



DGK Veröffentlichungen der DGK
Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 796

Ulf Kreuziger

**Entwicklung georeferenzierender
Augmented Reality Systeme
auf Mobilgeräten mit Mikrosensoren**

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5208 6



DGK Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 796

Entwicklung georeferenzierender
Augmented Reality Systeme
auf Mobilgeräten mit Mikrosensoren

Inaugural-Dissertation

in der Fakultät Geistes- und Kulturwissenschaften
der Otto-Friedrich-Universität Bamberg

vorgelegt von

Ulf Kreuziger

aus Rüdersdorf bei Berlin

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 -1283 / - 1100

e-mail post@dgk.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Dekan: Universitätsprofessor Dr. Markus Behmer

Erstgutachter: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. habil. Matthias Möller

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Hehl

weiterer Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill

Tag der mündlichen Prüfung: 14.02.2017.

Diese Dissertation ist auf dem Server der Deutschen Geodätischen Kommission unter <<http://dgk.badw.de/>>
sowie auf dem Server der Otto-Friedrich-Universität Bamberg unter
<[urn:nbn:de:bvb:473-opus4-489856](http://nbn:de:bvb:473-opus4-489856)> elektronisch publiziert

© 2017 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Entwicklung georeferenzierender Augmented Reality Systeme auf Mobilgeräten mit Mikrosensoren

Zusammenfassung

Die Motivation der Arbeit besteht darin, einen Beitrag zu leisten, um die Augmented Reality (AR) tiefer in den (Arbeits-)Alltag zu integrieren und leichter für (Fach-)Anwendungen zugänglich zu machen sowie konzeptuelle Vorlagen zur Entwicklung zukünftiger AR-Systeme im Bereich der graphischen Geodatenverarbeitung bereitzustellen.

Die Dissertation setzt sich mit einer konkreten Art von AR-Systemen intensiv auseinander. Es handelt sich dabei um Systeme mit einem Anwendungsbereich außerhalb von Gebäuden (Außenbereich) sowie mit einem absoluten Raumbezug von AR-System und Geodaten auf der Erdoberfläche. Derartige Systeme werden hierbei als Georeferenzierende Augmented Reality System(e) für Geodaten (GeoARS) bezeichnet und weiterführend in mobil-pedestrische und stationäre Systeme unterteilt.

Dem low cost Ansatz folgend integrieren GeoARS verschiedene Mikrosensoren, sind mit plattformunabhängiger handelsüblicher Massenmarkt-Hardware (Smartphone, Tablet, Einzelkomponenten) verwendbar und unabhängig von Betriebssystem und Programmiersprache.

Die Komponenten von GeoARS werden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit sowie ihrem Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System eingehend untersucht.

Die Ergebnisse der Arbeit umfassen die erarbeiteten Grundlagen – Modelle, Konzepte, Verfahren, Algorithmen sowie Beispiele – und können als „Werkzeugkasten“ zur Entwicklung zukünftiger GeoARS-Spezialisierungen verstanden werden.

Die Überprüfung der entwickelten Lösungen erfolgte stets anhand zweier Referenzbeispiele – „GeoARS-Landentwicklung“ und „GeoARS-Unfallaufnahme“ – in Form mehrerer Prototypen, auf verschiedenen Plattformen, verschiedenen Betriebssystemen und unterschiedlichen Programmiersprachen, womit die Übertragbarkeit der Ergebnisse gezeigt wird.

Developing georeferencing augmented reality systems on mobile devices with microsensors

Summary

This study aims to make a contribution to integrating augmented reality (AR) more deeply in daily (work) life, to make accessing it easier for (technical) applications, and to provide conceptual models for developing future AR graphic geodata processing systems.

The dissertation focuses intensely on a specific of AR systems type. These are systems that find application outside buildings (outdoor) and that also provide an absolute spatial reference between AR system and geodata on the earth's surface. These systems are herein denoted as georeferencing augmented reality system(s) for geodata (GeoARS) and further subdivided into mobile pedestrian and stationary systems.

Taking the low cost approach, GeoARS integrate various microsensors, can be used with platform-independent, off-the-shelf mass market hardware (smartphones, tablets, standalone components) and independent of operating systems and programming languages.

The GeoARS components are extensively examined with respect to their capabilities, utility, and application in AR systems.

The dissertation's results comprise the fundamentals worked out in the study – models, concepts, processes, algorithms and examples – and can be regarded as a „toolkit“ for developing future GeoARS specializations.

The solutions developed are tested in each case by reference to two examples – „GeoARS Land Development“ and „GeoARS Accident Surveying“ – in several prototypes on diverse platforms, various operating systems, and different programming languages, all designed to demonstrate the applicability of the results.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation	11
1.2	Zielstellung	11
1.3	Abgrenzung	12
1.4	Fragestellungen	13
1.5	Gliederung der Arbeit	13
2	Augmented Reality und Augmented Reality Systeme	15
2.1	Wahrnehmung und Verbreitung von AR in der Öffentlichkeit	15
2.2	Arten von AR-Systemen und Einsatzgebiete	16
2.3	Allgemeiner Aufbau von AR- und Geo-AR-Systemen	18
2.4	Problemstellungen und Herausforderungen	18
2.5	Georeferenzierende AR-Systeme im Außenbereich (GeoARS)	19
2.5.1	Beschreibung der Anwendungsumgebung in der Realen Welt	19
2.5.2	Abgrenzung zur Innenbereich-AR	20
2.5.3	Stand der Wissenschaft und Technik	21
2.5.4	Definition mobil-pedestrisch und stationär	22
3	Systemmodell GeoARS	23
3.1	Ansätze	23
3.2	Problemstellungen und Herausforderungen	25
3.3	Stand der Wissenschaft und Technik	27
3.4	Systemunterschiede zwischen mobil-pedestrischen und stationären GeoARS	27
3.5	Anforderungen an GeoARS	28
3.6	Gewählter AR-Modell-Ansatz (Übersicht)	29
3.6.1	Komponenten, Systeme, Verfahren	29
3.6.2	Ansatz zur Wahl der Bezugssysteme	31
4	Semantische AR-Geoobjektmodellierung	47
4.1	Modellierung von AR-Geodaten	47
4.1.1	Ansatz zur Datenmodellierung in GeoARS	48

4.2	Gewählter Ansatz der AR-Geoobjektmodellierung	50
4.2.1	Erweiterung von GIS-Objektmodellen um AR-Objekte	50
4.2.2	Raumbezug und Georeferenzierung von AR-Geoobjekten	51
4.2.3	Punktförmige AR-Geoobjekte	51
4.2.4	Linienförmige AR-Geoobjekte	52
4.2.5	Flächenförmige AR-Geoobjekte	55
4.2.6	Ansätze zur Objektbildung und Speicherung von AR-Geoobjekten	57
4.2.7	Realisierungsbeispiel Modellierung AR-Geoobjekte: „GeoARS-Unfallaufnahme“	61
4.2.8	Realisierungsbeispiel Modellerweiterung AR-Geoobjekte: „GeoARS-Landentwicklung“	65
4.3	Zwischenresümee	69
5	Visualisierung von AR-Geoobjekten	71
5.1	Ansätze	71
5.2	Problemstellungen und Herausforderungen	71
5.3	Stand der Wissenschaft und Technik	71
5.4	Gewählter Visualisierungsansatz	72
5.4.1	Datenprimitive und Visualisierungsform	72
5.4.2	Extensible 3D (X3D)	73
5.4.3	Open Graphics Library (OpenGL)	74
5.5	Nutzung von GIS-Daten	74
5.5.1	Dimensionserweiterung von vektoriiellen 2D-Geodaten	75
5.5.2	Verwendung von Karten und Rasterdaten in GeoARS	78
5.6	Realisierungsbeispiel Visualisierung AR-Objekte: „GeoARS-Landentwicklung“	78
5.7	Realisierungsbeispiel Visualisierung AR-Geoobjekte: „GeoARS-Unfallaufnahme“	80
5.8	Zwischenresümee	82
6	Darstellungskomponente	83
6.1	Ansatz	83
6.2	Problemstellungen und Herausforderungen	83
6.3	Stand der Wissenschaft und Technik	83
6.4	Gewählter Ansatz	84
6.4.1	Gewählter Ansatz: video see-through mit handgehaltenen Displays	84

6.5	Displays	89
6.5.1	Ermittlung der Leistungsfähigkeit	89
6.5.2	Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System	91
6.6	Realisierungsbeispiel „GeoARS-Landentwicklung“	91
6.7	Realisierungsbeispiel „GeoARS-Unfallaufnahme“	91
7	Position, Orientierung, Registrierung	93
7.1	Beschreibung der Ausgangssituation	93
7.1.1	Beschreibung der Ausgangssituation in Bezug auf die reale Welt	93
7.1.2	Beschreibung der Ausgangssituation in Bezug auf die virtuelle Welt	95
7.2	Problemstellungen und Herausforderungen	96
7.3	Stand der Wissenschaft und Technik	96
7.4	Ansätze	97
7.5	Sensorparameter	99
7.6	Drehratensensor	101
7.6.1	Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik	101
7.6.2	Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System	106
7.7	Beschleunigungssensor	110
7.7.1	Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik	110
7.7.2	Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System	120
7.8	Magnetfeldsensor	121
7.8.1	Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik	123
7.8.2	Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System	130
7.9	GNSS-Modul	132
7.9.1	Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik	132
7.9.2	Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System	133
7.10	Bildsensor	136
7.10.1	Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik	136
7.10.2	Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System	144
7.11	Virtuelle Kamera	145

7.12	Bestimmung der räumlichen Lage eines GeoARS	146
7.12.1	Berechnung von Nick- und Rollwinkel	146
7.12.2	Echtzeittransformationen mit Navigationsformeln	147
7.12.3	Gleichungen der Inertialnavigation	147
7.12.4	Numerische Integrationsverfahren	155
7.12.5	Inertialnavigation mit mobil-pedestrischen GeoARS	156
7.12.6	Echtzeitfähige 14-Parametertransformation	162
7.12.7	Orientierung-Prozessierung mittels Bildsensor in Echtzeit	167
7.12.8	Filterung	174
7.13	Gewählter Ansatz des 3D-Registrierungsverfahrens	175
7.13.1	Realisierungsbeispiel „GeoARS-Landentwicklung“	181
7.13.2	Realisierungsbeispiel „GeoARS-Unfallaufnahme“	182
8	GeoARS-Funktionalitäten und Interaktion	185
8.1	Ansätze	185
8.2	Problemstellungen und Herausforderungen	185
8.3	Stand der Wissenschaft und Technik	186
8.4	Gewählter Ansatz	187
8.4.1	Interaktion: Navigation	187
8.4.2	Interaktion: Systemeinstellungen	189
8.4.3	Interaktion: Symbolische Eingaben	189
8.4.4	Interaktion: Selektion	189
8.4.5	Interaktion: Manipulation	191
8.4.6	Interoperabilität	192
8.4.7	Verwendung eigener Karten	193
9	Schlussbetrachtung und Ausblick	195
9.1	Schlussbetrachtung	195
9.2	Ausblick	198
A	Ausgewählte Messgrößen und Statistik	201
A.1	Messwerte und Genauigkeit	201
A.1.1	Funktionales Modell	201
A.1.2	Stochastisches Modell	202

B	Ausgewählte Untersuchungen der Sensorik	209
B.1	Ausgewählte Untersuchungen Drehratensensor	209
B.1.1	Drehratensensor: Normalnutzung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung	209
B.1.2	Drehratensensor: Alternierende Normalnutzungs- und Nichtnutzungsphase	211
B.1.3	Drehratensensor: Normalnutzung mit visueller Rückkopplung	213
B.1.4	Drehratensensor: Horizontale Drehgeschwindigkeit stationäres GeoARS	216
B.2	Ausgewählte Untersuchungen Beschleunigungssensor	218
B.2.1	Beschleunigungssensor: Normalnutzung, nicht-kontinuierliche visuelle Rückkopplung	218
B.2.2	Beschleunigungssensor: Normalnutzung mit visueller Rückkopplung	220
B.2.3	Beschleunigungssensor: Alternierende Normalnutzungs- und Nichtnutzungsphase	221
B.2.4	Beschleunigungssensor: Beobachtung der Beschleunigung in Ruhelage	223
B.3	Magnetfeldsensor: ausgewählte Untersuchungen	226
B.3.1	Magnetfeldsensor: Beobachtung des Gierwinkels in Ruhelage	226
B.3.2	Magnetfeldsensor: Beobachtung diskreter Horizontalwinkeländerungen	227
B.4	GNSS-Modul: ausgewählte Untersuchungen	229
B.4.1	GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage	229
C	Erdmagnetfeldmodelle	231
C.1	Globale Modelle	231
C.2	Zusammenhang Gebietsgröße und Deklinationsänderung	233
D	Rotationen, Translationen, Transformationen	234
D.1	Rotationen	234
D.1.1	Euler-Winkel	234
D.1.2	Überführung von Euler-Winkeln in Quaternionen	235
D.2	Transformationen	237
E	Übersicht einbezogener/untersuchter Komponenten	241
F	Ergänzende Quelltexte	243
F.1	Pixel-Schattierer-A	243
G	Stichprobe Befragung Fachanwender der Geoinformation	245
	Literaturverzeichnis	247

Abbildungsverzeichnis	265
Tabellenverzeichnis	271
Quelltextverzeichnis	273
Danksagung	275
Verzeichnis der verwendeten Akronyme	277

1 Einleitung

1.1 Motivation

Reale Objekte lassen sich in einer realen Umwelt mit den menschlichen Sinnen erfassen und auf unterschiedliche Weise behandeln. Schwieriger ist es, Nichtvorhandenes oder Mögliches verschmolzen mit der Realität anschaulich darzustellen und zu vermitteln. Dies kann mit dem Instrumentarium der **Augmented Reality (AR)**, übersetzbar in den deutschen Sprachgebrauch mit Erweiterter Realität, erleichtert oder sogar vollständig erreicht werden. Die Nutzbarkeit für jedermann mit leicht zugänglicher Alltagshardware ist jedoch bis heute immer noch nicht hergestellt. Daraus ergibt sich die Motivation dieser Arbeit, fachbezogene Geodaten in der Realität unter Einsatz herkömmlicher kostengünstiger Alltagstechnik (z.B. handelsübliche Smartphones) sowie modular kombinierbarer kostengünstiger Einzelkomponenten zu untersuchen und zu konzipieren. Dies sind Gründe einen Beitrag zu leisten, die Augmented Reality tiefer in den (Arbeits-)Alltag zu integrieren bzw. leichter für darauf aufbauende (Fach-)Anwendungen zugänglich zu machen.

1.2 Zielstellung

Mit der vorliegenden Arbeit wird, ausgehend von auf dem **Massenmarkt** verfügbaren Hardware-Komponenten und handelsüblichen **Mobilgeräten** mit hohem oder höchstem Verbreitungsgrad, untersucht, welche konkreten Hard- und Softwarekomponenten wie und zu welchem Zweck in AR-Systemen eingesetzt werden können. Damit einhergehend wird das Ziel verfolgt, ausschließlich kostengünstigste (engl. **low cost**) Hardware zu verwenden. Es ist zu untersuchen, wie mit diesen Systemen Geodaten aus modernen Geodateninfrastrukturen (GDI) oder Geo-Informationssystemen (GIS) visualisiert und damit nachhaltig weitergenutzt werden können. Hierbei ist auf die Besonderheiten der in Betracht kommenden Hard- und Software-Komponenten einzugehen sowie die notwendige Algorithmik zum Einsatz von AR-Systemen für Geodaten zu erarbeiten. Die beabsichtigte Arbeitsumgebung und der Einsatzbereich der AR-Systeme ist der Bereich außerhalb von Gebäuden, nachfolgend als Außenbereich bezeichnet, unter Verwendung einer absoluten Georeferenzierung. Dieser Zielsetzung soll mit dem Akronym **GeoARS (Georeferenzierende Augmented Reality System(e) für Geodaten)** Rechnung getragen werden. Ein weiteres Ziel ist die Erschließung interdisziplinären Fachwissens unter anderem aus den Bereichen Geodäsie, Photogrammetrie, Geoinformatik und Computer Vision. Es gilt das fachspezifische Wissen der Teildisziplinen explizit für die Zwecke der Augmented Reality zu extrahieren, zu fusionieren, zu modifizieren und Lücken zu schließen, sodass die Realisierung von GeoARS gezeigt werden kann. Bisher konnte keine Arbeit recherchiert werden, in der die für AR-Zwecke im Außenbereich notwendigen Formeln und Algorithmen im Zusammenhang beschrieben und auf kostengünstiger Alltagshardware gesamtseitlich realisiert wurden. Diesbezüglich soll die vorliegende Arbeit auch als Werkzeugkasten (mit Algorithmen, Konzepten, Vorlagen, Hinweisen) für zukünftige AR-Entwicklungen auf diesem Gebiet dienen.

Es werden im Rahmen der Arbeit **anhand zweier Referenzbeispiele** die Verhaltensweisen von GeoARS unter praktischen Bedingungen untersucht. Bei dem ersten Referenzbeispiel handelt es sich um mehrere Prototypen auf Android Smartphone- und Windows Tablet-PC-Basis verschiedener handelsüblicher Geräte. Sie werden als unterstützendes Instrument für den praktischen Einsatz zur Entwicklung ländlicher Räume im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren, nachfolgend mit „**GeoARS-Landentwicklung**“ bezeichnet, verwendet. Im zweiten Beispiel wird ein zweiteiliges modulares AR-System mit stationärer Einheit und mobilen Tablet-PC entwickelt. Dieses System wurde im Rahmen des zweijährigen Forschungs- und Entwicklungsprojektes „LUN-AS 3D hybrid – Mobiles Laser-Unfall-Aufmaß-System zur präzisen Verkehrsunfallaufnahme/-dokumentation

auf der Basis eines benutzerfreundlichen und schnellen hybriden 3D-Verfahrens“, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, erarbeitet. Es soll in der Praxis bei polizeidienstlichen Verkehrsunfallaufnahmen und -dokumentationen seine Anwendung finden und wird nachfolgend unter dem Synonym „GeoARS-Unfallaufnahme“ geführt.

Mit diesen beiden Referenzbeispielen soll die Übertragbarkeit der zu untersuchenden und zu entwickelnden Konzepte auf verschiedenen Anwendungsfeldern gezeigt werden. Ebenfalls soll sowohl die Plattformunabhängigkeit der zu entwickelnden Augmented Reality Systemlösungen wie auch die vollständige Übertragbarkeit auf verschiedene Betriebssysteme und Programmiersprachen belegt werden.

1.3 Abgrenzung

Diese Arbeit orientiert sich neben einschlägiger Fachliteratur an thematisch angelehnten Dissertationen von u.a. Kluge [2012], Dähne [2008], Tönnis [2008], Tegtmeyer [2006], grenzt sich jedoch bereits durch die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Ziele ab.

Es wird deutlich vertiefender auf die Mikrosensorik eingegangen, kostengünstige Alltagshardware eingesetzt und praxistaugliche Echtzeit-Algorithmen für diese Geräteklasse untersucht und erarbeitet. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich weiterhin intensiver auf räumliche Koordinatensysteme für Geodaten und zur Bestimmung der räumlichen Lage des AR-Systems als die bisherigen Arbeiten. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Systeme werden als georeferenzierende Augmented Reality Systeme mit absolutem Raumbezug für mobil-pedestrische oder stationäre Anwendungsgebiete auf der Erdoberfläche im Außenbereich entwickelt. Sie integrieren verschiedene Mikrosensoren, sind mit plattformunabhängiger handelsüblicher Massenmarkt-Hardware verwendbar und unabhängig von Betriebssystem und Programmiersprache. Die gegenständlichen Systeme verwenden Geodaten verschiedener Datenquellen, sind grundsätzlich unabhängig vom Geo-Kontext und somit übertragbar auf viele Anwendungsfelder. Das schwerpunktmäßig betrachtete regionale Einsatz- und Untersuchungsgebiet ist der Bereich der Bundesrepublik Deutschland, wobei eine globale Verwendung der Konzepte möglich sein wird.

Begleitend zur Entstehungszeit dieser Arbeit wurden parallele konzeptionelle und technische Entwicklungen verfolgt. Dies schließt auf dem Kopf getragene Displays bzw. Datenbrillen (z.B. Google Glass) oder Kompaktgeräte (z.B. Google Tango) mit ein. Alle in dieser Arbeit vorzustellenden Konzepte sind so aufgestellt, dass sie allgemein übertragbar sind und auch für zukünftige Geräteklassen Anwendung finden können. Ein Ausschluss beider vorgenannten Gerätearten für die vorliegende Arbeit erfolgte insbesondere, weil sie nicht Bestandteil des Massenmarktes und damit auch nicht ausreichend niedrigpreisig sowie noch nicht weit verbreitet sind. Zudem ist ein deutlicher Vorteil gegenüber der hier betrachteten Hardware für den avisierten Einsatzzweck und den Einsatz im Außenbereich noch nicht erkennbar.

1.4 Fragestellungen

Die Arbeit wird geleitet von den nachfolgenden Fragestellungen:

- Wie lässt sich AR für fachliche Geodaten erschließen und für den (Arbeits-)Alltag nutzen?
- Kann die aktuell verfügbare kostengünstige Hardware (low-cost) für GeoARS verwendet werden? Wie genau sind die Mikrosensoren handelsüblicher mobiler Endgeräte und Einzelkomponenten? Gibt es Einschränkungen?
- Wie kann die Realität visuell um die Sicht auf virtuelle Geodaten mit mobilen kostengünstigen Endgeräten erweitert werden?
- Welche Darstellungsformen sind zur Darstellung der Geoobjekte im Rahmen der Augmented Reality geeignet? Wie genau können Geoobjekte dargestellt werden?
- Wie können die vielfach lediglich zweidimensional vorliegenden Geofachdaten Geographischer Informationssysteme in den dreidimensional operierenden GeoARS verwendet werden?

1.5 Gliederung der Arbeit

Nachdem mit Kapitel 1 die Motivation, die sich daraus ergebenden Zielstellungen, die Abgrenzung zu anderen Arbeiten sowie die Arbeit leitenden Fragestellungen dargelegt wurden, gilt es in Kapitel 2 die Augmented Reality für den hier gegenständlichen Kontext näher zu definieren und die Definition von AR-Systemen zu erarbeiten. Dabei werden die aktuelle Wahrnehmung und Verbreitung von AR in der Öffentlichkeit analysiert, die Arten von AR-Systemen und der allgemeine Aufbau sowie die Spezialisierung Geo-AR-Systeme für den Außenbereich (GeoARS) klargelegt. In diesem Zusammenhang werden die bestehenden Probleme und Herausforderungen diskutiert.

In Kapitel 3 wird das Systemmodell der hier gegenständlichen AR-Systeme erarbeitet und die einbezogenen Komponenten, Systeme und Verfahren beschrieben. Hierbei wird eine Unterscheidung der GeoARS in mobile, pedestrische und stationäre GeoARS getroffen und deren Anforderungen formuliert. Ebenfalls wird der Stand der Wissenschaft und Technik sowie bestehende Problemstellungen und Herausforderungen beschrieben. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die Wahl und Definition der verschiedenen beteiligten Bezugssysteme.

Der objektorientierte Entwicklungsansatz von GeoARS beinhaltet die semantische Modellierung, die Bildung sowie die Speicherung von AR-Geoobjekten und wird in Kapitel 4 erarbeitet.

Eine Teilaufgabe von GeoARS ist es, virtuelle graphische Objekte zu visualisieren. Hierzu werden in Kapitel 5 die für Augmentationen geeigneten Visualisierungsformen der Geoobjekte sowie Realisierungsverfahren untersucht und die Resultate erläutert.

Zur Realisierung und Darstellung der virtuellen Geoobjekte wird in Kapitel 6 eine geeignete Komponente und ein geeignetes Verfahren festgelegt sowie die Leistungsfähigkeit der gewählten Darstellungskomponente ermittelt.

Das Kapitel 7 umfasst die Themenbereiche Position, Orientierung und 3D-Registrierung. Hierbei werden alle beteiligten Hardwarekomponenten untersucht sowie deren Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System

herausgestellt. Es werden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage eines GeoARS erarbeitet und abschließend das gewählte 3D-Registrierungsverfahren unter Einbeziehung aller beteiligten Komponenten im Zusammenhang beschrieben.

Mit der Interaktion zwischen Anwender (Mensch) und GeoARS (Maschine) befasst sich das Kapitel 8. Hierbei werden auch realisierte praktische Funktionalitäten eines GeoARS vorgestellt.

Die Schlussbetrachtung zu den Ergebnissen dieser Arbeit sowie ein Ausblick wird mit Kapitel 9 gegeben.

Hinweise zur Notation

Die vorliegende Arbeit trägt, wie oben beschrieben, interdisziplinäres Fachwissen aus verschiedenen wissenschaftlichen Bereichen zusammen, in denen unterschiedliche Notationen für mathematische Beschreibungen verwendet werden. Dieser Umstand führt teilweise zu Kollisionen in der Schreibweise mathematischer Ausdrücke. Es wurde dahingehend versucht, die Notationen weitestgehend zu vereinheitlichen und der geodätischen Schreibweise anzugleichen.

2 Augmented Reality und Augmented Reality Systeme

2.1 Wahrnehmung und Verbreitung von AR in der Öffentlichkeit

Der Begriff „**Augmented Reality**“ (AR) ist im englischsprachigen Raum entstanden und wird in deutschsprachiger Literatur und Publikation mehrheitlich original verwendet. Synonym kann die Übersetzung „Erweiterte Realität“ verwendet werden. Es fanden bereits in den späten 1960er Jahren erste technische Entwicklungen statt. Zum Beispiel entwickelte 1968 der Amerikaner Ivan Sutherland das wohl erste Head-Mounted Display, vgl. [Bimber u. Raskar 2005]. Der eigentliche Begriff „Augmented Reality“ wurde zu Beginn der 1990er von Caudell u. Mizell [1992] geprägt und publiziert. In den Folgejahren definierte Azuma [1997] und konkretisierten Azuma u. a. [2001] die Eigenschaften von AR-Systemen: aus technischer Sicht müssen sie reale und virtuelle Objekte in einer realen Umwelt kombinieren, interaktiv und in Echtzeit funktionieren sowie reale und virtuelle Objekte in Bezug zueinander setzen. Die zuletzt genannte Eigenschaft wird als **3D-Registrierung** bezeichnet und wirkt sich auf die vom Benutzer wahrgenommenen Überlagerungsqualität besonders stark aus. Die Augmented Reality ist eine Form der Mensch-Technik-Interaktion, bei der dem Anwender die unmittelbare Realität durch verschiedenartige Informationen angereichert wird, vgl. [Bill u. Zehner 2001]. Die Anreicherung der Realität mit zusätzlichen Informationen kann hierbei alle Sinnesorgane des Menschen (Hören, Riechen, Schmecken, Tasten, Sehen) einbeziehen, vgl. [Azuma u. a. 2001]. Weiterführende Definitionen erweitern die vorgenannte überwiegend technische Definition von Augmented Reality um nichtmenschliche Wahrnehmungsmöglichkeiten, z.B. durch Infrarot- oder Radarsensorik, vgl. [Mehler-Bicher u. Steiger 2014].

In der Augmented Reality wird Realität und Virtualität mittels technischer Hilfsmittel miteinander vermischt. In dem von Milgram u. Kishino [1994] aufgestellten Modell des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums wird der Bereich zwischen Realität auf der einen Seite und Virtualität auf der Gegenseite als gemischte Realität bezeichnet. Die Augmented Reality ist in diesem Kontinuum nahe der Realität und weiter entfernt der Virtualität eingeordnet, da hier die Realität lediglich mit wenigen virtuellen Elementen angereichert wird. Weitere Ausführungen zur Historie und den vielfältigen Varianten der Augmented Reality können der weiterführenden Literatur - in Mehler-Bicher u. Steiger [2014], Dörner u. a. [2014], Tönnis [2010], Bimber u. Raskar [2005], Friedrich [2004] - entnommen werden.

Nahezu drei Jahrzehnte nach der ursprünglichen Begriffsprägung wird die Augmented Reality zunehmend verbreiteter durch die Gesellschaft wahrgenommen. Seit 2005 [Fenn u. Linden 2005] wird sie auch im sogenannten Hype Zyklus für aufstrebende Technologien (engl. hype cycle for emerging technologies) [Fenn u. Raskar 2008] der Gartner Inc., einem Anbieter von Marktforschungsergebnissen, aufgeführt und seitdem kontinuierlich beobachtet. Hierbei werden aufstrebende Technologien beobachtet und jährlich ihr aktueller Entwicklungsstand eingeschätzt. Bei dem Hype Cycle Modell wird davon ausgegangen, dass alle neuen Technologien einen bestimmten Zyklus durchlaufen, vgl. Abbildung 2.1. Der Zyklus wird in verschiedene Phasen - beginnend mit der erstmaligen Erscheinung einer Technologie (1. Phase), einer Phase des Enthusiasmus und hohen Erwartungen (2. Phase), gefolgt von der Phase der Desillusion (3. Phase) sowie einer Phase in der bestehende Schwierigkeiten gelöst werden (4. Phase) und der abschließenden Marktreife- bzw. Einführungsphase (5. Phase) - eingeteilt. In der Abbildung 2.1 ist ersichtlich, dass sich AR aktuell in der Tiefpunktphase (3. Phase) des Zyklus befindet. Während dieser Phase ist es auch Aufgabe der Wissenschaft aufgetretene Probleme zu lösen und praktische Schwierigkeiten überwinden zu helfen. Dies ist auch eine Motivation der vorliegenden Arbeit. Beachtenswert ist die Tatsache, dass der Zeitraum den Augmented Reality bis zum Erreichen der letzte Phase seit Beginn der Beobachtung im Jahre 2005 stets auf 5-10 Jahre geschätzt wurde (vgl.

