzipierten Austragungsorte, wie Stadien oder Messegelände, statt. Dies hat zur Folge, dass auf Gelände außerhalb von städtischem Gebiet kurzfristig und nur temporär benötigte Infrastruktur geschaffen werden muss, um die Besucher an- und abreisen zu lassen, sie unterzubringen, zu versorgen, die Veranstaltung zu koordinieren, zu überwachen und ggf. Rettungsmaßnahmen durchführen zu können. Diese Strukturen lassen sich aus Sicht der Sicherung und Versorgung durchaus mit Entwicklungen vergleichen, wie sie bei Flüchtlingsbewegungen entstehen können. Den Menschen stehen nur provisorische und ggf. mobile Unterkünfte, Sanitär- und Versorgungseinrichtungen, z.B. in Zelten, zur Verfügung, ähnlich derer wie sie auch auf einem Festivalgelände zu finden sind. Umso wichtiger sind dann für staatliche Hilfseinrichtungen Informationen darüber, wie viele Menschen sich dort aufhalten, um Maßnahmen zur Versorgung zu koordinieren. Aus diesem Grund adressiert diese Arbeit nicht nur Fragestellungen des Katastrophenschutzes, sondern des Bevölkerungsschutzes allgemein, der laut BBK 2018b wie folgt definiert wird: *„Bevölkerungsschutz ist die Summe der zivilen Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen vor den Auswirkungen von Kriegen, bewaffneten Konflikten, Katastrophen und anderen schweren Notlagen sowie solcher zur Begrenzung und Bewältigung der genannten Ereignisse. Bevölkerungsschutz umfasst Katastrophenschutz, Zivilschutz und Katastrophenhilfe. Die Wahrnehmung der Aufgaben erfolgt in der jeweiligen verfassungsmäßigen Zuständigkeit, für den Katastrophenschutz (Länder) sowie Zivilschutz und Katastrophenhilfe (Bund).“*

---

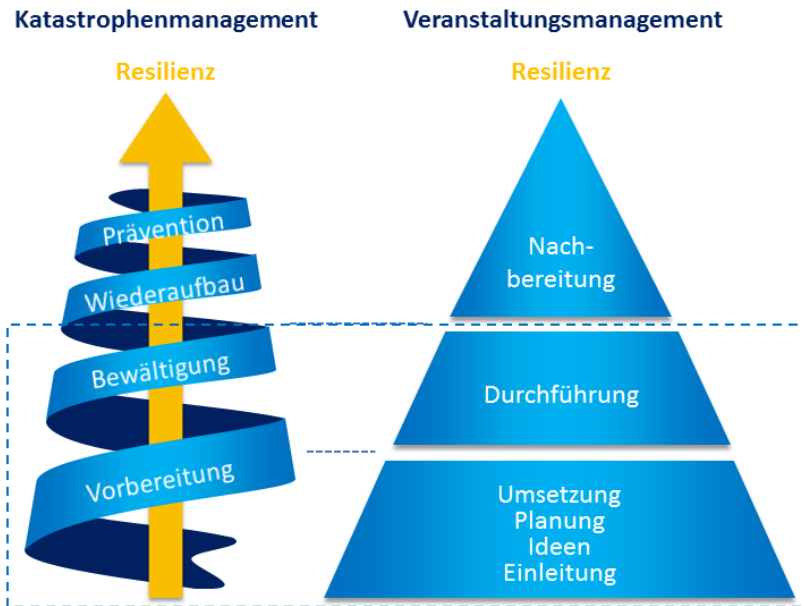
Doch welche Rolle spielen 3D Informationen aus Fernerkundungsdaten an dieser Stelle? Die Fernerkundung ist nach Albertz, 2007, „*ein indirektes Beobachtungsverfahren um anhand von reflektierter, elektromagnetischer Strahlung Informationen über die Erdoberfläche und die sich darauf befindenden Objekte zu gewinnen*“. Fernerkundungsdaten können sowohl mit Hilfe optischer (passiver) Kamerasysteme, als auch mit aktiven Radarsystemen bzw. Laserscannern gewonnen werden, welche auf Satelliten, Flugzeugen, Hubschraubern oder Drohnen betrieben werden. Während herkömmliche Informationen, wie z.B. Fotos oder Berichte von Personen vor Ort, zu Großveranstaltungen in unwegsamem Gelände oft lückenhaft oder aufgrund dynamischer Lagen bereits schnell veraltet sind, liefern Fernerkundungsdaten einen objektiven Blick von oben. Auf diese Weise lassen sich nicht nur flächendeckend Informationen gewinnen, sondern mit Hilfe von wiederholten Aufnahmen lässt sich auch der Verlauf einer Lage genau beobachten. Römer et al., 2016 haben Forschungsarbeit zum operationellen Einsatz von Fernerkundungsdaten bei Großveranstaltungen geleistet, jedoch existieren bislang nur wenige Studien in diesem Bereich. Das Ergebnis der Ableitung von dreidimensionalen (3D) Informationen sind 3D Punktwolken, die in ein 3D Modell oder ein sogenanntes digitales Oberflächenmodell (DOM oder engl. Digital Surface Model - DSM) überführt werden können. Dieses beinhaltet eine digitale Darstellung der äußersten Hülle der Geländeoberfläche inklusive Vegetation und Gebäude. Hiervon zu unterscheiden ist das Digitale Geländemodell (DGM oder engl. Digital Elevation Model - DEM), das lediglich die Geländeoberfläche, d.h. ohne Landschaftsobjekte wie Häuser oder Bäume, enthält. Was genau diese 3D Informationen bei Großveranstaltungen beinhalten und wie sie genutzt werden können, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

## **1.2 Relevante Phasen des Katastrophen- und Veranstaltungsmanagements**

Großveranstaltungen sind aufgrund ihrer hohen Teilnehmerzahl und Teilnehmersdichte auf vergleichsweise kleinem Gelände besonders anfällig für Gefahren- und Schadenslagen. Immer wieder kommt es bei großen Menschenansammlungen zu Verletzungen und Todesfällen und es wird seit Jahren an den Ursachen für Unfälle, sowie Beeinflussungsmöglichkeiten geforscht, um Großveranstaltungen sicherer zu machen (Fruin, 1993; Helbing et al., 2000; Oberhagemann 2012). Hinzu kommt, dass sich die genauen Besucherzahlen vorab oft nur schwer abschätzen lassen, wie die Diskussion um die tatsächliche Teilnehmerzahl des Evangelischen Kirchentags in Wittenberg zeigt (Leitlein, 2017). Auch die Unterbringung und Versorgung von teils mehreren tausend Teilnehmern in Zelten oder Mobilheimen ist nicht nur eine Herausforderung für die Organisatoren, sondern birgt auch Risiken für die Teilnehmer, die gegenüber Umwelteinflüssen kaum geschützt sind.

Abbildung 1 zeigt eine Gegenüberstellung der Phasen des Katastrophenkreislaufs nach Alexander, 2012, und des Veranstaltungsmanagements nach BBK, 2016. Um Risiken besser einschätzen zu können und Katastrophen möglichst zu vermeiden, bzw. bei deren Eintreten schnell und effizient handeln zu können, ist eine umfassende Vorbereitung entsprechend des Katastrophenkreislaufs besonders wichtig.





**Abbildung 1: Phasen des Katastrophen- und Veranstaltungsmanagements.**

Bezogen auf die Phasen des Veranstaltungsmanagements, sind darin die Einleitung, Ideenfindung, Planung und Umsetzung, sowie die Durchführung enthalten. Tritt ein Schadensereignis ein, überlappen sich die Durchführungsphase des Veranstaltungsmanagements mit der Bewältigungsphase des Katastrophenmanagements. Anschließend erfolgt die Nachbereitungsphase, in der die Veranstaltung reflektiert wird und Erfahrungen in neue Planungsprozesse aufgenommen werden. Diese Phase entspricht der Präventionsphase des Katastrophenmanagements, in der aus der Katastrophe Gelerntes vor einem erneuten Eintreffen einer Katastrophe schützen soll. Beide Modelle zielen darauf ab, durch Nachbereitung der Veranstaltung oder Präventionsarbeit nach einer Katastrophe einen Lerneffekt zu erzielen und sich somit in Richtung zunehmender Resilienz zu entwickeln. Von besonderem Interesse für diese Arbeit sind jedoch die Vorbereitungs- und Bewältigungsphase bzw. die Abläufe von der Einleitung bis zur Durchführung der Veranstaltung.

### 1.3 Ziel der Arbeit

Damit die Verantwortlichen für Planung, Versorgung und Soforthilfe einer Großveranstaltung fundierte Entscheidungen treffen können, müssen sie über ein möglichst vollständiges Bild der Situation verfügen. Eine Quelle für raumbezogene und flächendeckende Informationen sind Fernerkundungsdaten. Diese werden schon seit vielen Jahren beispielsweise im Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) als Grundlage für Kartierungen in verschiedensten Bereichen des Katastrophenmanagements eingesetzt, seien es Gefahren-, Risiko- oder Vulnerabilitätsanalysen, Frühwarnsysteme oder Schadenserfassungen (Joyce et al., 2009; Bello & Aina, 2014; Gähler, 2016). Mit zunehmender Verfügbarkeit und Qualität der Daten werden auch die Verfahren zur Ableitung von 3D Informationen schneller und besser, so dass die gewonnenen Informationen auch vermehrt operationell nutzbar werden (Lee & Zlatanova, 2008; Biljecki et al., 2015; Schröter, 2016; Lechner & Gähler, 2017).

Im Verkehrsforschungsprojekt VABENE++ (Verkehrsmanagement bei Großveranstaltungen und Katastrophen) (Verkehrsforschung, 2018) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

---

(DLR) wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Hilfsmittel zur Gewinnung von Fernerkundungsinformationen entwickelt, um diese anschließend für BOS nutzbar zu machen. Unter anderem wurde das 4k Kamerasystem entwickelt, mit dessen Hilfe die in dieser Arbeit verwendeten Luftbilder im Rahmen von Nutzerkampagnen zum Wacken Open Air 2016 und dem Evangelischen Kirchentag 2017 aufgenommen wurden. Mit Hilfe der aufgenommenen Luftbilder wurden anschließend 3D Informationen in Form von Digitalen Oberflächenmodellen generiert.

Das Ziel dieser Arbeit ist nun die Untersuchung, in welchen Bereichen die Verwendung von 3D Informationen aus Fernerkundungsdaten einen Mehrwert für Fragestellungen des Bevölkerungsschutzes bei Großveranstaltungen darstellt. Ein Aspekt ist dabei die Verwendung einer neuen Methode zur automatischen Ableitung und Fusion von 2D und 3D Veränderungen zwischen unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten und deren operationelle Nutzung. Die vorliegende Arbeit umfasst einen kurzen Überblick zum aktuellen Stand der Technik bzgl. der Ableitung von 3D Informationen aus Fernerkundungsdaten unterschiedlicher luft- und satellitengestützter Sensoren. Anschließend widmen sich die folgenden Kapitel der Beschreibung der Untersuchungsgebiete, der Erläuterung der Datengrundlage und der verwendeten Methodik zur 3D Informationsgewinnung, bzw. der weiteren Analyse der Daten zur Berechnung von Veränderungen zwischen den Aufnahmen vor und während der Veranstaltungen. Auf die Vorstellung der Ergebnisse folgen verschiedene Verwendungsmöglichkeiten in der Praxis, sowie der Diskussionsteil. Zum Abschluss der Arbeit wird ein Ausblick auf künftige Entwicklungen gegeben.

---

## 2 Gewinnung und Nutzung von 3D Informationen - Stand der Technik

In der vorliegenden Studie werden aus optischen Luftbildern DOM abgeleitet, die streng genommen nur zweieinhalb-dimensionale Informationen (2,5D) darstellen, da nur ein Höhenwert pro x-y-Koordinate existiert. Im Gegensatz dazu werden bei der echten Dreidimensionalität (3D) jedem in der Lage gegebenen Punkt mehrere Höhenwerte zugeordnet, wodurch auch senkrechte Oberflächenformen und Überhänge modelliert werden können (Longley et al., 2005). Abbildung 2 zeigt einen Vergleich zwischen einer 2,5D und 3D Darstellung von Schloss Elmau abgeleitet aus Luftbildern eines flugzeuggestützten Kamerasystems (links) und einer Befliegung mit einer Drohne (rechts). Man erkennt deutlich die typischen Verzerrungen an Gebäudefassaden und Bäumen im linken 2,5D Modell. In der Literatur wird allgemein von 3D gesprochen, sobald Höheninformationen berücksichtigt werden, daher wird im Folgenden zur Vereinfachung auch hier der Begriff 3D beibehalten.



**Abbildung 2: Beispiel für eine 2,5D (links) und 3D (rechts) Visualisierung: Schloss Elmau (DLR).**

### 2.1 Optische Aufnahmesysteme

Zu den optischen Aufnahmesystemen zählen an dieser Stelle alle passiven Systeme, die reflektiertes Licht aufnehmen ohne zuvor eigene Signale auszusenden. Die Aufnahmesysteme können auf verschiedensten Plattformen, z.B. Satelliten, Flugzeugen, Hubschraubern oder auch auf Drohnen installiert werden. Um aus optischen Fernerkundungsdaten über photogrammetrische Verfahren 3D Informationen zu erstellen, werden mehrere überlappende Aufnahmen der Oberfläche aus unterschiedlichen Perspektiven benötigt (Reinartz et al., 2006; Hirschmüller, 2008). Im Fall von Satellitendaten werden bevorzugt Stereo-Daten (zweifache Aufnahmen) oder Triplets (dreifache Aufnahmen) verwendet, die während eines Überflugs aufgenommen werden. Diese Art der Aufnahme wird bislang allerdings von nur wenigen Betreibern angeboten. Einzelaufnahmen unterschiedlicher Überflüge und ggf. sogar unterschiedlicher Sensoren können ebenfalls genutzt werden, jedoch sind hier möglichst flaches Gelände und geringe Veränderungen zwischen den Aufnahmen, sowie zueinander passende Stereowinkel notwendig (Gstaiger et al., 2013). Der große Vorteil von Satellitendaten sind die Erfassung vergleichsweise großer Flächen und die geometrischen Auflösungen („Pixelgröße“) kommerzieller Daten, z.B. des Satelliten WorldView-4, welche inzwischen bei bis zu 31cm liegen (DigitalGlobe, 2018). Die Nachteile liegen in der Notwendigkeit von wolkenfreien

---

Wetterverhältnissen und der geringen Flexibilität bei der Datenaufnahme. Die Aufnahmen benötigen einen von Betreiber und Sensor abhängigen, zeitlichen Vorlauf zur Bestellung und Programmierung. Für eine Wiederholung der Aufnahme muss auf den nächsten Überflug gewartet werden, der abhängig von der Zielregion, der Anzahl verfügbarer Satelliten und deren Auslastung ggf. mehrere Tage dauern kann (Gähler, 2016).

Der Betrieb von Luftbildkamarasystemen ist deutlich flexibler. Auch hier muss ein gewisser Planungszeitraum vorab für die Flug- und Personalplanung und ggf. Beantragung von Sondergenehmigungen berücksichtigt werden. Einmal im Einsatz kann ein Gebiet im Rahmen eines Monitorings jedoch innerhalb kurzer Abstände mehrfach befliegen werden. Auch kurzfristige Anpassungen der Flugplanung, um beispielsweise einem Hochwasserscheitel zu folgen, sind möglich. Die Bildaufnahme erfolgt entlang eines Flugpfades durch wiederholte Aufnahme von Einzelbildern mit Bildüberlappungen von meist mindestens 66% zur späteren Berechnung der 3D Modelle. Je nach Aufnahmesystem und Flughöhe werden dabei Bodenauflösungen der Luftbilder von wenigen Zentimetern erreicht (Kurz et al., 2012; Kurz et al., 2014).