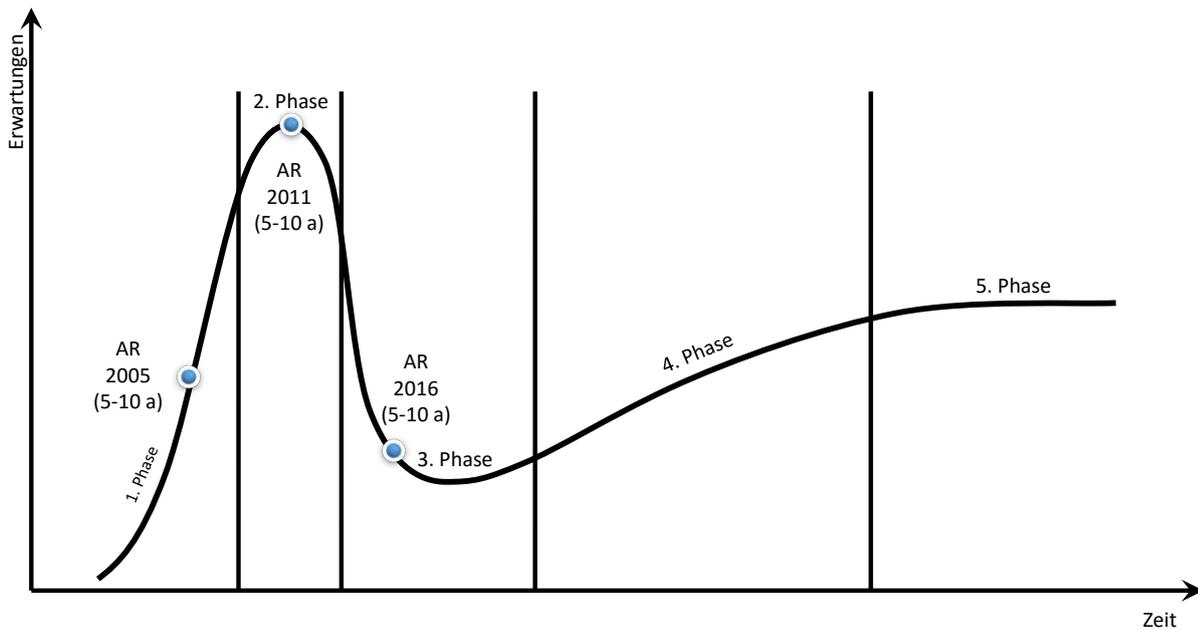


Abbildung 2.1: Darstellung der Augmented Reality im Hype Cycle nach Fenn u. Linden [2005] mit Jahresstand 2005, 2011 und 2016; (5-10 a) entspricht der geschätzten Jahresanzahl des jeweiligen Beobachtungszeitpunktes bis zum Erreichen der letzten Phase

Abbildung 2.1: „(5-10a)“ und auch im jüngsten Bericht so eingeschätzt wird, vgl. [Fenn u. Linden 2005], [Forni u. van der Meulen 2016]. Daraus wird geschlossen, dass die Prognose, wann AR tatsächlich im Alltag vollständig integriert sein wird, unter Zugrundelegung stets aktueller Erkenntnisse, schwer einzuschätzen ist. Auch im deutschsprachigen Raum kann beobachtet werden, dass AR noch nicht vollständig im Alltag bzw. Arbeitsalltag angekommen ist. So haben beispielsweise zwei einfache Stichproben in Berlin und Brandenburg aus den Jahren 2015 und 2016 unter kommunalen Vertretern, Vertretern von örtlichen Versorgungsunternehmen und GIS-Fachanwendern ergeben, dass etwa 40-60 % der Befragten der Begriff Augmented Reality und weiterführend damit zusammenhängende Anwendungen noch gänzlich unbekannt waren, vgl. Anhang G. Auch Mehler-Bicher u. Steiger [2014] kommen zu diesem Ergebnis. Eine mögliche Schlussfolgerung aus dem Vorgenannten ist, dass das Forschungs- und Aufgabenfeld von Augmented Reality weiter zu entwickeln ist, sofern das Ziel der vollständigen Integration in alltägliche Anwendungen, Fachanwendungen und den Alltag erreicht werden soll.

2.2 Arten von AR-Systemen und Einsatzgebiete

Es gibt vielfältige Möglichkeiten AR-Systeme nach Arten zu klassifizieren. Eine Möglichkeit ist die Unterteilung nach ihren Darstellungsmöglichkeiten (vgl. Tabelle 2.1), das heißt nach den angesprochenen menschlichen Sinnen. Demnach können sie in visuelle, akustische, gustatorische, olfaktorische, haptische AR-Systeme eingeteilt werden, vgl. [Azuma 1997] und [Azuma u. a. 2001]. Ebenfalls können sie, wie in Tabelle 2.2 dargestellt, nach ihren Interaktionsmöglichkeiten (Selektion, Manipulation, Navigation, Systemeinstellungen, symbolische Eingaben) [Tönnis 2010], [Bowman u. a. 2004] nach verwendeter Hardware [Azuma u. a. 2001], [Milgram u. a. 1994] oder Einsatzgebieten und Anwendungsmöglichkeiten [Azuma 1997], Mehler-Bicher u. Steiger [2014] klassifiziert. Teilt man die AR-Systeme nach der Verfahrensart zur Bestimmung der räumlichen Lage des

Tabelle 2.1: Übersicht Arten der Darstellung

Darstellung	Sinnesorgan
visuell	Augen
akustisch	Ohren
gustatorisch	Zunge
olfaktorisch	Nase
haptisch	Haut

Tabelle 2.2: Übersicht Interaktionstechniken

Interaktionstechnik	Untergruppe
Selektion	
Manipulation	
Navigation	Bewegung
	Signaletik
Systemeinstellungen	
Symbolische Eingaben	

Systems [Rolland u. a. 2001] auf (vgl. Tabelle 2.3), so kann in die sechs Grundprinzipien Laufzeitmessung, räumliches Scannen (darunter auch die markerbasierten¹ optischen Verfahren [Tönnis 2010]), inertielle Verfahren, mechanische Verfahren, Phasenvergleichsverfahren und direkte Feldabtastung, jeweils mit verschiedenen Untervarianten unterschieden werden. GeoARS können weiterführend hinsichtlich ihrer Computergraphik-Bestandteile in die Klasse der Systeme mit weicher Echtzeitanforderung eingeordnet werden, vgl. [Nischwitz u. a. 2007]. Dieser Klasse liegt eine Bildwiederholrate von 1 Hz bis 60 Hz zugrunde – sie beträgt bei Virtual Reality Anwendungen und angelehnt bei AR-Anwendungen etwa 30 Hz.

Die in dieser Arbeit gegenständlichen AR-Systeme lassen sich gut über die Klassifikation nach der Darstellungsmöglichkeit und dem Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage beschreiben, vgl. Abschnitt 3.6 (Gewählter AR-Modell-Ansatz (Übersicht)).

Tabelle 2.3: Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage, vgl. auch [Rolland u. a. 2001]

Prinzip	Untergruppe
Laufzeitmessung	Ultraschallmessung
	Infrarotmessung
	GNSS
	Optische Drehratenmessung
Räumliches Scannen mit den Varianten: Outside-In und Inside-Out	Videometrie
	Laserscanner
Mechanische Verbindungen	
Inertialsensorik	mechanische Drehratenmessung
	Beschleunigungsmessung
Phasenvergleichsverfahren	
Direkte Feldabtastung	Magnetfeldmessung
	Gravitationsmessung

¹Marker sind Muster oder Referenzbilder die von der Bildverarbeitungs-komponente erkannt werden können, um daraus die räumlich Lage des AR-Systems zu berechnen, vgl. [Tönnis 2010].

2.3 Allgemeiner Aufbau von AR- und Geo-AR-Systemen

Unter Geo-AR-Systemen werden in dieser Arbeit AR-Systeme verstanden, die grundsätzlich einen direkten absoluten Bezug zur Erdoberfläche (Georeferenzierung) realisieren können. Diese können weiterführend in AR-Systeme für den *Innenbereich* (innerhalb von Gebäuden) und AR-Systeme für den *Außenbereich* (außerhalb von Gebäuden, auf der Erdoberfläche) unterteilt werden, mit der Maßgabe das Alleinstellungsmerkmal der absoluten Georeferenzierung nicht zu verlieren. Für die Herstellung des Bezuges zur Erdoberfläche ist die Verwendung von räumlichen geodätischen Bezugssystemen eine grundsätzliche Voraussetzung. Die hier gegenständlichen GeoARS sind der Gruppe der AR-Systeme für den Außenbereich zugeordnet.

Den Aufbau von AR-Systemen hat Tönnis [2010] in einem Dreikomponentenmodell zusammengefasst. Nach diesem Ansatz setzen sich AR-Systeme im Wesentlichen aus einer Komponente zur Ermittlung der räumlichen Lage des Systems (Tracking), einer Komponente, mit der die virtuellen Daten gemeinsam mit der realen Welt dargestellt werden (Darstellung) und einem Bestandteil zur Kommunikation von Mensch und Maschine (Interaktion). Die letztgenannte Komponente kann grundsätzlich alle Sinne des Menschen ansprechen und müssen somit nicht nur auf eine Visualisierung beschränkt sein.

Für GeoARS wird als zusätzliche Komponente die Datenverarbeitungskomponente für Geodaten eingeführt. Der detaillierte Aufbau wird im Rahmen des AR-Modell-Ansatzes (vgl. Abschnitt 3.6) erarbeitet.

2.4 Problemstellungen und Herausforderungen

Die Problemstellungen und Herausforderungen von GeoARS lassen sich in Teilproblemfelder zerlegen und weiterführend aus Hardwaresicht (Prozessierungseinheit, Display, Sensoren), Softwaresicht (mathematische Modelle, Echtzeitalgorithmik, Sensorverwendung/Messdatenverarbeitung) und aus Datensicht (Grafik/visuelle Ausprägung, Fachdaten/Semantik, Datenhaltung) betrachten.

Die (mobile) Hardware hat eine verschiedenartige Dateneingabe, -verarbeitung und -visualisierung in Echtzeit zu leisten und stellt gerade durch diese notwendige Echtzeitfähigkeit eine große Herausforderung dar, sofern im Niedrigpreissegment des Konsumentenbereichs mit Alltagshardware operiert wird. Insbesondere gilt es mit unterschiedlichen physikalischen Komponenten (u.a. Mikrosensoren, Display, Kamera) umzugehen. Als Herausforderung gilt es hier die Zuverlässigkeit und erforderliche Leistungsfähigkeit sowie den Aufgabenbereich jeder Komponente zu untersuchen. Die Erarbeitung der komplexen oder auch gezielten Nutzungsmöglichkeiten von Mikrosensoren in GeoARS stellt hierbei eine der zu lösenden Hauptaufgaben dar. Ebenfalls gilt es insbesondere die Kamera-Komponente zu untersuchen - sie liefert in der Regel verzerrte Echtzeit-Video-Bilder [Kreuziger u. a. 2015], die korrigiert werden müssen. Weiterhin hat die gesamte Hardware die Arbeit von Navigationssystem, Präsentationssystem und Geoinformationssystem gleichzeitig zu leisten und stellt allein durch diese Aufgabenfülle eine besondere Problematik dar. Aus Softwaresicht bildet die echtzeitfähige Verarbeitung der Sensordaten und die algorithmische Verbindung der geodätischen Bezugssysteme zu den Koordinatensystemen der virtuellen Daten sowie die Behandlung der zeitlichen Änderungen der geodätischen Bezugssystemrealisierungen in Zusammenhang mit der Aufgabe der Bestimmung der räumlichen Lage eines GeoARS einen zentralen Untersuchungsgegenstand. Aus Sicht der Geodaten ist die Herausforderung, Geodaten bzw. Geofachdaten echtzeitfähig aufzubereiten und in der Realität passgenau zu visualisieren. Für Geodaten auf der Erdoberfläche besteht hier das Problem der unebenen Topographie der Oberfläche. Zudem gibt es derzeit keinen festgeschriebenen Rahmen, keine Vorschrift und keine Norm für Daten der Augmented Reality, sodass die Schaffung eines geeigneten Datenkonzeptes für AR-Geoobjekte eine

weitere Herausforderung dieses Teilproblemfeldes bildet. Insgesamt wirken die vorgenannten Teilprobleme aus Hardware, Software und aufbereiteten Geodaten stark auf die in Echtzeit zu realisierende 3D-Registrierung ein und bilden eine geschlossene Herausforderungskette. Auch in anderen Veröffentlichungen wird die 3D-Registrierung insgesamt als wichtige und zu lösende Herausforderung für AR-Systeme angesehen, vgl. z.B. [Broschart u. Zeile 2014], [Langlotz 2014], [Müller 2014], [Friedrich u. a. 2013], [Kreuziger u. Hehl 2012], [Bähler u. Stark 2012], [Woodward u. Hakkarainen 2011], [Schall u. Schmalstieg 2010], [Woodward u. a. 2010], [Izkara u. a. 2009].

2.5 Georeferenzierende AR-Systeme im Außenbereich (GeoARS)

Aus dem Titel und der Zielstellung dieser Arbeit geht bereits hervor, dass die hier zu betrachtenden AR-Systeme - **GeoARS** (**Georeferenzierende Augmented Reality System(e)** für Geodaten) einen starken Bezug zur Erdoberfläche aufweisen und durch das Präfix **Geo** signalisiert wird. Dies beinhaltet auch die **geographische** Systemeigenschaft und stellt die thematische Verbindung der hier gegenständlichen AR-Systeme zu den weit verbreiteten Geo-Informationssystemen her. Der erforderliche Bezug zur Erdoberfläche der hier gegenständlichen AR-Systeme basiert auf der Einbeziehung **geodätischer** Mess- und Rechenverfahren. Diese Eigenschaften werden mit dem Attribut **georeferenzierend** assoziiert. Nach Bill u. Zehner [2001] kann Georeferenzierung „... als räumliches Metakzept betrachtet werden, womit räumliche Referenzinformation einem Datensatz mitgegeben wird.“ – einem Konzept dem auch GeoARS folgen. Der Ansatz dieser Arbeit sieht ebenfalls vor, auf Mobilgeräte-Basis mit Mikrosensoren zurückzugreifen, entweder in Form von Kompaktgeräten (z.B. Smartphones oder Tablets) oder in Form kombinierbarer Module oder Komponenten. Der Fokus soll diesbezüglich auf Alltagshardware (engl. consumer hardware) gerichtet sein, das heißt Geräten, die sich mit hoher Verbreitung (gegebenenfalls auch zu anderen Zwecken) bereits in alltäglicher Verwendung befinden. Dies betrifft insbesondere die Geräteplattform und Mikrosensoren.

2.5.1 Beschreibung der Anwendungsumgebung in der Realen Welt

Anwendungsumgebungen für AR-Systeme im Außenbereich stellen eine sehr heterogene, dynamische und durch diverse Faktoren beeinflusste Umgebung dar. Der hier verwendete Begriff der Umgebungsfaktoren erfolgt in Anlehnung an den in der interdisziplinären Forschungsrichtung der Umweltwissenschaften verwendeten Begriff Umweltfaktoren, vgl. [Breidenbach 2002], [Townsend u. a. 2014], [Knodel u. Kull 1981]. In dieser Arbeit wird unter einem **Umgebungsfaktor** eine Erscheinung verstanden, die die Komponenten eines GeoARS, z.B. Messwerte der Sensorik, beeinflusst.

In der Tabelle 2.4 erfolgt eine Zusammenstellung über die vorherrschenden Einflussfaktoren, die GeoARS auf die verschiedenste Weise beeinflussen. Die aufgeführten Faktoren haben einfachen oder mehrfachen Einfluss auf die System-Komponenten; sie wirken sich somit direkt auf die Nutzbarkeit und Systemintegrität aus und sind bei Systemkonzeptionen in die Überlegungen einzubeziehen. Beispielsweise beeinflusst starkes Sonnenlicht die Lesbarkeit der dargestellten Objekte auf dem Display (Darstellungskomponente). Durch Wind bewegte Realobjekte oder Gegenlicht erschweren optische Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage. Niederschläge behindern ggf. die Interaktion zwischen Mensch und Maschine und niedrige Temperaturen vermindern die Einsatzdauer eines GeoARS.

Tabelle 2.4: Umgebungsfaktoren mit Einfluss auf GeoARS

Umgebungsfaktor	Einfluss/ Auswirkung
Licht/ Ausleuchtung	wechselnde Lichtverhältnisse (Intensitätsänderungen, Gegenlicht, Schatten, etc.)
Temperatur	Temperaturschwankungen während der Verwendung möglich; jahreszeitliche Temperaturunterschiede; tlw. Extremwerte (z.B. direkte Sonneneinstrahlung)
Luftfeuchtigkeit/Niederschlag	Niederschlag und Sichtbehinderung durch Regen, Nebel, etc.
Luftdruck	Druckschwankungen während der Verwendung; Änderung mit der Höhe oder Wetterlage
Wind	Realobjekte werden bewegt
Erdrotation	je nach Empfindlichkeit des Drehratensensors in Ergänzung der AR-Systembewegung zu beachten
Gravitation	lokale Abweichungen von der Normalschwere (Schwerestörung)
Erdmagnetismus	zeitliche/regionale Variationen während der Verwendung; Magnetfeldstörungen, Störung des Erdmagnetfeldes im Einflussbereich der Sensorik durch Realobjekte (z.B. elektr. Geräte, Fahrzeuge)
(Jahres-)Zeit	jahreszeitliche Änderungen (z.B. Vegetationsperioden) bewirken Abschattung und Verdeckung
Objekte	Eigenbewegung von Realobjekten (Äste, Blätter, Fahrzeuge, Personen, etc.) Oberflächenbeschaffenheit: Farbe und Struktur von Realobjekten; Reflexion in Systemnähe, Multipath
Sonnenenergie	Variationen im externen Magnetfeld, u.a. in Ionosphäre [Bauer 2011] und Magnetosphäre [GFZ 2016d]

2.5.2 Abgrenzung zur Innenbereich-AR

In den zurückliegenden Jahren wurden viele zivile Anwendungen für den Innenbereich realisiert. Mehler-Bicher u. Steiger [2014] und Dörner u. a. [2014] führen vielfältige Beispiele auf. Darunter befinden sich Anwendungsbeispiele zur Möbeleinrichtung oder zur Visualisierung von 3D-Objekten auf Printmedien und Karten.

Die Abgrenzung von GeoARS zur Innenbereich-AR lässt sich über die verwendeten Daten, den absoluten Raumbezug zur Erdoberfläche und den einsetzbaren Sensoren formulieren. Während die Innenbereich-AR regelmäßig keinen absoluten Bezug zu den geodätischen Bezugssystemen der Erde herstellt und eine relative Positionierung der virtuellen Objekte zur Realität verwendet, operieren GeoARS stets in einem globalen geodätischen Bezugssystem mit absolutem Raumbezug. Die verwendeten virtuellen Daten sind Geodaten, in der Regel aus geographischen Informationssystemen und mit international genormten Koordinatensystemen. Für den Innenbereich lassen sich globale Satellitenpositionierungsdienste oder Magnetfeldsensoren aufgrund der Signalstörungen innerhalb von Gebäuden regelmäßig nicht oder erschwert verwenden. Aktuell kann beobachtet werden, dass überwiegend optische Sensoren (u.a. auch Infrarot) [Tönnis 2010], [Mehler-Bicher u. Steiger 2014]), kombiniert mit markerbasierten oder merkmalsbasierten Auswerteverfahren [Dörner u. a. 2014] eingesetzt werden. In GeoARS erfolgt zusätzlich zur Verwendung der optischen Sensoren die Nutzung der geodynamischen Phänomene der Erde mittels Erdmagnet- und Schwerfeld sowie die Einbeziehung

globaler Satellitenpositionierungsdienste. Hinsichtlich der Nutzung der Sensorik zur Bestimmung der globalen räumlichen Lage des Systems treten letztgenannte Sensoren sowie die dazugehörigen Auswertelgorithmen gegenüber den Auswerteverfahren der optischen Sensorik in den Vordergrund.

2.5.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die aktuell erhältlichen handelsüblichen mobilen Endgeräte (z.B. Smartphones, Tablets oder modulare Einzelkomponenten) sind mit Mehrkernprozessoren und zusätzlichen Grafikchips ausgerüstet. Der technische Ausbau mobiler Datennetz- und Telekommunikationsstrukturen in Verfügbarkeit und Geschwindigkeit wurde in den letzten Jahren weiter vorangetrieben. Für einige Teile der Bundesrepublik Deutschland, insbesondere der ländlichen Regionen (einem Kernanwendungsgebiet für GeoARS), ist der Netzausbau aber noch nicht vollständig erfolgt, vgl. [Mohr 2016]. Der letztgenannte Punkt macht es erforderlich, die virtuellen Daten auf dem Mobilgerät persistent vorzuhalten und alle Berechnungen geräteintern durchzuführen. Die Rechenkraft verteilter Server ist so im Regelfall nicht nutzbar. Dies hat jedoch gleichzeitig den Vorteil, dass serverseitig keine Kosten für zusätzliche Infrastrukturen zur Betreuung von AR-Anwendungen anfallen.

Vielfältige durch die Wissenschaft erarbeitete Konzepte mit ihren Algorithmen und internationalen Normungen (z.B. Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), International Organization for Standardization (ISO), Open Geospatial Consortium (OGC)) auf den Gebieten der Geoinformatik, Geodäsie, Computer Vision und Photogrammetrie können in der Augmented Reality ihre Anwendung finden, wobei die beschränkten Hardwareressourcen beachtet und die parallele Ausführung aller Prozesse der Darstellungs-, Interaktions-, Positionierungs- und Orientierungskomponenten stets in Echtzeit erfolgen muss. Die Einzelkomponenten sind bislang nicht auf den hier gegenständlichen Kontext evaluiert und zusammengeführt worden.

Eine komplexe Verbindung von Einzellösungen (Spezialisierungen oder ein Baukastensystem) aus den verschiedenen Forschungsdisziplinen - bei gleichzeitig beschränkten Hardwareressourcen, der Echtzeitnotwendigkeit und einer anwendungsbezogenen Genauigkeit - ist bislang nicht existent.

Hinsichtlich der Positionierungs- und Orientierungskomponenten lässt sich beobachten, dass häufig optische Verfahren und hier überwiegend markerbasierte Verfahren (vgl. Abschnitt 7.10.2) zur Bestimmung der räumlichen Lage des Systems verwendet werden. Höhl u. Broschart [2015] führen diesen Aspekt auch auf Performance-Defizite aktueller handelsüblicher Hardware mobiler Endgeräte zurück. Merkmalsbasierte² und nichtoptische Multisensorverfahren sind rechenintensiv und benötigen performante mobile Hardware oder eine effiziente Ausnutzung der existierenden Hardwaresysteme, z.B. auch durch die in dieser Arbeit vorgestellte GPU-Nutzung. Es lässt sich feststellen, dass markerbasierte und merkmalsbasierte optische Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage des AR-Systems robust funktionieren, solange stabile und geeignete Umgebungsfaktoren vorliegen. Allein wechselnde Lichtverhältnisse, Änderungen der Vegetation, durch Wind bewegte Objekte oder Niederschlag (vgl. Tabelle 2.4) führen zu einem Systemversagen. Doch genau diese Erscheinungen treten im Anwendungsbereich von GeoARS auf, sodass andere Lösungen eingesetzt werden müssen. Systeme, die zusätzlich Tiefensensoren benutzen, wie z.B. Google Tango, funktionieren nur im Nahbereich von wenigen Metern [Google 2016b] und eignen sich aus sensorischer Sicht nicht.

Es gibt AR-Systeme, die auf mobiler Hardware aufbauen und im Außenbereich einsetzbar sind. Teilweise beruhen diese System nicht auf kostengünstiger Alltagshardware (z.B. Schall u. a. [2013]) und teilweise sind die verwendeten Algorithmen und Systemzusammenhänge nicht offengelegt (z.B. Bundock [2012]). Sie benötigen

²es werden statt Referenzbildern, natürliche Merkmale (engl. Features) genutzt, vgl. [Tönnis 2010]

mobile Datenverbindungen oder lassen die Verwendung von standardisierten Geodaten bzw. Geofachdaten nicht zu (z.B. AR-Browser „wikitude“ oder „layar“).

2.5.4 Definition mobil-pedestrisch und stationär

Die Begriffe „mobil“ und „stationär“ werden in vielen Kontexten verwendet, sind weitläufig und auch von der Fachdisziplin abhängig, in der sie verwendet werden. In dieser Arbeit wird ein System als „mobil“ aufgefasst,

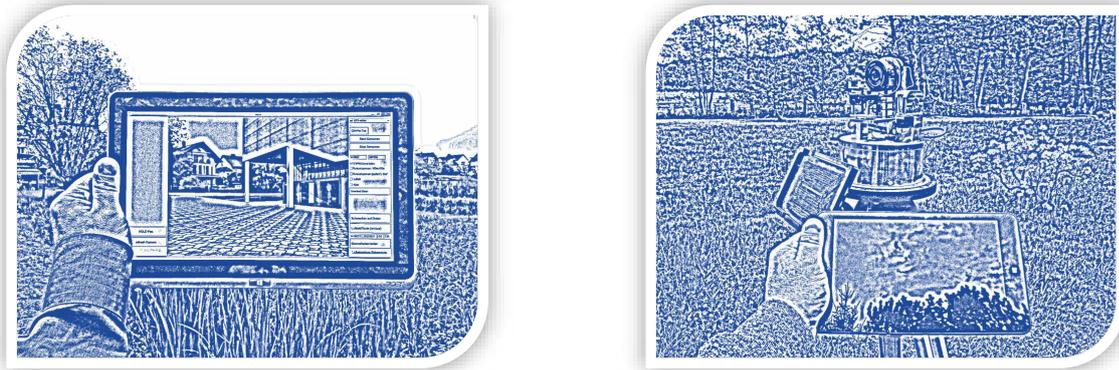


Abbildung 2.2: Vision: mobil-pedestrisches (links) und stationäres (rechts) GeoARS

wenn es sich in höchst kompakter Form während der Fortbewegung als Fußgänger, nachfolgend als **mobil-pedestrisch** bezeichnet, benutzen lässt. Dem gegenüber wird ein System, dass sich zwar ohne größeren Aufwand tragen ließe, jedoch aufgrund seiner Konzeption, beispielsweise wegen der Nutzung spezieller Sensorkomponenten, für die Zeit der Nutzung an einem temporär festen Ort (z.B. einem Stativ) gebunden ist, als **stationär** betrachtet, vgl. Abbildung 2.2. Beide Ausprägungen lassen sich in die Definition nach Azuma [1997] bzw. Azuma u. a. [2001] als AR-Systeme einordnen, solange sie die dort beschriebenen Anforderungen erfüllen.

3 Systemmodell GeoARS

3.1 Ansätze

Die nachfolgenden Ausführungen dienen als Vorüberlegung für die später in Abschnitt 3.6 zu treffende Festlegung zur Modellierung eines GeoARS. Hierbei werden die in Abbildung 3.1 aufgeführten Faktoren als maßgeblich und mit direkter Einflussnahme auf die Modellierung eines GeoARS gesehen, die es vor der eigentlichen Systemmodellierung zu hinterfragen gilt.

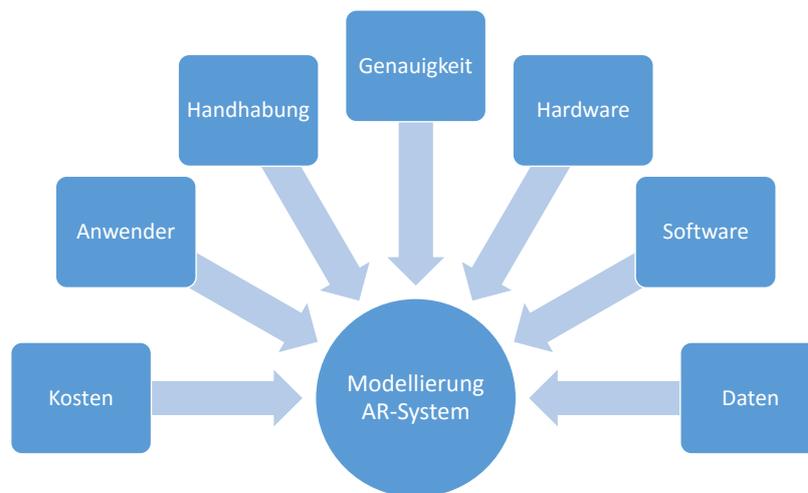


Abbildung 3.1: Einflussfaktoren auf die Modellierung eines GeoARS

Über den gezielt zu hinterfragenden Einsatzzweck hinaus sind die Herstellungskosten, wie auch die laufenden Kosten eines GeoARS von wesentlicher Bedeutung für die tatsächliche Einsetzbarkeit im (Arbeits-)Alltag. Diesbezüglich besteht der Ansatz darin, die GeoARS einerseits mit kostengünstigster Sensorik und Hardware zu realisieren und andererseits die laufenden Kosten zu minimieren. So wird beabsichtigt, alle Rechenprozesse durch das AR-System selbst durchführen zu lassen und keine externen Server (Kostenstelle) zu verwenden. Auch softwareseitig sollen die Kosten durch Vermeidung kostenpflichtiger Entwicklungsumgebungen und kostenpflichtiger Bibliotheken minimiert werden. Hinsichtlich des **Anwenderkreises** besteht die Intention darin, GeoARS für die Nutzung von Fachanwendern auszustatten und gezielt den praktischen Erfordernissen des Arbeitsalltags anzupassen. Hierbei werden Schnittmengen zwischen verschiedenen Anwendungsbereichen erwartet. Die Modellierung von AR-Systemen hängt stark von Bedingungen ab, unter denen es eingesetzt werden soll. Dabei spielen **Handhabungsparameter**, wie Gewicht, Ausdauer, benötigte Leistung und für Außenanwendungen teilweise auch die Wetterbeständigkeit, eine zentrale Rolle. Ziel und Ansatz ist es, eine leichtes ausdauerndes geschlossenes System zu modellieren, das zudem ohne zusätzliche Außenverkabelung und Außenmodule einsatzfähig ist, um einer höchst nutzerfreundlichen Handhabung Rechnung zu tragen. Dieser Anforderung und auch dem zuvor genannten low cost Grundsatz wird gegenüber der Gesamt**genauigkeit** des Systems zunächst der Vorrang eingeräumt. Erfüllt das System nach dem low cost Ansatz die Genauigkeitskriterien nicht, so werden Alternativvorschläge erarbeitet. Ist die Genauigkeit nicht

sofort abschätzbar, werden die Leistungsgrenzen zunächst untersucht. Der **Hardware**-Ansatz wird durch zentrale Fragen begleitet, z.B. ob für das GeoARS eine spezielle Hardware mit Bindung an einen spezifischen Hersteller oder herstellerunabhängige Hardware verwendet werden soll. Auch ist für die Modellierung eines GeoARS die Frage nach den benötigten Sensoren und nach der Austauschbarkeit der Komponenten individuell zu beantworten. Hierbei wird dem Grundsatz gefolgt, dass die Berechnungs- und Darstellungskomponenten unabhängig von der Hardware nur eines Herstellers funktionieren müssen. Hinsichtlich der Sensorkomponenten zur Bestimmung der räumlichen Lage des Systems soll für mobil-pedestrische GeoARS auf die bereits durch die Hersteller integrierte interne Sensorik zurückgegriffen werden. Für stationäre GeoARS ist die Bestückung durch individuelle Einzelkomponenten vorgesehen. In Analogie zu den Überlegungen der Hardware ist auch hinsichtlich der **Software** zu prüfen, ob eine Bindung an ein spezifisches Betriebssystem oder an eine spezifische Programmier- oder Skriptsprache bzw. Entwicklungsumgebung oder Softwarebibliothek erfolgen darf. Der Ansatz besteht darin, GeoARS auf verschiedenen Betriebssystemen mit verschiedenen Programmiersprachen sowie hinsichtlich AR-Funktionen unabhängig von Bibliotheken zu realisieren. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass der zeitliche und monetäre Aufwand einer Implementierung überwiegend für die (einmalige) Erarbeitung des Prozessverständnisses sowie der allgemeingültigen übertragbaren nachhaltigen Algorithmen benötigt werden wird und nur ein geringerer Teil an Arbeitsleistung für die Übertragung auf verschiedene Softwaresystemumgebungen investiert werden muss. **Daten** sind ein zentrales Element von AR-Systemen, denn sie sollen letztendlich in der Realität abgebildet und verwendet werden. Für GeoARS wird der Ansatz verfolgt, Geodaten und im Speziellen Daten von Geo-Informationssystemen, nachfolgend als **GIS-Daten** bezeichnet, zu verwenden. Damit wird eine Nach- und Weiternutzung sowie eine Erfassung von georeferenzierten Fachdaten möglich. Geo-Informationssysteme (auch Geographische Informationssysteme, engl.: Geographic Information Systems) sind nach Bill [2016] rechnergestützte Systeme, die aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen bestehen. Mit GIS können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, verwaltet, reorganisiert werden. Die Daten können alphanumerisch und graphisch präsentiert werden. Insbesondere können mit GIS raumbezogene Problemstellungen bearbeitet und modelliert werden. Die in GIS geführten raumbezogenen Daten können der Gruppe der Geodaten zugeordnet werden. **Geodaten** (engl. geo data, spatial data) sind nach Bill [2016] Daten über Gegenstände, Geländeformen und Infrastrukturen an der Erdoberfläche. Als wesentliches Element dieser Daten muss ein Raumbezug vorliegen. Sie lassen sich in Geobasisdaten und Geofachdaten unterteilen. Darüber hinaus definiert sich der Begriff Geodaten auch aus der Infrastructure for SPatial InfoRmation in Europe (INSPIRE)-Richtlinie³ über Artikel 3 Nummer 2: „...alle Daten mit einem direkten oder indirekten Bezug zu einem bestimmten Standort oder geografischen Gebiet.“.

Grundsätzlich soll keine Beschränkung vorgenommen werden, ob die Daten ausschließlich auf dem GeoARS selbst vorliegen oder über eine mobile Datenanbindung von einem entfernten Server bezogen werden. Ein damit zusammenhängender Ansatz ist es, insbesondere die im Rahmen der INSPIRE-Richtlinie und den damit entstandenen Geodateninfrastrukturen bereitstehenden Geofachdaten für AR-Zwecke nutzbar zu machen (vgl. Abschnitt 5.5.1). Damit wird u.a. untersucht, wie mobile GIS um eine AR-Ansicht erweitert werden oder wie und ob GIS-Datenbanken für AR-Zwecke einbezogen werden können.

Als **technischer Ansatz** für die visuell ausgeprägten GeoARS kommen von den bekannten drei Verfahren – optical see-through, video see-through, Projektoren, vgl. [Azuma u. a. 2001] oder [Dörner u. a. 2014] – die beiden zuerst genannten Verfahren in die nähere Auswahl. Beide Verfahren lassen sich auf Displays realisieren, die entweder auf dem Kopf als Datenbrille (engl. Head-Mounted Display (HMD)) getragen oder in der Hand gehalten werden (engl. handheld display), vgl. [Milgram u. a. 1994], [Azuma u. a. 2001], [Dörner u. a. 2014]. Ein

³Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft

drittes bekanntes Verfahren, bei dem Projektoren eingesetzt werden [Azuma u. a. 2001] ist für Anwendungen im Außenbereich allein durch das Gewicht nicht praktikabel. HMD auf video see-through Basis schirmen den Anwender stark von der Umwelt (Außenwelt) ab und können bei längerer Tragezeit unbequem werden oder zu Unwohlsein führen (Kinetose), vgl. [Dähne 2008]. Optical see-through Verfahren sind derzeit noch nicht weit verbreitet, d.h. noch nicht Bestandteil des Massenmarktes und kommen daher ebenfalls zunächst nicht in die engere Wahl. Eine Intention von GeoARS ist die Zusammenarbeit zwischen Menschen dahingehend zu fördern, dass GeoARS helfen sollen, Sachverhalte zu veranschaulichen und gegenstandsnah erläutern- und diskutierbar auszugestalten. Hierzu wird es als hilfreich angesehen, wenn ein gemeinsames Display genutzt wird. Transparente in der Hand gehaltene Displays gehören aktuell noch in die Gruppe der zukünftigen Displays [Samsung 2016]. Sie haben einen sehr geringen Marktanteil (kein Massenmarktprodukt) und können für GeoARS noch nicht genutzt werden. Für die praktische Realisierung eines GeoARS eignen sich derzeit aufgrund ihrer massenhaften Verfügbarkeit, den dadurch geringen Anschaffungskosten sowie durch die Möglichkeit der gleichzeitigen Nutzbarkeit mehrere Anwender das video see-through Verfahren mit in der Hand gehaltenen Displays (z.B. Smartphones, Tablets).

Der hier gewählte Ansatz zur Modellierung von AR-Systemen für den Außenbereich besteht darin, zielgerichtet zu untersuchen, welche Hard- und Softwarebestandteile für GeoARS erforderlich sind. Aus einem zu erarbeitenden „Werkzeugkasten“ sollen dann zukünftig die für ein spezifisches GeoARS passenden Werkzeuge entnommen werden können, um AR-Systeme flexibel und spezialisierend zu realisieren. Dabei richtet sich die Aufmerksamkeit hardwareseitig auf die Mikrosensoren und softwareseitig auf die Algorithmen. Die Übertragbarkeit dieser Herangehensweise soll anhand zweier Prototypen (mobil-pedestrisch und stationär) gezeigt werden (vgl. Abschnitt 1.2), indem zielgerichtet die für den jeweiligen Einsatzzweck des jeweiligen GeoARS notwendigen Werkzeuge ausgewählt und auf ihre Funktionsfähigkeit, insbesondere auf ihre Echtzeitfähigkeit untersucht werden.

3.2 Problemstellungen und Herausforderungen

Für die Systemmodellierung eines GeoARS lassen sich Herausforderungen erkennen, die zum einen die **Hardware** und zum anderen die zu erarbeitende **Algorithmik** betreffen.

Hinsichtlich der Algorithmik gilt es beispielsweise, die Diskrepanz der zeitinvarianten Koordinatensysteme der Geodaten gegenüber den **zeitabhängigen Koordinatensystemen** der Satellitenpositionierung in Echtzeit zu berücksichtigen. In ländlich geprägten Räumen kann auf markerbasierte Positionierungsverfahren oder Verfahren unter Zuhilfenahme natürlicher Objekte mit geeigneten Landmarken aus praktischen Gesichtspunkten nicht zurückgegriffen und folglich Echtzeit-Bildanalysen zur Positionsbestimmung weitestgehend nicht eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.5). Stattdessen ist die Positionierung über ein Global Navigation Satellite System (GNSS) durch die freie Sicht zum Himmel, abgesehen von bewaldeten Gebieten, möglich, vgl. [Kreuziger u. a. 2015]. „Bei GNSS handelt es sich generell um globale erdfeste geozentrische Referenzsysteme, die sämtliche Veränderungen der Erdkruste, z.B. aufgrund von Plattentektonik, berücksichtigen müssen. Die für die Realisierung der jeweiligen GNSS einbezogenen Referenzpunkte (Stationen) liegen auf verschiedenen Kontinenten der Erde und sind ständigen Änderungen unterworfen. Die Eurasische Kontinentalplatte bewegt sich beispielsweise jährlich etwa um 2.5 cm in Richtung Nordosten ..., sodass daraus bis heute bereits eine Verschiebung von über 60 cm seit dem Jahr 1989 ... resultiert und damit Konsequenzen für die Koordinatenbeziehungen zwischen GNSS und auf dem europäischen Kontinent gelagerten Geodaten entstehen. Dies hat zur Folge, dass sich die mittels GNSS ermittelten Standpunktkoordinaten auf der Erdoberfläche ständig ändern. Mit einem beliebigen GNSS bestimmte Punkte der Erdoberfläche haben folglich zu verschiedenen

Zeitpunkten unterschiedliche Koordinaten – sie sind also zeitabhängig! Aus diesen Gründen werden von Zeit zu Zeit Koordinaten für eine bestimmte Anzahl an Passpunkten auf der Erdoberfläche exakt berechnet und als Referenzrahmen veröffentlicht. Beispiele für Referenzrahmen sind für WGS84 die Rahmen G1150 oder G1674 und für das internationale Referenzsystem ITRS die Realisierungen ITRF2000 oder ITRF2008. Für Geodaten möchte man jedoch regelmäßig konstante, zeitlich unabhängige Koordinaten vorhalten, um nicht ständig die Koordinaten der Geobjekte fortschreiben zu müssen. Das Bezugssystem der Positionsbestimmung unterscheidet sich hierin gegenüber dem Bezugssystem der verwendeten Geodaten deutlich und muss zwingend für eine Präzisionssteigerung der dreidimensionalen AR-Registrierung beachtet werden, wenn höhere Genauigkeiten des AR-Systems realisiert werden sollen.“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015]. Hierbei ist die Herausforderung eine echtzeitfähige Lösung, die diese Aspekte berücksichtigt, zu erarbeiten.

Eine weitere die Algorithmik betreffende Herausforderung stellt die **Topographie der Erdoberfläche** dar. Geo(fach)daten werden regelmäßig in Geodatenbanken vorgehalten und sind häufig nur für eine zweidimensionale Betrachtung in einer Kartenansicht (Draufsicht) konzipiert. Vielfach werden sie im Rahmen von Geodateninfrastrukturen (z.B. Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE)) zusätzlich über Webservices zur Verfügung gestellt. Sofern diese Daten nur zweidimensionale Koordinaten tragen, können sie zunächst nur sehr eingeschränkt für die großmaßstäbige 3D-AR-Ansicht in Egoperspektive verwendet werden. Die lokale Topographie der Erdoberfläche im Außenbereich ist nicht zweidimensional flach, sondern weist ein unebenes dreidimensionales Gelände (z.B. Böschungen, Hänge, Hügel) auf. Die Überlagerung der virtuellen zweidimensionalen Daten mit dem Abbild der realen Welt führt zu visuellen Störeffekten, die es durch geeignete Methoden zu beheben gilt.

Weiterhin ist zu untersuchen, ob die kostengünstigen Systemkomponenten die gewünschte geometrische Genauigkeit gewährleisten. Hierbei führt ein unkorrigiertes Kamerabild zu **Fehlern des Abbildes der realen Welt** und weiterführend zu einer fehlerhaften Registrierung. Während visuelle Anwendungen der virtuellen Realität auf einer stets mathematisch korrekt arbeitenden virtuellen Kamera, die allein virtuelle Daten visualisiert basieren, so haben sich Anwendungen der Augmented Reality mit Herausforderungen bei der korrekten Darstellung des Abbildes der realen Welt auseinanderzusetzen. Werden hierfür reale Kameras mit Echtzeit-Bild-Datenstrom (ca. 30-100 Bilder pro Sekunde) eingesetzt, so tritt das Problem von physikalischen Kamerafehlern, wie z.B. Verzerrungen auf, die das Abbild der Welt fehlerhaft wiedergeben. Als Folge werden virtuelle und reale Objekte fehlerhaft überlagert. Die Folge sind Irritationen der visuellen Wahrnehmung des Nutzers.

Ebenfalls gilt es mit den kostengünstigen Endgeräten des Massenmarktes komplexe Berechnungen, wie die Navigation oder die Visualisierung, parallel und in Echtzeit durchzuführen. Hier wird es eine Herausforderung sein, eine **echtzeitfähige Gestaltung der Algorithmen** zu realisieren.

Darüber hinaus wird der korrekte Umgang mit den **Auswirkungen der Umgebungsfaktoren im Außenbereich** als eine zu lösende Aufgabe gesehen: Einerseits werden ihre Eigenschaften für verschiedene Systemfunktionen genutzt und andererseits beherbergen sie zusätzliche Fehlerquellen und Variationen, die einen direkten Einfluss auf die Nutzbarkeit und Integrität von GeoARS erwarten lassen.

3.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Das video see-through Verfahren wird in aktuellen Applikationsentwicklungen häufig verwendet. Beispiele für damit realisierte AR-Anwendungen, die jedoch keine Geofachdaten im Außenbereich verarbeiten, können u.a. in Mehler-Bicher u. Steiger [2014], Dörner u. a. [2014], Dähne [2008] oder Broschart u. Zeile [2014] nachgeschlagen werden. Mit ca. 46 Millionen Smartphone-Nutzern allein in Deutschland (Stand Februar 2015, vgl. [Lutter u. Böhm 2016], [Statista 2016]) steht nunmehr einerseits die für einen praktikablen Einsatz im Außenbereich notwendige Hardware und andererseits ein großer potentieller Anwenderkreis zur Verfügung. Es sind Geräte auf dem Massenmarkt verfügbar, die ständig weiterentwickelt und in ihrer Leistungsfähigkeit stets verbessert werden. Während noch vor wenigen Jahren in wissenschaftlich angelegten AR-Projekten auf üppige Geräte, z.B. Laptop-Rechner mit externen Komponenten (z.B. Sensoren, Kamera) zurückgegriffen werden musste, so verwenden jüngere Arbeiten bereits Mobilgerätetechnik, vgl. [Kluge 2012]. Allerdings weist Kluge [2012] auf Schwachstellen seines Systems hin, z.B. bei der Überlagerung von virtuellen Daten (Neuberechnung/Latenz) und der Sensorik. Hier ist eine Weiterentwicklung der Hardware offenbar nach wie vor wünschenswert. Die bisher häufig in wissenschaftlichen Arbeiten oder Forschungs- und Entwicklungsprojekten konzipierten und teilweise realisierten AR-Systeme für die Nutzung im Außenbereich lassen sich aus Softwaresicht in zwei Kategorien einteilen. AR-Rahmensysteme [Dähne 2008] bilden hierbei die erste Kategorie, während Einzellösungen (z.B. [Kluge 2012]) in einer zweiten Kategorie zusammengefasst werden können. Ebenfalls fällt auf, dass optische Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage des Systems deutlich häufiger beschrieben und implementiert wurden, als nichtoptische (nichtvisuelle) oder hybride Verfahren. Bei den hybriden Verfahren dominiert wiederum der optische Systemteil. Dies belegen insbesondere die publizierten Anwendungsbeispiele der o.g. weiterführenden Literatur, insbesondere Mehler-Bicher u. Steiger [2014]. Während es bereits vielfältige Realisierungen gibt, um Bilder, Texte und virtuelle 3D-Modelle im Rahmen von Augmented Reality im Außenbereich zu visualisieren, wurden die in Geoinformationssystemen vorliegenden Daten bislang wenig verwendet, vgl. Einleitung. Möglicherweise liegt dies daran, dass Geo(fach)daten regelmäßig lediglich zweidimensional vorliegen und für dreidimensionale AR-Anwendungen nicht oder nur eingeschränkt verwendbar sind.

3.4 Systemunterschiede zwischen mobil-pedestrischen und stationären GeoARS

Ob ein System mobil-pedestrisch oder stationär eingesetzt wird, hat grundlegenden Einfluss auf die Systemmodellierung. Ein entscheidender funktionaler Unterschied stationärer gegenüber mobilen Systeme ist, dass sich der Vorgang zur Bestimmung der räumlichen Position des Systems auf einen einmaligen Vorgang reduziert und danach konstant bleibt. Der Komplex der Navigation, vgl. u.a. Abschnitt 7.12.2, entfällt und muss nicht modelliert werden. Zudem können stationäre Systeme mit höherem Eigengewicht ausgebildet werden, da sie nicht kontinuierlich vom Nutzer mitgetragen werden müssen. Dies eröffnet auch die Möglichkeit zusätzliche Komponenten zu integrieren, z.B. Schrittmotoren oder Laser-Entfernungsmesser. Ein stationäres GeoARS gilt im Rahmen dieser Arbeit immer noch als AR-System, wenn Teile davon (z.B. das Display) mobil mit dem Nutzer mitgeführt werden können.

3.5 Anforderungen an GeoARS

Bereits in der Einleitung wurden einige Anforderungen angeführt, die nachfolgend konkretisiert werden, vgl. Abbildung 3.2. Die Systemmodellierung soll anhand von Hardware-Komponenten des Massenmarktes mit hohem Verbreitungsgrad sowie mit kostengünstigster Hard- und Software erfolgen. Die zu verwendende Hardware soll austauschbar sein. Ebenfalls sind die Algorithmen übertragbar auszugestalten und keine Bindungen an Betriebs- und Softwaresysteme einzugehen. Es ist vorgesehen explizit Geodaten und/oder Geodatenbanken zu verwenden, sodass das AR-System als GIS-Erweiterung betrachtet werden kann. Je nach Einsatzzweck sollen GeoARS modular durch zusätzliche Komponenten erweiterbar, (arbeits-) alltagstauglich und leicht installierbar sowie übertragbar auf andere Hardware-Plattformen sein. Die Anforderung an die Systemmodellbildung schließt eine Dimensionserweiterung der Geodaten von 2D auf 3D-AR, z.B. für INSPIRE-konforme Datennutzung, ein. Insgesamt sollen sich GeoARS durch geringes Gewicht, transportable Technik und Kompaktheit auszeichnen. Eine ausgeprägte Praktikabilität in der Anwendung für den Nutzer ist zu gewährleisten - sie sollen praktisch einsetzbar sein. Hierzu ist eine durchgängige Echtzeitfähigkeit und eine anwendungskonforme Genauigkeit zu realisieren. Das System muss verlässlich (integer) arbeiten.

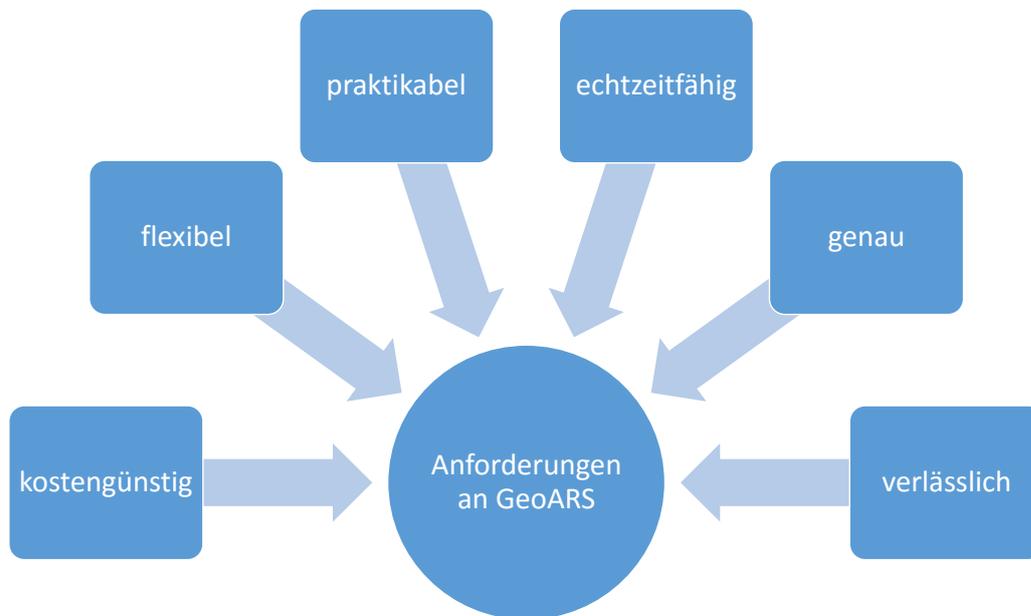


Abbildung 3.2: Anforderungen als Grundlage der GeoARS-Systemmodellierung

3.6 Gewählter AR-Modell-Ansatz (Übersicht)

3.6.1 Komponenten, Systeme, Verfahren

Abbildung 3.3 stellt die in Abschnitt 2.3 eingeführten Komponentenaufteilung von GeoARS dar. Gestützt auf die Vorüberlegungen in Abschnitt 3.1 zum technischen Ansatz erläuterten Gründe wird die **Darstellungskomponente** von GeoARS (vgl. Abschnitt 6) durch ein in der Hand haltbares Display mit dem visuellen Darstellungsverfahren nach dem **video see-through Verfahren** modelliert.

Die Modellierung der **Komponente zur Bestimmung der räumlichen Lage** (vgl. Kapitel 7) des Systems erfolgt durch eine auf den jeweiligen Einsatzzweck des GeoARS abgestimmte Kombination verschiedener Verfahren (direkten Feldabtastung, Phasenvergleichsverfahren, Laufzeitmessung, Inertialverfahren, nicht markerbasiertes räumliches Scannen) und somit als **Hybridverfahren**.

Die **Interaktionskomponente** (vgl. Kapitel 8) wird so modelliert, dass Eingaben unter Zuhilfenahme des berührungsempfindlichen Displays erfolgen und Ausgaben zusätzlich zur visuellen Darstellung auch akustisch oder haptisch möglich sind.

Als vierte Komponente des Modellansatzes wird die **Geodatenverarbeitungskomponente** (vgl. Kapitel 4) der Geodaten (Transformation, Konvertierung, Speicherung, Analyse) hinzugefügt.

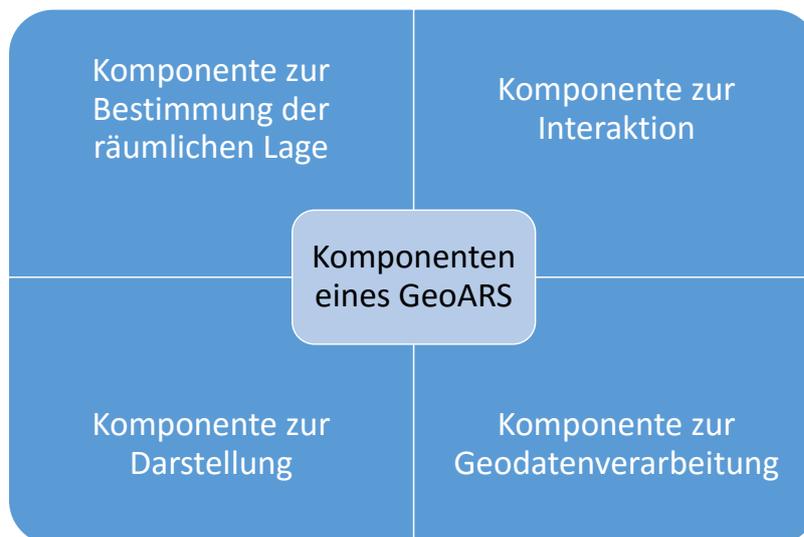


Abbildung 3.3: Komponenten eines GeoARS

Alle vorgenannten Systemkomponenten setzen sich wiederum aus Hardware- und Softwarebestandteilen zusammen. Für die durchzuführenden Untersuchungen und später zur Realisierung der GeoARS-Prototypen werden heterogene Hard- und Softwarekomponenten herangezogen. Tabelle E.3 (Anhang E) stellt eine Übersicht der einbezogenen Kompaktgeräte für die Gruppe der mobil-pedestrischen GeoARS dar (vgl. „GeoARS-Landentwicklung“).

Die für stationäre GeoARS (vgl. „GeoARS-Unfallaufnahme“) relevanten Einzelkomponenten und Module sind in der Tabelle E.2 (Anhang E) aufgeführt.

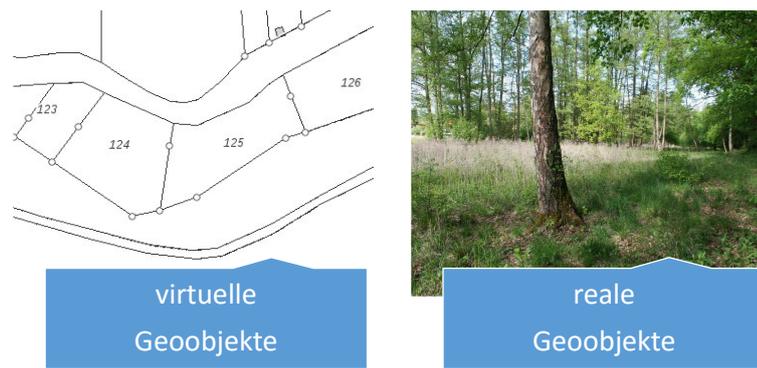


Abbildung 3.4: links: virtuelle Geobjekte (Flurstücke); rechts: reale Geobjekte, Abbild der realen Topographie des identischen Ausschnitts der Erdoberfläche

Die Entwicklung von GeoARS ist unabhängig von Betriebssystem und Programmiersprache vorgesehen. Eine Abdeckung aller aktuellen Betriebssysteme und Programmiersprachen ist mit vertretbarem Aufwand nur schwer möglich. Tabelle E.1 (Anhang E) fasst die im Rahmen dieser Arbeit einbezogenen Softwarekomponenten zusammen.

Im Bedarfsfall können GeoARS durch zusätzliche Komponenten erweitert werden. Tabelle E.4 (Anhang E) listet diese nicht mehr dem Niedrigpreissegment zuzuordnenden optionalen Erweiterungskomponenten auf. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das GeoARS-Systemmodell Hardware, Software, Daten und den Anwender berücksichtigt.

Der gewählte Modell-Ansatz hat nicht zum Ziel ein allgemeines AR-Rahmensystem, wie z.B. bei Dähne [2008], abzuleiten, sondern über Module eines zu erstellenden Werkzeugkastens exakt auf den Einsatzzweck eines GeoARS abgestimmte Spezialisierungen herzustellen. Die praktische Umsetzung des Modell-Ansatzes wird später anhand der Entwicklung der beiden Systemprototypen gezeigt.

Die Darstellung der **virtuellen Geobjekte** gemeinsam mit dem Abbild der realen Welt und damit den **realen Geobjekten**, vgl. Abbildung 3.4, soll bei GeoARS in einer Zentralperspektive auf einem zweidimensionalen Display erfolgen und wird in Abschnitt 6.4.1 im Zusammenhang mit der Darstellungskomponente weiterführend untersucht.

Die in dieser Arbeit behandelten Geodaten besitzen die Eigenschaft, dass sie sich auf oder in der Nähe (wenige Meter) der Erdoberfläche befinden. Diesbezüglich spielt die Modellierung der Erdoberfläche der virtuellen Welt in Analogie zur real vorhandenen Erdoberfläche eine wesentliche Rolle und sollte diese bestmöglich approximieren. Nach Hake u. Grünreich [1995] kann man ein Digitales Geländemodell (DGM) als Zahlenspeicher zur numerischen Beschreibung der Topographie auffassen, sodass der gewählte Modellierungsansatz der **virtuellen Erdoberfläche** bei GeoARS durch Digitale Geländemodelle avisiert wird, vgl. Abbildung 3.5.

Der gewählte Verfahrensansatz besteht darin, ein GeoARS als **Systemkombination** von photogrammetrischem Aufnahmesystem (terrestrische Photogrammetrie), Geodatenverarbeitungssystem (Geoinformatik), Bildverarbeitungssystem (Computergraphik) und Navigationssystem (Inertialgeodäsie) aufzufassen. Die mit den jeweiligen Systemen befassten Wissenschaften (Photogrammetrie, Geoinformatik, Computergraphik, Inertialgeodäsie) haben zur Beschreibung ihrer Systeme fachspezifische **Bezugssysteme (Koordinatensysteme)**⁴ formuliert, die bei der Modellierung eines GeoARS algorithmisch zusammenzuführen sind. Auf die

⁴Koordinatensystem: mathematisch-geometrischer Begriff, Bezugssystem/Bezugsrahmen: geodätische Begriffe, vgl. Heck [2003]

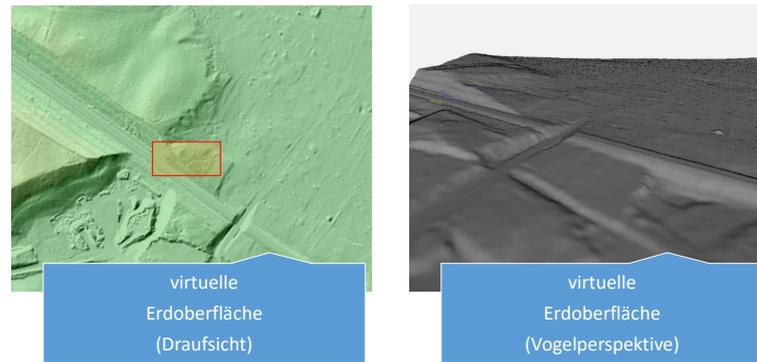


Abbildung 3.5: Digitales Geländemodell als virtuelle Erdoberfläche in GeoARS

Zusammenführung der Bezugssysteme wird später, mit Abschnitt 7.13 (3D-Registrierung), eingegangen. Mit dem anschließenden Abschnitt erfolgt zunächst die Definition der beteiligten Bezugssysteme, von denen in Abbildung 3.6 vorab eine Auswahl an beteiligten Koordinatensystemen gemeinsam dargestellt werden.

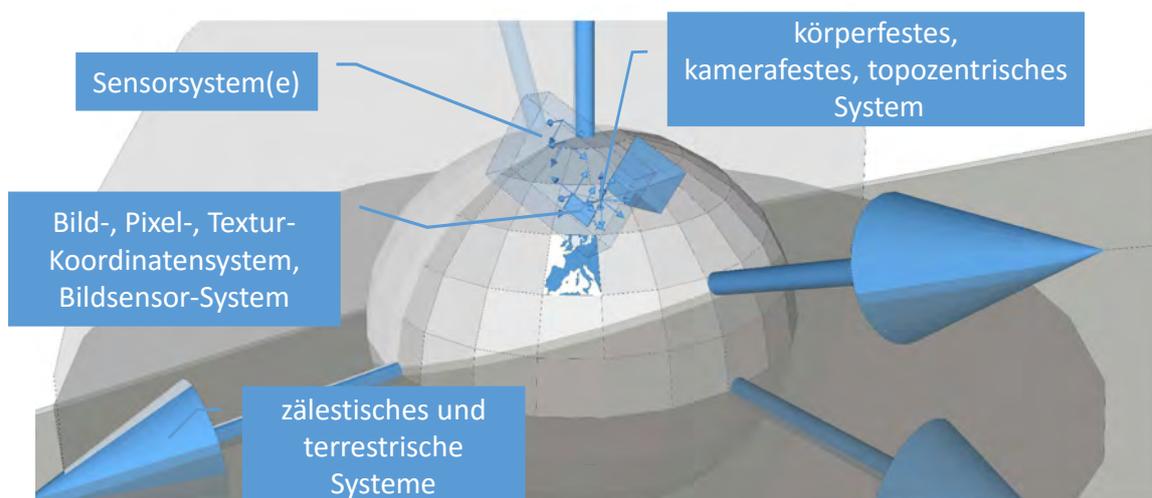


Abbildung 3.6: geometrischer Ansatz des 3D-AR-Modells und Darstellung einer Auswahl beteiligter Koordinatensysteme

3.6.2 Ansatz zur Wahl der Bezugssysteme

Nach Heck [2003] sind geometrische Referenzsysteme in zwei Kategorien zu unterscheiden; zälestische Referenzsysteme, die raumfeste Systeme realisieren und terrestrische Referenzsysteme, die erdfeste Systeme bilden. Für GeoARS sind beide Kategorien relevant und werden nachfolgend dargestellt. Zusätzlich zu diesen geodätischen Bezugssystemen sind Koordinatensysteme zur Modellierung von Sensorik, Kamera, Live-Bild und virtuelle Daten notwendig. Grundsätzlich werden in GeoARS sowohl rechtshändige Koordinatensysteme (Rechtssysteme) wie auch linkshändige Koordinatensysteme (Linkssysteme) verwendet, vgl. [Bronstein u. a. 2015].