Aufnahmesysteme auf ferngesteuerten Flugplattformen (Drohnen) werden üblicherweise als Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Unmanned Aerial Systems (UAS) oder Remotely-Piloted Aerial Systems (RPAS) bezeichnet und werden meist synonym verwendet. Diese Aufnahmesysteme finden inzwischen auch im Bereich des Katastrophenmanagements immer größeren Zuspruch (Skrzypietz, 2011; Colomina & Molina, 2014; Restas, 2015; Erdelj et al., 2017; FSD, 2018). Die Vorteile liegen hier allem voran in der Schnelligkeit und Flexibilität der Datenerfassung vor Ort, da die aufwändige Vorplanung in der Regel entfällt (Colomina & Molina, 2014; Greenwood, 2015; Köhler, 2016). Hinzu kommt, dass die Systeme sehr hohe Auflösungen liefern, immer kostengünstiger werden und sich somit deutlich von vergleichsweise kostenintensiven Satellitenaufnahmen und Luftbildaufnahmen abheben (Colomina & Molina, 2014; Greenwood, 2015; Köhler, 2016). Neben der starken Abhängigkeit von Wind- und Wetterverhältnissen ist ein weiterer Nachteil die kurze Betriebszeit kleiner und einfacher Systeme, da die Batterien meist nach kurzer Zeit gewechselt werden müssen. Somit sind besonders die einfachen Systeme in ihrer Reichweite und Aufnahmekapazität eingeschränkt. Um die räumliche Abdeckung zu erhöhen, wird intensiv an Systemen zum Betrieb von UAV Schwärmen geforscht, in denen mehrere UAVs ein Gebiet untereinander aufteilen und dieses parallel befliegen (Erdelj et al., 2017; Manß et al., 2017). Ein weiterer Nachteil ist die Einschränkung bzgl. der Traglast kleiner und günstiger UAVs. So können nur einfache Instrumente zur Lage- und Positionserfassung transportiert werden, was die Datenqualität vermindert und den nachträglichen Verarbeitungsaufwand zur Ableitung hochwertiger 3D Informationen erhöht (Remondino et al., 2012; Colomina & Molina 2014; Cesetti et al., 2015; Zhuo et al., 2015).

Die Herausforderung besteht nun darin, aus den 2D Satelliten- und Luftbilddaten eine 3D Oberfläche zu rekonstruieren. In der menschlichen Wahrnehmung geschieht das über die eigene Bewegung im Raum und die Beobachtung der Veränderung von Objekten um uns herum während dieser Bewegung. Im Bereich der Computer Vision existiert hierzu ein ähnliches photogrammetrisches Verfahren, das als Structure from Motion (SfM) Technik bezeichnet wird und u.a. in den Geowissenschaften vielseitig Verwendung findet (Westoby et al., 2012). Es gilt, in 2D Bildpaaren gleiche Pixel z.B. an Objektkanten zu finden und diese zu verknüpfen. Hierzu existieren verschiedene Algorithmen, wie z.B. das Semiglobal-Matching-Verfahren (SGM)

---

(d'Angelo & Reinartz, 2011, Hirschmüller, 2008), Mean Sum of Square Difference (Mean SSD) (Wozencraft & Jacobs, 1965), oder Energy Minimisation (Pierrot-Deseilligny & Paparoditis, 2006). Aus dem Versatz der Punkte in den Bildern wird unter Berücksichtigung der Aufnahmegeometrie die jeweilige Höheninformation für jeden Punkt abgeleitet. Es entsteht eine 3D Punktwolke, aus der schließlich die Oberfläche rekonstruiert wird. Die geometrische Auflösung des DOM liegt etwa bei der zweifachen geometrischen Auflösung der ursprünglichen optischen Daten. Die Nachteile der SfM Verarbeitung liegen im Auftreten von Datenlücken, einem Verlust von Informationen durch beleuchtungsbedingten Schattenwurf, geometrische Abschattung, einem möglichen Bildversatz, sowie der Glättung von Kanten aufgrund der Interpolation von Ausreißern (Stal et al., 2013). Die Qualität des abgeleiteten Oberflächenmodells hängt sowohl von Aufnahmeart, der Anzahl verfügbarer Stereopaare und der geometrischen Auflösung der Daten, als auch vom Gelände und der Landbedeckung ab (Bernard et al., 2012; Carl et al., 2013; Durand et al., 2013; Martinis et al., 2017).

## 2.2 Radarsysteme

Radarsysteme (aktive Systeme) basieren im Gegensatz zu den oben beschriebenen passiven Systemen auf der Aussendung von elektromagnetischer Strahlung, welche an der Erdoberfläche reflektiert wird. Die reflektierten Signale werden von einer Antenne empfangen und hinsichtlich der Intensität und Phase der Strahlung ausgewertet. Die Reflexion des Radarsignals wird dabei sowohl von Material- und Oberflächeneigenschaften, als auch von Wellenlängen und Polarisationen der Signale beeinflusst (Albertz, 2007; Matikainen et al., 2016). Radarsysteme mit synthetischer Apertur (künstlich verlängerte Antenne) werden als SAR-Systeme bezeichnet (engl. Synthetic Apertur Radar). Die synthetische Apertur wird durch die Kombination nacheinander folgender Radaraufnahmen entlang der Flugbahn des Sensors gebildet, wodurch in einem Schritt der Nachprozessierung eine erhöhte räumliche Auflösung in und quer zur Flugrichtung erreicht werden kann. Daten kommerzieller Radarsatelliten, wie z.B. TerraSAR-X oder COSMO-SkyMed, erzielen inzwischen Bodenaufösungen bis zu einem Meter und genauer (Airbus Defence and Space, 2018; e-geos, 2016).

Bei der Auswertung von Radardaten wird zwischen Radargrammetrieverfahren und SAR-Interferometrie unterschieden (Martinis et al., 2017). Höheninformationen der Erdoberfläche können großflächig oder punktuell erfasst werden. Während die SAR Interferometrie Phasenunterschiede zwischen Aufnahmen aus unterschiedlichen Blickwinkeln nutzt (Massonnet, 1998), werden bei der Radargrammetrie mit Hilfe von stereoskopischen Messungen ähnlich denen der Photogrammetrie Höheninformationen berechnet und dabei Intensitäts- und Entfernungsinformationen verwendet (Meric et al. 2009). Darüber hinaus gibt es Methoden zur Ableitung von Daten aus einem Überflug (Single-Pass) (Rossi & Gernhardt, 2013), sowie Methoden, die eine ganze Zeitreihe verwenden (Multi-Pass) (Wang et al., 2017). Je nach Sensor, Methodik und Umfang der verfügbaren Daten können Oberflächenmodelle und feinste Veränderungen der Oberfläche bis in den Millimeterbereich abgebildet werden. Radarsignale können aufgrund ihrer Wellenlänge Wolken durchdringen und sind somit weitestgehend wetter- und beleuchtungsunabhängig, jedoch ist die Aufnahme und Auswertung der Daten aufgrund der damit einhergehenden physikalischen Effekte sehr komplex (Rodriguez & Martin, 1992; Sefercik & Dana, 2011; Wang et al., 2017). Besonders in urbanen Gebieten kommt es zu geometrischen Effekten wie Überlagerungen, Verkürzungen und Schatten. Hinzu kommt der

---

sogenannte „Speckle“-Effekt bei Oberflächen mit einer zufälligen Aufsummierung von Rückstreuungen verschiedenen Ursprungs (Rodriguez & Martin, 1992).

Mit Hilfe luftgestützter Radarsysteme lassen sich Oberflächeninformationen sowohl über Single-, als auch Multi-Pass-Interferometrie ableiten. Für die Anwendung von Single-Pass-Interferometrie sind sowohl die Sende- als auch die Empfangsantenne räumlich versetzt am Flugzeug angebracht. Das am DLR entwickelte F-SAR System operiert beispielsweise in verschiedenen Wellenlängen von X- bis P-Band und erreicht Genauigkeiten unter 30cm für die abgeleiteten Oberflächenmodelle. Für Multi-Pass-Auswertungen werden sogar Genauigkeiten von unter 10cm erreicht (Pinheiro, 2017).

SAR-Systeme lassen sich derzeit nur schwer verkleinern ohne einhergehenden Leistungsverlust, daher finden sich nur wenige Beiträge zu SAR-Systemen mit 3D Anwendungen auf UAVs (Colomina & Molina, 2014; Remy et al., 2012).

### **2.3 LiDAR-Systeme**

Laserscanner (engl. Light Detection and Ranging – LiDAR) können sowohl auf Flugzeugen und Hubschraubern als auch auf UAVs eingesetzt werden. Als aktives System ist Airborne Laser Scanning (ALS) eine tageslichtunabhängige Methode zur Erstellung hochgenauer 3D Daten. ALS arbeitet mit gerichteten Laserimpulsen, die an der Oberfläche reflektiert werden und mit Hilfe derer die Entfernung zwischen Sensor und Oberfläche gemessen wird. Der Abstand kann entweder anhand der Laufzeit der ausgesendeten Signale bis zum erneuten Empfang oder anhand von Phasenunterschieden zwischen gesendeten und empfangenen Pulsfolgen berechnet werden. Kontinuierlich messende Systeme (continuous wave – CW) arbeiten mit Berechnungen aus Phasenunterschieden. Beide Systeme können zusätzlich die Energie der reflektierten Signale messen. Zusammen mit den hochgenauen Positions- und Orientierungsinformationen von GPS/INS (Global Positioning System / Inertial Navigation System) entstehen 3D Punktwolken, welche die Geländeoberfläche mit allen darauf befindlichen Objekten widerspiegeln. Besonders ist dabei, dass je nach Wellenlängenbereich und Oberflächenbeschaffenheit, z.B. an Bäumen, Mehrfachreflexionen entstehen, mit Hilfe derer sich sowohl das Kronendach, als auch die Bodenoberfläche getrennt modellieren lassen. Die Genauigkeit der Daten hängt dabei von vielen Faktoren, wie z.B. der verwendeten Sensorik, der Wellenlänge, den Reflexionseigenschaften der Oberfläche, der Abtastrate (Fluggeschwindigkeit und Flughöhe), sowie der Lage- und Orientierungsgenauigkeit ab. Punktdichten von mehreren Dutzend bis hin zu mehreren hundert Punkten pro m<sup>2</sup> sind möglich und resultieren in geometrischen Auflösungen und Höhengenaugigkeiten von wenigen Zentimetern (Albertz, 2007; Matikainen et al., 2016; Wehr & Lohr, 1999). Die Nachteile dieses Verfahrens liegen laut Baltsavias & Gruen (2003) allerdings in möglichen Fehlern aufgrund von Mehrfachreflexionen nahe vertikaler Strukturen, einer geringeren Abdeckung, längerer Flugzeit und der anspruchsvolleren Flugplanung im Vergleich zu einfachen Luftbilddaufnahmen. Hinzu kommt, dass die Daten alleine ohne zusätzliche Informationen, z.B. optische Luftbilddaten, nur schwer auszuwerten sind. Im Vergleich zu Oberflächenmodellen aus optischen Daten bleibt bei 3D Rekonstruktionen aus LiDAR Daten ein höherer Detailgrad erhalten. ALS findet somit Verwendung u.a. in der Kartierung von Korridoren (Straßen, Gleise, Wasserwege, etc.), Stromtrassen und –masten, der Vermessung von Vegetation (u.a. Waldgrenzen, Baumhöhen, Dichte der Baumbestände, Biomasseabschätzung), Gletschern, Küstengebieten (z.B. Dünen, Küstenerosion), sowie der Erstellung von hochgenauen Gelände-



---

und Oberflächenmodellen z.B. zur Ableitung von 3D Stadtmodellen (Matikainen et al., 2016; Wehr & Lohr, 1999).

Während die Verwendung von Laserscan-Daten zusammen mit Luftbildern in der traditionellen Photogrammetrie inzwischen gängig ist, sind Laserscan-Befliegungen mit UAS noch immer schwierig. Das Preis-Leistungsverhältnis von LiDAR und dessen Größe in Verbindung mit den negativen Auswirkungen der starken Flugdynamik auf den Aufnahmeprozess führen dazu, dass diese Systeme nur sehr spezialisierte Anwender finden (Zhou et al., 2012; Graham, 2015). Choi et al. (2009) stellen ein UAV-basiertes System für Rapid Mapping Einsätze vor, das sowohl mit einer optischen, als auch mit einer Laserkomponente arbeitet und somit ein UAV mit einer Nutzlast von 70kg benötigt. Colomina und Molina (2014) listen auch neuere und kleinere Laser Scanner bis 2kg auf, welche speziell für die Verwendung auf UAVs entwickelt wurden, jedoch gehen kleinere Systeme oft mit einfacheren IMU (Inertial Measurement Unit) Systemen einher und führen so zu einem Mehraufwand bei der Nachbereitung für qualitativ hochwertige Ergebnisse.

## **2.4 Veränderungsanalysen**

Bei vielen Anwendungen reicht die Betrachtung der Oberfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht, sondern erst die Entwicklung über die Zeit bringt die entscheidende Information. Die scheinbar einfachste und zugleich eine der wichtigsten Fragestellungen ist die der Veränderung zwischen zwei Zeitpunkten – im Fall von Naturkatastrophen meist vor und nach dem Ereignis für die Schadensfeststellung. Doch trotz zunehmender Datenverfügbarkeit mangelt es häufig an geeigneten und vor allem an hochaufgelösten Referenzdatensätzen: Wo besonders genaue Veränderungen wie z.B. Schäden an Einzelgebäuden detektiert werden sollen, sind Datensätze erforderlich, die sich direkt vergleichen lassen. Zusätzlich müssen bei Verwendung unterschiedlicher Sensoren sensorbedingte Fehlerquellen bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Qin et al. (2016) beschreiben in ihrer Studie die gängigsten methodischen Ansätze und Anwendungen für 3D Veränderungsanalysen. Im Vergleich zu Veränderungsanalysen von 2D Daten liegen die Vorteile darin, dass Volumenunterschiede berechnet werden können, die perspektivischen Effekte, z.B. Abschattungen, reduziert und Höhenmessungen unabhängig von der Beleuchtungssituation sind. Nachteile sehen die Autoren in möglichen Ungenauigkeiten der 3D Messungen, welche zu Artefakten führen, sowie die hohen Kosten der notwendigen Datensätze. Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Ansatz zur 2D und 3D Veränderungsanalyse wurde in Tian & Dezert, 2018, veröffentlicht und wird in Kapitel 5.2 näher erläutert.

## **2.5 Verwendung im Katastrophenmanagement**

Auch Akteure des Katastrophenschutzes entdecken die Möglichkeiten der Verwendung von Fernerkundungsdaten und den daraus abgeleiteten 3D Informationen für sich (Biliecki et al. 2015; Lechner & Gähler 2017, Schröter 2016). In allen klassischen Phasen des Katastrophenmanagements (vgl.

Abbildung 1) finden sich Anwendungsmöglichkeiten für Fernerkundungsdaten und ebenso für daraus abgeleitete 3D Informationen. Während der Vorbereitungsphase lassen sich Oberflächen-

---

und Gebäudemodelle in Analyse- und Planungsprozesse einbeziehen. Beispiele sind die Modellierung von Schadstoffausbreitungen (Lichter et al. 2015), die Abschätzung von Starkregen- oder Hochwassergefahren und -risiken (Kruaß & Fischer, 2016; Sanders, 2007; LHW, 2018) und entsprechend angepasste Evakuierungs- oder Standortplanungen (Lee & Zlatanova 2008). Des Weiteren werden 3D Informationen aus Fernerkundungsdaten zur Beobachtung und Erforschung von Hangbewegungen eingesetzt, um deren Ursachen und Verläufe zu studieren und Erkenntnisse für mögliche Frühwarnsysteme zu gewinnen (Nichol & Wong 2005; Martha et al., 2010; Turner et al., 2015). Ein weiterer Aspekt ist der Einsatz von 3D Welten zur Vorbereitung und Schulung von Einsatzkräften (Döllner et al., 2006).

Während und nach dem Eintreten einer Katastrophe gilt es, schnell Katastrophenhilfe zu leisten. Hierfür ist ein möglichst realitätsnahes und aktuelles Lagebild notwendig (Alexander, 2012). Die Situation sollte zeitnah, flächendeckend und detailgetreu erfasst werden, damit Einsatzkräfte und –mittel effizient eingesetzt werden können. Hierzu kann eine auf Fernerkundungsdaten basierte Schadensanalyse beitragen. Beschädigte Strukturen können flächendeckend oder punktuell erfasst und von Fachleuten beurteilt werden (Frassl et al., 2012; Jüpner et al, 2015), Schadensanalysen z.B. nach Erdbeben geben Aufschluss über den Grad der Vertrümmerung und mögliche Hindernisse auf Zufahrtswegen, die eine Planung von Ausweichrouten erfordern (Dong & Shan, 2013; Tian et al., 2015).

Im Nachgang des Ereignisses können Veränderungsanalysen beispielsweise zur Beobachtung der Wiederaufbaumaßnahmen genutzt werden (Qin et al., 2016).

Auch Flüchtlingslager wurden in der Vergangenheit bereits mit Hilfe von 3D Informationen aus Fernerkundungsdaten erforscht, um Details zur Zahl der Flüchtlinge und der Entwicklung der Lager abzuschätzen oder das Gelände hinsichtlich der Errichtung von Trinkwasser- und Sanitäreinrichtungen zu untersuchen (Gayer, 2008; Tiede & Lang, 2010; Gstaiger et al., 2013; Füreder et al., 2015).



---

### 3 Untersuchungsgebiete

Zur Untersuchung von 3D Informationen, die für den Bevölkerungsschutz nützlich sein können, dienten zwei Großveranstaltungen in Deutschland als Fallbeispiele – das Musikfestival Wacken Open Air 2016 und die Feierlichkeiten zum evangelischen Kirchentag 2017 (siehe Abbildung 3). Beide Veranstaltungen waren durch hohes Besucheraufkommen gekennzeichnet und fanden außerhalb städtischer Gebiete auf freiem Gelände statt, so dass entsprechende mobile Aufbauten, sowie extra angelegte Verkehrsinfrastruktur errichtet werden mussten.

Das Heavy Metal Festival Wacken Open Air findet jährlich in der Gemeinde Wacken im Kreis Steinburg statt. Die Gemeinde liegt im westlichen Schleswig-Holstein nahe des Nord-Ostsee-Kanals und ist somit Teil der Großlandschaft Norddeutsches Tiefland und des Unternaturraums Heide-Itzehoer Geest mit weitestgehend grünlandgeprägter Kulturlandschaft (BfN, 2012a). Während die Gemeinde selbst 1.900 Einwohner zählt (Gemeinde Wacken, 2018), kamen 2016 für drei Tage 75.000 Festivalbesucher, sowie rund 9.500 weitere Teilnehmer hinzu (ICS, 2017). Für die Veränderungsanalyse wurden zwei kleine Testgebiete ausgewählt, die repräsentativ für die Belegung der Campingflächen sind und in Kapitel 6.2. näher beschrieben werden.

Die Feierlichkeiten zum evangelischen Kirchentag fanden 2017 südlich der Lutherstadt Wittenberg in der Gemeinde Wittenberg statt. Die Gemeinde liegt in Sachsen-Anhalt und zählt ebenfalls zur Großlandschaft Norddeutsches Tiefland, jedoch zum Unternaturraum Elbe-Elster-Tiefland mit ackergeprägter offener Kulturlandschaft (BfN, 2012b). Zur Veranstaltung zählten sowohl verschiedene Standorte in der Stadt, als auch eine große Fläche südlich der Elbe. Diese Fläche lag im Überschwemmungsgebiet, das bei einem Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit (HQ20) vollständig überschwemmt wird (LHW, 2018). Zur Veranstaltung wurden zu den rund 48.500 Einwohnern der Stadt (Lutherstadt Wittenberg, 2017) über 100.000 weitere Besucher erwartet und für den Gottesdienst auf der Elbwiese ein Bühnenbereich mit Besuchertribüne, sowie befestigte Zugänge zum Gelände und eine mobile Zusatzbrücke über die Elbe errichtet. Auch für das Testgebiet Wittenberg wurden zwei kleine Bereiche für die 3D Change Detection ausgewählt, die zum einen den Backstage-Bereich, sowie eine Zufahrt zum Festgelände mit Straßensperren beinhalten und in Kapitel 6.2 detailliert beschrieben werden.



**Abbildung 3: Fotos des Wacken-Festivals 2016 (links) und den Feierlichkeiten zum Evangelischen Kirchentag 2017 in Wittenberg (rechts) (DLR).**

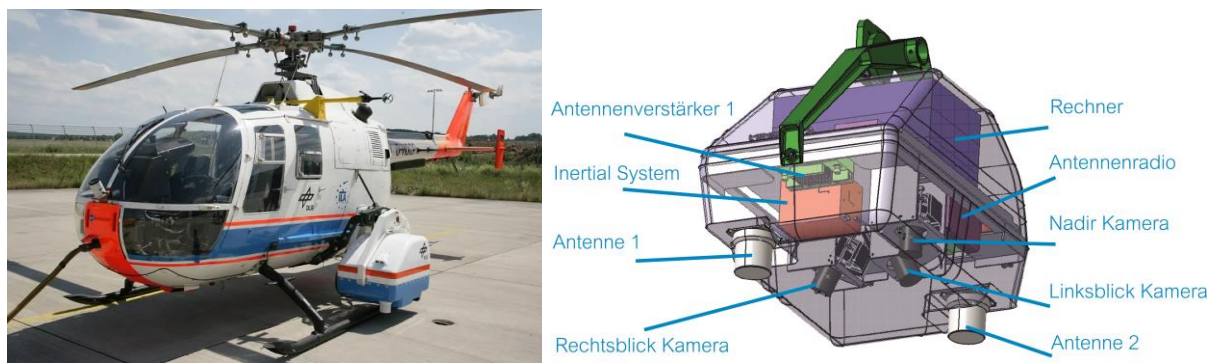
---

## 4 Datengrundlage

Die Datengrundlage dieser Arbeit besteht aus Luftbildern, die mit Hilfe des 4k Kamerasystems des DLR zum Wacken Open Air 2016 und zur Feier des Evangelischen Kirchentags 2017 aufgenommen und zu digitalen Oberflächenmodellen weiterverarbeitet wurden. Dieses Kapitel beschreibt das Aufnahmesystem, sowie die aufgenommene Datengrundlage.

### 4.1 Das 4k Kamerasystem des DLR

Mit dem 4k Kamerasystem (siehe Abbildung 4) hat das DLR eine kostengünstige Alternative zu metrischen Luftbildkamerasystemen mit konstanten Elementen der inneren Orientierung entwickelt (Kurz et al., 2014). Das Gesamtsystem gliedert sich in eine luftgestützte und eine bodengebundene Komponente. An Bord des Hubschraubers befindet sich das 4k Kamerasystem, bestehend aus drei handelsüblichen Spiegelreflexkameras, einer Echtzeit-GPS/INS-Einheit, einer Recheninfrastruktur zur Datenverarbeitung und zwei Antennen für die Mikrowellen-Datenverbindung mit einer Übertragungsrate von 11Mbit/s. Zwei der drei Kameras blicken schräg nach links bzw. rechts unten und erreichen ein gemeinsames Sichtfeld von etwa 75°. Die dritte Kamera ist senkrecht nach unten ausgerichtet und kann für die Aufnahme von Videos in 4k Qualität verwendet werden.



**Abbildung 4: Das montierte 4k Kamerasystem (links) und seine Komponenten (rechts)**

In der Standardkonfiguration nehmen die beiden schräg gerichteten Kameras Luftbilder auf, welche noch an Bord des Hubschraubers orthorektifiziert und weiter analysiert werden können. Damit lassen sich beispielsweise Verkehrsdaten wie Fahrzeuganzahl, Fahrtrichtung und Reisegeschwindigkeit unmittelbar ableiten (Kurz, 2012; Türmer, 2014). Die Luftbilder und Zusatzdaten werden anschließend per Datenlink zu einer Bodenstation gesendet, wo sie empfangen, ggf. noch weiterverarbeitet und über ein webbasiertes Portal visualisiert und als Kartenprodukt ausgedruckt werden können. Eine der wichtigsten Eigenschaften des Systems ist die Schnelligkeit der Informationsbereitstellung. Die Daten und Analyseergebnisse können innerhalb von Sekunden vor Ort zur Verfügung stehen und an die zuständigen Personen und Einsatzkräfte weitergegeben werden. Ein entscheidender Vorteil, denn die Aktualität von Informationen ist von besonderer Bedeutung in vielen Szenarien des Katastrophenmanagements (Alexander, 2012).

Das Kamerasystem selbst wurde hauptsächlich im Rahmen des DLR-Forschungsprojektes VABENE++ (Verkehrsmanagement bei Großereignissen und Katastrophen) entwickelt (DLR,

---

2018) und erstmals 2014 zur Unterstützung der nationalen Übung der Medizinischen Task Force des Bundes eingesetzt (Gstaiger, 2015). Seitdem hat das System verschiedene Katastrophenschutzübungen und Einsätze begleitet. Für die Flüge des Wacken Open Air und des Evangelischen Kirchentages wurde das System auf einem Hubschrauber des Typs BO 105 installiert (siehe Abbildung 4), es wird derzeit jedoch zusätzlich für den Hubschraubertyp EC 135 zugelassen und ist dann auf den meisten Hubschraubern des Zivil- und Katastrophenschutzes einsetzbar.

## **4.2 Luftbilddaten**

Für diese Arbeit wurden zwei Luftbilddatensätze verwendet. Der erste Datensatz „Wacken“ umfasst Aufnahmen des Wacken Open Air von den Nachmittagen des 2. August 2016 und 4. August 2016 (siehe Abbildung 7). Die Daten decken ein etwa 1km x 1,5km großes Gebiet ab, das mit jeweils 54 Luftbildern am 2. August bzw. 60 Luftbildern am 4. August der Links- und Rechtsblick-Kameras aus einer Flughöhe von 600m am 2. August bzw. 650m am 4. August über Grund und mit einem Überlapp von 90% in Flugrichtung und 60% senkrecht zur Flugrichtung aufgenommen wurde.

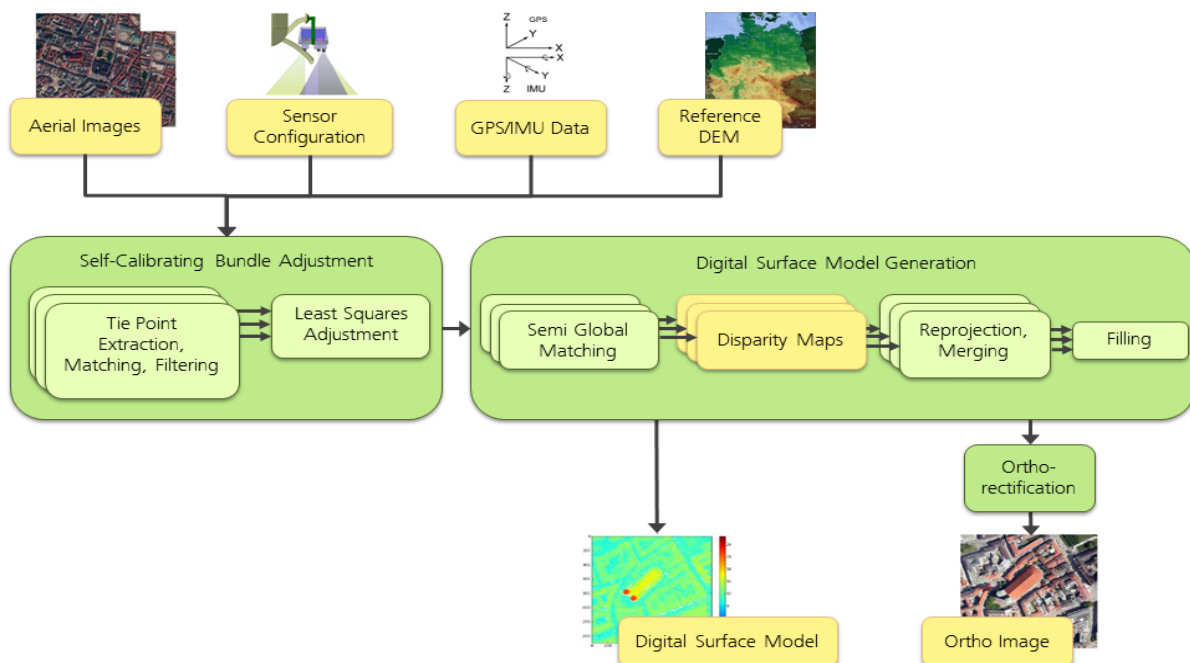
Die Daten des Evangelischen Kirchentags wurden am 24. Mai 2017 am späten Nachmittag und am 28. Mai 2017 vormittags aufgenommen. Der Datensatz „Wittenberg“ umfasst etwa 5km x 5km, die mit insgesamt 621 Luftbildern am 24. Mai bzw. 554 Luftbildern am 28. Mai aus einer Flughöhe von 850m am 24. Mai bzw. 900m am 28. Mai über Grund mit einer Überlappung von 90% in Flugrichtung und 70% senkrecht zur Flugrichtung aufgenommen wurden (siehe Abbildung 8).

## 5 Methodik

Im Folgenden werden sowohl die Methode zur Berechnung der Oberflächenmodelle aus den Luftbildern des 4k Kamerasystems beschrieben, als auch die 2D und 3D Veränderungsanalysen nach Gstaiger et al., 2018, erläutert.

### 5.1 Berechnung digitaler Oberflächenmodelle

Zunächst nimmt das 4k-System während eines Überflugs oder mehrerer Überflüge in kurzen Zeitabständen wiederholt Luftbilder auf und erfasst gleichzeitig die zugehörigen Positions- und Lagedaten des Systems zum Zeitpunkt der Bildaufnahme. Die folgenden Schritte zur Weiterverarbeitung sind in Abbildung 5 zu sehen und erfolgen im Nachgang an die Befliegung.



**Abbildung 5: Arbeitsschritte zur Erstellung digitaler Oberflächenmodelle aus Luftbildern (Gstaiger et al., 2018).**

Nach der Bildaufnahme werden die Luftbilder mit den Positions- und Lagedaten verknüpft und alle gemessenen GNSS (Global Navigation Satellite System)-Positionen mit Hilfe des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) differentiell korrigiert. Daraufhin werden alle gemessenen Bildpositionen und Einstellungen durch eine selbstkalibrierende Bündelblockausgleichung verbessert. Zusätzlich werden die Höhen eines globalen Oberflächenmodells (X-Band SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)) als weitere Informationsquelle für jeden identifizierten Verknüpfungspunkt (Tie Point) verwendet, um die Korrelationen während der Bündelblockausgleichung zu reduzieren und die Endgenauigkeiten zu verbessern. Nach der Ermittlung der Verknüpfungspunkte mit Hilfe von scale-invariant feature transform (SIFT)-basiertem Matching und anschließender Filterung, erfolgt die Bündelblockausgleichung basierend auf der Kleinsten Quadrate Methode. Anschließend werden dichte 3D Punkte mit Hilfe des SGM Verfahrens ermittelt, die zur Rekonstruktion der Geländeoberfläche dienen (d'Angelo & Reinartz, 2011). Es entstehen Disparitätsbilder, die

anschließend projiziert und zusammengeführt werden. Mögliche Lücken werden durch Interpolation oder die Verwendung eines Referenzmodells gefüllt. Die Berechnung findet automatisiert über die Prozessierungsinfrastruktur Catena statt, welche in der Abteilung Photogrammetrie und Bildanalyse des Instituts für Methodik der Fernerkundung des DLR zur Verarbeitung von Fernerkundungsdaten genutzt wird (Krauß et al., 2013). Die Prozesskette liefert digitale Oberflächenmodelle im Rasterformat zusammen mit orthorektifizierten Luftbildern, welche zum Schluss zur einfacheren Handhabung zu Kacheln mosaikiert werden. Aufgrund der Berechnungsschwierigkeiten der Oberflächenmodelle bei Gewässern, wurde die Elbe im Anwendungsbeispiel Wittenberg manuell ausmaskiert und auf die SRTM-Höhe von 104m gesetzt.