3.6.2.1 Zälestisches Referenzsystem (i-System)

Zur Beschreibung von Bewegungen eines Körpers ist für die Nutzung der Möglichkeiten der Inertialnavigation in GeoARS die Festlegung eines übergeordneten Bezugssystems - in dem die Newton'schen Gesetze gelten bzw. weiterführend das Einstein'sche Äquivalenzprinzip gilt - grundlegend. Nach Knickmeyer [2003], [Titterton u. Weston 2004] und [Farrell 2008] ist ein Inertialsystem (lat. iners: träge, untätig) - auch als Absolutsystem oder absoluter Raum bezeichnet - ein Bezugssystem in dem die drei Newton'schen Axiome gelten. Diese drei Gesetze gelten auch für Bezugssysteme, die sich geradlinig gleichförmig gegen den absoluten Raum bewegen. Die Bewegung der Bezugssysteme zueinander erfolgt hierbei zunächst ohne Beschleunigung, ohne Anwesenheit von Gravitation und ohne Drehung. Weiterhin sind Inertialsysteme euklidisch⁵ und es liegt eine absolute Zeit, die in allen Bezugssystemen gleichermaßen gilt, vor. Nach dem Einstein'schen Äquivalenzprinzip gilt, dass sich in einem System, das sich im gravitationsfreien Raum mit einer Beschleunigung bewegt, alle Vorgänge genauso abspielen wie in einem unbeschleunigten System, in dem ein Gravitationsfeld mit einer Gravitationsbeschleunigung existiert. Diesbezüglich wird nachfolgend ein zälestisches Referenzsystem (himmelsfestes [Heck 2003]) als Inertialsystem definiert und nachfolgend als i-System bezeichnet. Zur Lösung praktischer inertialer Navigationsaufgaben im Rahmen von GeoARS kann nach Knickmeyer [2003] das folgende lokale im Geozentrum verortete i-System (operationelles Inertialsystem) verwendet werden:

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Massezentrum der Erde
x-Achse x^i :	Richtung Frühlingspunkt zur Epoche T_0
y-Achse y^i :	senkrecht zur x^i - z^i -Ebene
z-Achse z^i :	mittlere Rotationsachse der Erde
Reihenfolge der Achsen:	x^i, y^i, z^i , vgl. Abbildung 3.7

Das System bewegt sich mit der Erde auf dem Weg um die Sonne, nimmt jedoch nicht an der Erdrotation teil.

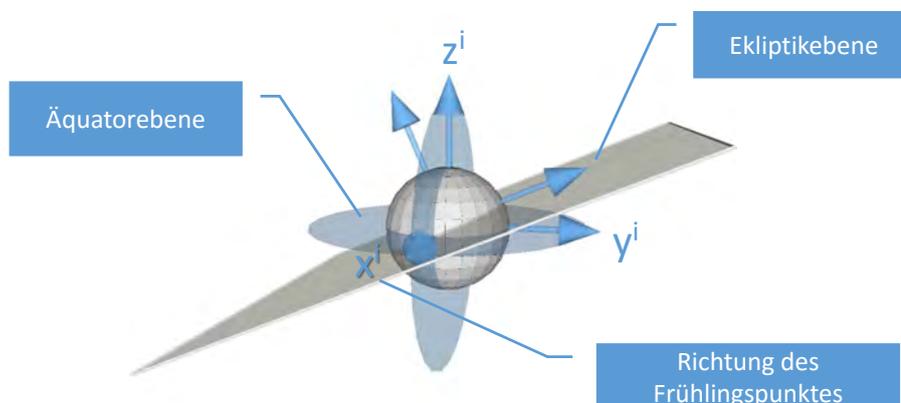


Abbildung 3.7: i-System

⁵euklidischer Raum: dreidimensionaler Punktraum, vgl. [Bill 2016], [Heck 2003]

3.6.2.2 Erdfestes System (e-System)

Das erdfeste System, vgl. Heck [2003], ist ein terrestrisches Referenzsystem. Es bewegt sich mit der Erde auf dem Weg um die Sonne und nimmt an der Erdrotation teil. Allerdings ist es nicht an eine einzelne kontinentale Platte gebunden. Die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten können unter Verwendung eines spezifischen Rotationsellipsoids auch als ellipsoidische Koordinaten in Form von Länge λ und Breite φ sowie der Höhe h über dem Ellipsoid umgerechnet werden. Für einzelne Betrachtungen in dieser Arbeit wird auf sphärische Approximationen zurückgegriffen. Das erdfeste System, nachfolgend als e-System bezeichnet, ist wie folgt definiert:

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Massezentrum der Erde
x-Achse x^e :	Richtung Schnittpunkt mittlerer Äquator und mittlerer Meridian von Greenwich
y-Achse y^e :	senkrecht zur x^e - z^e -Ebene
z-Achse z^e :	Richtung mittlere Rotationsachse der Erde
Reihenfolge der Achsen:	x^e, y^e, z^e , vgl. Abbildung 3.8

Für GeoARS wird die absolute Standortbestimmung durch den Satellitenempfänger im System des jeweils verwendeten GNSS realisiert. Wie einleitend in Abschnitt 3.2 angeführt, muss man sich für die Entwicklung von GeoARS der Tatsache bewusst sein, dass die durch den GNSS-Empfänger des mobilen Endgerätes in Echtzeit ermittelten Standortkoordinaten regelmäßig in einem von dem Bezugssystem der Geodaten abweichenden Bezugssystem berechnet werden und dieser Umstand zu Fehlern bei der Überlagerung von realen und virtuellen Daten führt. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines einheitlichen Bezugssystems für die virtuellen Geodaten und die in Echtzeit bestimmten Standortkoordinaten oder aber eine Lösung über Echtzeit-Koordinatentransformationen zwischen den Systemen (wird in Abschnitt 7.12.6 vorgestellt) notwendig.

Grundlage für die Einzelpunktbestimmungen sind die in den empfangenen Satellitensignalen enthaltenen Satellitenbahninformationen und das jeweils GNSS-spezifische Referenzsystem der Satellitenbahninformationen. Unter einem Referenzsystem versteht man die theoretische ideale Definition eines Koordinatensystems im Raum [Kahmen 2005], [Witte u. Sparla 2011]. Es handelt sich bei GNSS stets um globale erdfeste geozentrische Referenzsysteme, vgl. [Torge 2001].

Globale erdfeste geozentrische Systeme müssen sämtliche Veränderungen der Erdkruste - z.B. aufgrund von Plattentektonik, Erdbeben, ozeanischen und atmosphärischen Auflasten - berücksichtigen. Somit sind die für die Realisierungen der Systeme einbezogenen Beobachtungspunkte (Stationen) [Kahmen 2005] und ihre Koordinaten ständigen Änderungen unterworfen. Für das Navigational Satellite Timing and Ranging - Global Positioning System (GPS) bildet beispielsweise das World Geodetic System 1984 (WGS84) das zugrundeliegende Referenzsystem.

Ein Referenzrahmen definiert die Realisierung eines Systems z.B. in Form von Koordinaten fest installierter Stationen. Während ein Referenzsystem einmalig definiert wird, werden Referenzrahmen in unregelmäßigen Abständen neu berechnet. Beispiele für Referenzrahmen sind für das System WGS84 der Rahmen G1674 und für das internationale Referenzsystem ITRS der International Terrestrial Reference Frame (ITRF) ITRF2014.

Beispiele für die beiden praktisch dominierenden GNSS [GSA 2015] (GPS und Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema (GLONASS)) sowie ihre zugehörigen Referenzsysteme können der Tabelle 3.1 entnommen werden.

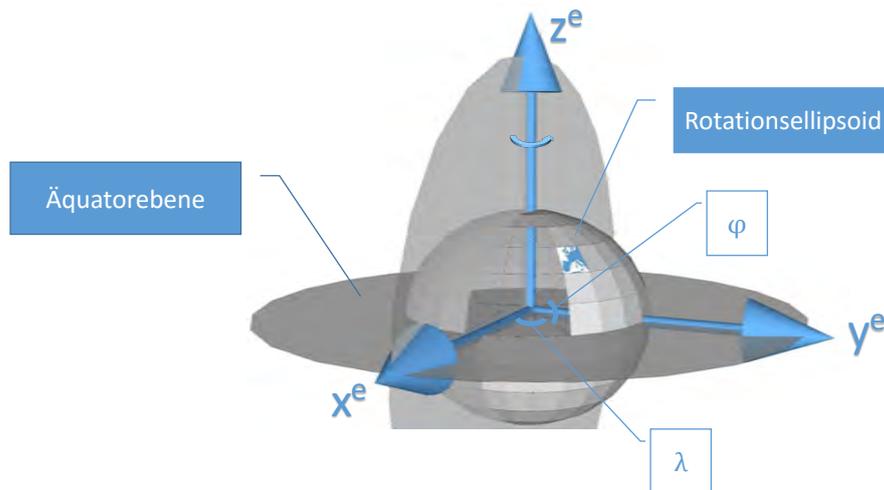


Abbildung 3.8: e-System

Tabelle 3.1: Verwendete GNSS und deren Parameter, vgl. [Torge 2001], [Bauer 2011]

Parameter	GPS	GLONASS
Systembezeichnung	WGS84	PZ-90.02
große Halbachse Bezugse ellipsoid [m]	6378137.0	6378137.0
Abplattung Bezugse ellipsoid $1/f$	298.257223563	298.257223563
geozentrische Gravitationskonstante GM [$m^3 s^{-2}$]	$3986004.418 \cdot 10^8$	$3986004.418 \cdot 10^8$
dynamischer Formfaktor J_2	0.001081874	0.00108263
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [$m s^{-1}$]	299792458	299792458
Winkelgeschwindigkeit der Erddrehung ω [$rad s^{-1}$]	$7.292115 \cdot 10^{-5}$	$7.292115 \cdot 10^{-5}$

Für die Entwicklung von GeoARS und den Umgang mit den notwendigen Koordinatentransformationen ist die Kenntnis über den konkret durch den GNSS-Empfänger bzw. durch eine nachgeschaltete Anwendungsprogrammierschnittstelle (engl. Application Programming Interface (API)) des Empfängers verwendete Referenzrahmen zwingend notwendig. Für Entwicklungen mit Android-Betriebssystem und -Werkzeugatz (engl. Software Development Kit (SDK)) werden die Koordinaten beispielsweise stets auf dem WGS84-Ellipsoid ausgegeben, vgl. [Google 2016a].

3.6.2.3 Regionales erdfestes System (r-System)

Als regionales erdfestes System, nachfolgend als r-System bezeichnet, wird für GeoARS das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) verwendet. Das ETRS89 ist aus dem globalen International Terrestrial Reference System (ITRS) - bzw. konkret aus dessen globaler Realisierung, dem International Terrestrial Reference Frame 1989 (ITRF89) [Görres u. a. 2012] - abgeleitet. Für das ETRS89 war der European Terrestrial Reference Frame 1989 (ETRF89) die erste Realisierung, bei der die Koordinaten von 17 europäischen Satellite Laser Ranging (SLR)- und Very Long Baseline Interferometry (VLBI)-Stationen aus dem ITRF89 sowie weiterer Punkte aus mobilen VLBI-Messungen ausgewählt und als Anschlusspunkte für die ETRF-Realisierung zum Zeitpunkt 1.1.1989 verwendet wurden [Görres 2010].

ETRF89 ist folglich als ein Teilnetz der globalen Lösung ITRF89 zu betrachten [Kahmen 2005]. Regionale Referenzsysteme, wie das ETRS89, können somit ausgehend vom globalen System durch Verdichtung des Punktnetzes (Stationen) realisiert werden [Görres 2010]. Für alle damit in Zusammenhang stehenden Prozesse ist für den Kontinent Europa die Unterkommission 1.3a Reference Frame for Europe (EUREF) der International Association of Geodesy (IAG) zuständig. Auch für die übrigen Kontinente sind derartige Kommissionen (SubCommission 1.3b bis 1.3f) eingerichtet.

Mit der Einführung des ETRS89 verfolgte man das Ziel für einen längeren Zeitraum für Europa ein einheitliches und zeitunabhängiges Bezugssystem zur Verfügung zu haben [Torge 2001]. „Es ist beispielsweise in Deutschland im Bereich der Landesvermessung und im Liegenschaftskataster das geltende Bezugssystem. Auch in den übrigen europäischen Staaten erfolgt im Rahmen verschiedener Vereinheitlichungsprozesse, z.B. INSPIRE, die Umstellung auf ETRS89 in vielen Bereichen. Diese INSPIRE ist eine bindende Richtlinie der Europäischen Union für ihre Mitgliedsstaaten und soll die grenzübergreifende Nutzung von Geodaten in Europa erleichtern ... Die Richtlinie schreibt für das Bezugssystem der Lage das System ETRS89 vor ...“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015]

Das ETRS89 ist folgendermaßen definiert, vgl. [Boucher u. Altamimi 1992], [BKG 2016a], [AdV 2014]:

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Massezentrum der Erde
x-Achse x^r :	Richtung Schnittpunkt Äquator und Meridian von Greenwich
y-Achse y^r :	senkrecht zur x^r - z^r -Ebene
z-Achse z^r :	Richtung mittlere Rotationsachse der Erde
Reihenfolge der Achsen:	x^r, y^r, z^r , vgl. Abbildung 3.9

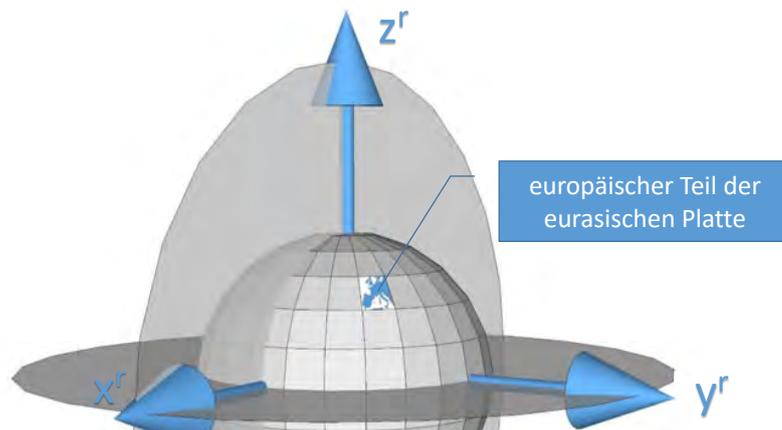


Abbildung 3.9: r -System

Als Referenzellipsoid wird hierbei das Geodetic Reference System 1980 (GRS80)-Ellipsoid verwendet (vgl. Tabelle 3.2) [Moritz 1980], [BKG 2016a]. Unveränderliche Zahlenwerte und völlig stabile Punktlagen der Stationen sind jedoch nicht möglich, da durch intrakontinentale Bewegungen, wie die fennoskandische Landhebung oder die kontinuierliche Gebirgshebung der Alpen, sekulare Bewegungen Punktbewegungen im großräumigen Sinn auftreten. Periodische Bewegungen, wie Erdbeben und Auflasteffekte können modelliert werden und haben keine signifikante Auswirkung auf die Veränderlichkeit der Stationskoordinaten. Neben den großräumigen Änderungen wirken sich auch kleinräumige Ereignisse aufgrund tektonischer oder

Tabelle 3.2: Rotationsellipsoid des ETRS89

Parameter	
Bezeichnung	GRS80
große Halbachse Bezugsellipsoid [<i>m</i>]	6378137.0
Abplattung Bezugsellipsoid 1/ <i>f</i>	298.257223563

anthropogener Bewegungen, z.B. Bergsenkungsgebiete, aus. Darüber hinaus können auch größere Sprünge in der Kontinuität der Stationskoordinaten verursacht durch Erdbeben (für Deutschland eher nicht zutreffend) auftreten, vgl. [Görres 2010].

Ergänzend zu den vorgenannten geodynamischen Ursachen bewirken auch signifikante Änderungen in den Auswertestrategien und im Beobachtungsmaterial oder der Wechsel des Instrumentariums [Wanninger u. Fettke 2008] Anpassungen der Stationskoordinaten.

In unregelmäßigen Abständen werden, sowohl für das ITRS als auch das ETRS89, neue Referenzrahmen berechnet und veröffentlicht. Der momentan gültige globale Referenzrahmen ist der ITRF2014 [IGN / LAREG 2016] und der aktuell gültige regionale Referenzrahmen für Europa ist der ETRF2000 [IAG 2011]. Die sich daraus für GeoARS ergebenden Konsequenzen werden in Abschnitt 7.12.6 behandelt.

Die im ETRS89 vereinbarte Universal Transverse Mercator (UTM) Abbildung führt dazu, dass in der geodätischen Praxis die real gemessenen Strecken auf die Abbildungsebene reduziert werden müssen. Das gilt grundsätzlich auch für visuell dargestellte Strecken oder Geometrien im Bild bzw. auf dem Display eines GeoARS. Diesen Umstand gilt es bei der Registrierung von realen Geodaten (Live-Bild) und virtuellen Geodaten im System ETRS89 zu beachten.

Nach [Kahmen 2005] ist eine reale gemessene (oder auf dem Display dargestellte) Strecke s_{gem} zunächst auf die Oberfläche des Bezugsellipsoids zu projizieren und hierfür eine Höhenreduktion über

$$s_{ell} = s_{gem} \cdot \frac{R}{R + h_{ell}} \quad (3.1)$$

mit dem Radius R der Gaußschen Schmiegekugel im Ordinatenfußpunkt und der ellipsoidischen Höhe h_{ell} - näherungsweise auch Summe aus Normalhöhe (z.B. Deutsches Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016), vgl. [Heckmann u. a. 2015]) und Mittelwert für die Quasigeoidundulation für ein Gebiet (z.B. German Combined Quasigeoid (GCG2016), vgl. [Heckmann u. a. 2015]) - vorzunehmen.

Die UTM-Abbildung wird durch Projektion auf einen querachsigen Schnittzylinder realisiert. Hierfür ist die oben berechnete Strecke s_{ell} einer Abbildungskorrektur zu unterziehen, vgl. [Kahmen 2005]:

$$s_{UTM} = s_{ell} \cdot \left(1 + \frac{(E - 500000)^2}{2R^2} \right) \cdot 0.9996. \quad (3.2)$$

Der Ausdruck $(E - 500000)$ entspricht hierbei der Mittelordinate mit dem mittleren Ostwert der Streckenkoordinaten E und dem zusätzlichen Maßstabsfaktor 0.9996. Für Gebiete in der Nähe des Mittelmeridians ist die Streckenkorrektur am größten, während sich im Bereich der Schnittmeridiane die Korrekturen minimieren.

Nimmt man an, dass der wirksame Sichtbereich von GeoARS in Abhängigkeit der Displaygröße sowie Display- und Kameraauflösung bei etwa 100 *m* liegt, so müssen etwaige Streckenkorrekturen nur für diese kurze Distanz betrachtet werden.

Für AR-Einsätze ergeben sich für Distanzen von 100 m für Gebiete nahe dem Mittelmeridian maximale Abbildungskorrekturen $\Delta s_{max} = s_{UTM} - s_{gem}$ von wenigen Zentimetern, z.B. für $h_{ell} = 100\text{ m}$, $E = 500.000\text{ m}$ beträgt die Abbildungskorrektur der Strecke $\Delta s_{max} = -4.2\text{ cm}$. Liegt dieser resultierende Fehler unterhalb des geometrischen Auflösungsvermögens des GeoARS und unterhalb des sensorischen Auflösungsvermögens der übrigen verwendeten Hardwarebestandteile, kann er für kleinräumige Gebiete und großmaßstäbigen Betrachtungen von Geodaten in GeoARS vernachlässigt werden. Die Korrekturen wegen Gebietshöhe und UTM-Abbildung können dann entfallen.

3.6.2.4 Virtuelles regionales erdfestes System (w-System)

Das virtuelle regionale erdfeste System ist als System der virtuellen Welt, nachfolgend als w-System bezeichnet, definiert und wird im Rahmen von GeoARS als Koordinatensystem der virtuellen Daten innerhalb der virtuellen Welt Anwendung finden:

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Zentrum der virtuellen Erde, adäquat zu r-System
x-Achse x^w :	Richtung Schnittpunkt virtueller Äquator und Null-Meridian, adäquat zu r-System
y-Achse y^w :	senkrecht zur x^w - z^w -Ebene, adäquat zu r-System
z-Achse z^w :	Richtung Rotationsachse der virtuellen Erde, adäquat zu r-System
Reihenfolge der Achsen:	x^w, y^w, z^w , vgl. Abbildung 3.10

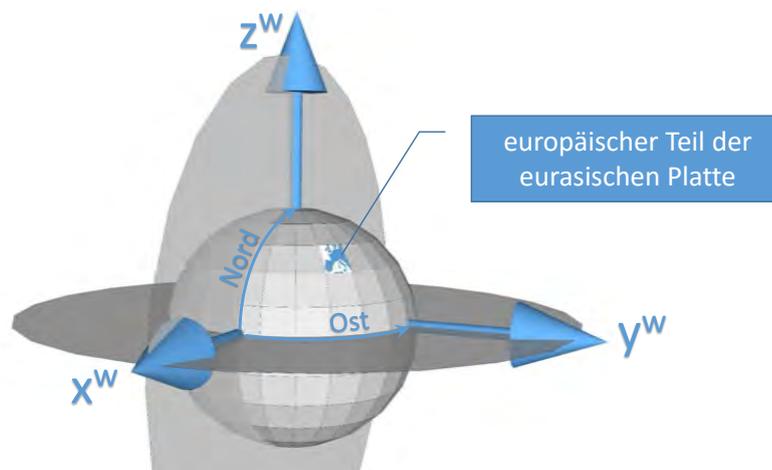


Abbildung 3.10: w-System

Es werden in GeoARS die in die Ebene umgerechneten Koordinaten *Ost* und *Nord*, entsprechend den Vereinbarungen der UTM-Abbildung des ETRS89 und der Höhe (ggf. lokal) als dritte Komponente verwendet. Diesbezüglich wird auf die Ausführungen des vorhergehenden Abschnitts 3.6.2.3 (Regionales erdfestes System (r-System)) verwiesen.

3.6.2.5 Topozentrisches System (l-System, n-System)

Das topozentrische System ist als lokales geodätisches System, nachfolgend als l-System bezeichnet, definiert und wird im Rahmen von GeoARS als Navigationssystem Anwendung finden:

Art:	kartesisches Linkssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Topozentrum, Projektionszentrum der Kamera des GeoARS
x-Achse x^l :	nach Norden, geographisch
y-Achse y^l :	nach Osten, geographisch
z-Achse z^l :	nach oben, entlang der negativen Rotationsellipsoidnormalen
Reihenfolge der Achsen:	x^l, y^l, z^l , vgl. Abbildung 3.11
Hinweis:	identisch mit n-System der Inertialnavigation, vgl. Abschnitt 7.12.2

Das topozentrische System weicht in der näheren Umgebung des Standpunktes eines GeoARS kaum von der mathematischen Figur der Erde - Kugel oder Rotationsellipsoid - ab. Meyer [2010] leitet den sich ergebenden geometrischen Höhenfehler (Δh) und Streckenfehler (Δs) zwischen Ebene und sphärischer Geometrie - mit dem Bogenstück b , dem Kreissegment α und dem Radius r - über den fundamentalen Zusammenhang $b = \alpha \cdot r$ unter Zuhilfenahme der Kosinusdefinition mit $\Delta h = \frac{r}{\cos \frac{b}{r}} - r$ und der Tangensfunktion mit $\Delta s = r \tan \frac{b}{r} - b$ her. Es kann angenommen werden, dass der wirksame Sichtbereich von GeoARS in Abhängigkeit der Displaygröße sowie Display- und Kameraauflösung bei etwa bei 100 m liegt. Der Höhenfehler liegt bei dieser Entfernung mit $\Delta h \approx 0.8 \text{ mm}$ im Submillimeterbereich. Der Streckenfehler der Differenz zwischen sphärischen Entfernung und Strecke in der Tangentialebene liegt bei 100 m mit $\Delta s \approx 8.2 \cdot 10^{-9} \text{ mm}$ im Nanometerbereich. Liegt der resultierende Fehler unterhalb des geometrischen Auflösungsvermögens für GeoARS und unterhalb des sensorischen Auflösungsvermögens der übrigen verwendeten Hardwarebestandteile, so kann das ebene topozentrische System für die kleinräumigen Gebiete in GeoARS direkt als Navigationssystem verwendet werden.

Es wird mit den ebenen Eigenschaften und in tangentialer Anlehnung an die geometrische Erdfigur sowie unter Einbeziehung der vorstehenden Aussagen zur Verebnung in der näheren Umgebung des Standpunktes und als hybrides 3D-Modell mit globalen ellipsoidischen Koordinaten und Höhenmodell oder optional mit lokalen Koordinaten (Option bei „GeoARS-Unfallaufnahme“) verwendet.

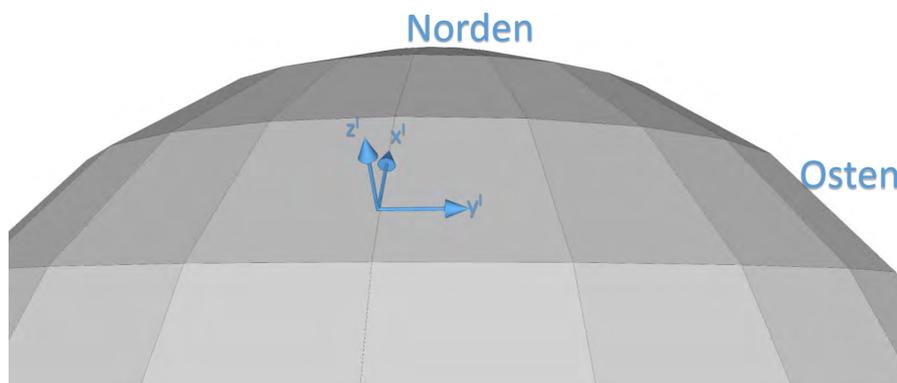


Abbildung 3.11: l-System

3.6.2.6 Topozentrisches System des Erdmagnetfeldes (m-System)

Das topozentrische System des Erdmagnetfeldes ist als lokales geodätisches System, nachfolgend als m-System bezeichnet, definiert und wird später in die Orientierungsberechnung von GeoARS einbezogen:

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Topozentrum, Projektionszentrum der Kamera des GeoARS
x-Achse x^l :	nach Norden, magnetisch
y-Achse y^l :	nach Osten, magnetisch
z-Achse z^l :	Nadir, entlang negativer Rotationsellipsoidnormalen (teilweise sphärische Approximation)
Reihenfolge der Achsen:	x^m, y^m, z^m , vgl. Abbildung 3.12

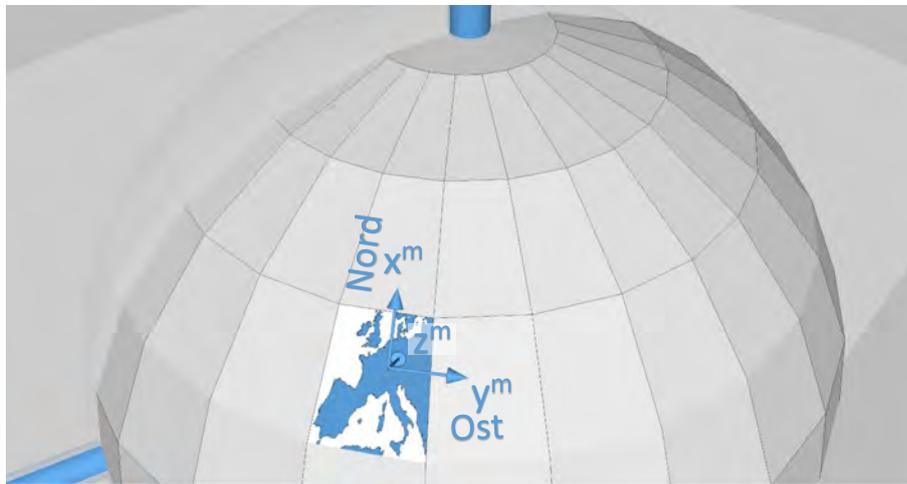


Abbildung 3.12: m-System

Weitere Besonderheiten sowie die Algorithmik werden im Abschnitt 7.8 (Magnetfeldsensor) und im Anhang C (Erdmagnetfeldmodelle) behandelt.

3.6.2.7 Körperfestes System (b-System)

Im körperfesten Koordinatensystem, nachfolgend als b-System bezeichnet, wird die Lage und Ausrichtung der einzelnen Sensoren eines GeoARS in ein gemeinsames Koordinatensystem zusammengeführt. Es ist das gerätefeste Koordinatensystem der Trägerplattform, z.B. des mobilen Endgerätes. Der Koordinatenursprung wird hier als identisch mit dem Koordinatenursprung des Kamerasystems festgelegt und die übrigen Systemparameter zusammenfassend wie folgt definiert:

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Projektionszentrum der realen Kamera des GeoARS
x-Achse x^b :	senkrecht der optischen Achse zur Objektivoberseite
y-Achse y^b :	senkrecht zur x^b - z^b -Ebene
z-Achse z^b :	optische Achse der realen Kamera in negativer Aufnahme-richtung
Reihenfolge der Achsen:	x^b, y^b, z^b , vgl. Abbildung 3.13

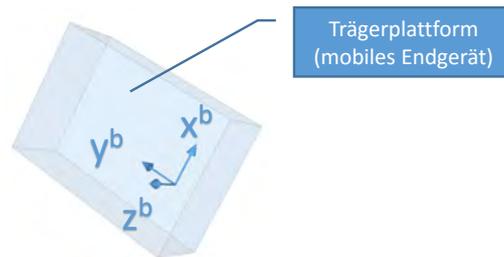


Abbildung 3.13: *b-System*

3.6.2.8 Sensor-Systeme

Alle Sensoren werden anwendungsfallsspezifisch fest mit dem GeoARS verbunden. Die Sensoren können ggf. herstellerseitig auf einer Sensorplattform als kombiniertes Sensormodul im Gerät verbaut werden oder worden sein. Der jeweilige Koordinatenursprung der Systeme liegt für Sensorsysteme mit einer Probemasse im Zentrum der Probemasse, für GNSS-Module im Antennenphasenzentrum und für alle weiteren Sensoren (Luftdruck, Temperatur, Laserdistanzmesser) im Zentrum des jeweiligen Sensorblocks. Für den Sonderfall der Verwendung motorischer Systeme wird der Mittelpunkt der Motorachse als Ursprung festgelegt.