## 5.2 3D Veränderungsanalyse

Um veränderte Pixel tatsächlicher Objekte von spektralen Veränderungen aufgrund z.B. der Beleuchtung zu unterscheiden, werden bei der fusions-basierten 3D Veränderungsanalyse sowohl 2D Veränderungen, als auch zusätzliche Höheninformation berücksichtigt. Im Folgenden wird die Methodik zur automatischen, fusions-basierten 3D Veränderungsanalyse aus Tian & Dezert, 2018, zusammengefasst. Die verwendeten Verfahren und Algorithmen können dort im Detail nachgelesen werden. Diese Methode wurde zur Analyse von optischen Satellitendaten verwendet und erstmals in Gstaiger et al., 2018, zur Analyse von Luftbildern eingesetzt, um die Ergebnisse der fusions-basierten 3D Veränderungsanalyse mit denen einer 2D Veränderungsanalyse zu vergleichen.

Das Verfahren ermittelt so genannte Veränderungsindikatoren aus Oberflächenmodellen und den entsprechenden optischen Luft-/ oder Satellitenbildern. Diese Indikatoren werden schließlich basierend auf der Dempster-Shafer Fusionstheorie (Dempster, 1967; Shafer 1976) kombiniert. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, kann der Gesamtprozess in drei Schritte unterteilt werden: die Ermittlung der 2D/3D Veränderungsindikatoren, die Verbesserung der Indikatoren und die Zusammenführung der Indikatoren.

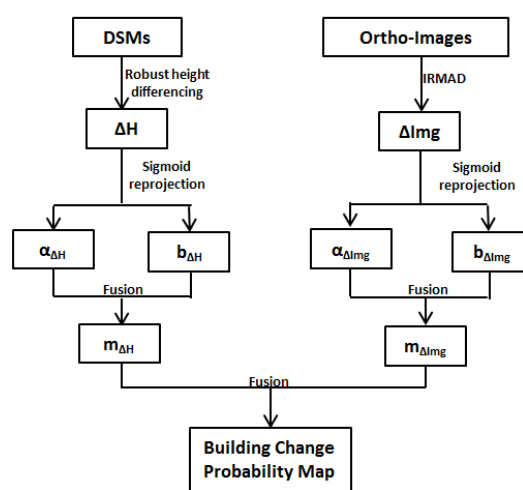


Abbildung 6: 3D Veränderungsanalyse nach Tian & Dezert, 2018.

Anhand der Oberflächenmodelle beider Zeitpunkte wird zunächst ein robustes Verfahren zur Ermittlung der Höhenunterschiede durchgeführt, um die Veränderungen  $\Delta H$  aus  $H_2-H_1$  zu

---

ermitteln. Die 2D Veränderungsanalyse der Luftbilder ergibt parallel dazu aus I2-I1  $\Delta I_{mg}$ . Im zweiten Schritt werden die Veränderungsindikatoren anhand der SIGMOID-Funktion normalisiert. Die Indikatoren werden unterteilt in Übereinstimmungsindices  $a$  und Abweichungsindices  $b$ , welche anhand der Dempster-Shafer Fusionstheorie kombiniert werden. Zum Schluss werden die beiden Funktionen von  $\Delta H$  und  $\Delta I_{mg}$  anhand des genannten Fusionsmodells zusammengeführt, um eine Wahrscheinlichkeitskarte zu erhalten, die Aufschluss über die tatsächlichen Veränderungen gibt. Die Ergebnisse der 3D Change Detection dieser Studie beziehen sich ausschließlich auf positive Veränderungen. Die Berechnung negativer Veränderungen ist auf ähnliche Weise möglich, sie wurde jedoch vernachlässigt, da fast ausschließlich positive Veränderungen zu beobachten waren.



## 6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erstellten Oberflächenmodelle des Wacken Open Air, sowie der Feier zum Evangelischen Kirchentag zusammen mit den daraus berechneten Veränderungsanalysen vorgestellt.

### 6.1 Digitale Oberflächenmodelle

Das Gelände des Wacken Open Air ist relativ flach und besteht aus dem zentralen Festivalbereich und mehreren aneinandergrenzenden Grundstücken, die durch Baumreihen, kleine Fahrwege oder Entwässerungskanäle getrennt sind und die während des Festivals als Campingflächen genutzt werden. Abbildung 7 zeigt eine Übersicht der Luftbilddatensätze mit den daraus abgeleiteten Oberflächenmodellen vom 02. und 04. August 2016 des Festivalgeländes. Detaildarstellungen folgen im nächsten Kapitel. Kurz vor der ersten Aufnahme (a, b) hatte die Anreise zum Festival bereits begonnen, weshalb die Zeltplätze teilweise belegt, allerdings noch nicht ausgelastet sind. Zur zweiten Aufnahme (c, d) war die Anreise abgeschlossen und das Festival hatte bereits begonnen, was auch an den deutlich stärker belegten Zeltplätzen zu erkennen ist. Im Südosten des Ausschnittes liegt der zentrale Bühnenbereich, an dem die Campingflächen direkt anschließen. Der Höhenbereich der Oberflächenmodelle (b, d) erstreckt sich von knapp 42m (blau) am tiefsten Punkt der durch das Gelände verlaufenden Senke bis knapp 81m (braun) an Baumkronen und Festzeltspitzen. Die hochaufgelösten Oberflächenmodelle bilden nicht nur leichte Steigungen und Gefälle innerhalb des Geländes ab, sondern zeigen auch detaillierte Strukturen von Vegetation, Gebäuden, Fahrzeugen und Zelten.

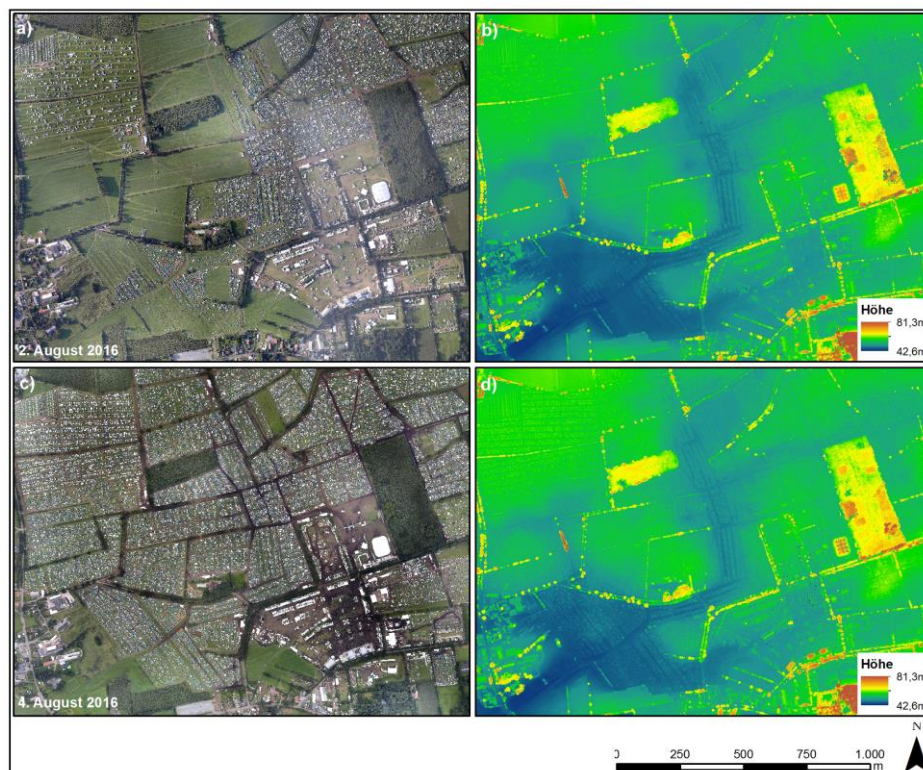
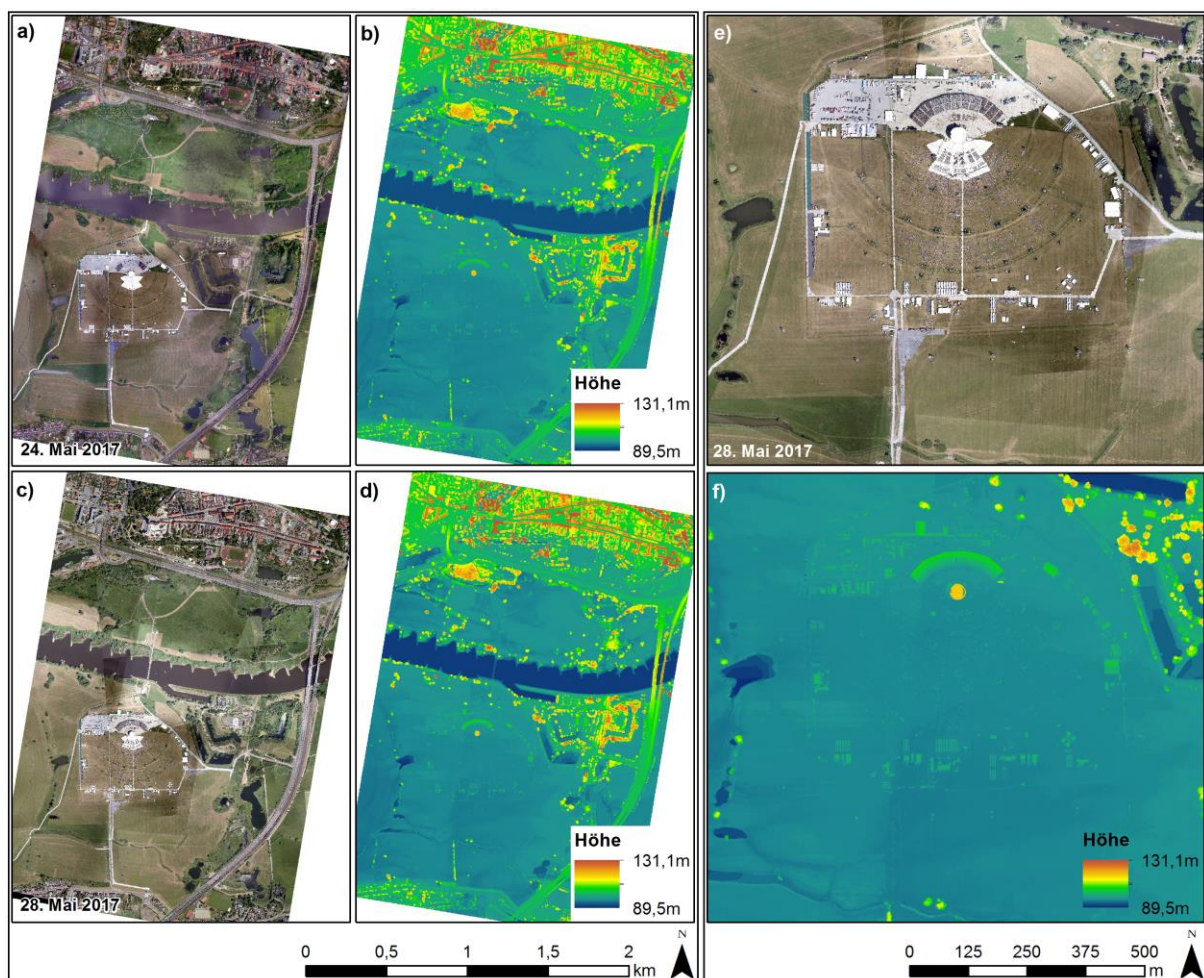


Abbildung 7: Übersicht der Luftbilder und berechneten Oberflächenmodelle des Wacken Open Air.

Das Aufnahmegebiet zur Feier des Evangelischen Kirchentags ist als Übersicht in Abbildung 8 dargestellt und erstreckt sich von der Innenstadt Wittenbergs nach Süden über die Elbe bis zu den nördlichen Häusern von Kienberge. Im Osten wird die Aufnahme von der Leipziger Straße und der daneben verlaufenden Eisenbahntrasse begrenzt. Die Aufnahmen vor (a, b) und während der Veranstaltung (c, d, e, f) ähneln sich zunächst sehr, da das Festgelände und der Bühnenbereich (e, f) bereits aufgebaut waren. Neben den Aufbauten auf dem Festgelände, wie Zelten, Containern, Toiletten, der großen runden Bühne, sowie der Besuchertribüne, sind auch städtische Strukturen und die umgebende Verkehrsinfrastruktur im den Luftbildern zu sehen und somit auch in den Oberflächenmodellen enthalten. Im Detail werden zum zweiten Aufnahmezeitpunkt Personengruppen auf der Wiese, sowie eine mobile Zusatzbrücke für Fußgänger über die Elbe sichtbar. Der Höhenbereich der Oberflächenmodelle erstreckt sich von knapp 90m bis knapp über 131m.



**Abbildung 8: Übersicht der Luftbilder und berechneten Oberflächenmodelle des Evangelischen Kirchentags.**

Die absolute Genauigkeit lässt sich aufgrund fehlender Bodeninformation beider Untersuchungsgebiete nicht bestimmen, jedoch lässt sich die Genauigkeit (RMSE) der Verknüpfungspunkt-Koordinaten bei allen Datensätzen auf etwa 0,1-0,3m schätzen. Die geometrische Auflösung der Luftbilder beträgt 9cm für das Wacken Open Air bzw. 11cm für die Feier zum Evangelischen Kirchentag, was zu einer Auflösung von etwa 20cm der berechneten Oberflächenmodelle führt.



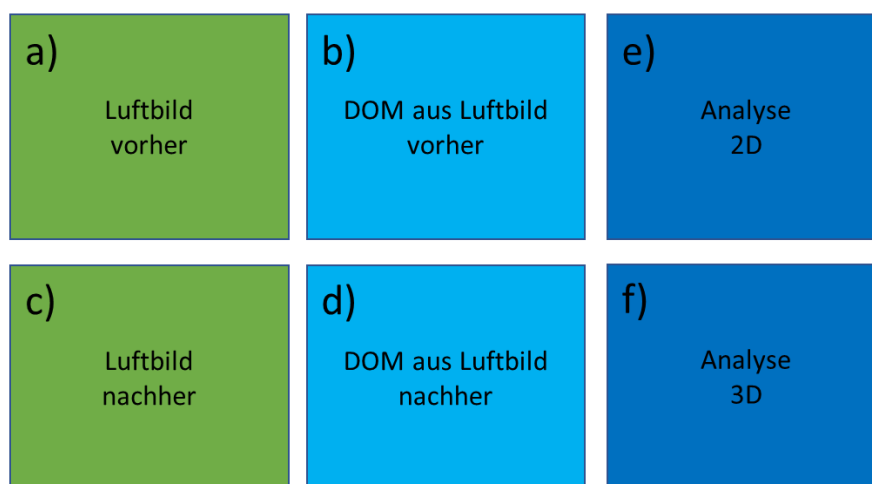
---

Die Elbe wurde wie in Kapitel 5.1 beschrieben manuell auf 104m gesetzt; die übrigen Oberflächengewässer wurden automatisch interpoliert und weisen die entsprechenden Interpolationsartefakte auf. Im Detail (siehe auch Abbildung 12 und Abbildung 13) ist ein deutliches Rauschen bei Gewässern und kontrastarmen Gebieten zu erkennen. Dieses entsteht aufgrund zu weniger oder qualitativ nicht ausreichender Matching-Punkte bei glatten und kontrastarmen Oberflächen, einer Bildsättigung bei starker Sonnenreflektion oder einer niedrigen Anzahl sich überlappender Bildpaare.

## 6.2 Automatische Veränderungsberechnung

Die Berechnung der 2D und schließlich fusions-basierten 3D Veränderungsanalysen erfolgt automatisch und für die gezeigten Ausschnitte innerhalb von Sekunden.

Die Ergebnisse der Veränderungsanalysen sind in Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13 zu sehen. Abbildung 9 zeigt den schematischen Aufbau der Abbildungen: a) und b) zeigen den Luftbilddatensatz und das dazugehörige DOM zum Zeitpunkt vor der Veranstaltung, c) und d) den Luftbilddatensatz und das dazugehörige DOM zum Zeitpunkt während der Veranstaltung, e) das Ergebnis der zugehörigen 2D Veränderungsanalyse und f) das Ergebnis der zugehörigen 3D Veränderungsanalyse jeweils in Wahrscheinlichkeiten für Veränderungen von 0 bis 1.



**Abbildung 9: Schematische Darstellung der Analyseergebnisse.**

Abbildung 10 und 11 zeigen Ausschnitte der Zeltplätze des Wacken Open Air. Diese wurden gewählt, um möglichst repräsentativ für die Bereiche des Zeltplatzes zu sein, in denen große Veränderungen zwischen beiden Aufnahmezeitpunkten stattgefunden haben. In Abbildung 10 sind weitestgehend Wohnmobile und Camper zu sehen, wohingegen Abbildung 11 auch kleinere Fahrzeuge und Zelte, sowie eine Sanitäreinrichtung beinhaltet. Die einzelnen Campingflächen sind durch klar erkennbare Wege getrennt. Die 2D Veränderungsanalyse zeigt jeweils sehr detaillierte Veränderungsstrukturen, die sich neben den tatsächlich veränderten Objekten, wie Fahrzeugen, Zelten oder anderen größeren Aufbauten befinden, aber auch Veränderungen des Weges/Untergrunds und der Vegetation beinhaltet. Farbveränderungen, sowie Reflektionen an Zeltdächern aufgrund der Sonneneinstrahlung werden ebenfalls als Veränderungen markiert. Es sind zahlreiche kleine Flächen oder scheinbare Umrisse zu erkennen, die jedoch nicht immer ein Objekt erkennen lassen. Die Farbskala reicht von blau bis rot, wobei

blau für keine Indikatoren (Wahrscheinlichkeit 0) und rot für die maximale Anzahl von Indikatoren und somit eine hohe Wahrscheinlichkeit (1) für Veränderung steht. Die Ergebnisse der 3D Veränderungsanalyse zeigen schließlich klare und trennbare Formen und deutlich weniger kleine Fragmente als die 2D Veränderungsanalyse. Die wahrscheinlichen Veränderungen stimmen gut mit den tatsächlichen Formen überein. Fehler aufgrund von Beleuchtungsunterschieden, wie z.B. beim roten Dach des großen Zeltes in Abbildung 11, die zu starken Änderungen bei der 2D Veränderungsanalyse führen, können im Rahmen der 3D Analyse korrigiert werden. Weitere Fehlerquellen, wie die fehlerhaft detektierten Veränderungen im gesättigten Bereich des Sanitärzeltes in Abbildung 11, sowie der Verlust von niedrigeren Zelten, konnte nicht vermieden werden.

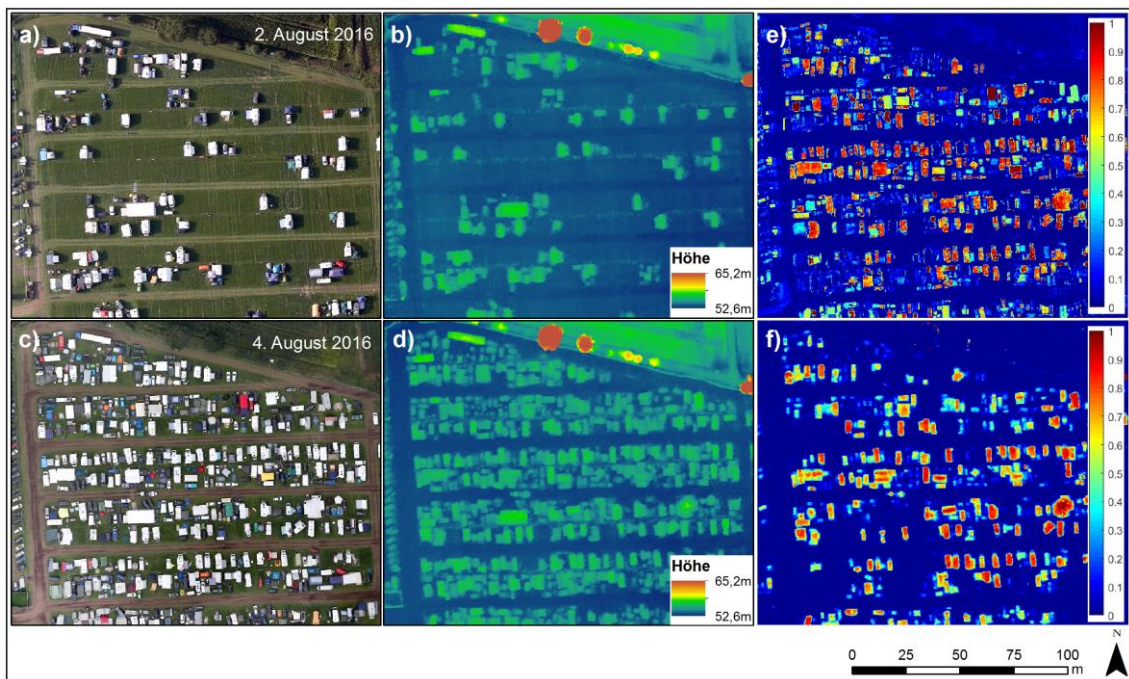


Abbildung 10: Wacken-1 (Wohnmobile und Camper) aus Gstaiger et al., 2018.

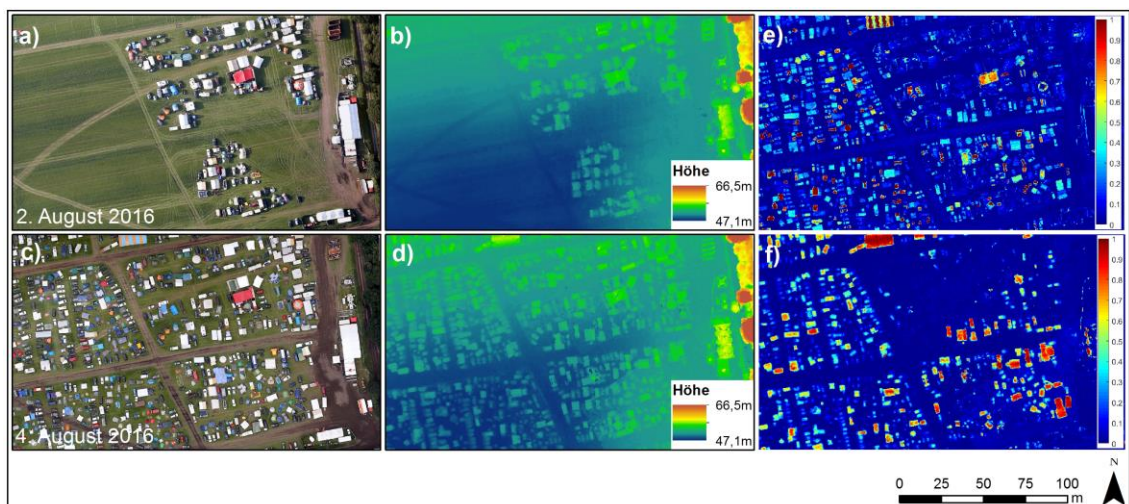


Abbildung 11: Wacken-2 (Fahrzeuge und Zelte, sowie eine Sanitäreinrichtung) aus Gstaiger et al., 2018.



Die Beispiele des Evangelischen Kirchentags zeigen eine Zufahrt zum Festgelände, die während der Veranstaltung für Fahrzeuge gesperrt wurde (Abbildung 12), sowie einen Teil der Besuchertribüne mit angeschlossenem Bereich für Organisatoren (Abbildung 13). Auffällig sind in beiden Beispielen wieder die vielen Details in der 2D Veränderungsanalyse, die vor allem in Abbildung 13 auffällig oft Schattenbereiche betreffen. Dies ist besonders hinter der großen und hohen Besuchertribüne zu sehen, die einen entsprechenden Schatten wirft. Die 3D Veränderungsanalyse ergibt auch in diesem Beispiel Änderungen mit relevanter Höheninformation, die wieder auf tatsächliche Objekte schließen lassen. Verloren gehen jedoch Informationen mit nicht ausreichender Höhenveränderung – so werden die Fahrbahnblockaden in Abbildung 12 aufgrund ihrer zu geringen Höhe in der 3D Veränderungsanalyse weitestgehend unterschlagen. Auch schmale Zäune werden meist ausgefiltert. Eine weitere Fehlerquelle sind detektierte Veränderungen an Vegetation (Bäumen). Die entstehenden Schatten führen nicht nur zu Fehldetektionen in der 2D Veränderungsanalyse, sondern können aufgrund der Fehler in den Oberflächenmodellen selbst von der 3D Veränderungsrechnung nicht ausgefiltert werden. Gut und sicher abgebildet werden hingegen die Einsatzwagen zur Absperrung der Straße in Abbildung 12.

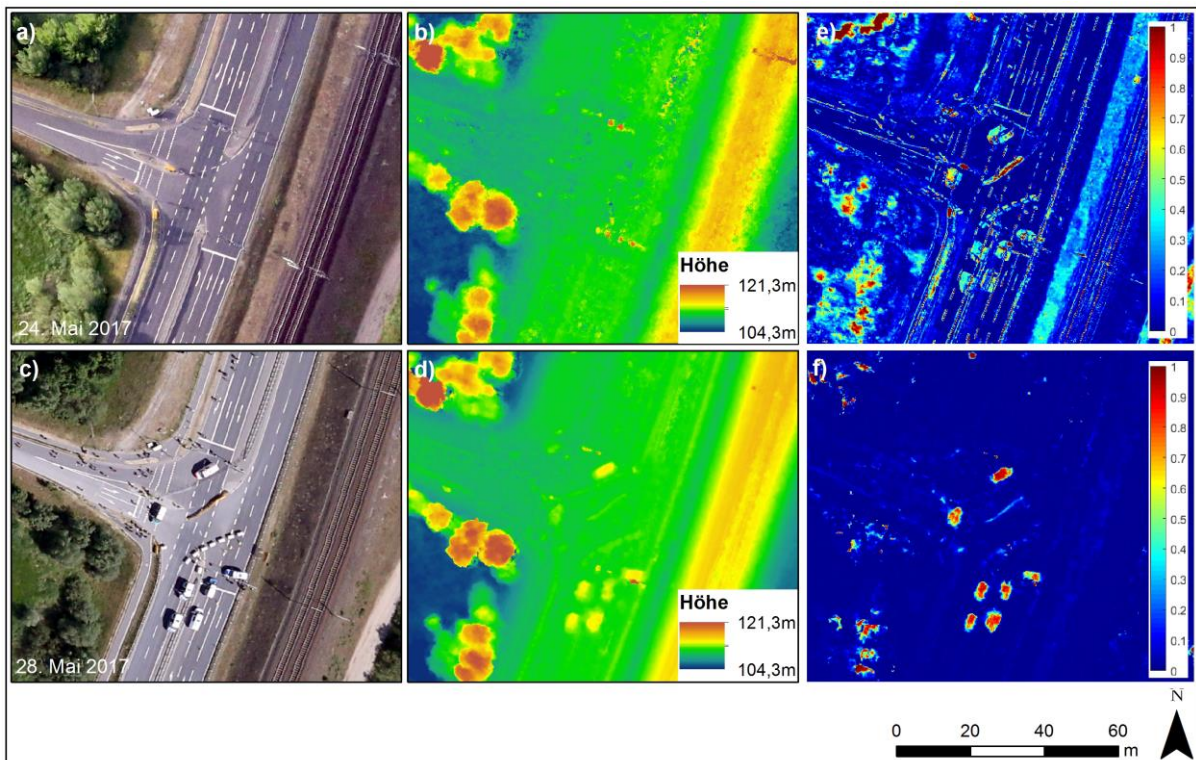
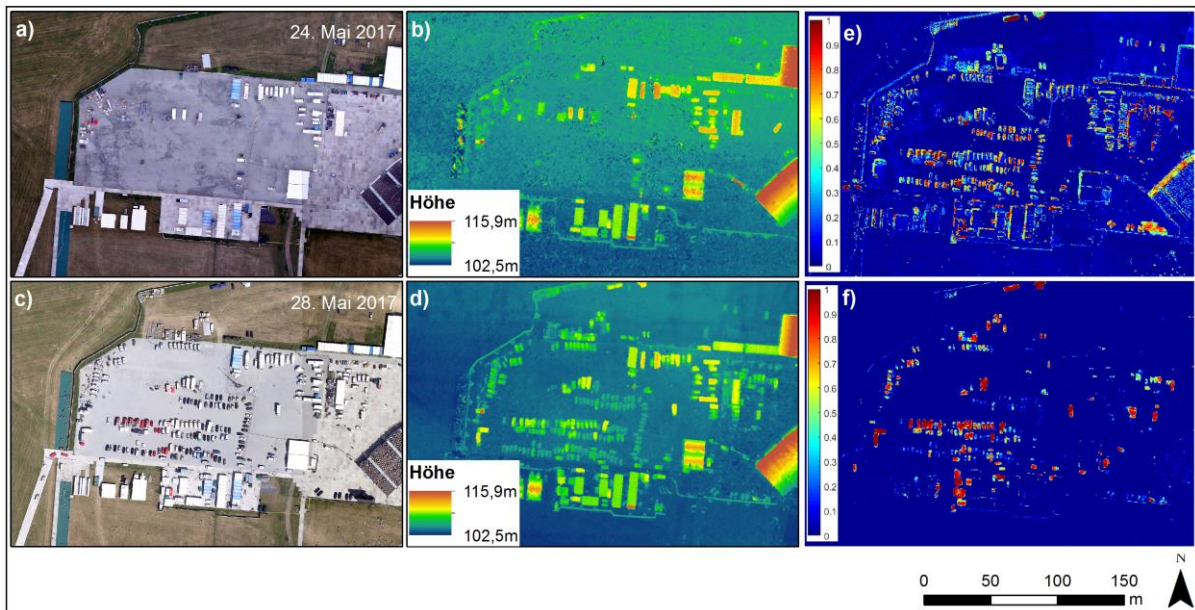


Abbildung 12: Wittenberg-1 (Zufahrt zum Festgelände) aus Gstaiger et al., 2018.



**Abbildung 13: Wittenberg-2 (Bühnenbereich mit einem Teil der Besuchertribüne) aus Gstaiger et al., 2018.**

Für die Qualität der Änderungserkennung ist u.a. die relative Genauigkeit zwischen zwei DOM entscheidend. Da für jeden Datensatz die Bündelausgleichung unabhängig durchgeführt wurde, können die relativen Unterschiede der DOM in X und Y mit etwa dem doppelten Fehler, d.h. zwischen 0,2 und 0,6m (einfach 0,1-0,3m), angenommen werden. Dies gilt ebenfalls für die relativen Höhenwerte. Da alle GNSS-Positionen mit Hilfe von zusätzlichen SAPOS-Informationen korrigiert werden, sind weitere Verschiebungen von X und Y nahezu ausgeschlossen. Systematische Höhenunterschiede sind ebenfalls vernachlässigbar, da alle Datensätze an die gleichen absoluten Höhen eines SRTM DEM geknüpft sind.

Zur quantitativen Auswertung der generierten Veränderungsbilder wurden diese mit manuell extrahierten Änderungsmasken verglichen. Für die Auswertung wird die Grenzwertoptimierungskurve (AUC) verwendet (Zweig & Campbell, 1993). Im Wertebereich von null bis eins stehen höhere Werte für eine bessere Qualität der Veränderungsberechnung. Darüber hinaus wird der fusionsbasierte Ansatz zur 3D Veränderungsberechnung mit anderen traditionellen 2D Veränderungsberechnungen verglichen, darunter mit der Change Vector Analyse (CVA) (Johnson & Kasischke, 1998), IRMAD und einem rein höhenbasierten Änderungserkennungsansatz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 festgehalten. Zu sehen ist, dass der 2D Ansatz IRMAD im Vergleich zu CVA zwar robuster im Umgang mit multi-temporalen Datensätzen ist, jedoch im Fall von starken Schatteneffekten wie in den Daten von Wittenberg ohne Höheninformationen nur unzureichende Ergebnisse erzielt werden. Hier erreichen die Ansätze unter Einbezug der Höheninformation deutlich bessere Werte – allen voran der fusionsbasierte Ansatz, der sowohl die 2D, als auch die 3D Informationen effizient nutzt.



Tabelle 1: AUC Vergleich der vorgestellten Testgebiete aus Gstaiger et al., 2018.