Die Achsen der Sensoren werden parallel zum *b*-System ausgerichtet und Restfehler durch Kalibrierung gegenüber dem *b*-System ermittelt. Die Orientierung der Achsen kann dabei für jeden Sensor unterschiedlich sein, vgl. Abbildung 3.14. Somit existiert für jeden Sensor ein individuelles Koordinatensystem, das in der Realisierung eines GeoARS in das *b*-System zu transformieren ist. Für den Fall, dass ein GeoARS mit fest verbundenen Sensoren als inertiales Navigationssystem genutzt wird, kann es als „strapdown“ System, vgl. [Titterton u. Weston 2004], angesehen werden. Die Definition des Kamerasystems als Sensorsystem wird in den nachfolgenden Abschnitten 3.6.2.9 und 3.6.2.12 gesondert beschrieben.

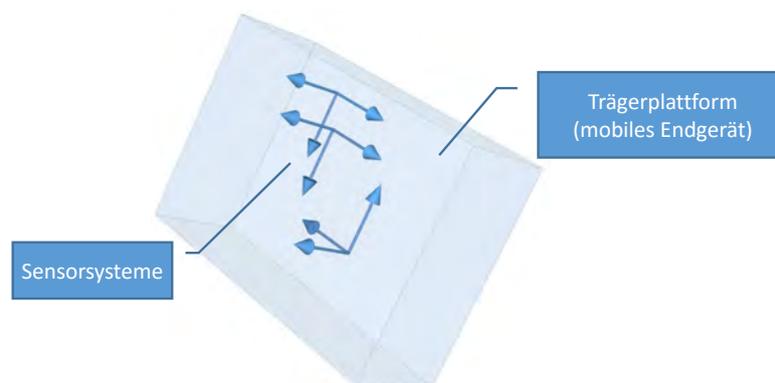


Abbildung 3.14: *Sensor-Systeme*

3.6.2.9 Kamerafestes Koordinatensystem - reale Kamera (k-System)

Das kamerafeste Koordinatensystem der realen Kamera hat seinen Koordinatenursprung im Projektionszentrum der realen Kamera. Entlang der optischen Achse, jedoch in entgegengesetzter Aufnahmerichtung, wird die z-Achse definiert. Die x-Achse und die y-Achse werden parallel zur x- und y-Achse der Bildebene gelegt, so dass sich ein kartesisches dreidimensionales Rechtssystem ergibt, ähnlich [Luhmann 2010b]. Dieses Koordinatensystem kann auch als räumliches Bildkoordinatensystem aufgefasst werden, vgl. [Luhmann 2010b].

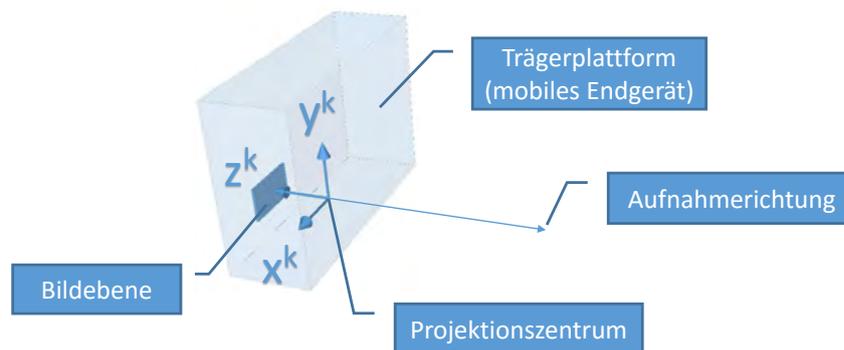


Abbildung 3.15: k-System

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Projektionszentrum der Kamera
x-Achse x^k :	nach links, in Blickrichtung z-Achse
y-Achse y^k :	Richtung horizontale (längere) Bildseite beziehungsweise Sensorseite
z-Achse z^k :	nach oben, Richtung vertikale (kürzere) Bildseite bzw. Sensorseite
	senkrecht zur x^k - y^k -Ebene
	entlang der optischen Achse, entgegen Aufnahmerichtung
Reihenfolge der Achsen:	x^k, y^k, z^k , vgl. Abbildung , vgl. Abbildung 3.15

Luhmann [2010b] folgend ist es in der Photogrammetrie üblich, die Lage des Projektionszentrums im Bildraum sowie Abweichungen der realen Aufnahmegeometrie vom Ideal-Modell der Zentralprojektion einer Lochkamera in diesem räumlichen Bildkoordinatensystem zu beschreiben. Es wird genutzt, um in ihm später die Parameter der inneren Orientierung der Kamera zu bestimmen. Die Parameter der inneren Orientierung nach diesem Ansatz sind die Kammerkonstante (genähert die Brennweite, auch Bilddistanz, vgl. Luhmann [2010b]), die Lage des Bildhauptpunktes im Bildkoordinatensystem, die Parameter von Bildfehler beschreibenden Funktionen (u.a. radial-symmetrische Verzeichnung, Maßstab und Scherung des Bildkoordinatensystems, tangentielle und asymmetrische Verzeichnung, entfernungsabhängige Verzeichnung). Die reale Außenkamera eines GeoARS unterscheidet sich durch diese Parameter maßgeblich von der virtuellen Kamera.

Die Beschreibung der Verfahrensweise zur Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung der realen Kamera und die Anwendung in Form der Echtzeitkorrektur auf ein GeoARS wird später in Abschnitt 7.10.1 vorgenommen.

3.6.2.10 Virtuelles topozentrisches System (o-System)

Das virtuelle topozentrische System ist als lokales System innerhalb der virtuellen Welt, nachfolgend als o-System bezeichnet, definiert und wird im Rahmen von GeoARS als Navigationssystem innerhalb der virtuellen Welt Anwendung finden:

Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	virtuelles Topozentrum, Projektionszentrum der Lochkamera
x-Achse x^o :	nach Osten, virtuell geographisch
y-Achse y^o :	nach oben, entlang der Ellipsoidnormalen
z-Achse z^o :	nach Süden, virtuell geographisch
Reihenfolge der Achsen:	x^o, y^o, z^o , vgl. Abbildung 3.16

Das virtuelle topozentrische System wird in der Computergraphik (z.B. Open Graphics Library (OpenGL)) als Perspektive des Augpunktes verwendet.

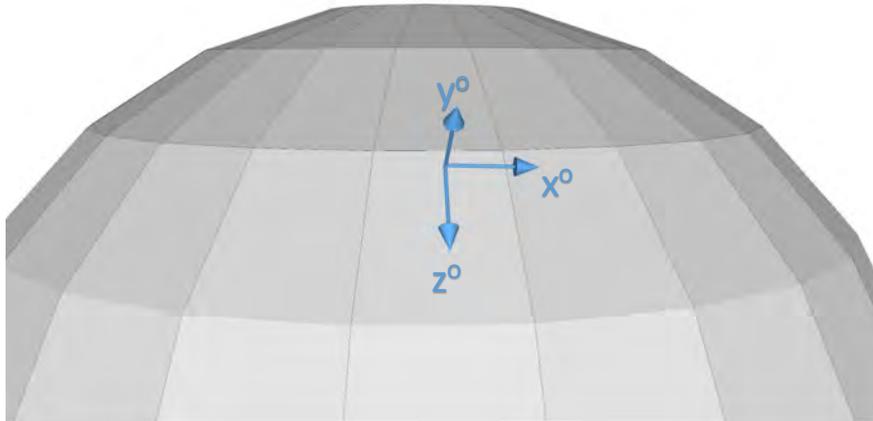
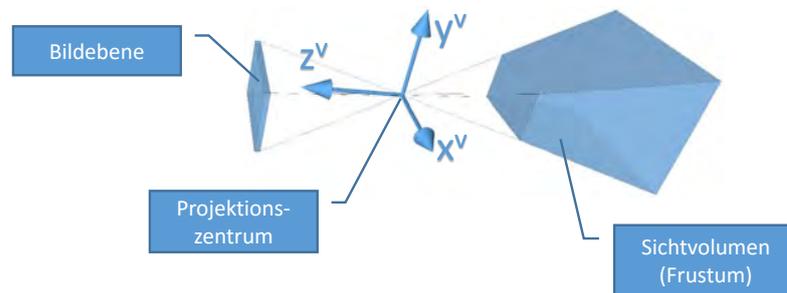


Abbildung 3.16: o-System

3.6.2.11 Kamerafestes Koordinatensystem – virtuelle Kamera (v-System)

Das kamerafeste Koordinatensystem der virtuellen Kamera hat seinen Koordinatenursprung im Projektionszentrum der virtuellen Kamera. Es wird eine zentralperspektivische Abbildung zugrunde gelegt, bei der sich alle Strahlen von Objektpunkten des virtuellen Raumes in einem Zentralpunkt treffen. Dieses Zentrum wird als Lochkamera bezeichnet, vgl. [Tönnis 2010], [Luhmann 2010b], [Luhmann 2010a]. Die x- und y-Achse werden parallel zur x- und y-Achse der Bildebene ausgerichtet. Orthogonal zur x-y-Ebene und entgegen der Blickrichtung der virtuellen Kamera wird die z-Achse gelegt.

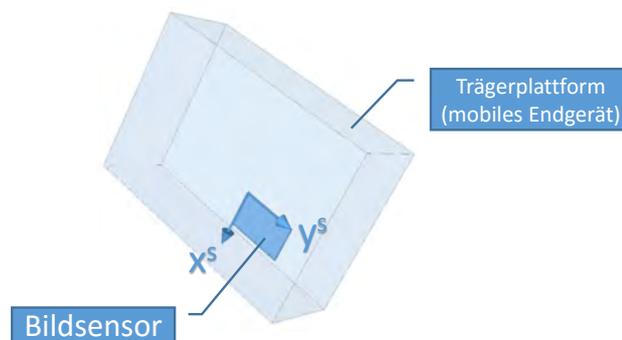
Art:	kartesisches Rechtssystem
Dimension:	dreidimensional
Koordinatenursprung:	Projektionszentrum der Lochkamera
x-Achse x^v :	nach links, Richtung horizontale (längere) Bildseite/Displayseite
y-Achse y^v :	nach oben, Richtung vertikale (kürzere) Bildseite/Displayseite
z-Achse z^v :	senkrecht zur x^v - y^v -Ebene, entgegengesetzte Blickrichtung der Lochkamera
Reihenfolge der Achsen:	x^v, y^v, z^v , vgl. Abbildung 3.17

Abbildung 3.17: *v-System*

Da die virtuelle Kamera genau dem vorgenannten Ideal-Modell entspricht und keinerlei Verzerrungen auftreten, reduziert sich die Angabe der Parameter der inneren Orientierung allein auf den vertikalen und horizontalen Sichtfeld-Parameter (engl. field of view).

3.6.2.12 Bildsensor-Koordinatensystem (s-System)

Das Koordinatensystem eines physischen Bildsensors wird in dieser Arbeit als Bildsensor-Koordinatensystem bezeichnet. Es besteht aus x Zeilen und y Spalten und ist wie folgt definiert:

Abbildung 3.18: *s-System*

Art:	kartesisches System
Dimension:	zweidimensional
Koordinatenursprung:	linkes oberes Sensorelement
x -Achse x^s :	nach unten, Richtung vertikale (kürzere) Sensorseite
y -Achse y^s :	nach rechts, Richtung horizontale (längere) Sensorseite
Reihenfolge der Achsen:	x^s, y^s , vgl. Abbildung 3.18

In der Praxis wird zur Erzeugung des realen Kamerabildes nicht immer die gesamte Sensorfläche zur Bilderzeugung genutzt. Dieser Umstand ist im Rahmen der Kamerakalibrierung zu beachten. Ebenfalls haben

Deformationen des Sensors oder Sensorschiefen Auswirkungen auf das resultierende Bild und die 3D-Registrierung. Mit Hilfe der Kamerakalibrierung in Abschnitt 7.10.1 und der dort vorgestellten Lösung zur Echtzeit-Korrektur wird dieser Sachverhalt behandelt.

3.6.2.13 Bildkoordinatensystem (d-System)

Das Koordinatensystem des digitalen Bildes hat seinen Koordinatenursprung im Bildmittelpunkt. Es wird wie folgt definiert:

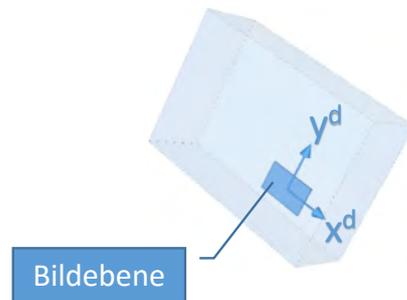


Abbildung 3.19: d-System

Art:	kartesisches System
Dimension:	zweidimensional
Koordinatenursprung:	Bildmitte
x-Achse x^d :	nach rechts, Richtung horizontale (längere) Bildseite
y-Achse y^d :	nach oben, Richtung vertikale (kürzere) Bildseite
Reihenfolge der Achsen:	x^d, y^d , vgl. Abbildung 3.19

Die Koordinatenwerte des Bildkoordinatensystems können sowohl in der Einheit Meter, als auch Pixel angegeben werden.

3.6.2.14 Pixelkoordinatensystem (p-System)

Das Koordinatensystem eines digitalen Bildes wird als Pixelkoordinatensystem bezeichnet, vgl. Abbildung 3.20. Es besteht aus x Spalten und y Zeilen. Das Pixelkoordinatensystem kann als zweidimensionale Matrix im Sinne der digitalen Bildverarbeitung oder bei Verkettung der Zeilen als Array im Rahmen der Speicher-Pufferung, vgl. [Sellers u. a. 2015], beschrieben werden.

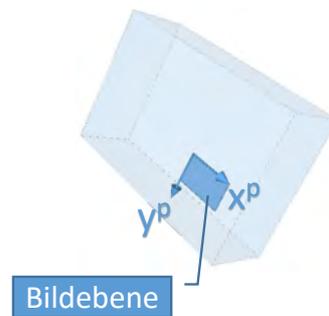


Abbildung 3.20: p-System

Art:	kartesisches System
Dimension:	zweidimensional
Koordinatenursprung:	linkes oberes Element (Pixel)
x-Achse x^p :	nach rechts, Richtung horizontale (längere) Bildseite
y-Achse y^p :	nach unten, Richtung vertikale (kürzere) Bildseite
Reihenfolge der Achsen:	y^p, x^p

Die Werte der x- und y-Achse werden als Integerzahl in der Einheit Pixel angegeben. Die Koordinate eines Pixels bezieht sich auf den Mittelpunkt des Pixels.

3.6.2.15 Texturkoordinatensystem (t-System)

Das Koordinatensystem einer Textur wird als Texturkoordinatensystem bezeichnet. Eine Textur im Sinne der Computergraphik ist eine Struktur, die man auf die Oberfläche von Objekten aufbringen kann, vgl. [Nischwitz u. a. 2007], [Luhmann 2010b]. Das System ist wie folgt definiert:

Art:	kartesisches System
Dimension:	zweidimensional
Koordinatenursprung:	linke obere Ecke, vgl. [Sellers u. a. 2015]
x-Achse x^t :	nach rechts
y-Achse y^t :	nach unten
Reihenfolge der Achsen:	y^t, x^t , vgl. Abbildung 3.21

Die Wertebereiche der x- und y-Achse liegen zwischen 0.0 und 1.0 und werden als Dezimalzahlen ohne Maßeinheit angegeben.



Abbildung 3.21: *t-System*

3.6.2.16 Displaykoordinatensystem (y-System)

Das Koordinatensystem des Displays (des mobilen Endgerätes) hat seinen Koordinatenursprung in der linken oberen Ecke des Displays und ist zusammenfassend wie folgt definiert:

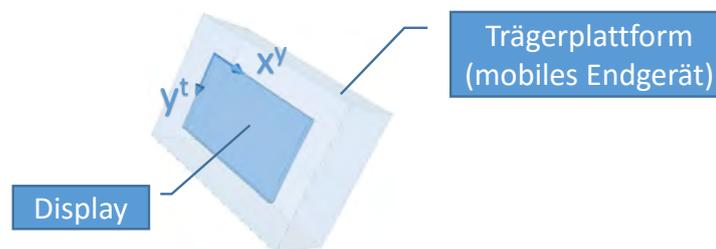


Abbildung 3.22: *y-System*

Art:	kartesisches System
Dimension:	zweidimensional
Koordinatenursprung:	linke obere Ecke, vgl. [Sellers u. a. 2015]
x-Achse x^y :	nach rechts
y-Achse y^y :	nach unten
Reihenfolge der Achsen:	y^y, x^y , vgl. Abbildung 3.22

Die Werte der x- und y-Achse werden als Integerzahl in der Einheit Pixel angegeben. Die Koordinate eines Pixels bezieht sich auf den Mittelpunkt des Pixels. Es ist zu beachten, dass häufig bei GeoARS nicht die gesamte Displayfläche für das Live-Video-Bild zur Verfügung steht, sondern beispielsweise durch eine Menüleiste verkleinert wird, ggf. zu einachsigen Stauchungen des Bildes führt und vor der Registrierung zu korrigieren ist, vgl. Kapitel 6.

4 Semantische AR-Geoobjektmodellierung

4.1 Modellierung von AR-Geodaten

Mit der vorliegenden Arbeit wird für GeoARS eine durchgehend objektorientierte Systemkonzeption angestrebt. Die objektorientierte semantische Modellierung schließt ein, dass auch die Datenerfassung, Objektbildung, Datenspeicherung und Programmierung objektorientiert erfolgen.

Als Ansatz der grundsätzlichen Vorgehensweise für den Aufbau von GeoARS wird der folgende dreiteilige **objektorientierte Modellierungsprozess** gewählt: Objektorientierte Analyse (OOA), Objektorientiertes Design (OOD), Objektorientierte Programmierung (OOP), vgl. [Borrmann u. a. 2015], [Balzert 2011]. Die Abbildung 4.1 verdeutlicht die dreiteilige Herangehensweise in Anlehnung an [Balzert 2011] in Form einer schematischen Übersicht, auf die nachfolgend genauer eingegangen wird.

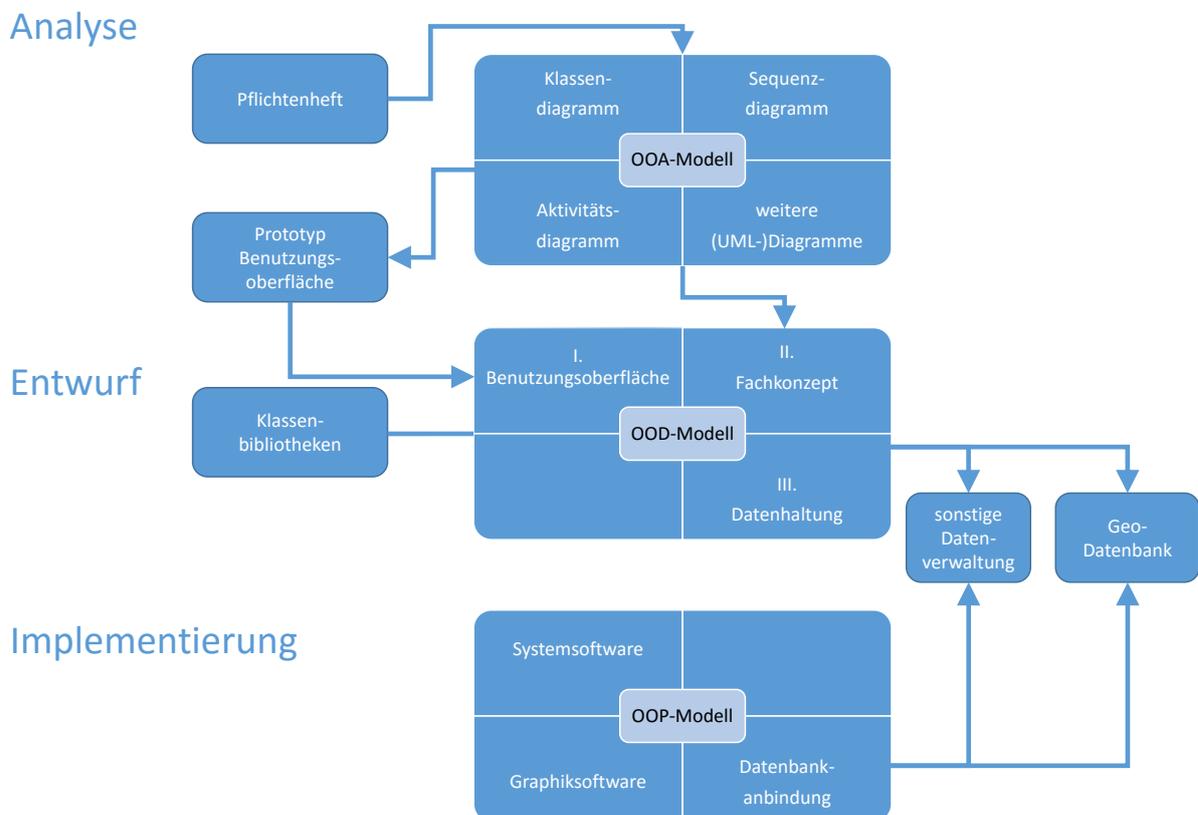


Abbildung 4.1: Objektorientierte AR-Geoobjektmodellierung und Softwareentwicklung von GeoARS

Für diese Arbeit werden zwei Fälle von GeoARS unterschieden. Der erste Fall beinhaltet GeoARS für die noch kein Objektmodell bezüglich der Geo(fach)daten besteht. Dies trifft hier beispielsweise auf das „GeoARS-Unfallaufnahme“ zu.

Der zweite Fall betrifft GeoARS für die eine Integration von AR-Geoobjekten in bereits bestehende Modelle beabsichtigt ist. Dieser Kategorie wird das Referenzbeispiel „GeoARS-Landentwicklung“ zugeordnet. Im letzten Fall existiert bereits ein Fachkonzept und eine Datenhaltung, sodass sich der Aufwand im objektorientierten Modellierungsprozess erheblich vereinfacht.

Zielsetzung dieses Kapitels ist die Untersuchung zur Modellierung von GeoARS-fähigen Geodaten bzw. Geoobjekten und die Übertragbarkeit der Herangehensweise auf beliebige bestehende Geodaten-Systeme (u.a. vorliegend in GIS) hinsichtlich Verwendbarkeit für Zwecke der Augmented Reality.

Im Rahmen der regelmäßig mit hohem Aufwand verbundenen **Analyse** werden die Grundlagen zusammengetragen, um das Fachkonzept eines Systems zu erstellen. Für das Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ existiert das Fachkonzept noch nicht und muss beginnend mit der OOA zunächst erarbeitet werden. Die Details dazu folgen in Abschnitt 4.1.1. Für das Referenzsystem „GeoARS-Landentwicklung“ existiert das Fachkonzept bereits, sodass dieses Referenzsystem als Beispiel für die Erweiterung existierender Objektmodelle um AR-Geoobjekte dient.

Aufbauend auf den Arbeitsergebnissen der Analyse folgt der **Entwurf** eines Systems. Für beide vorgenannten Referenzbeispiele wird als Ansatz für die Entwicklung von GeoARS eine Drei-Schichten-Architektur – bestehend aus der Schicht der Benutzungsoberfläche, einer Fachkonzeptschicht und einer Datenhaltungsschicht – vorgeschlagen, vgl. Abbildung 4.1 (OOD). Die Fachkonzeptschicht und die Datenhaltungsschicht sind besonders relevant, da sie konkret die semantische dreidimensionale AR-Objektmodellierung der Geodaten betreffen und anschließend hinsichtlich GeoARS untersucht werden.

Der letzte Teil des vorgeschlagenen Ansatzes für die grundsätzliche Vorgehensweise zum Aufbau von GeoARS umfasst die **Implementierung**, bei der als Ergebnis die ausführbare GeoARS-Anwendung entsteht.

4.1.1 Ansatz zur Datenmodellierung in GeoARS

Für eine geeignete Informationsmodellierung steht eine Vielzahl an Modellierungssprachen zur Auswahl. Fettke [2009] benennt das Entity-Relationship Model (ERM), die **Unified Modeling Language (UML)**, die Workflow-Modellierung, die Ereignisgesteuerte Prozesskette (EKP) und Zustandsdiagramme als die fünf am häufigsten in der Praxis eingesetzten Sprachen. Die Nutzungshäufigkeit der UML hat in den letzten Jahren stark zugenommen, liegt aber immer noch knapp unterhalb der führenden Modellierungssprache ERM, vgl. [Fettke 2009]. In Deutschland wird UML allerdings von mehr als der Hälfte der Modellierer eingesetzt und ist damit national dominierend. Zwei bedeutende Vertreter größerer Daten- und Softwareprojekte im GIS-Bereich, das AAA-Modell der Katasterverwaltungen Deutschlands und der internationale standardisierte City Geography Markup Language (CityGML), wurden mit UML modelliert und bilden fachliche Datengrundlagen und Schnittmengen für eine Verwendung in GeoARS. Auch im Rahmen des Building Information Modeling (BIM) wird die UML eingesetzt, vgl. [Borrmann u. a. 2015].

UML eignet sich, um Systeme grafisch zu konstruieren, zu erläutern und zu dokumentieren. UML dient weiterführend als gemeinsame Sprache zwischen Technikern und Nicht-Technikern und verwendet eine einheitliche und standardisierte Notation und Semantik, vgl. [Steinpichler 2009]. Komplexe Sachverhalte können mit ihr strukturiert und verständlich dargestellt werden. UML wird von der Object Management Group (OMG) kontinuierlich entwickelt und ist bereits als ISO (ISO/IEC 19505 für Version 2.4.1) standardisiert worden und liegt derzeit in der Version 2.5 vor, vgl. [OMG 2016b]. An verschiedenen Stellen dieser Arbeit wird UML verwendet, um **Datenflüsse und Prozessabläufe** (Aktivitätsdiagramm) darzustellen, verschiedene **Sichten auf die Struktur des modellierten AR-Systems** (Komponentendiagramm) zu geben oder **Objektklassen und Schnittstellen** (Klassendiagramm) zu modellieren, vgl. [OMG 2016a].

Insbesondere die in Aussicht stehenden Synergien mit den vorgenannten GIS-Projekten führten zu der Entscheidung, **UML in dieser Arbeit** zur Dokumentation der Datenanalyse und zur objektorientierten Datenmodellierung einzusetzen sowie objektorientierte Programmiersprachen (u.a. Java, C#) zu verwenden.

Für die Systemkonzeption eines GeoARS ist vorausschauend zu hinterfragen, ob und in welcher Form ein Datenaustausch von Geodaten mit AR-Eigenschaften erfolgen soll, da es im Rahmen der Konzeption weitere Punkte (z.B. Schnittstellen, Funktionen) zu berücksichtigen gilt.

Ein Ansatz für GeoARS ist die Verwendung der Augmented Reality Markup Language (ARML). Hierbei wurde in den zurückliegenden Jahren mit ARML ein Vorschlag erarbeitet, wie AR-Inhalte zwischen verschiedenen AR-Systemen ausgetauscht werden können. Die ARML wird seit November 2011 von einer Arbeitsgruppe des OGC entwickelt und liegt derzeit in der Version 2.0 vor, vgl. [OGC 2013]. Sie stellt ein interoperables Austauschformat (engl. interchange format) für AR-Inhalte in Syntax der Extensible Markup Language (XML) dar. Über ARML können virtuelle Objekte inklusive ihrer Erscheinungsmerkmale sowie ihre Georeferenzierung beschrieben werden. Über ihre Skript-Fähigkeit (ECMAScript) ermöglicht sie eine dynamische Modifizierung von virtuellen Szenen, vgl. [Lechner 2015]. ARML beinhaltet jedoch absichtlich keine Algorithmen für die Bestimmung der räumlichen Lage eines AR-Systems, für die 3D-Registrierung oder die Anbindung von Sensoren, vgl. [OGC 2013]. ARML-Objekte bestehen dem generellen ARML-Konzept nach grundsätzlich aus Features, VisualAssets und Achors, vgl. [Lechner 2015]. Über ein „Feature“ wird das Objekt über einen Metadatenatz beschrieben, u.a. dem Objektidentifikator, dem Namen und einer Beschreibung. Der Bestandteil Feature stammt aus der Weiternutzung bzw. Ableitung des Feature der Geography Markup Language (GML). Ein oder mehrere zu einem Objekt gehörende Anchor realisieren die Objektgeometrie (Punkt, Linie, Polygon) und sind ebenfalls der GML entnommen, verweisen mittels Uniform Resource Identifiers (URIs) auf die zu nutzenden Tracking-Methoden (Trackables) oder definieren relative Positionierungen der darzustellenden Objekte. In VisualAssets werden die Erscheinungsmerkmale der virtuellen Objekte festgelegt, z.B. Sichtbarkeit, Skalierung oder ergänzende Texte. Die Einbeziehung von ARML als Datenaustausch-Schnittstelle erscheint für GeoARS wenig sinnvoll, da für den Austausch von Geofachdaten bereits abgestimmte normierte Datenaustauschformate in der gängigen Praxis (z.B. Normbasierte Austauschschnittstelle (NAS)) existieren.

Der Ansatz bezüglich GeoARS besteht nunmehr darin, für Geodaten bereits existierende Datenstandards und Modelle, die ebenfalls Metadaten, Geometrie, Semantik und Erscheinung beinhalten, z.B. das AAA-Modell oder CityGML-Datenmodell zu verwenden und leicht zu erweitern. Die Aufbereitung der Geo(fach)daten für AR-Zwecke erfolgt in Echtzeit durch das jeweilige GeoARS. Die für die Pflege der komplexen fachlichen Geodatenmodelle zuständigen Gremien (z.B. die Kataster- und Vermessungsverwaltung, Flurbereinigungsverwaltung) können die notwendige AR-Objektarten direkt in das Datenmodell integrieren und im Rahmen der regulären Datenmodellpflege weiterführen. Die Integration der AR-Eigenschaften in die Fachmodelle wird als maßgeblicher Vorteil angesehen, weil keine zusätzliche ARML-Datenhaltung und -Pflege notwendig wird. Darüber hinaus existieren zur Modellierung von virtuellen Daten bereits internationale Standards, z.B. X3D (vgl. Abschnitt 5.4.2), die im Modell und in der Implementierung des GeoARS genutzt werden können und nicht neu entwickelt werden müssen.