Methods	Wacken-1	Wacken-2	Wittenberg-1	Wittenberg-2
CVA	0.8542	0.8035	0.6703	0.6094
IRMAD	0.9372	0.9194	0.7587	0.8946
Height	0.9357	0.8988	0.9017	0.8479
Fusion-based	0.9566	0.9198	0.9115	0.9393

### 6.3 Einsatzmöglichkeiten der 3D Informationen

Nach der Vorstellung der erstellten Oberflächenmodelle und den daraus berechneten Veränderungen stellt sich die Frage der Verwendungsmöglichkeiten dieser Daten. Im Folgenden wird auf verschiedene Beispiele eingegangen, in denen diese Informationen von praktischem Nutzen sein können und im anschließenden Diskussionsteil werden künftige Weiterentwicklungen angeregt.

#### 6.3.1 Standort- und Zufahrtsplanung

Das Gelände spielt eine entscheidende Rolle für die Planung von Standorten z.B. für Lagerstätten, Unterkünfte oder Sanitär- und Versorgungseinrichtungen, sowie für die Wegführung von Zufahrtsstraßen oder Evakuierungsrouten. Das Beispiel Wacken Open Air bestätigt den Zusammenhang von niedrig gelegenen Standorten und entsprechenden Folgen bei Niederschlag: Staunässe auf Wiesen und Fahrwegen, die eine Verlagerung der Zelte, sowie entsprechende Zugfahrzeuge zur Bergung von steckengebliebenen Fahrzeugen notwendig macht. Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt des Geländes, dessen Hauptwege zum zweiten Aufnahmezeitpunkt bereits stark durchnässt waren und dunkel erscheinen. Für Planungsprozesse, bei denen Transportwege extra angelegt werden müssen, sind detaillierte und aktuelle Informationen zur Topographie daher unbedingt notwendig. Indikatoren wie die Höhe des Geländes, Hangneigungen oder Senken mit eventueller Staunässegefahr unterstützen die Planung der Wegführung, sowie der notwendigen Bau- und Befestigungsmaterialien von Hauptverkehrswegen, damit diese intakt bleiben.

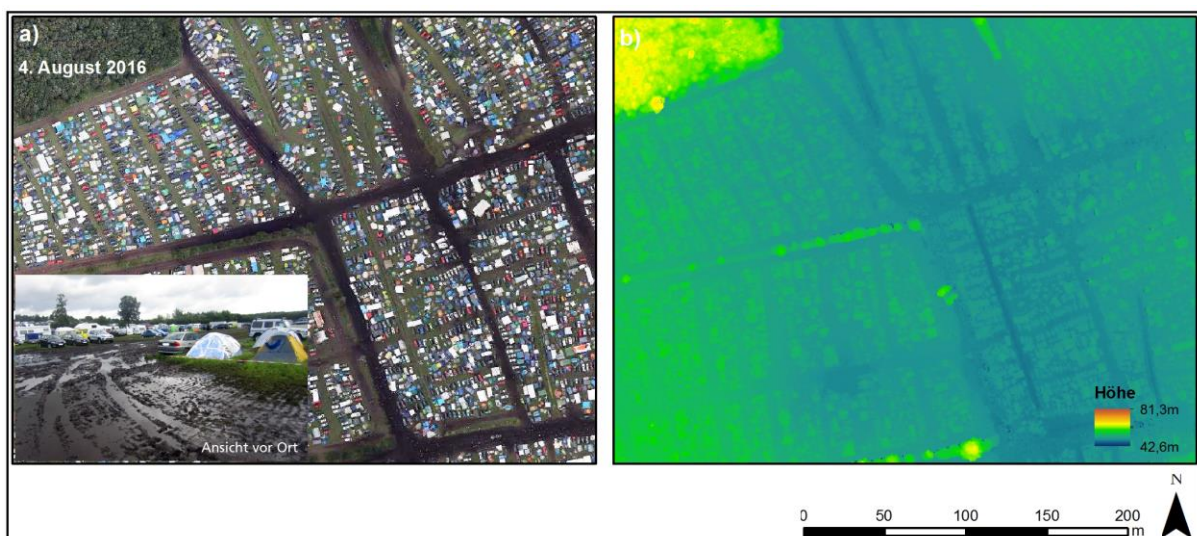
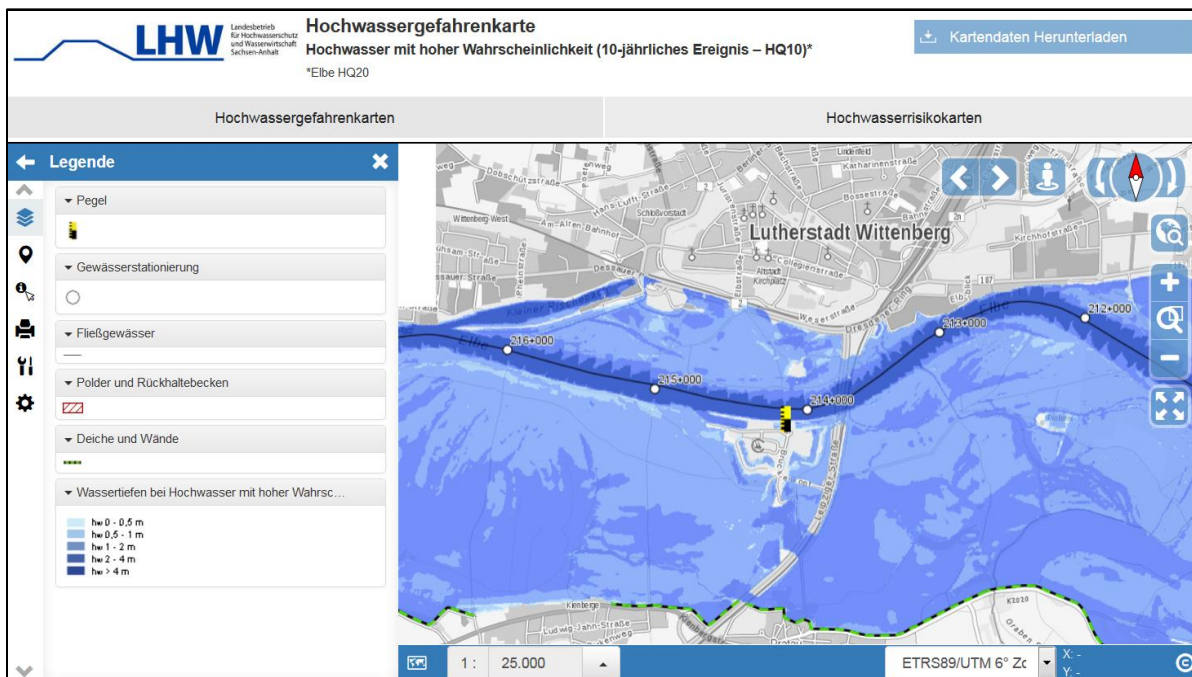


Abbildung 14: Staunässe auf tiefergelegenen Hauptwegen des Wacken Open Air zu erkennen im Luftbild (a) und DOM (b).

### 6.3.2 Gefahren-/ Risikoanalyse

Im Fall des Evangelischen Kirchentags in Wittenberg befand sich das Veranstaltungsgelände auf Überschwemmungsgebiet entlang der Elbe, das bereits bei einem Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit (20-jährliches Ereignis) komplett überflutet wäre (siehe Abbildung 15). Die Modellierung von Flusshochwasserszenarien erfolgt in der Regel anhand hydrodynamisch-numerischer Modelle, welche digitale Geländemodelle als eine grundlegende Ausgangsinformation benötigen. Die Modelle geben Auskunft über die Ausdehnung überfluteter Bereiche, Wassertiefen, sowie Fließgeschwindigkeiten und können Szenarien zum Verlauf von Überschwemmungen berechnen (Martin, 2011; Oelze, 2013). Da die Geländemodelle mittel- bis großskalig verfügbar sein müssen, eignen sich luft- und satellitengestützte Aufnahmesysteme, sofern Höhenpassinformationen zur Kompensation der geringeren Höhengenaugigkeit im Vergleich zu terrestrischen Sensoren verwendet werden. Stehen für derartige Modellierungen keine geeigneten Ausgangsdaten oder Kapazitäten zur Verfügung, lassen sich Gelände- oder Oberflächenmodelle wie die hier berechneten auch mit Hochwasserlinien verknüpfen und so mit gewissen qualitativen Abstrichen indirekt Überflutungstiefen ableiten. Mit Hilfe wiederholter Messungen lässt sich auf diese Weise auch der Überflutungsverlauf genau beobachten. Für diese Anwendung werden sowohl aktuelle und hochaufgelöste Geländeinformationen, als auch sehr präzise Überflutungsflächen bzw. Wasserstände benötigt, die in der Praxis jedoch selten in entsprechender Form und Qualität zur Verfügung stehen (Kujau, 2016).



**Abbildung 15: Hochwassergefahrenkarte Wittenberg für ein Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit (©Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), 2018).**

Werden Hochwasserflächen mit Gelände- und Gebäudemodellen verknüpft, lassen sich die Anzahl der betroffenen Gebäude, sowie mögliche Schäden hinsichtlich betroffener Stockwerke ableiten. Bei Großveranstaltungen wie dem Evangelischen Kirchentag kommen jedoch mobile Aufbauten zum Einsatz, die im regulären Geodatenbestand des Bundes und der Länder nicht enthalten sind. Wird ein aktuelles Oberflächenmodell aus beispielsweise Befliegungsdaten

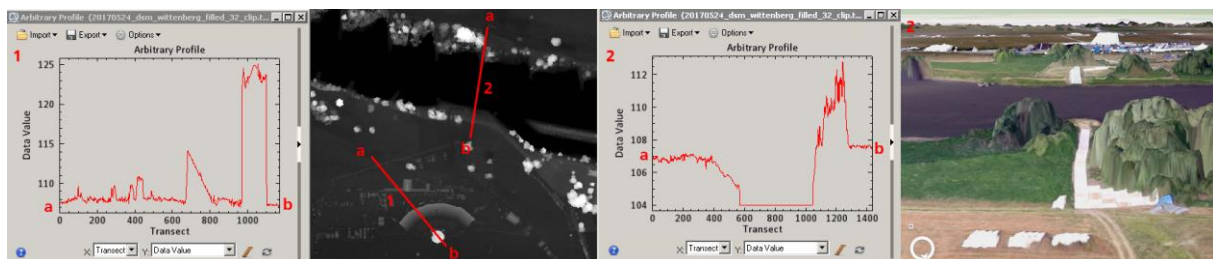
verwendet, lässt sich dennoch darstellen, welche Gebäude oder Aufbauten bei welchem Grad von Überflutung betroffen wären. Abbildung 16 zeigt das Festgelände in perspektivischer Ansicht des Oberflächenmodells mit überlagertem Luftbild und Überflutungsflächen bei einem Pegel von knapp über sieben Metern, wie er am 18.08.2002 am Pegel Wittenberg gemessen wurde (WSV, 2018). Auch die Planung von Evakuierungsrouten zu höher gelegenen Sammelpunkten kann mit Hilfe hochaufgelöster Geländeinformationen unterstützt werden.



**Abbildung 16: Feier zum Evangelischen Kirchentag in Wittenberg am 28. Mai 2017 mit einem simulierten Pegelstand von 706cm und den entsprechenden Überflutungsflächen.**

### 6.3.3 Vorbereitung der Einsatzkräfte

Zur Vorbereitung auf Einsätze werden Rettungs- und Sicherheitskräfte immer häufiger anhand von Simulationen geschult, für die auch 3D Gebäude- und Stadtmodelle herangezogen werden. Wie bereits erwähnt, sind temporäre Aufbauten nicht im regulären Datenbestand enthalten, jedoch erlaubt ein aktuelles Oberflächenmodell je nach Auflösung entsprechend detailgetreue Ansichten der Situation vor Ort und gibt durch die Erstellung von Profilen (siehe Abbildung 17) Aufschluss über das Gelände und mögliche Sichtachsen. Profil 1 zeigt beispielsweise das Oberflächenprofil von außerhalb des Festgeländes über den Zaun und die Besuchertribüne bis über die Hauptbühne. Es lässt sich auf diese Weise leicht abschätzen, welcher Bereich von welchem Standort aus noch eingesehen werden kann. Das zweite Profil zeigt den Geländeverlauf über die Elbe. Man erkennt den Abstieg zum Fluss, sowie den Anstieg und die befestigten Treppen über den Deich am südlichen Ufer. An dieser Stelle wurde die mobile Fußgängerbrücke über die Elbe installiert.



**Abbildung 17: Profile (in m) des DOM am 24. Mai 2017 durch das Festgelände (1), sowie über die Elbe (2) mit perspektivischer Ansicht des zweiten Profils (rechts).**



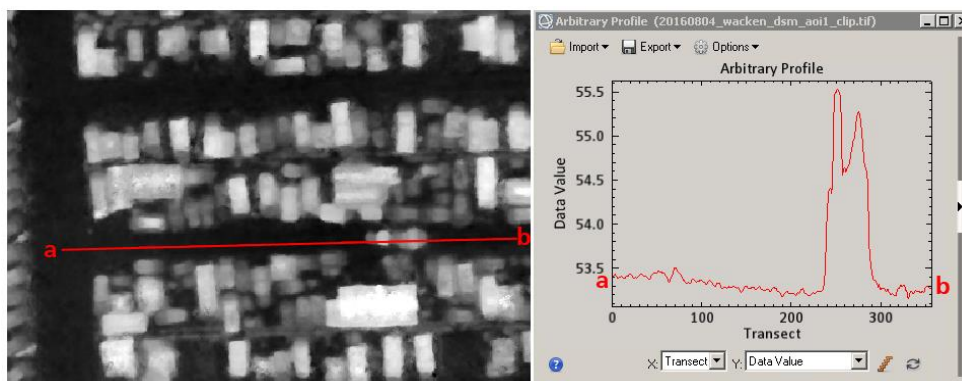
### 6.3.4 Monitoring von Zufahrtswegen und Rettungsgassen

Während der Veranstaltung gilt das Hauptaugenmerk dem aufmerksamen Beobachten der Veranstaltung. Hierzu zählt auch sicherzustellen, dass alle Fluchtwege und Rettungsgassen jederzeit frei und benutzbar sind. Stau, sowie Blockaden auf den Transport- und Versorgungswegen müssen schnellstmöglich erkannt werden, um entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Mit Hilfe der Veränderungsanalyse lassen sich schnell und einfach Hindernisse erkennen und diese genauer untersuchen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 18 und Abbildung 19 zu sehen. Auf einem der Fahrwege befindet sich ein Traktor mit beladenem Anhänger. Auf dem Luftbild rechts oben erkennt man deutlich den Traktor auf dem mittig in Ost-West Richtung verlaufenden Fahrweg, die 3D Veränderungsanalyse (rechts unten) weist sichere Höhenveränderungen aus und in der perspektivischen Ansicht des DOM mit überlagertem Luftbild lässt sich das „Hindernis“ schließlich intuitiver begutachten.



**Abbildung 18: Traktor auf Fahrweg. Perspektivische Darstellung des möglichen Hindernisses (links), Luftbildausschnitt (rechts oben) und Veränderungsanalyse (rechts unten) des Wacken Open Air am 04. August 2016.**

Das Höhenprofil aus Abbildung 19 zeigt den ebenen Verlauf des Weges mit dem Anstieg des Hindernisses, das sich auf diese Weise präzise vermessen lässt und die Interpretation erleichtert, um was es sich handeln könnte.



**Abbildung 19: Profil des Hindernisses auf einem Fahrweg des Wacken Open Air am 04. August 2016.**



---

### **6.3.5 Schadensanalyse**

Wie im vorangegangenen Beispiel positive Veränderungen detektiert wurden, so lassen sich z.B. im Fall eines Schadensereignisses auch negative Veränderungen – also Zerstörungen automatisch und flächendeckend detektieren und auf diese Weise Bereiche identifizieren, die möglicherweise besonders stark betroffen sind und besondere Hilfe benötigen. Anhand der Höheninformation lassen sich Objektveränderungen vermessen und insbesondere bei Hangbewegungen das Volumen des bewegten oder im Weg liegenden Materials abschätzen.

---

## 7 Diskussion

Fernerkundungsdaten bieten Akteuren des Bevölkerungsschutzes eine Möglichkeit, zeitnah und flächendeckend aktuelle Geoinformationen zu erhalten, die zu einem möglichst realitätsnahen Lagebild beitragen können. So zeigt die vorliegende Arbeit, dass aus optischen Luftbildern mit Hilfe automatischer Verfahren zur Weiterverarbeitung sehr präzise Oberflächenmodelle abgeleitet werden können, die zuverlässige Informationen zur Oberfläche und wertvolle Hinweise auf Höhenveränderungen geben können. Während ein reiner 2D Vergleich von Luftbildern bereits eine Vielzahl von Veränderungen abbildet, die für Fragestellungen des Bevölkerungsschutzes von Relevanz sind, bilden die Ergebnisse der fusions-basierten 3D Veränderungsanalyse meist tatsächlich veränderte Objekte, wie beispielsweise Fahrzeuge, Zelte oder andere Aufbauten ab. Besonders dort, wo mobile Aufbauten nicht im regulären Datenbestand von z.B. Landesvermessungsämtern vorhanden sind, bietet die Erstellung von Oberflächenmodellen aus Fernerkundungsdaten eine zuverlässige Möglichkeit die Strukturen vor Ort sichtbar zu machen. Im Fall von Großveranstaltungen können diese Zusatzinformationen besonders die Vorbereitung und Begleitung der Veranstaltung unterstützen.

Ein großflächiges Monitoring aus der Luft kann Personal vor Ort entlasten und die automatische Detektion von größeren und möglicherweise störenden Objekten auf Rettungsgassen kann dem Veranstalter die Möglichkeit geben, deren Größe und Volumen näher zu analysieren und schnell und effizient Maßnahmen zur Räumung einzuleiten. Die Hinzunahme der Höheninformation kann zudem Klassifikationsergebnisse von Zelten und Fahrzeugen verbessern. Aus Größe, Typ und Anzahl von Zelten oder Wohnmobilen können Personenzahlen vor Ort abgeschätzt werden um herauszufinden, wie viele Personen im Notfall versorgt oder evakuiert werden müssen. Dies ist eine wichtige Information auch für den Zivilschutzfall.

Jedoch sind weder die Höhenmodelle allein, noch die Veränderungsanalysen als solche zur direkten Weitergabe an Endanwender geeignet. Es gibt eine Vielzahl von möglichen Fehlerquellen, deren Ursachen nur von Experten abgeschätzt und bewertet werden können. Somit müssten aufbauend auf der Auswertung von 3D Informationen nutzerspezifische Produkte entwickelt werden, um die Informationen in geeigneter Form weiterzugeben.

Eine Ursache von Fehlern ist das Aufnahmesystem selbst, dessen Qualität der Lage- und Positionsdaten bei starken Vibrationen während des Fluges und der Aufnahmen schwanken können. Diese Ungenauigkeiten müssen in der Nachverarbeitung durch Zusatzdaten korrigiert werden. Ist das nicht möglich, kommt es zu Fehlern in der Georeferenzierung, die sich wiederum auf die darauffolgenden Verarbeitungsschritte auswirken.

Eine weitere Fehlerquelle liegt ebenfalls in den Daten. Mangelnde Textur im Bild, Sättigung bei starker Reflektion oder eine unzureichende Abdeckung mit Stereopaaren führen zu einem Mangel an qualitativen Matching-Punkten und somit zu Informationslücken oder Ausreißern im Oberflächenmodell. Diese Stellen müssen interpoliert werden bzw. bleiben oft als Rauschen bestehen. In der 3D Veränderungsanalyse kommt es so zu Fehldetektionen oder es werden feine Strukturen ausgefiltert und die entsprechenden Informationen gehen verloren.

Auch die verwendeten Zusatzdaten können negativen Einfluss haben. Das SRTM-DEM beispielsweise gibt eine Höhengenaugigkeit von drei Metern an. Dies hat zwar keine Auswirkung

---

auf die Ergebnisse einer Veränderungsanalyse von zwei Oberflächenmodellen, die auf die gleiche Weise berechnet und nur relativ zueinander betrachtet werden, jedoch wird die absolute Genauigkeit des Oberflächenmodells beeinträchtigt und eine Abweichung von drei Metern hat entscheidende Auswirkungen beispielsweise bei der Berechnung einer möglichen Hochwasserausbreitung.

---

## 8 Ausblick

Ein kritischer Faktor in verschiedensten Bereichen des Katastrophen- oder allgemein Bevölkerungsschutzes ist die Zeit bzw. der Zeitraum von der Aufnahme der Daten bis zur Bereitstellung des fertigen Produktes (z.B. Kartenmaterial). Die verwendeten Oberflächenmodelle dieser Studie wurden erst nach den Veranstaltungen basierend auf den aufgenommenen Luftbildern generiert. Die Berechnung eines Gebietes mit dem Umfang der hier verwendeten Beispiele dauert mit verteilter Recheninfrastruktur etwa einen Tag. Inzwischen wurde ein Verfahren in die Datenverarbeitungskette des 4k Systems implementiert, welches es erlaubt, bereits während des Fluges digitale Oberflächenmodelle ad-hoc abzuleiten, diese an die Bodenstation zu übertragen und die Einzelstücke dort zu mosaikieren. Die Abläufe werden derzeit getestet und auf ihre Genauigkeit untersucht. Bisherige Zwischenergebnisse weisen zwar Abstriche in der Genauigkeit auf, jedoch sind die Oberflächenmodelle innerhalb von Minuten nach der Datenaufnahme verfügbar. Unter Hinzunahme von zusätzlichen Passinformationen, wie z.B. geodätischen SAR Punkten oder Informationen aus Passpunkt-Datenbanken, ließe sich auch die Genauigkeit der Georeferenzierung verbessern.

Darauf aufbauend ließen sich weitere Verfahren und Services implementieren, die eine automatisierte Auswertung der Daten durchführen und die operationelle Weitergabe zusätzlicher Produkte ermöglichen. Geeignet wäre die Integration der 3D Veränderungsrechnung und darauf aufbauende Methoden zur Objektklassifikation, um als Produkt detaillierte Informationen darüber zu erhalten, was sich genau verändert hat und wie stark. Die Erkennung von Hindernissen auf Verkehrswegen ist eine essenzielle Information für die Planung von Versorgungs- und Rettungsmaßnahmen. Innerhalb des Projektes VABENE++ wurden bereits Verfahren entwickelt, um ein angepasstes Routing (Verkehrsnavigation) anhand derartiger Zusatzdaten zu berechnen. Informationen über Hindernisse oder Sperrungen lassen sich in Simulationen importieren und ermöglichen so die schnelle Berechnung alternativen Wegführungen.

Das Verfahren zur 3D Veränderungsanalyse wird im DLR derzeit anhand von optischen Satellitendaten und Luftbildern getestet. Eine weitere mögliche Datenquelle sind Luftbilder von UAS, die eine immer größere Rolle vor allem im Katastrophenschutz spielen, zumal die am 04. Juli 2017 in Kraft getretene Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten (BMVI, 2017) dem Katastrophenschutz erweiterte Möglichkeiten für Befliegungen gewährt. Nun gilt es, das Verfahren zur 3D Veränderungsanalyse auch auf Befliegungsdaten von Drohnen anzuwenden und zu untersuchen.

Eine weitere Hürde bleibt die Verfügbarkeit von geeigneten Referenzdaten für einen direkten Höhenvergleich. Eine aussagekräftige Veränderungsanalyse ist nur sinnvoll, wenn die Daten qualitativ auch zueinander passen. Deutschlandweit werden zwar regelmäßig und flächendeckend Befliegungen durchgeführt und der Datenbestand kontinuierlich erweitert, diese komfortable Situation herrscht jedoch nicht in allen Ländern. Vielerorts bleiben nur die globalen Datenbestände wie die Geländemodelle von ASTER oder SRTM, die zwar kostenlos zur Verfügung stehen, jedoch nur geometrische Auflösungen von bis zu 30 Meter haben. Präzisere und ebenfalls global verfügbare Daten könnte künftig das Höhenmodell der Satellitenmission TanDEM-X liefern. Bislang stehen die Daten der Öffentlichkeit nur in einer Auflösung von 90m

---

oder in höherer Auflösung kostenpflichtig bzw. nach Beantragung für Forschungszwecke zur Verfügung.

Abhilfe für das Problem der mangelnden Verfügbarkeit geeigneter Daten könnten Ansätze zur Fusion unterschiedlicher Datensätze schaffen. Derzeit wird intensiv an Deep Learning Methoden gearbeitet, um diese Datenfusion zu ermöglichen. Zudem werden Algorithmen entwickelt, um eine Klassifikation von Objekten, wie z.B. Fahrzeuge oder Zelte, schneller und präziser werden zu lassen. Zhu et al., 2017 geben in ihrem Review einen Überblick der aktuellen Verfahren und Forschungsergebnisse.

Die Verwendungsmöglichkeiten von 3D Informationen aus Fernerkundungsdaten sind zahlreich und liegen im Bereich von Großveranstaltungen vor allem in der Vorbereitung und Begleitung der Veranstaltungen mit dem Ziel Risiken zu vermeiden. Mit zunehmender Verfügbarkeit von 3D Informationen wird die Zahl der daraus erstellbaren Produkte steigen und die Produkte werden sich auch qualitativ stetig verbessern. Damit sich diese Produkte zielgerichtet entwickeln und in die operativen Prozesse des Katastrophenmanagements integriert werden können um auch nachhaltig nutzbar zu werden, ist weiterhin eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis notwendig.

---

## 9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich während des Studiums und der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zunächst gilt mein Dank dem DLR und insbesondere meinem Abteilungsleiter Prof. Dr. Peter Reinartz für die Ermöglichung des Studiums, sowie Prof. Dr.-Ing. Günter Strunz für seinen Einsatz als Prüfer dieser Arbeit. Des Weiteren danke ich meinem Betreuer Dr. Fabian Löw für seine Hilfsbereitschaft, seinen aufmerksamen Blick und die unkomplizierte Zusammenarbeit. Ich möchte auch meinem Kollegen Dr. Franz Kurz für sein gnadenloses Feedback und die konstruktive Unterstützung bei fachlichen Fragestellungen danken. Zusätzlicher Dank gilt meinen Kollegen Jiaojiao und Ralph für die gemeinsame Arbeit an dem Fachbeitrag, auf dem diese Arbeit maßgeblich beruht. Für die Bereitstellung der Luftbilder geht mein Dank an die Verkehrsforschung des DLR und in diesem Zusammenhang auch an meine Kollegen des Projektes VABENE++ für die gute Zusammenarbeit während der letzten Jahre und der spannenden Kampagnen – nicht nur in Wacken und Wittenberg.

Ganz besonders danken möchte ich Holger für seine Unterstützung, Anregungen, Korrekturen, Geduld und Aufmunterung.

---

## 10 Literaturverzeichnis

- Airbus Defence And Space 2018: Satellite Data. Online verfügbar unter:  
<http://www.intelligence-airbusds.com/satellite-data/> [letzter Abruf 27.08.2018].
- Albertz, J., 2007: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3. Auflage. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Alexander, D. 2012: Principles of emergency planning and management. 6. Auflage. S. 1-352. Dunedin Academic Press Ltd, Edinburgh, United Kingdom. ISBN 978-1-903544-10-5.
- Baltsavias, E., Gruen, A., 2003: Resolution Convergence: A Comparison of Aerial Photos, LiDAR and Ikonos for Monitoring Cities. In: Remotely-Sensed Cities, S. 47–82. Taylor & Francis. London
- Bello, O. M., Aina, Y. 2014: A. Satellite Remote Sensing as a Tool in Disaster Management and Sustainable Development: Towards a Synergistic Approach. In: Procedia - Social and Behavioral Science, 120, S. 365-373. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.02.114.
- Bernard M., Decluseau, D., Gabet, L., Nonin, P., 2012: 3D capabilities of Pleiades satellite. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXIX-B3, S. 553-557.
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., Çöltekin, A. 2015: Applications of 3D City Models: State of the Art Review. In: ISPRS Int. J. Geo-Inf, 4, S. 2842-2889.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) 2016: Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen. Teil 1. Online verfügbar unter:  
[https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis\\_Bevoelkerungsschutz/Band\\_17\\_Praxis\\_BS\\_Sicherheit\\_Grossveranstaltungen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_17_Praxis_BS_Sicherheit_Grossveranstaltungen.pdf?__blob=publicationFile) [letzter Abruf: 30.08.2018].
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) 2018a: Links zu den Katastrophenschutzgesetzen der Länder. Online verfügbar unter:  
[https://www.bbk.bund.de/DE/Service/Fachinformationsstelle/RechtundVorschriften/Rechtgrundlagen/Bundeslaender/bundeslaender\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/Service/Fachinformationsstelle/RechtundVorschriften/Rechtgrundlagen/Bundeslaender/bundeslaender_node.html) [letzter Abruf 27.08.2018].
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) 2018b: Bevölkerungsschutz. Online verfügbar unter: [https://www.bbk.bund.de/DE/TopThema/TT\\_2009/Definition-Bevoelkerungsschutz.html](https://www.bbk.bund.de/DE/TopThema/TT_2009/Definition-Bevoelkerungsschutz.html) [letzter Abruf 30.08.2018].
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) 2012a:Landschaftssteckbrief. 69301 Heide-Itzehoer Geest. Online verfügbar unter:  
[https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/69301.html?tx\\_isprofile\\_pi1%5Bbundesland%5D=7&tx\\_isprofile\\_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=45091fe28d6b92d8e63415a5f2a7b099](https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/69301.html?tx_isprofile_pi1%5Bbundesland%5D=7&tx_isprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=45091fe28d6b92d8e63415a5f2a7b099) [letzter Abruf 27.08.2018].
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) 2012b:Landschaftssteckbrief. 88100 Elbe-Elster-Tiefeland. Online verfügbar unter:  
[https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/88100.html?tx\\_isprofile\\_pi1%5Bbundesland%5D=6&tx\\_isprofile\\_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=03acb9f3716256a31540ef39e850cd2d](https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/88100.html?tx_isprofile_pi1%5Bbundesland%5D=6&tx_isprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=03acb9f3716256a31540ef39e850cd2d) [letzter Abruf 27.08.2018].

- 
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BfJ) 2009: Gesetz über den Zivilschutz und die Katastrophenhilfe des Bundes. Online verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/zsg/> [letzter Abruf 27.08.2018].
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BfJ) 1949: Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/gg/index.html#BJNR000010949BJNE005300314> [letzter Abruf 27.08.2018].
- Carl, S., Bärtsch, S., Lang, F., d'Angelo, P., Arefi, H., Reinartz, P., 2013: Operational Generation of High Resolution Digital Surface Models from Commercial Tri-Stereo Satellite Data. In: Photogrammetric Week 2013, S. 261-269.
- Cesetti, A., Frontoni, E., Mancini, A., Ascani, A., Zingaretti, P., Longhi, S., 2011: A visual global positioning system for unmanned aerial vehicles used in photogrammetric applications. In: Journal of Intelligent and Robotic Systems 61 (1-4), S. 157-168.
- Choi, K., Lee, I., 2011: A UAV-based close-range rapid aerial monitoring system for emergency responses. In: Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens. Spat. Inf. Sci., 38, S. 247–252.
- Colomina, I., Molina, P., 2014: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, S. 79–97.
- d'Angelo, P., Reinartz, P., 2011: Semiglobal Matching Results on the ISPRS Stereo Matching Benchmark. Institute of Photogrammetry and GeoInformation, Leibniz University Hannover. High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. Hannover, Deutschland.
- Dempster, A. 1967: Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. In: The Annals of Mathematical Statistics, 38, 2, S. 325–339.
- DigitalGlobe 2018: WorldView-4. Online verfügbar unter: <http://worldview4.digitalglobe.com/#/main> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- DLR, 2018: VABENE++ - Verkehrsmanagement bei Großereignissen und Katastrophen. Online verfügbar unter: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/vabene> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Dong, L., Shan, J. 2018: A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 84, S. 85-99.
- Döllner, J., Kolbe, T., Liecke, F., Sgouros, T., Teichmann, K. 2006: The virtual 3D city model of Berlin - Managing, integrating, and communicating complex urban information. In: Proceedings of the 25th Urban Data Management Symposium UDMS, Aalborg, Denmark.
- Durand, A., Michel, J., de Franchis, C., Allenbach, B., Giros, A., 2013: Qualitative assessment of three DSM generation approaches using Pléiades-HR data. Case study: Port-au-Prince, Haiti. 33th EARSeL Symposium, 3.-6. Juni 2013, Matera, Italien.
- e-geos, 2016: Price List. Online verfügbar unter: <http://www.e-geos.it/products/pdf/prices.pdf> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Erdelj, M., Król, M., Natalizio, E. 2017: Wireless Sensor Networks and Multi-UAV systems for natural disaster management. In: Computer Networks, S. 72-86. DOI: 10.1016/j.comnet.2017.05.021.