4.2 Gewählter Ansatz der AR-Geoobjektmodellierung

4.2.1 Erweiterung von GIS-Objektmodellen um AR-Objekte

Den nachfolgenden Überlegungen und Veranschaulichungen liegt die Annahme zugrunde, dass die virtuellen Geoobjekte aus punkt-, linien- oder flächenförmigen Geometrien erzeugt werden können. Zur Modellierung wird sich des Standards der Internationalen Organisation für Normung (ISO) bedient und in UML modelliert. Insbesondere werden hierbei die Normen ISO 19103 (Conceptual Schema Language), ISO 19107 (Spatial Schema), ISO 19111 (Spatial Referencing by Coordinates) und ISO 19775 (Extensible 3D (X3D)) verwendet. Die Objektkonstruktion der Abbildung 4.2 bildet hierbei die Grundlage für die zu modellierenden Objektarten eines GeoARS. Hierbei wird der aus ISO 19107 stammende Objekttyp `GM_Object` sowie seine Spezialisierung

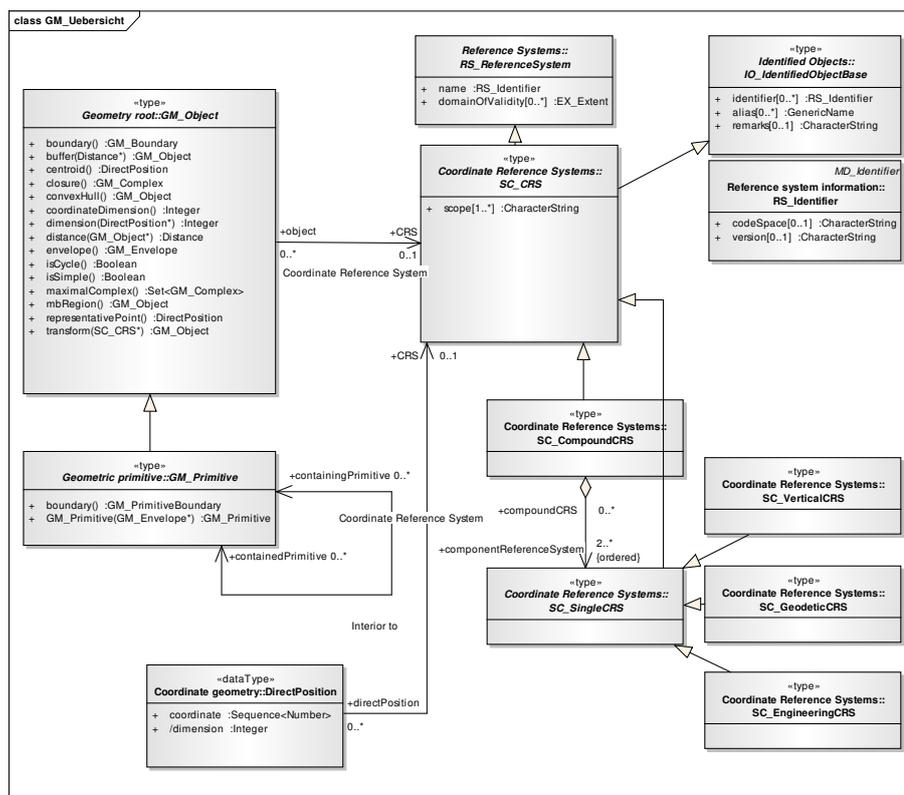


Abbildung 4.2: UML-Klassendiagramm Grundlage der AR-Geoobjekte: Objektgeneralisierung und -relation nach ISO 19107 und ISO 19111

`GM_Primitive` als Einstiegspunkt in die Modellierung gesehen. Die ISO 19107 mit der Bezeichnung „Geographic information - Spatial schema“ beschreibt die Modellierung von Geoinformationen (engl. geographic features) aus geometrischer und topologischer Hinsicht und schließt auch dreidimensionale Modellierung ein, vgl. [Andrae u. a. 2009], [Gröger u. Kolbe 2005]. In Verbindung mit der ISO 19111 Geographic Information - Spatial referencing by coordinates, welche die Georeferenzierung durch Koordinaten eines Koordinatenreferenzsystems und Koordinatentransformationen beschreibt, lassen sich mittels Relationen Geometrie und Raumbezug miteinander in Verbindung setzen. Von hoher praktischer Relevanz in aktuellen DBMS ist weiterführend die Norm ISO 19125 Geographic information - Simple feature access, vgl. [Brinkhoff 2013]. Das darin beschriebene Feature-Geometrie-Modell ist eine Untermenge des Spatial Schemas der ISO 19107, beschränkt sich jedoch lediglich auf zweidimensionale Vektorgeometrien. Dieser Sachverhalt wird später in Abschnitt 5.5.1 (Dimensionserweiterung) aufgegriffen und weitergeführt.

4.2.2 Raumbezug und Georeferenzierung von AR-Geoobjekten

In der vorliegenden Modellierung erhalten die Geometrieobjekte den Raumbezug über die Relation zu dem Objekttyp `SC_CRS`. Ein Bezugssystem kann als einfaches Koordinatensystem (`SC_SingleCRS`) in der Spezialisierung als geodätisches Koordinatensystem (`SC_GeodeticCRS`), als Höhensystem (`SC_VerticalCRS`) oder lokales Koordinatensystem (`SC_EngineeringCRS`) ausgebildet oder als hybrides System (`SC_CompoundCRS`) modelliert werden. Einem primitiven oder komplexen Geometrieobjekt wird hierbei maximal ein Koordinatensystem der Klasse `SC_CRS`, vgl. Kardinalität 0..1 in Abbildung 4.2, zugeordnet.

Für GeoARS gilt es zwei Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall ist vorgesehen, dass auch in lokalen terrestrischen Koordinatensystemen gearbeitet werden kann, z.B. für die Erfassung von Geodaten ohne globale Positionierung (z.B. ohne GNSS). Im zweiten Falle sollen Geodaten mit globalen Koordinaten verarbeitet werden. In beiden Fällen sind die Daten dreidimensional aufzubereiten und können lokale und/oder globale Höhen beinhalten. Hierbei wird die **CRS-Festlegung für GeoARS** eingeführt, das Koordinatendatensätze immer als Koordinatentripel geführt werden. Die praktische Lösung dieser modellierten Festlegung wird im Rahmen der Implementierung erarbeitet.

INSPIRE gibt in ihrer Durchführungsrichtlinie „D2.8.I.1 INSPIRE Specification on Coordinate Reference Systems - Guidelines“ zusätzlich einen Hinweis zur Einführung und Vergabe von Koordinatensystem-Identifikatoren (Objekt `RS_Identifier`), die für GeoARS-Realisierungen berücksichtigt werden, z. B. „ETRS89-TM33/DHHN2016“ oder „lokal/ lokal“, vgl. [INSPIRE TWG CRS 2014].

Dabei können zu einem solchen Bezugssystem (`SC_CRS`) bzw. seinen Spezialisierungen mehrere Objekttypen (`GM_Object`) gehören. Der Datentyp `DirectPosition` stammt ebenfalls aus der ISO 19107. Eine `DirectPosition` ist ein Sachdatenobjekt und trägt im Attribut *dimension* die Dimension des Koordinatensystems, die für GeoARS *dimension* = 3 beträgt. Das Attribut *coordinate* beinhaltet die dreidimensionale Folge von Koordinatenwerten (Koordinatentripel). Der Datentyp `DirectPosition` kann (Kardinalität 0..1) hierbei auf ein bestimmtes Koordinatensystem referenzieren. Eine Übersicht über bekannte Koordinatenbezugssysteme ist unter der Internetadresse <http://www.epsg.org> zugänglich. Sie enthält über 500 geodätische Datumsangaben und knapp 50 Beschreibungen von Ellipsoiden sowie mehrere Tausend georeferenzierte Bezugssysteme, die durch einen eindeutigen European Petroleum Survey Group Geodesy (EPSG)-Schlüssel identifiziert werden, vgl. [Brinkhoff 2013].

`DirectPosition` wird später innerhalb der Geometrieobjekte verwendet, um die Koordinatenwerte des jeweiligen Objektes abzuspeichern. Der Objekttyp `GM_Primitive` bildet den Ausgangspunkt für die weiteren Ausführungen.

4.2.3 Punktförmige AR-Geoobjekte

Abbildung 4.3 zeigt auf der rechten Seite den punktförmigen Geometrieobjekttyp `GM_Point` der ISO 19107 als Spezialisierung von `GM_Primitive`. Er beinhaltet das Attribut *position* mit dem Datentyp `DirectPosition`. Als nächster Schritt wird ein virtuelles punktförmiges AR-Geoobjekt `PunktObjektVR` als Spezialisierung von `GM_Point` modelliert. Im Rahmen der späteren Implementierung wird dann jedes AR-Geoobjekt dieser Art als Instanz realisiert. Neben dem Attribut *position* erbt `PunktObjektVR` auch alle Operationen seiner Generalisierungen, z.B. *isSimple()* von `GM_Object`. Diese und weitere Operationen können später in Datenbank-Systemen genutzt werden, die über Funktionalitäten zur Geodatenverarbeitung (Verschneidungen, u.s.w.) verfügen, z.B. PostGIS. Als weiteres Attribut beinhaltet das `PunktObjektVR` das Attribut

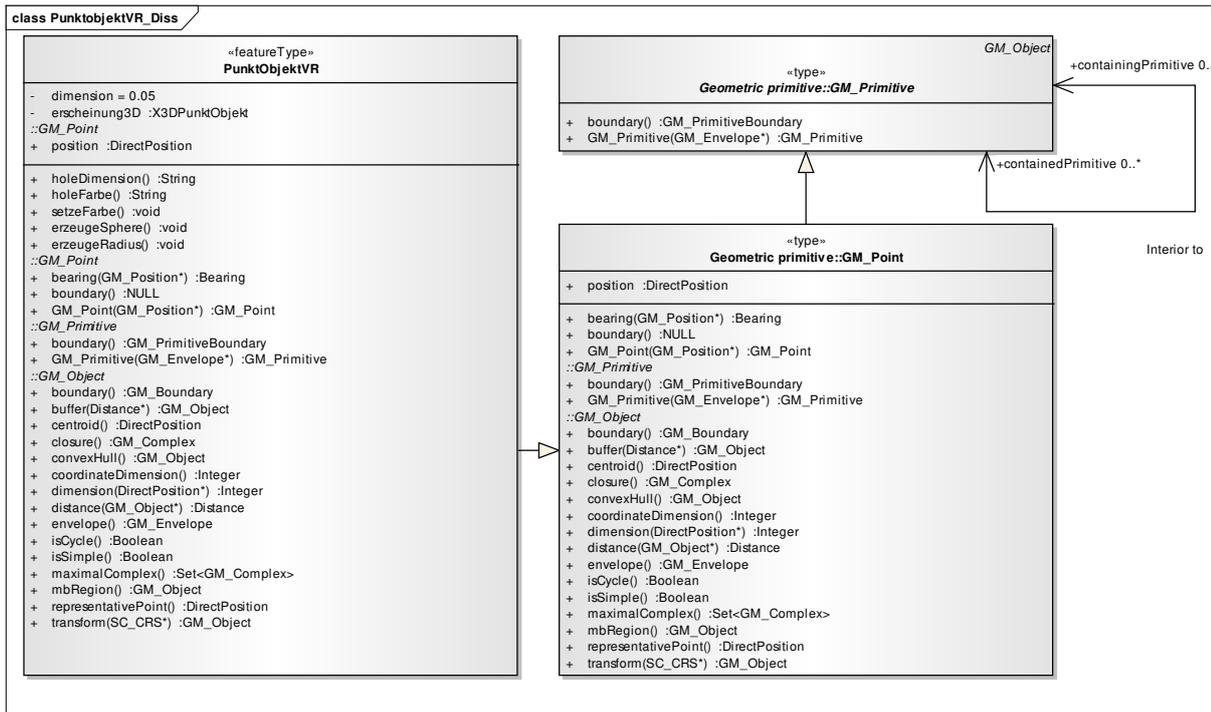


Abbildung 4.3: UML-Klassendiagramm PunktObjektVR

erscheinung3D. Hierbei werden X3D-Objekte (ISO 19775) verwendet und als Objekttyp *X3DPunktObjekt* eingeführt. Im *X3DPunktObjekt* sind dann wiederum als Objektattribute sogenannte X3D-Knoten (vgl. auch Abschnitt 5.4.2) enthalten, in denen einerseits die Materialeigenschaften (Präsentationseigenschaften), z.B. Form und Farbe für die spätere Visualisierung auf dem Display und andererseits weitere ereignisauslösende Eigenschaften (z.B. Verlinkungen, Animationen) gespeichert werden. Hierbei wird das *X3DPunktObjekt* als eigenständige Klasse und nicht als Datentyp modelliert. Bei Instanzen des *X3DPunktObjekt* handelt es sich um tatsächlich in der virtuellen Welt des GeoARS existierende Objekte, zum Beispiel ein aufgemessener und visualisierter Einzelpunkt eines Verkehrsunfallobjektes im „GeoARS-Unfallaufnahme“. Born u. a. [2004] erläutern, dass Werte von Datentypen selbst keine Identität besitzen können. Demgegenüber sind Objekte Instanzen von Klassen, die stets voneinander unterscheidbar sind und somit eine eigene Identität besitzen. Um dem Rechnung zu tragen, erhalten Instanzen der Objekte *X3DPunktObjekt* eigene Objekt-IDs. Abbildung 4.4 gibt eine Übersicht über das *X3DPunktObjekt* und die darin genutzten X3D-Knoten. Es ist ersichtlich, dass *X3DPunktObjekt* den Identifikator durch Vererbung erhält. In der Abbildung sind u.a. die X3D-Knoten *Material*, *Appearance*, *Shape*, *Sphere*, *Plansensor*, *Anchor* und *Transform* aufgeführt. Letzterer wird implizit verwendet und trägt die Koordinaten des virtuellen Objektes. Implementierungsbeispiele hierzu werden in Abschnitt 4.2.7 angeführt.

4.2.4 Linienförmige AR-Geoobjekte

Abbildung 4.5 zeigt den linienförmigen Geometrieobjekttyp *GM_Curve* der ISO 19107 als Resultat einer Kette von Spezialisierungen des *GM_Primitive*. Ein Objekt des Typs *GM_Curve* besteht aus einem oder mehreren Segmenten des Typs *GM_LineString*. Diese beinhalten das Attribut *controlPoint* mit dem Datentyp *GM_PointArray*, einer Composition aus *GM_Position*. In *GM_Position* sind wiederum über dem Datentyp *DirectPosition* die Koordinaten der Geometrie. Als nächster Schritt wird das virtuelle linienförmige

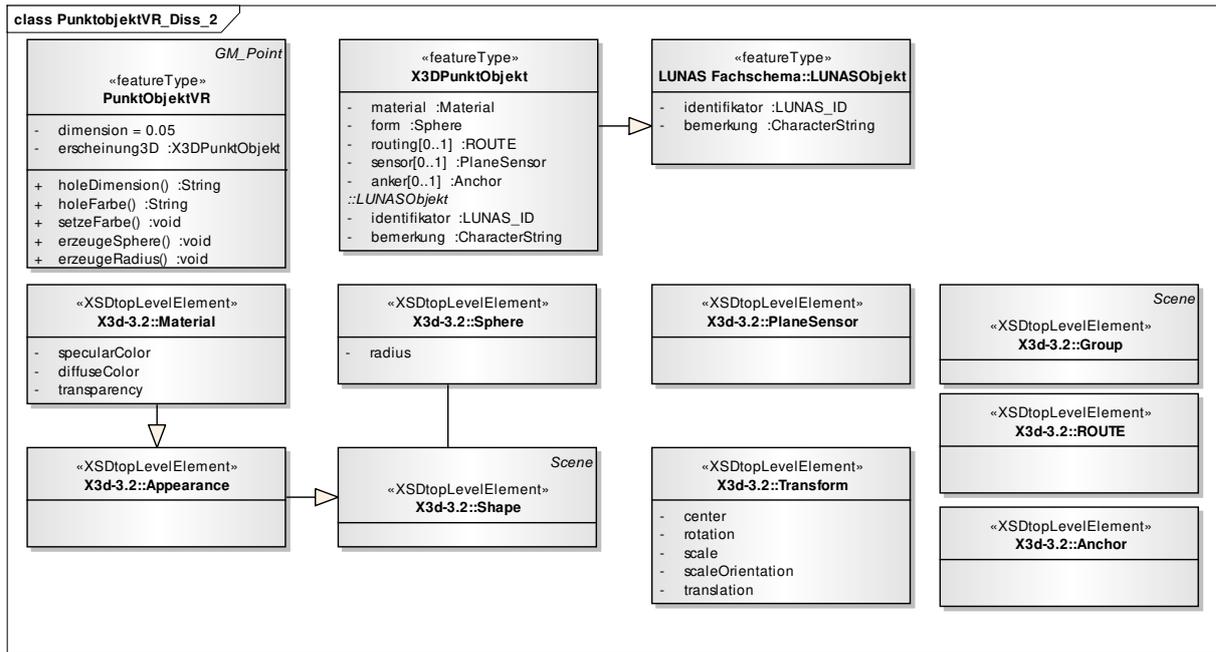


Abbildung 4.4: UML-Klassendiagramm PunktObjektVR und X3D

AR-Geoobjekt *LinienObjektVR* als Spezialisierung von *GM_Curve* modelliert. Im Rahmen der späteren Implementierung wird dann jedes Objekt dieser Art als Instanz realisiert. Neben dem Attribut *erscheinung3D* erbt *LinienObjektVR* auch alle Operationen seiner Generalisierungen.

Das Attribut *erscheinung3D* beinhaltet wiederum X3D-Objekte als Objekttyp *X3DLinienObjekt*. Darin sind dann wiederum als Objektattribute die X3D-Knoten enthalten, in denen wie bei *X3DPunktObjekt* die Materialeigenschaften und weitere ereignisauslösende Eigenschaften gespeichert sind. Hierbei wird für *X3DLinienObjekt* wieder eine eigenständige Klasse modelliert. Auch handelt es sich bei Instanzen des *X3DLinienObjekt* erneut um tatsächlich in der virtuellen Welt des GeoARS existierende Objekte, wie zum Beispiel ein aufgemessenes und visualisiertes linienförmiges Objekt (z.B. eine Bremsspur eines Verkehrsunfallobjektes im „GeoARS-Unfallaufnahme“). Abbildung 4.6 gibt eine Übersicht über das *X3DLinienObjekt* und die darin genutzten X3D-Knoten.

In der Abbildung 4.6 ist ersichtlich, dass das *X3DLinienObjekt* den Identifikator durch Vererbung erhält. Es sind auch die X3D-Knoten *Material*, *Appearance*, *Shape*, *IndexedLineSet* und *TouchSensor* aufgeführt. Im X3D-Knoten *IndexedLineSet* werden die Koordinaten der zu visualisierenden linienförmigen Geometrie synonym zu *GM_PointArray* realisiert, z.B. mit der Operation *GM_Curve (GM_CurveSegment*)*. Implementierungsbeispiele hierzu werden in Abschnitt 4.2.7 angeführt.

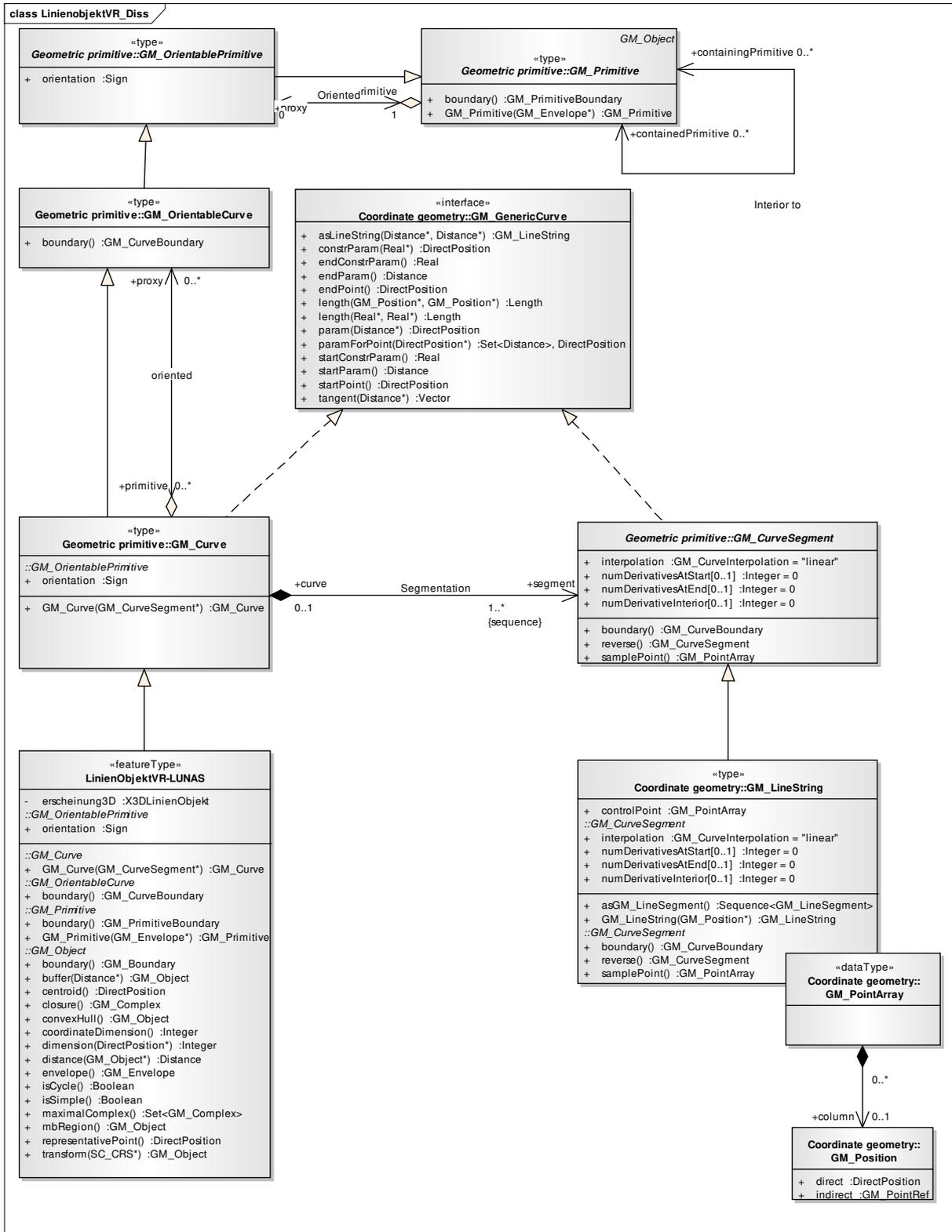
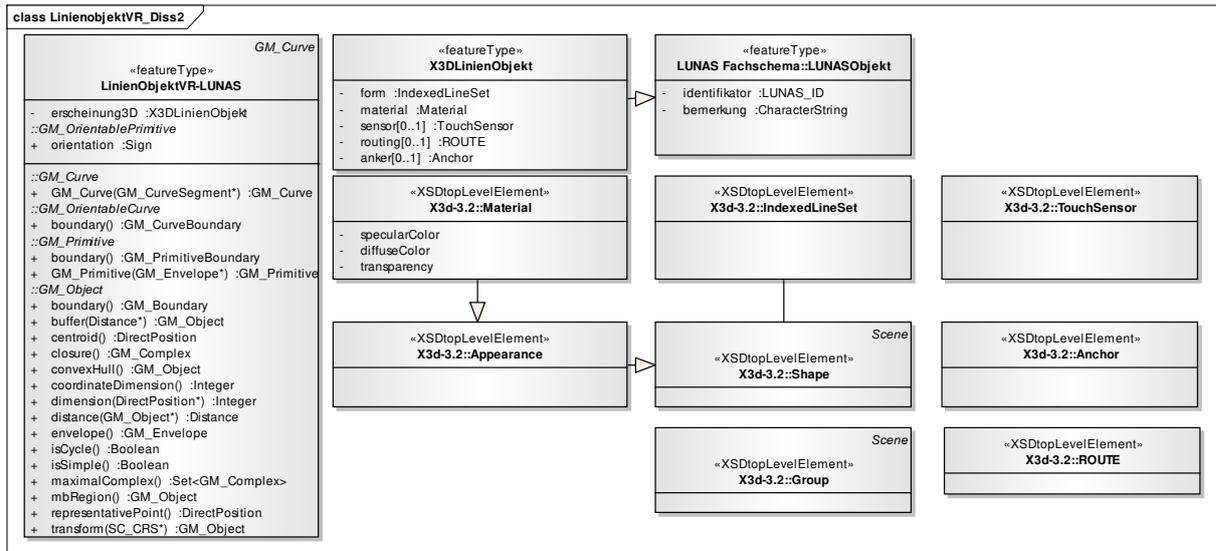


Abbildung 4.5: UML-Klassendiagramm LinienObjektVR

Abbildung 4.6: UML-Klassendiagramm *LinienObjektVR* und X3D

4.2.5 Flächenförmige AR-Geoobjekte

Abbildung 4.7 zeigt den flächenförmigen Geometrieobjekttyp *GM_TriangulatedSurface* der ISO 19107 (vgl. auch [Andrae u. a. 2009]) als Resultat einer Kette von Spezialisierungen des *GM_Primitive*. Ein Objekt des Typs *GM_TriangulatedSurface* besteht aus einem oder mehreren Segmenten des Typs *GM_Triangle*. Diese beinhalten das Attribut *corners* mit dem Datentyp *GM_Position*. In *GM_Position* sind wiederum über den Datentyp *DirectPosition* die Koordinaten der Geometrie enthalten. Als nächster Schritt wird das virtuelle flächenförmige AR-Geoobjekt *FlaechenObjektVR* als Spezialisierung von *GM_TriangulatedSurface* modelliert. Im Rahmen der späteren Implementierung wird dann jedes Objekt dieser Art als Instanz realisiert. Neben dem Attribut *erscheinung3D* erbt das *FlaechenObjektVR* auch alle Operationen seiner Generalisierungen. Das Attribut *erscheinung3D* beinhaltet X3D-Objekte als Objekttyp *X3DFlaechenObjekt*. Darin sind dann wiederum als Objektattribute die X3D-Knoten enthalten, in denen wie bei *X3DPunktObjekt* und *X3DLinienObjekt* einerseits die Materialeigenschaften und weitere ereignisauslösende Eigenschaften abgelegt werden. Hierbei wird für *X3DFlaechenObjekt* ebenfalls eine eigenständige Klasse modelliert. Ein *X3DFlaechenObjekt* ist ein tatsächlich in der virtuellen Welt des GeoARS existierendes Objekt, wie zum Beispiel ein aufgemessenes und visualisiertes flächenförmiges Objekt (z.B. ein Materialspurfeld eines Verkehrsunfallobjektes im „GeoARS-Unfallaufnahme“).

Abbildung 4.8 gibt eine Übersicht über das *X3DFlaechenObjekt* und die darin genutzten X3D-Knoten. Es ist ersichtlich, dass das *X3DFlaechenObjekt* den Identifikator durch Vererbung erhält und die X3D-Knoten *Material*, *Appearance*, *Shape*, *IndexedFaceSet* und *TouchSensor* einschließt.

Im X3D-Knoten *IndexedFaceSet* werden die Koordinaten der zu visualisierenden flächenförmigen Geometrie synonym zur Komposition von *GM_Triangle* zu *GM_TriangulatedSurface* realisiert, z.B. mit der Operation *GM_PolyhedralSurface(GM_Polygon*)*. Implementierungsbeispiele hierzu werden in Abschnitt 4.2.7 angeführt.