- 
- Füreder, P., Lang, S., Hagenlocher, M., Tiede, D., Wendt, L., Rogenhofer, E. 2015: Earth observation and GIS to support humanitarian operations in refugee/IDP camps. In: Proceedings of the ISCRAM 2015 Conference, 24.-27.Mai 2015, Kristiansand, Norwegen.
- Frassl, M., Lichtenstern, M., Angermann, M., Gullotta, G. 2012: Micro Aerial Vehicles in Disaster Assessment Operations – The Example of Cyprus 2011. In: Communications in Computer and Information Science, 318. Springer. Future Security 2012, 4.-6.9.12, Bonn.
- Fruin J. J. 1993: The causes and prevention of crowd disasters. In: Smith, R. A., Dickie, J. F. (ed): Engineering for Crowd Safety. S. 99-108. Elsevier, Amsterdam.
- FSD 2018: Drones for Humanitarian and Environmental Applications. Online verfügbar unter: <http://drones.fsd.ch/en/homepage/> [letzter Abruf 27.08.2018].
- Gähler, M., 2016: Remote Sensing for Natural or Man-made Disasters and Environmental Changes. In: Environmental Applications of Remote Sensing. S. 309–338. DOI: 10.5772/62183.
- Gayer, M. 2008: Advanced Methods for IDP and Refugee Camp Mapping with Very High Resolution Satellite Imagery. Magisterarbeit, Universität Freiburg.
- Gemeinde Wacken, 2018: Gemeinde in Zahlen. Online verfügbar unter: <http://wacken.de/wp/gemeinde-wacken/gemeinde-in-zahlen/> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Graham, L., 2015: Drones and LiDAR. In: LiDAR News Magazine, 5,1. Online verfügbar unter: [http://www.lidarmag.com/PDF/LiDARNewsMagazine\\_Graham-DronesAndLiDAR\\_Vol5No1.pdf](http://www.lidarmag.com/PDF/LiDARNewsMagazine_Graham-DronesAndLiDAR_Vol5No1.pdf) [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Greenwood, F., 2015: How to make maps with drones. Drones and Aerial Observation. S. 35–47.
- Gstaiger, V., d’Angelo, P., Schneiderhan, T., Krauss, T., 2013: Crisis DSM Generation to Support Refugee Camp Management. ESA Living Planet Symposium 2013. 09.-13. September 2013. Edinburgh.
- Gstaiger, V., Römer, H., Rosenbaum, D., Henkel, F. 2015: Airborne Camera System for Real-Time Applications - Support of a National Civil Protection Exercise. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2015, XL-7/W3, XL-7 (W3), S. 1189-1194, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1189-2015.
- Gstaiger, V., Tian, J., Kiefl, R., Kurz, F., 2018: 2D vs. 3D Change Detection Using Aerial Imagery to Support Crisis Management of Large-Scale Events. *Eingereicht im Oktober 2018 – derzeit im Review*.
- Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T. 2000: Simulating dynamical features of escape panic. In: Nature, 407, S. 487-490.
- Hirschmueller, H. 2008: Stereo Processing by semiglobal matching and mutual information. In: IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 30, 2, S. 328-341.
- ICS 2018: Das W:O.A 2016 IST HISTORY! Online verfügbar unter: <https://www.wacken.com/de/news/news/news-detail/das-woa-2016-ist-history/> [letzter Abruf: 27.08.2018].

- 
- Johnson, R. D., Kasischke, E. S. 1998: Change vector analysis: A technique for the multispectral monitoring of land cover and condition. In: *Int. J. Remote Sens.*, 19, 3, S. 411–426.
- Joyce, K. E., Belliss, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J., Glassey, P. J. 2009: A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 2009, 33, 2, S.183-207. DOI: 10.1177/0309133309339563.
- Jüpner, R., Brauneck, J., Pohl, R., 2015: Einsatz von Drohnen im Hochwasserfall – Erfahrungen und Ideen. In: *WasserWirtschaft*, 9, S. 49-54. Online verfügbar unter: [http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/images/e/e6/WaWi\\_2015\\_09\\_FA\\_10\\_Juepner.pdf](http://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/images/e/e6/WaWi_2015_09_FA_10_Juepner.pdf) [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Köhler, P., 2016: Hilfe, die vom Himmel kommt: Multicopter als Einsatzmittel für Rettungskräfte. In: *Im Einsatz. Zeitschrift für Helfer und Führungskräfte*, 6/16, S. 45-49. S+K Verlag, Edewecht.
- Krauß, T., d'Angelo, P., Schneider, M., Gstaiger, V., 2013: The Fully Automatic Optical Processing System Catena at DLR. In: *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-1/W1, S. 177-181. Copernicus Publications. ISPRS Hannover Workshop 2013, 21.-24. Mai 2013, Hannover.
- Krauß, T., Fischer, P., 2016: Automatic Detection and Vulnerability Analysis of Areas endangered by Heavy Rain. In: 2016 Proceedings of European Space Agency Living Planet Symposium. Spacebooks Online. ESA Living Planet Symposium 2016, 9.-13. Mai 2016. Prag.
- Kujau, A., 2016: Bericht: Social Media helfen bei Hochwasserkatastrophen. GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam. Online verfügbar unter: <https://www.gfz-potsdam.de/medien-kommunikation/meldungen/detailansicht/article/bericht-social-media-helfen-bei-hochwasserkatastrophen/> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Kurz, F., Türmer, S., Meynberg, O., Rosenbaum, D., Runge, H., Reinartz, P., Leitloff, J., 2012: Low-cost optical Camera System for real-time Mapping Applications. In: *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 2012,2, S.159-176.
- Kurz, F., Rosenbaum, D., Meynberg, O., Mattyus, G. 2014: Real-time mapping from a helicopter with a new optical sensor system. Gemeinsame Tagung der DGfK, der DGPF, der GfGI und des GiN, Hamburg.
- Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW) 2018: Hochwassergefahrenkarte. Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit. Online verfügbar unter: <https://www.geofachdatenserver.de/de/hochwassergefahrenkarte-hq10.html> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Lechner, K.; Gähler, M. 2017: Earth observation based crisis information — Emergency mapping services and recent operational developments. 4th International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), Münster. S.1-7, DOI: 10.1109/ICT-DM.2017.8275682.
- Lee, J., Zlatanova, S. 2008: A 3D data model and topological analyses for emergency response in urban areas. In: Zlatanova, S., Li, J. (Ed.): *ISPRS. Geospatial Information Technology for Emergency Response*, 6, S. 143-168. Taylor and Francis, Bristol, USA.

- 
- Leitlein, H. 2017: Kirchentag. Wittenberg, 11:02: Wie wurden daraus 120.000? In: Zeit online. Online verfügbar unter: <https://www.zeit.de/2017/23/kirchentag-wittenberg-besucherzahlen-gottesdienst> [letzter Abruf: 30.08.2018].
- Lichter, M., Grinberger, A. S., Felsenstein, D. 2015: Simulating and Communicating Outcomes in Disaster Management Situations. In: ISPRS Int. J. Geo-Inf., 4, S. 1827-1847. DOI: 10.3390/ijgi4041827.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. 2005: Geographic Information Systems and Science. 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England.
- Lutherstadt Wittenberg 2017: Stadtportrait. Online verfügbar unter: <http://www.wittenberg.de/staticsite/staticsite.php?menuid=1520&topmenu=> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Manß, C., Wiedemann, T., Shutin, D. 2017: Entropy Driven Height Profile Estimation with Multiple UAVs under Sparsity Constraints. In: 8th International Workshop on Wireless Networking and Control for Unmanned Autonomous Vehicles as part of the program of the IEEE International Conference on Global Communications (GLOBECOM 2017), 4.-8. Dezember, Singapur.
- Martha, T.R., Kerle, N., Jetten, V., van Westen, C.J., Kumar, K.V. 2010: Landslide volumetric analysis using Cartosat-1-derived DEMs. In: IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett., 7, 3, S. 582–586.
- Martin, H., 2011: Numerische Strömungssimulation in der Hydrodynamik: Grundlagen und Methoden. Springer Verlag.
- Martinis, S., Clandillon, S., Plank, S., Twele, A., Huber, C., Caspard, M., Maxant, J., Cao, W., Haouet, S., Fuchs, E.-M., 2017: *ASAP TERRA* - Advancing SAR and Optical Methods for Rapid Mapping. Projektbericht.
- Massonnet, D., Souyris J., 2008: Imaging with synthetic aperture radar. S. 177-228/280. Editions EPFL Press. Lausanne.
- Matikainen, L., Lehtomäki, M., Ahokas, E., Hyypä, J., Karjalainen, M., Jaakkola, A., Kukko, A., Heinonen, T., 2016: Remote sensing methods for power line corridor surveys. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 119, S. 10-31.
- Meric, S., Fayard, F., Pottier E., 2009: Radargrammetric SAR Image Processing. Ho, P.-G. P., (Hrsg.), 2009: Geoscience and Remote Sensing. InTech. S. 421-454. Online verfügbar unter: <https://www.intechopen.com/books/geoscience-and-remote-sensing/radargrammetric-sar-image-processing> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Nichol, J., Wong, M. S. 2005: Satellite remote sensing for detailed landslide inventories using change detection and image fusion. In: International Journal of Remote Sensing, 26, 9, S. 1913-1926.
- Oberhagemann, D. 2012 (Hrsg.): Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen. Technischer Bericht 13-01. Technisch-Wissenschaftlicher Beirat der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Altenberge. Online verfügbar unter: [https://www.vfdb.de/fileadmin/download/tb\\_13\\_01\\_grossveranstaltungen.pdf](https://www.vfdb.de/fileadmin/download/tb_13_01_grossveranstaltungen.pdf) [letzter Abruf 30.08.2012].

- 
- Oelze, M., 2013: Der Einsatz von Digitalen Geländemodellen im Hochwassermanagement – Erfahrungen. Lenkungsgruppe für die Erstellung eines landesweiten DGM (Hrsg.), 2013: Digitales Geländemodell und ausgewählte Anwendungen. S. 6-14. Online verfügbar unter: [https://www.geobasis-bb.de/pdf-Dateien/dgm2\\_infomat.pdf](https://www.geobasis-bb.de/pdf-Dateien/dgm2_infomat.pdf) [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N., 2006: A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In: IAPRS vol XXXVI-1/W41 in ISPRS Workshop On Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites). Ankara, Türkei.
- Pinheiro, M., 2017: Multi-Mode SAR Interferometry for High-Precision DEM Generation. Dissertation. DLR-Forschungsbericht.
- Qin, R., Tian, J., Reinartz, P., 2016: 3D change detection - Approaches and applications. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 122, S. 41-56.
- Reinartz, P., Müller, R., Lehner, M., Schroeder, M. 2006: Accuracy analysis for DSM and orthoimages derived from SPOT HRS stereo data using direct georeferencing. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60, 3, S. 160-169. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2005.12.003.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2012. UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives. In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-1/(September). S. 25–31.
- Remy, M.A., de Macedo, K., Moreira, J.R., 2012: The first UAV-based P- and X-band interferometric SAR system. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 22-27 July 2012, München.
- Restas, A. 2015: Drone Applications for Supporting Disaster Management. In: World Journal of Engineering and Technology, 3, S. 316-321. DOI: 10.4236/wjet.2015.33C047.
- Rodriguez, E., Martin J., 1992: Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. In: IEEE Proceedings-F 139, 2, S. 147-159.
- Römer, H., Kiefl, R., Henkel, F., Cao, W., Nippold, R., Kurz, F., Kippnich, U. 2016: Using airborne remote sensing to increase situational awareness in civil protection and humanitarian relief - the importance of user involvement. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2016, XLI-B8, S. 1363-1370. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-1363-2016.
- Rossi, C., Gernhardt, S., 2013: Urban DEM generation, analysis and enhancements using TanDEM-X. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 85, S. 120–131.
- Sanders, B. 2007: Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. In: Advances in Water Resources, 30, 8, S. 1831-1843. DOI: 10.1016/j.adwatres.2007.02.005.
- Schröter, A.E., 2016: Innovative Visualisierungen von Kriseninformation auf Basis von Fernerkundungsdaten. UAS-gestützte Lagebilderfassung für die zivile Sicherheit. Masterarbeit. Hafen City Universität Hamburg, Labor für Geoinformation und Visualisierung.
- Sefercik, U.G., Dana, I., 2011: Crucial points of interferometric processing for dem generation using high resolution SAR data. ISPRS Hannover Workshop.

- 
- Shafer, G. 1976: A mathematical theory of evidence. Princeton University Press, Princeton.
- Skrzypietz, T., 2011: Die Nutzung von UAS für zivile Aufgaben. Standpunkt Zivile Sicherheit. Potsdam: Brandenburgisches Institut für Gesellschaft und Sicherheit gGmbH.
- Stal, C., Tack, F., De Maeyer, P., De Wulf, A., Goossens, R., 2013: Airborne photogrammetry and LIDAR for DSM extraction and 3D change detection over an urban area: a comparative study. In: International Journal of Remote Sensing, 34, 4, S. 1087-1110.
- Tian, J., Dezert, J. 2018: Fusion of multispectral imagery and DSMs for building change detection using belief functions and reliabilities. In: International Journal of Image and Data Fusion, S. 1-27. DOI: 10.1080/19479832.2018.1513957.
- Tian, J., Nielsen, A. A., Reinartz, P. 2015: Building damage assessment after the earthquake in Haiti using two post-event satellite stereo imagery and DSMs. In: International Journal of Image and Data Fusion, 6, 2, S. 155-169.
- Tiede, D., Lang, S., 2010: Analytical 3D views and virtual globes — scientific results in a familiar spatial context In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, 3, S. 300-307.
- Turner, D., Lucieer, A., de Jong, S. M. 2015: Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). In: Remote Sens., 7, 2, S. 1736-1757. DOI: [10.3390/rs70201736](https://doi.org/10.3390/rs70201736).
- Wang, Y., Zhu, X. X., Zeisl, B., Pollefeys, M., 2017: Fusing Meter-Resolution 4-D InSAR Point Clouds and Optical Images for Semantic Urban Infrastructure Monitorin. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55, 1, S.14-26.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) 2018: Wasserstände an schifffahrtsrelevanten Pegeln. Pegel Wittenberg. Online verfügbar unter: <https://www.elwis.de/DE/dynamisch/gewaesserkunde/wasserstaende/index.php?target=1&pegelId=070b1eb4-3872-4e07-b2e5-e25fd9251b93> [letzter Abruf: 27.08.2018].
- Wehr, A., Lohr, U., 1999: Airborne laser scanning—an introduction and overview. In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, S. 68–82.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M., 2012: ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: Geomorphology, 179, S. 300-314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- Wozencraft, J. M., Jacobs, I. M., 1965: Principle of Communication Engineering. John Wiley and Sons.
- Zhu, X.X. et al.2017: Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5, 4, S. 8-36. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307.
- Zhuo, X., Kurz, F., Reinartz, P., 2015: FUSION OF MULTI-VIEW AND MULTI-SCALE AERIAL IMAGERY FOR REAL-TIME SITUATION AWARENESS APPLICATIONS. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-1/W4, S. 201-206.
- Zweig, M. H., Campbell, G. 1993: Receiver-operating characteristic (ROC) plots: A fundamental evaluation tool in clinical medicine. In: Clin. Chem., 39, 4, S. 561–577.