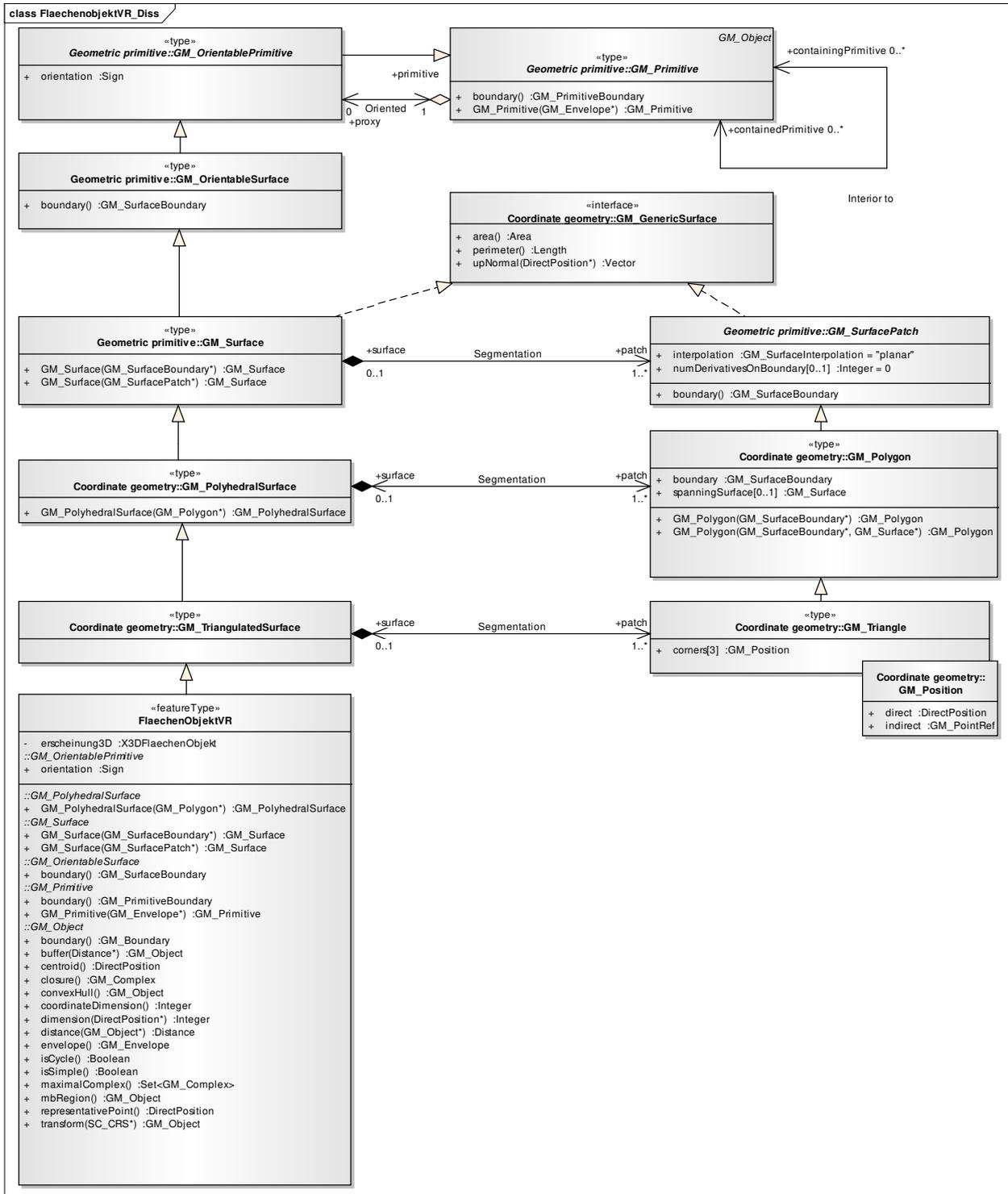
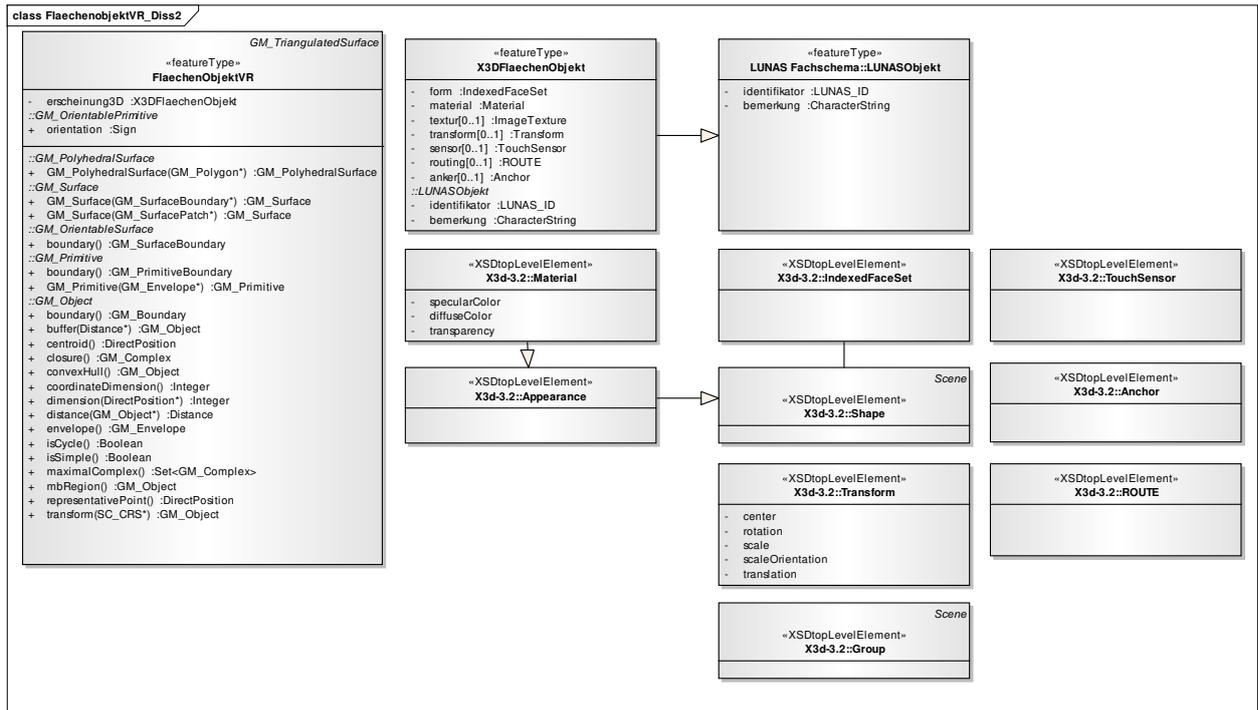


Abbildung 4.7: UML-Klassendiagramm FlaechenObjektVR

Abbildung 4.8: UML-Klassendiagramm *FlaechenObjektVR* und *X3D*

4.2.6 Ansätze zur Objektbildung und Speicherung von AR-Geoobjekten

In den vorherigen Abschnitten wurde die Objektmodellierung und die daraus resultierenden Klassendiagramme für AR-Geoobjekte als Teil der OOA für GeoARS erarbeitet.

Die Objektbildung und Speicherung von AR-Geoobjekten sind Gegenstand der Untersuchungen im Entwurf- und Implementierungsteil der Objektmodellierung. Im Weiteren werden Abbildung 4.1 folgend die gewählten Ansätze zur OOD und OOP, insbesondere die Verwendung von **Klassenbibliotheken**, die Möglichkeit von **Datenbankanbindungen**, die **Objektbildung** und die **Objektspeicherung** beschrieben.

4.2.6.1 Ansätze zur Objektbildung

Die Ableitung des objektorientierten Datenmodells der Geodaten und die Implementierung in ein GeoARS führen dazu, zunächst einen geeigneten Ansatz zur Objektbildung zu finden. Hierbei werden die in Abbildung 4.9 dargestellten Möglichkeiten gesehen.

Im ersten Ansatz erfolgt die Objektbildung ausschließlich über einen eigenen Programmcode durch Realisierung der Klassen aus u.a. ISO 190107, 19111, 19775 sowie der Erweiterung um die AR-Geoobjekt-Klassen und unter Nutzung einer objektorientierten Programmiersprache.

Der zweite Ansatz sieht die Verwendung von Klassenbibliotheken einer objektorientierten Programmiersprache vor. Bibliotheken, die das gesamte Spektrum der ISO 190107 umsetzen, existieren bislang nicht [Andrae u. a. 2013], jedoch wurde damit begonnen erste Klassen in einem Programminterface (GeoAPI interface library) zu realisieren, vgl. [Custer 2011]. Eine direkte Ableitung aus dem UML-Modell ist nicht möglich, weil umständliche und teilweise für die praktische Anwendung in der Programmierung schlecht handhabbare Programmiersprachen-Konstrukte entstehen, vgl. [OGC 2016]. Zumindest für die ISO 19125 sind umfangreiche

Klassenbibliotheken verfügbar, z.B. JTS Topology Suite [Davis 2015], GeoTools [Brinkhoff 2013], die regelmäßig jedoch einer Lizenzrestriktion unterliegen, z.B. GNU Lesser General Public License (LGPL). Daher wird es erforderlich, zusätzlich den eigenen Programmcode für die Realisierung fehlender Klassen aus u.a. ISO 19107, 19111, 19775 zu ergänzen sowie der Erweiterung um die AR-Geoobjekt-Klassen vorzunehmen.

Mit dem dritten Ansatz wird überlegt, ob ein Datenbankmanagementsystem (DBMS) mit bereits implementierter Geofunktionalität für die Bildung standardisierter Geoobjekte verwendet werden kann. Dieses ist dann um die Klassen der AR-Geoobjekte zu erweitern.

Der vierte Ansatz stellt eine Kombination der ersten drei Ansätze dar. Hierbei sollen sich die Möglichkeiten bei der Objektbildung derart ergänzen, dass vorhandene Möglichkeiten des DBMS und der GeoAPI genutzt und fehlende Klassen durch eigene Realisierungen der Klassen aus ISO 19107, ISO 19111 und ISO 19775 erstellt werden.

Alle Ansätze haben gemeinsam, dass eine Erweiterung um die Klassen der AR-Geoobjekte erfolgen muss.

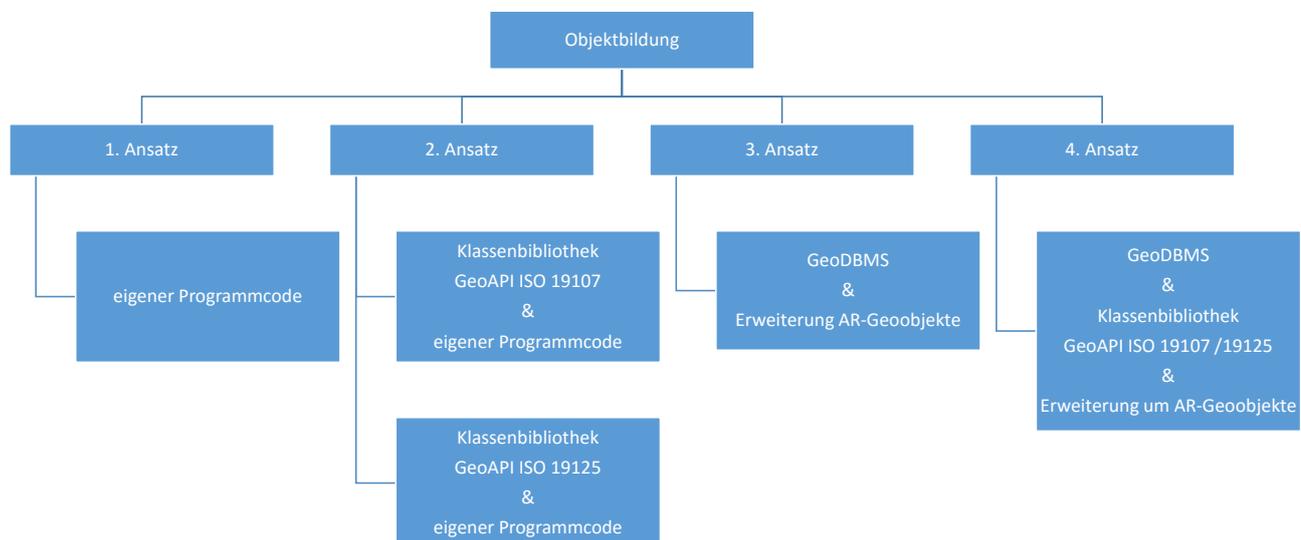


Abbildung 4.9: Ansätze zur Objektbildung in GeoARS

Hinsichtlich der Nutzung von Geodatenbanken (Ansätze 3 und 4) gibt es nach Brinkhoff [2014] bereits im Vorfeld zu beachten, dass trotz der Standardisierung der ISO-Datenmodelle der Zugriff von Anwendungsprogrammen auf in Datenbanksystemen gespeicherten Geodaten nicht vereinheitlicht ist. Das führt dazu, dass man auf proprietäre Lösungen der Datenbankhersteller angewiesen ist oder komplexe Rahmenstrukturen nutzen muss und diese komplexen Frameworks aufgrund der Überfrachtung für kleinere Anwendungen keine geeignete Lösung darstellen.

In Bezug auf die Erstellung und Verwendung von GeoARS mit Datenbankbindung wird dem Ansatz nachgegangen, das zur alleinigen Darstellung von 3D-AR-Objekten ein 2D-Datenbanksystem genügt, wenn die für 3D benötigten zusätzlichen Attribute in ergänzenden Datentabellen abgelegt werden (vgl. „GeoARS-Unfallaufnahme“).

Für GeoARS mit Verwendung von Geodatenbanken werden die nachfolgenden Anforderungen formuliert, die sowohl die Erfassung wie auch die Visualisierung von Geodaten einschließt. Es ist notwendig, dass

- räumliche Daten unterstützt werden
- genormte Koordinatensysteme verwaltet werden können
- jeder Punkt mit dreidimensionalen Koordinaten abgespeichert wird
- das DBMS objektrelational ist, um z.B. Rasterbilder (Live-Bild, Fotos) oder Multimedia-Daten abspeichern zu können und auch das binäre Abspeichern von Geometrie (räumliche Indizierung, Performanz) zu ermöglichen
- die Erweiterung eigener Tabellen zugelassen ist, um notwendige Ergänzungen für AR-Geoobjekte vornehmen zu können und die Erweiterung von Tabellenspalten zugelassen ist, um fehlende Attribute zu ergänzen
- Analysen möglich sind (z.B. geometrische Funktionen und Abfragen) und
- eine Schnittstelle zur Benutzeroberfläche des GeoARS vorhanden ist.

Nach Brinkhoff [2013] sind relationale DBMS ungeeignet, weil sie zu starr sind (Attribute in Tabellen müssen atomar sein, der Normalform genügen) und Operationen vom relationalen DBMS vordefiniert sind und dadurch nicht datentypisch ergänzt werden können. Objektrelationale Datenbankmodelle bieten zudem die Möglichkeit Klassen als Datentyp von Attributen einzusetzen (Attributwert als sogenanntes Spaltenobjekt). In objektrelationalen Datenbanken kann man die Tupel einer Relation (also die Zeilen einer Tabelle) als Objekte auffassen und so eine Objektsicht erhalten. Damit ist es möglich, die Datensätze in den Datenbanktabellen wie Objekte aufzufassen und mit Methoden zu versehen.

Der gewählte Ansatz und die Realisierung der Objektbildung wird weiterführend im gemeinsamen Zusammenhang mit der Realisierung der Objektspeicherung in den Abschnitten 4.2.7 und 4.2.7 beschrieben.

4.2.6.2 Ansätze zur Objektspeicherung

GeoARS werden in dieser Arbeit nicht nur als Visualisierungswerkzeuge von Geodaten verstanden, sondern auch als Datenerfassungswerkzeug. Dadurch schließt sich nach den Überlegungen zur Objektbildung die Objektspeicherung an. Abbildung 4.10 stellt die erarbeiteten Ansätze zur Speicherung von AR-Geodaten in GeoARS dar. Der erste Ansatz geht davon aus, dass die Speicherung der gebildeten AR-Geoobjekte ausschließlich in Dateiform ohne DBMS erfolgt. Hierfür werden auf dem mobilen Gerät jedoch Schreibrechte benötigt, die ggf. nicht durch die Administration zulässig sind. Im zweiten Ansatz erfolgt die Objektspeicherung in einer Datenbank ohne Erweiterung für geometrische Objekte und Funktionen. Die administrativen vorbereitenden Arbeiten und eventuell entstehende zusätzliche Kosten für das DBMS sowie die erforderlichen Systemzugriffsrechte sind bei diesem Ansatz gegenüber dem ersten für eine GeoARS-Konzeption zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind für die jeweilige spezifische Konzeption einige Einschränkungen von Dateien (erster Ansatz) gegenüber Datenbanksystemen (zweiter Ansatz) zu beachten: Änderungen im Datenmodell oder in der physischen Speicherung der Daten führen zu Änderungen der Anwendungsprogramme; lediglich eingeschränkter Mehrbenutzerbetrieb; Überprüfungen auf Datenintegrität ist nur durch Programmierung auf Anwendungsseite zu gewährleisten; fehlende Mechanismen zu Anfrageformulierung,- bearbeitung und

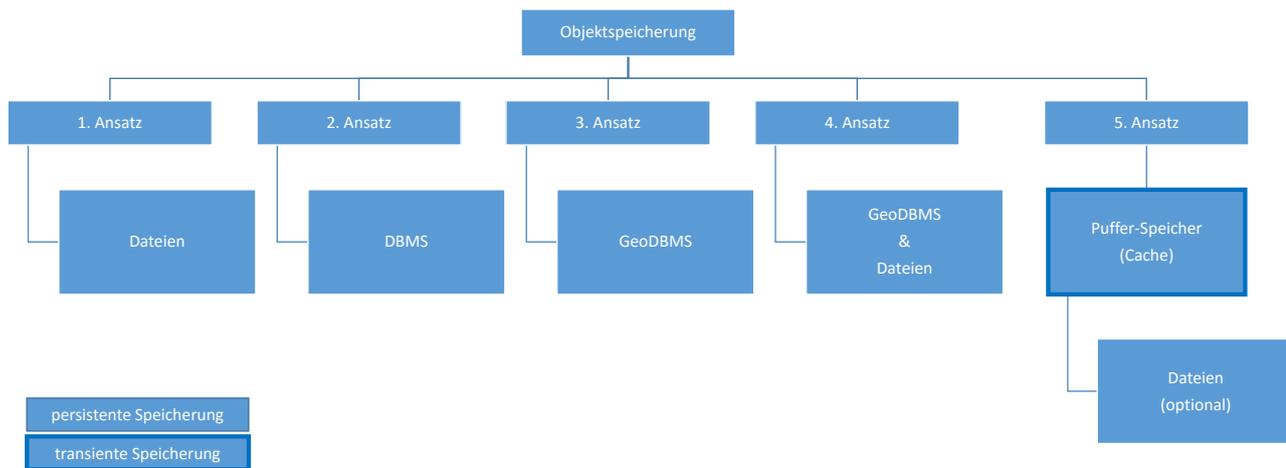


Abbildung 4.10: Ansätze zur Objektspeicherung in GeoARS

-optimierung; eingeschränkte administrative Zugriffskontrolle nur auf Betriebssystemebene, nicht z.B. auf Objektebene, vgl. [Brinkhoff 2013]. Der dritte Ansatz erweitert den zweiten Ansatz um ein DBMS mit einer Erweiterung für räumliche Objekte und Funktionen. Ein solches Datenbanksystem wird nachfolgend als GeoDBMS bezeichnet. Dabei erhält das GeoARS zusätzlich komfortable Analysefunktionen und Speicherfunktionen. Der vierte Ansatz bildet eine Mischform aus dem ersten und dritten Ansatz mit dem Hintergrund, dass eine Geo-Datenbank verwendet wird, jedoch die Speicherung der Objekte optional auch in Dateien erfolgt. Allen bisherigen Ansätzen ist gemein, dass sie die Objekte persistent speichern. Der letzte Ansatz eröffnet eine transiente Speicherung, z.B. bei Nutzung online herunterladbarer Daten Dritter, im Rahmen der Objektbildung für den Zeitraum der Programmnutzung. Nach Beendigung der AR-Applikation sind die Objekte nicht mehr existent. Hierbei besteht der Vorteil, dass außer zur Programmnutzung selbst, keine administrativen Systemrechte benötigt werden. Diese Voraussetzung ist für den Einsatz in datenschutzrelevanten Einsatzbereichen (z.B. Behörden) regelmäßig Grundvoraussetzung für die Verwendung von mobilen Applikationen. Zudem dürfen einige Daten Dritter aus lizenzrechtlichen Gründen nicht persistent gespeichert werden, z.B. WebAtlasDE light [BKG 2016d]. Um bestimmte Objekte über die Programmnutzung hinaus zu erhalten oder für einen Datenaustausch mit anderen Systemen weiter zu verwenden, sieht dieser Ansatz eine optionale persistente Datenspeicherung in Dateiform vor.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass sich die Speicherart der Objekte an die verwendete Objektbildungsform anlehnt. Wird bei der Objektbildung bereits ein DBMS verwendet, so sollte vorzugsweise auch die Speicherung der Objekte in der Datenbank erfolgen.

Welcher der vorgeschlagenen Ansätze zur Objektspeicherung verfolgt wird, ist spezifisch für das jeweilige GeoARS in der Phase des OOD festzulegen. Für komplexe Aufgabenbereiche, in denen zusätzlich zur Visualisierung die Erfassung von Geodaten eine wesentliche Rolle spielt, wird die Nutzung von Geodatenbanken nach dem dritten und vierten Ansatz empfohlen. Für primäre Visualisierungsaufgaben eines GeoARS ist eine persistente Datenhaltung in Dateien (erster Ansatz) oder eine transiente Speicherung (fünfter Ansatz) wegen des geringeren Einrichtungsaufwandes oder wegen administrativer Systemrestriktionen auf dem mobilen Endgerät (z.B. Smartphone) vorzuziehen.

In den nachfolgenden zwei Realisierungsbeispielen wird für „GeoARS-Unfallaufnahme“ der vierte Ansatz und für „GeoARS-Landentwicklung“ der fünfte Ansatz realisiert.

4.2.7 Realisierungsbeispiel Modellierung von AR-Geoobjekten: „GeoARS-Unfallaufnahme“

Der Ansatz zur **Herangehensweise** der Objektmodellierung des Referenzsystems „GeoARS-Unfallaufnahme“ ist, aufbauend auf den zu erfassenden und damit gegenständlichen Realobjekten, eine objektorientierte Analyse durchzuführen und in einem objektorientierten Datenmodell zu reproduzieren. Die zu erfassenden Realobjekte werden bislang in der Praxis in zweidimensionalen (analogen) Unfallskizzen abgebildet. Somit beinhalten Unfallskizzen die Menge der notwendigen und im Rahmen der OOA zu erfassenden Objekte. Nach Taschenmacher u. Eifinger [2014] dient eine Unfallskizze der Aufklärung eines Verkehrsunfalles in ordnungswidrigkeitenrechtlicher, strafrechtlicher und zivilrechtlicher Hinsicht. Es ist weiterführend der Ansatz, die verfügbaren Materialien und Beispiele anhand einer OOA, u.a. aus [Taschenmacher u. Eifinger 2014], [Gerber 2009], [Scheffler 1994], [Hering 1999] zu erarbeiten und in einer **Unfall- und Signaturenübersicht** zusammenzustellen, die Bestandteil des OOA-Modells wird. Ebenfalls als Bestandteil des OOA-Modells sollen **Anwendungsfälle** erarbeitet werden, vgl. [Balzert 2011]. Im Ergebnis der Analyse wird ein **Objektmodell** mit UML erstellt, in dem die Unfallobjekte aufgeführt und in Beziehung zueinander gesetzt werden.

Für das Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ wurde im Rahmen der OOA ein **Katalog der Unfallobjekte und Signaturen**, eine Reihe **verschiedener Anwendungsfälle** und mehrere **Prototypoberflächen** erstellt. Ein Auszug aus den Unterlagen ist in Abbildung 4.11 und 4.12 exemplarisch dargestellt.

LUNAS-3D: ANWENDUNGSFÄLLE

Standard-Anwendungsfall „Verkehrsunfall-Ersterfassung“

Anwendungsfall 1

- Anwendungsfallname:** Verkehrsunfall-Ersterfassung
- Ziel:** Erfassung eines neuen Verkehrsunfalles am Unfallort
Unfallsituation geometrisch darstellen
(Unfallbergang schildern)
Fotodokumentation unterstützen
Rückschluss auf den Unfallablauf ermöglichen
Unfallgeschehen reproduzierbar machen
- Kategorie:** primär
- Vorbedingung:** Einsatzkräfte sind am Unfallort, eingetroffen. LUNAS-Gerät ist einsatzbereit.
- Nachbedingung -Erfolg-:** Unfallaufnahme auf dem Aufnahmeort abgeschlossen. Alle von diesem Aufnahmeort messbaren Objekte wurden erfasst. Das Außendienstprojekt wurde mit Status „abgeschlossen“ oder „angehalten“ beendet.

Auszug

LUNAS-3D: UNFALLOBJEKTE UND SIGNATUREN

Objekte	modelliert in UML	Kartenausprägung	Zeichenkatalog	Darstellung 3D
Sa. Spuren auf der Fahrbahn: Blockierspur (Zuordnung zum beteiligten Fahrzeug, evtl. farbige)	✓	Linie, Text		✓
Sa. Spuren auf der Fahrbahn: Driftspur (Zuordnung zum beteiligten Fahrzeug, evtl. farbige)	✓	Linie, Text, Schraffur		✓

Auszug

Abbildung 4.11: Auszug Arbeitsergebnisse OOA „GeoARS-Unfallaufnahme“; Auszug Anwendungsfälle (links), Auszug Signaturenübersicht (rechts), vgl. [Kreuziger 2015]

Unter Zuhilfenahme dieser Arbeitsergebnisse wird das objektorientierte Datenmodell erarbeitet, auf das nachfolgend genauer eingegangen wird. Für die Zwecke der Augmented Reality sind hierbei die Fachobjekte um spezifische AR-Eigenschaften zu erweitern. Abbildung 4.13 gibt hierzu zunächst einen einführenden Überblick über die erarbeiteten Objektartengruppen. Jede Objektartengruppe, z.B. die Gruppe Spuren, beinhaltet die zugehörigen Fachobjektarten. Da aus Platzgründen hier nicht alle Fachobjektarten und ihre Klassendiagramme dargestellt werden können, wird die Logik des Datenmodells nachfolgend am konkreten Beispiel der Objektart

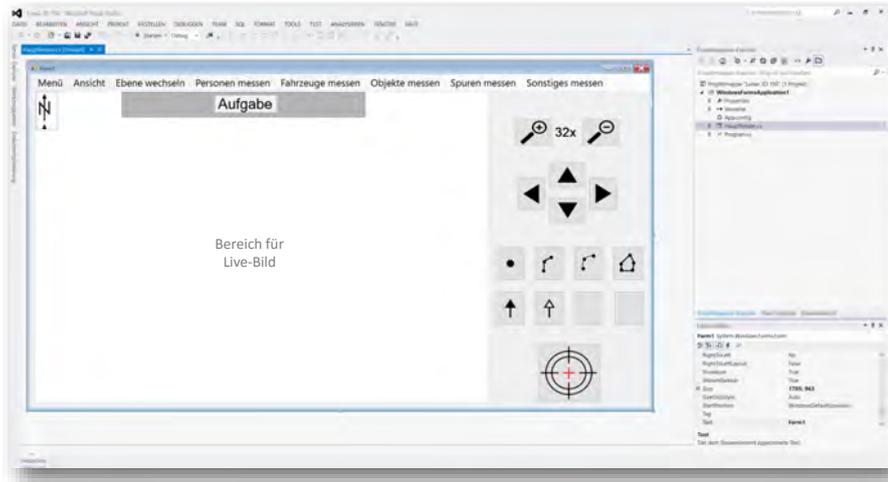


Abbildung 4.12: Auszug Arbeitsergebnisse OOA „GeoARS-Unfallaufnahme“; Auszug Prototyp-Anwendungsoberfläche in der Entwicklungsumgebung MS Visual Studio, vgl. [Kreuziger 2015]

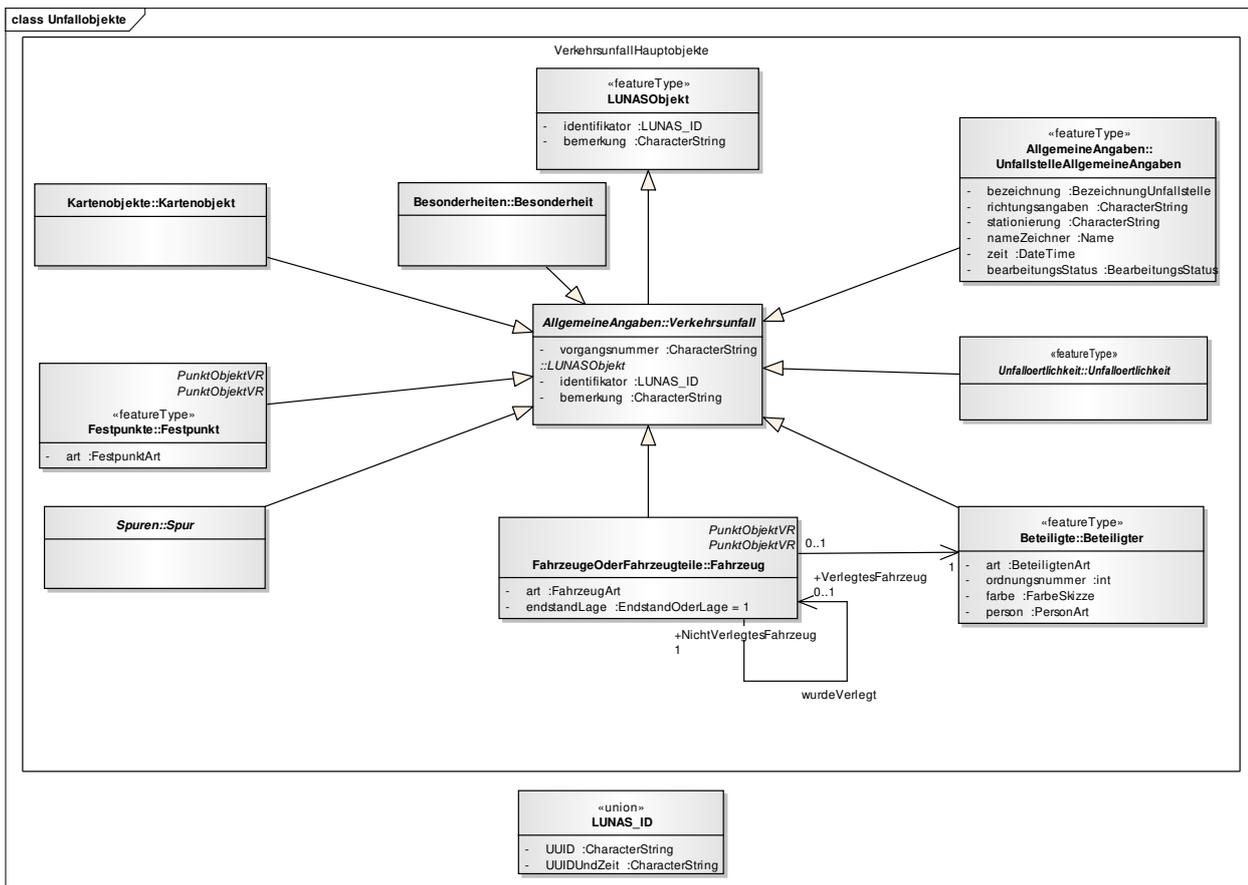


Abbildung 4.13: UML-Klassendiagramm Übersicht über die Objektartengruppen im Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“

„Spur“ erläutert. Aus der Abbildung 4.13 geht hervor, dass die Objektart *Spur* Eigenschaften aus den übergeordneten Objektarten *Verkehrsunfall* und *LUNASObjekt* erbt. Hierdurch erhalten die *Spur*-Objekte einen Identifikator und die Zuordnung zur unfallspezifischen Vorgangsnummer, dem behördlichen Aktenzeichen

des Verkehrsunfalls. Weiterführend ist in der Abbildung 4.14 ersichtlich, dass die Objektart `Spur` selbst eine Generalisierung darstellt, aus der weitere Spezialisierungen hervorgehen, z.B. die Objektart `Fahrbahnspur` oder `Materialspur`. Die einzelnen Objektarten besitzen das Attribut `art`. Über dieses Attribut wird der

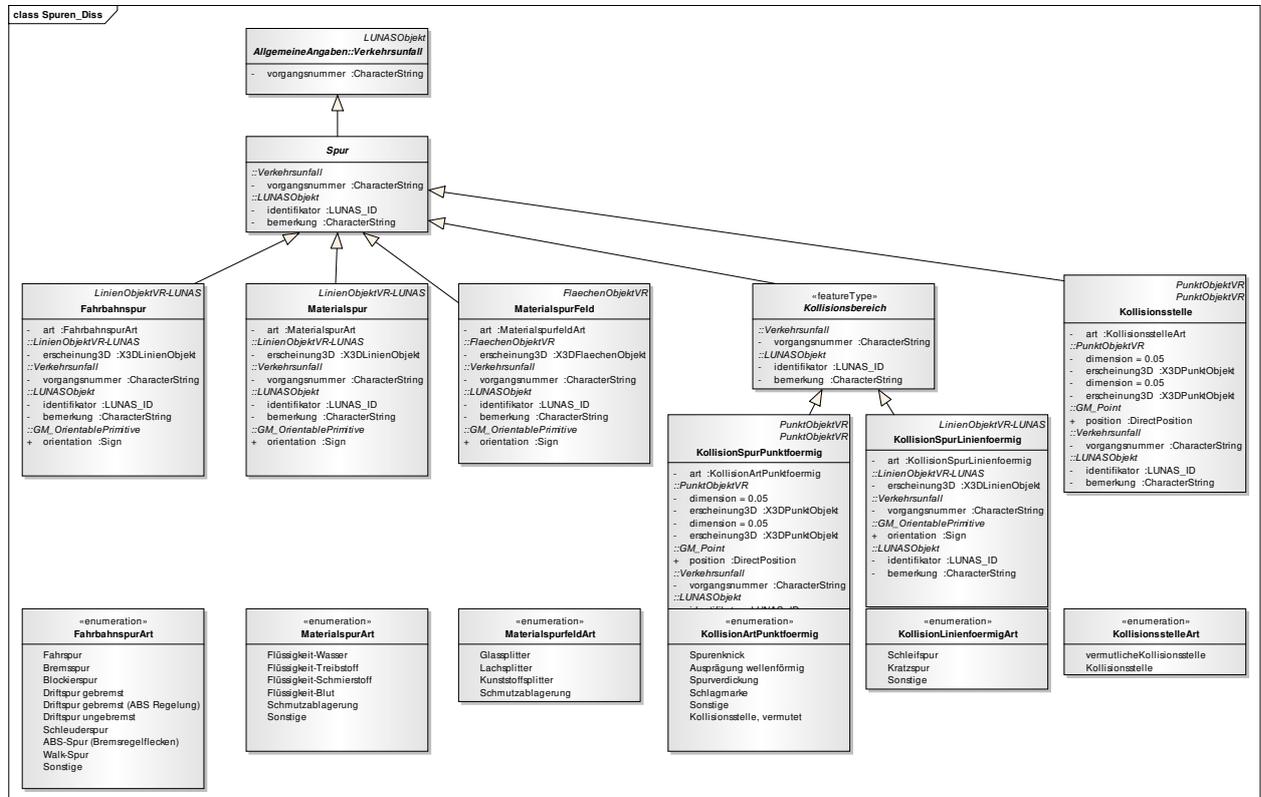


Abbildung 4.14: UML-Klassendiagramm Auszug Datenmodell „GeoARS-Unfallaufnahme“; Klassendiagramm Objektartengruppe „Spuren“

jeweiligen Objektart der Objekt-Typ über eine Enumeration, z.B. `MaterialspurArt`, zugeordnet.

Um die jeweiligen Objekte des Datenmodells für die Zwecke der Augmented Reality nutzen zu können, erhalten die spezialisierten Verkehrsunfallobjekte die notwendigen AR-Eigenschaften über die in Abschnitt 4.1.1 erläuterten Objektarten: `PunktObjektVR`, `LinienObjektVR`, `FlaechenObjektVR`. Im Falle der Spezialisierungsobjektart `Materialspur` ist das die Vererbung der Eigenschaften aus der Objektart `LinienObjektVR`. Für die Objektart `MaterialspurFeld` wird die Objektart `FlaechenObjektVR` eingesetzt. Abbildung 4.14 kann entnommen werden, dass zur Markierung von Kollisionsstellen eines Verkehrsunfalls auch punktförmige Objekte der Objektart `KollisionSpurPunktoermig` verwendet werden und die Objektart `PunktObjektVR` eingesetzt wird.

Zur Ableitung des Objektmodells in eine Datenbankstruktur werden die Klassen des Modells in **Datenbanktabellen des Geodatenbanksystems überführt**. Als DBMS für „GeoARS-Unfallaufnahme“ wird aufgrund des Funktionsumfangs und der Kostenfreiheit PostGIS verwendet. PostGIS ist eine speziell für räumliche Daten konzipierte Erweiterung für die objektrelationale Datenbank PostgreSQL, vgl. [PSC 2016b]. Eine umfassende Übersicht über die aktuellen Geodatenbanksysteme geben Brinkhoff [2013] und Obe u. Hsu [2015].

Hierbei werden für die Objektklassen der oben vorgestellten Modellierung separate Datenbanktabellen angelegt. Für die Geometrie der Objektarten `PunktObjektVR`, `LinienObjektVR` und `FlaechenObjektVR` werden in der jeweiligen Datenbanktabelle **spezielle Geometrie-Spalten** über die DBMS-interne Funktion

AddGeometryColumn() zur Speicherung als Spaltenobjekt erstellt, vgl. [Obe u. Hsu 2015], [Brinkhoff 2013]. Die dreidimensionalen Geometrien der Geodaten werden im Textformat Extended Well-Known Text (EWKT) bzw. im binären Extended Well-Known Binary (EWKB) [PSC 2016c], [Obe u. Hsu 2015] in der Datenbank abgelegt. Hierfür steht der PostGIS-Konstruktor *geometry ST_GeomFromText(text WKT, integer srid)* [PSC 2016d] zur Verfügung.

Für jede mit „GeoARS-Unfallaufnahme“ aufgemessene und visualisierte Geometrie erfolgt eine **Zuweisung zu einem definierten Koordinatensystem**. Die oben genannten Koordinatensysteme (r-System, l-System) werden in einer eigenen Datenbanktabelle (*SC_CompoundCRS*) geführt. Diese Tabelle wird entsprechend der Modellierung der Koordinatensystem-Objektklasse aus Abbildung 4.2 (S. 50) erstellt. Die Realisierung erfolgte in Anlehnung an die Tabelle *ST_SPATIAL_REFERENCE_SYSTEMS* aus ISO 13249 – 3 SQL/MM Spatial Schema, vgl. auch [Brinkhoff 2013].

Eine Besonderheit der „GeoARS-Unfallaufnahme“-Realisierung ist die Aufnahme und **Speicherung eines Fotos zu jedem aufgemessenen Punkt**. Bei „GeoARS-Unfallaufnahme“ handelt es sich um ein System zur Erfassung von Einzelpunkten unter Verwendung eines Laserentfernungsmessers mit dem Ziel, auch ein um Abbildungsfehler korrigiertes georeferenziertes Foto zu jedem aufgemessenen Punkt abzuspeichern. Dies erfolgt aus Gründen der Beweissicherung der Verkehrsunfallstelle und für eine mögliche nachträglichen Reproduzierbarkeit oder Nachmessung von Punkten im Bild bzw. Bildverband. Die Fotos werden als Large Objects mit der PostGIS-Funktion *lo_import()* in der Datenbank abgelegt, vgl. [PGDG 2016]. Hierbei gilt es zwischen dem Live-Bild der Kamera und einem statisch im Moment der Punktaufnahme erzeugten statischen Bild der Kamera, hier als Foto bezeichnet, zu unterscheiden. Das Foto ist bei „GeoARS-Unfallaufnahme“ deutlich hochauflösender und damit auch speicherintensiver als das Live-Bild. Es muss im realisierten Referenzbeispiel zunächst per Wireless Local Area Network (WLAN)-Verbindung von der Aufnahmeeinheit auf dem Stativ zum Mobilgerät transferiert werden, vgl. rechter Teil der Abbildung 6.1 (S. 85). Der Transfer kann hierbei mehrere Sekunden in Anspruch nehmen.

Nach der objektstrukturierten Abspeicherung der Geoobjekte erfolgt mit einer SELECT-Anweisung, z. B. „SELECT identifikator,zeitstempel,dimension,erscheinung3d,ST_AsText(geom),art FROM Fahrbahnspur“, die **Bildung der virtuellen Objekte aus der Datenbank** heraus. Über den Programmcode der Applikation erfolgt anschließend die Aufbereitung der Daten und Realisierung der virtuellen Geometriedaten, u.a. die Zusammenführung der Daten aus der Geometrie-Spalte mit den Daten der Spalte *erscheinung3d*. Hierbei werden die Koordinatentripel der Geometrie in den X3D-Knoten des virtuellen Objektes eingefügt, für das *LinienObjektVR* und *FlaechenObjektVR* zusätzlich ein Koordinatenindex erstellt und in das Objekt eingefügt. Diese **Realisierung** der AR-Geodaten wird in Abschnitt 5.7 gesondert beschrieben.

Die Kommunikation zwischen der Hauptanwendung und der Datenhaltungskomponente wird bei „GeoARS-Unfallaufnahme“ über den Datenbankprovider Npgsql⁶ realisiert. Der Datenprovider ist die Softwarekomponente, die den Inhalt der Geodatenbank oder eines GIS-Dateiformates in standardisierter Form erschließt, vgl. [Andrae u. a. 2013].

⁶<http://www.npgsql.org/>

4.2.8 Realisierungsbeispiel Modellerweiterung um AR-Geoobjekte: „GeoARS-Landentwicklung“

Für das Referenzsystem „GeoARS-Landentwicklung“ beschränkt sich die OOA lediglich auf die Konzeption von **Prototypoberflächen**, da die Beschreibung und Dokumentation des Landentwicklungsfachinformationssystems (LEFIS) bereits ein Datenmodell, Anwendungsfälle, Funktionsbeschreibungen sowie verschiedene Kataloge und Schnittstellenbeschreibungen umfasst, vgl. [Bäcker u. a. 2014]. Hierbei hat die Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Landentwicklung (ArgeLandentwicklung) die Beschreibung von LEFIS in etwa 10jähriger Entwicklungsarbeit erstellt, vgl. [ArgeLandentwicklung 2016b]. Für weiterführende Informationen wird diesbezüglich auf Bäcker u. a. [2014] und ArgeLandentwicklung [2016a] verwiesen. Der Ansatz besteht nun darin zu untersuchen, wie das ATKIS®-ALKIS®-AFIS® (AAA)-Modell der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD (AdV) [AdV 2015a] und das daran gekoppelte Fachschema LEFIS für GeoARS weiterverwendet werden kann. Abbildung 4.15 stellt hierbei zunächst den globalen Zusammenhang des LEFIS-Datenmodells dar, vgl. [ArgeLandentwicklung 2014]. Im rechten oberen Teil der Abbildung wird ersichtlich, dass das LEFIS-Fachschema direkt auf das AAA-Anwendungsschema verweist und dieses explizit verwendet.

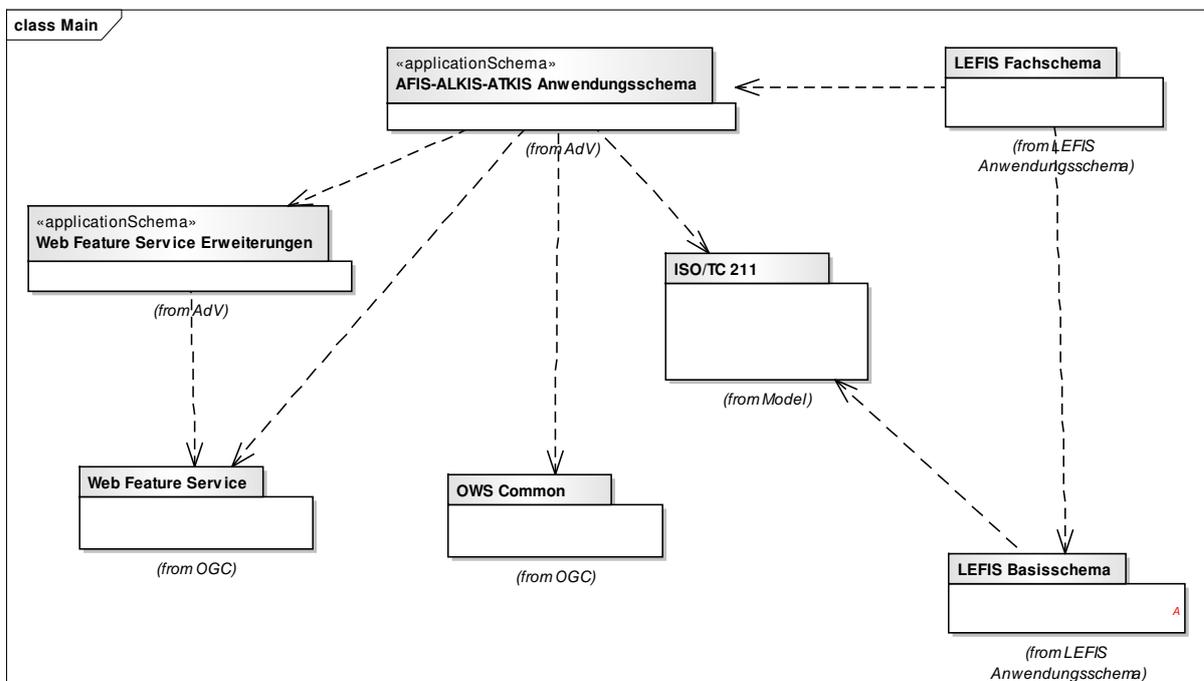


Abbildung 4.15: UML Übersichtsdiagramm zum Datenmodell LEFIS

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf das LEFIS-Datenmodell der Flurbereinigungsverwaltungen, gelten jedoch analog dazu auch für das AAA-Datenmodell der Kataster- und Vermessungsverwaltungen. Um in Analogie zu „GeoARS-Unfallaufnahme“ die jeweiligen Objekte des Datenmodells im Sinne der Augmented Reality nutzen zu können, bedarf es einer Erweiterung des Datenmodells, bei der die LEFIS-Objekte die notwendigen AR-Eigenschaften erhalten. Der allgemeingültige Ansatz aus Kapitel 4.2.1 wird nachfolgend und stellvertretend für alle flächenförmigen Raumbezogenen Elementarobjekte (REO) [AdV 2009], [AdV 2015b] des LEFIS-Datenmodells (und AAA-Modells) anhand der Objektartengruppe „Angaben zum Flurstück LEFIS“ exemplarisch dargestellt. Abbildung 4.16 kann entnommen werden, dass die REO-Objektart `AX_Flurstueck` eine Spezialisierung der Objektarten `AX_FlurstueckKerndaten`,

TS_FeatureComponent, GM_Multisurface und AA_Objekt ist.

Der Quellcode 4.1 stellt ergänzend zur Modellansicht der Abbildung 4.16 ein Objekt der Klasse AX_Flurstueck, realisiert in einem Datensatz einer Datenaustauschdatei der NAS exemplarisch dar. Darin sind verschiedene Sachdaten-Attribute (z.B. *flurstueckskennzeichen*) und aber auch die verebneten Koordinaten zur Darstellung der Objektgeometrie ersichtlich.

```

1 ...
2 <AX_Flurstueck fid="DEBBAL670005zkg">
3 ...
4 <position>
5 <gmlx:Polygon srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG::25833">
6 <gmlx:outerBoundaryIs>
7 <gmlx:LinearRing>
8 <gmlx:coordinates>419621.576,5817927.092 419625.734,5817905.624 419651.47,5817831.906
   419657.989,5817830.856 419640.789,5817932.758 419621.576,5817927.092</gmlx:coordinates>
9 </gmlx:LinearRing>
10 </gmlx:outerBoundaryIs>
11 </gmlx:Polygon>
12 </position>
13 ...
14 <flurstueckskennzeichen>12241901100365_____</flurstueckskennzeichen>
15 <amtlicheFlaeche uom="m2">3495.00</amtlicheFlaeche>
16 ...
17 </AX_Flurstueck>
18 ...

```

Quelltext 4.1: (NAS) Auszug aus einer NAS-Datenaustauschdatei: Geoobjekt AX_Flurstueck in Verbindung mit Abbildung 4.16

Die Objektart AX_Flurstück wird nun durch eine Verbindung zu LinienObjektVR um die AR-spezifischen Eigenschaften erweitert, vgl. Abbildung 4.17. Abbildung kann aus Modellsicht entnommen werden, dass Flurstücksobjekte die Eigenschaften des LinienObjektVR erben und das Attribut erscheinung3D des jeweiligen Flurstücks mit einem X3DLinienObjekt belegt wird (vgl. Abschnitt 4.2.1). Hierbei werden die Koordinatentupel der Geometrie des AX_Flurstueck in den X3D-Knoten des virtuellen Objektes eingefügt und das LinienObjektVR zusätzlich um einen Koordinatenindex ergänzt. Der Koordinatenindex ist hierbei durch die spätere Applikation in Echtzeit zu erzeugen. In „GeoARS-Landentwicklung“ wird das Flurstück für die AR-Ansicht nicht als Fläche visualisiert, sondern der Flurstücksumring als Polygon. In Analogie zur realen Einfriedung eines Flurstückes, z.B. durch einen Zaun, soll das Umringspolygon anschließend in der AR-Ansicht als Grenzlinie visualisiert werden. Eine Überlagerung des Abbildes der Realität (Live-Bild) mit einer flächigen virtuellen Geometrie würde große Bildbereiche abdecken und ist hier nicht gewünscht. Lediglich die linienförmigen Flurstücksgrenzen sind für den Anwender relevant.

Die Datenübernahme erfolgt bei „GeoARS-Unfallaufnahme“ aus Schnittstellen über Web-Feature-Dienste, vgl. Abschnitt 8.4.6.1. Über diese Schnittstelle werden die Daten im r-System (vgl. Abschnitt 3.6.2.3) bereitgestellt und durch die Anwendung nach dem Schema aus Abschnitt 7.13 weiterverarbeitet.

In der später zu realisierenden Anwendung (Applikation) ist eine Dimensionserweiterung der Geometriedaten von 2D auf 3D (vgl. Abschnitt 5.5.1) notwendig, um aus der planaren Geometrie des AX_Flurstueck eine sich an die Topographie der Erdoberfläche anschmiegende Geometrie zu erzeugen.

Der Quelltext 4.2 stellt ein Beispiel dar, bei dem aus einer Folge von Koordinaten (*Koord[]*) und einem Feld der Koordinatenindizes (*Indizes[]*) die Bildung der Liniengeometrie im transienten Speicher-Puffer (*mVertexBuffer*,

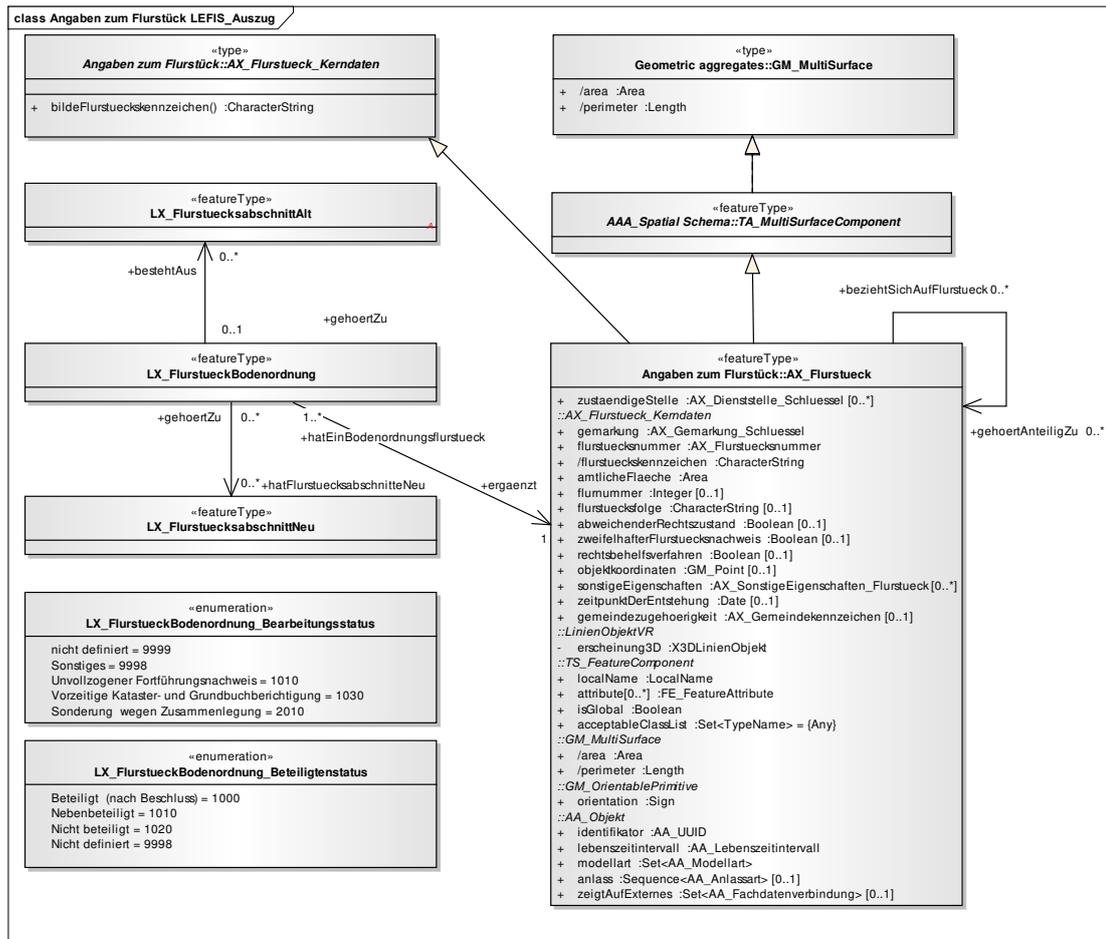


Abbildung 4.16: Auszug aus dem Klassendiagramm Objektartengruppe „Angaben zum Flurstück“ des LEFIS-Datenmodells

mIndexBuffer) zur Laufzeit der Applikation erfolgt (vgl. fünfter Ansatz). Das Feld *Koord[]* wird hierzu z.B. mit den Koordinaten aus dem Attribut *coordinates* (vgl. Quelltext 4.1) gefüllt. Die Darstellungsattribute sind im Quelltext 4.2 nicht mit aufgeführt und werden im nachfolgenden Kapitel 5 (Visualisierung) untersucht und beschrieben.

Implementierungsbeispiel zur Bildung und transienten Speicherung eines linienförmigen AR-Geoobjektes:

```

1 ...
2 class X3DLinienObjekt {
3 ...
4 public X3DLinienObjekt(float Koord[],byte Indizes[]) {
5     vertices = Koord;
6     indices = Indizes;
7     ByteBuffer vbb = ByteBuffer.allocateDirect(vertices.length*4);
8     vbb.order(ByteOrder.nativeOrder());
9     mVertexBuffer = vbb.asFloatBuffer();
10    mVertexBuffer.put(vertices);
11    mVertexBuffer.position(0);
12    mIndexBuffer = ByteBuffer.allocateDirect(indices.length);
13    mIndexBuffer.put(indices);
14    mIndexBuffer.position(0);
15    anzahl_i=indices.length;
  
```

```

16 } // end X3DLinienObjekt ()
17 ...
18 } // end Klasse X3DLinienObjekt
19 ...

```

Quelltext 4.2: (Java) X3DLinienObjekt für OpenGL

Analog zu diesem Beispiel lassen sich auch die oben modellierten punkt- und flächenförmigen Objekte realisieren.

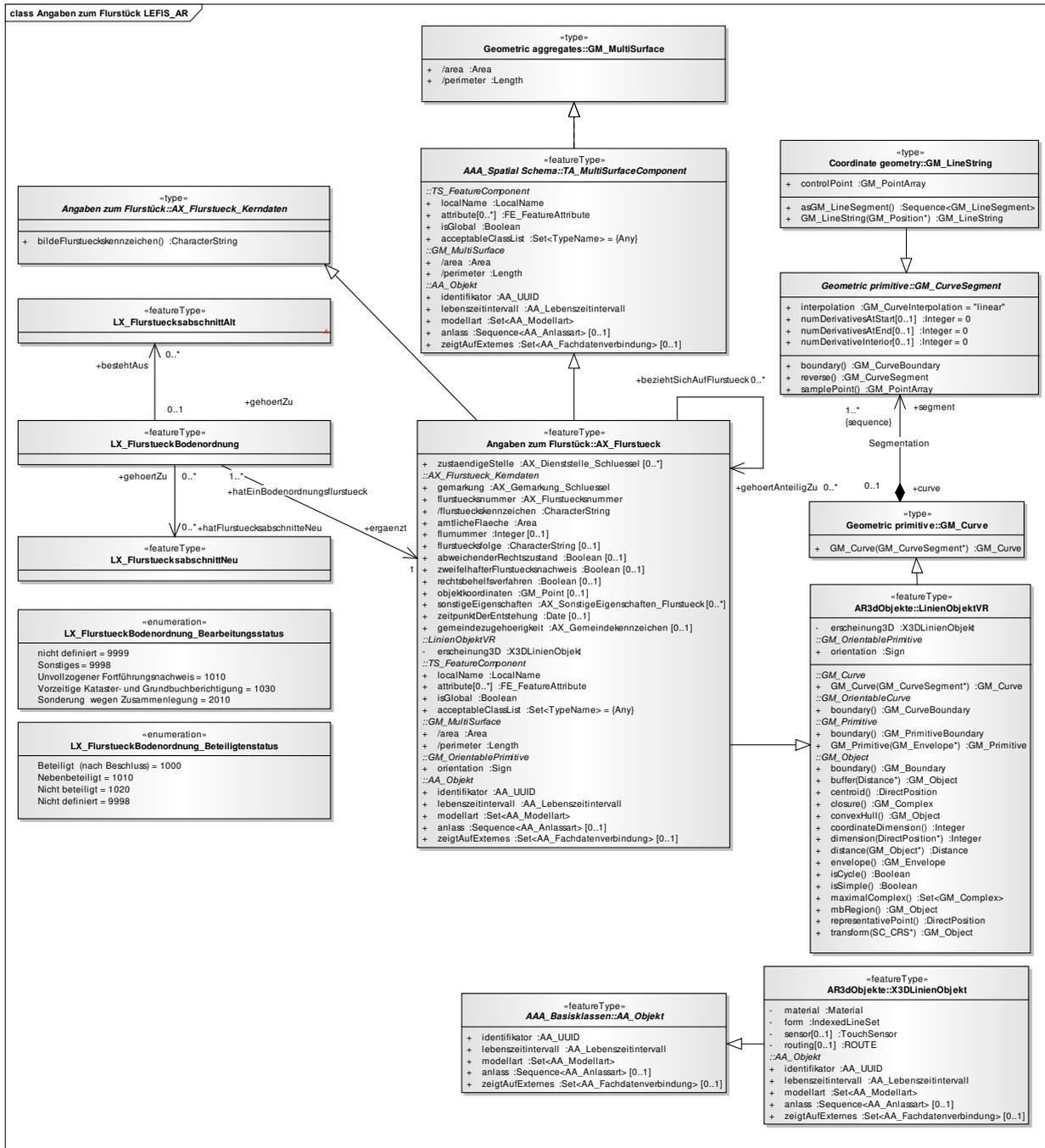


Abbildung 4.17: Auszug aus dem Klassendiagramm Objektartengruppe „Angaben zum Flurstück“ des LEFIS-Datenmodells mit Erweiterung durch AR-Geoobjekte

4.3 Zwischenresümee

In dem vorliegenden Kapitel wurde am Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ gezeigt, wie GeoARS anhand des dreiteiligen objektorientierten Modellierungsprozess (OOA, OOD, OOP) vollständig objektorientiert entwickelt und anhand des Referenzsystems „GeoARS-Landentwicklung“, wie bestehende objektorientierte System-Modelle um AR-Geoobjekte erweitert werden können. Es wurde gezeigt, wie die Objekte aus der Modellierung heraus in GeoARS („GeoARS-Landentwicklung“: transient und „GeoARS-Unfallaufnahme“: GeoDBMS) realisiert werden können. Die erarbeiteten Lösungen zur Modellierung, Bildung und Speicherung von AR-Geoobjekten sind auf andere fachliche Bereiche übertragbar und können als Grundlage für zukünftige weitere GeoARS dienen. Die konkrete Realisierung der AR-Geoobjekte wird im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

5 Visualisierung von AR-Geobjekten

5.1 Ansätze

Im Rahmen dieser Arbeit wird dem Ansatz gefolgt, die Geodaten auf dem Display kostengünstiger mobiler Endgeräte zu visualisieren. Demnach ist zu untersuchen, ob Möglichkeiten durch die eingesetzte Hardware und die verschiedenen Betriebssysteme angeboten werden, um die in Kapitel 4 modellierten AR-Geobjekte in geeigneter Form auf dem Display wiederzugeben.

5.2 Problemstellungen und Herausforderungen

Die Herausforderungen bezüglich der Visualisierung von Geometriedaten lassen sich nach verschiedenen Aspekten differenzieren.

Bei den in GeoARS zu visualisierenden Graphikdaten handelt es sich um Geodaten in Raster- und Vektorform, die entweder in dreidimensionaler Form oder in zwei Dimensionen ohne Höhenangabe vorliegen. Liegen die Geodaten ohne Höhe vor, so sind diese zunächst begrenzt, d.h. in planarer Form, verwendbar. Für AR-Zwecke sind zweidimensionale Vektordaten folglich nur bei absolut ebenen und nicht geneigtem Gelände verwendbar – ein Zustand der in der Realität eher selten zutrifft. Um Geofachdaten, z.B. Flurstücksgeometrien des Liegenschaftskatasters, die regelmäßig ohne Höhenangabe geführt werden für GeoARS nutzen zu können, wird eine Lösung für diese zweidimensionale Problemstellung benötigt.

Augmented Reality im vorliegenden Kontext bedeutet die (sparsame) Erweiterung der Realität durch virtuelle Elemente, d.h. in Bezug auf GeoARS: möglichst wenig Fläche des Abbildes der Realität (Live-Kamerabild) mit Geodaten zu überlagern. Hier gilt es mögliche Erscheinungs- und Visualisierungsformen der Geodaten zu finden.

Weiterhin ist die exakte 3D-Registrierung bereits ein Teilproblem der Visualisierung, da hier die Koordinatensysteme der virtuellen Welt (o-System, v-System, w-System) und der Visualisierungsoberflächen (d-System, p-System, t-System, y-System) in einem Transformationszusammenhang gesetzt werden müssen. Diese Problemstellung wird weiterführend in einem globalen Zusammenhang in Kapitel 7 bearbeitet.

Letztendlich ist die begrenzte Leistungsfähigkeit der mobilen Endgeräte ebenfalls eine relevante Herausforderung, um die Darstellung (das Rendern) der Daten auf dem Display in Echtzeit zu ermöglichen.

5.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Für die Programmierung der Softwarebestandteile zur Visualisierung der Geodaten eines GeoARS ist in dieser Arbeit beabsichtigt, die Erkenntnisse aus dem Bereich der 3D-Computergraphik heranzuziehen und für die Zwecke der Augmented Reality zu nutzen. Dahin gehend spielen die Visualisierungsansätze aus dem Bereich der Virtuellen Realität (engl. Virtual Reality (VR)) eine zentrale Rolle. Nischwitz u. a. [2007] geben eine Übersicht über die Historie der internationalen Normen und Industrie-Standards zur 3D-Computergraphik und Grafik-Programmierschnittstellen (API). Die Recherchen haben ergeben, dass die Betriebssysteme aktueller mobiler Endgeräte nicht alle beliebigen Programmierschnittstellen unterstützen, jedoch grundsätzlich verwendbare 3D-Graphik-Programmierschnittstellen besitzen, z.B. DirectX (vgl. [Microsoft 2016]), Metal (vgl. [Apple Inc. 2016]) und OpenGL (vgl. [Khronos Group 2016a]). Zukünftig wird auch Vulkan eingesetzt werden können [Khronos Group 2016c]. Somit ist ein Anknüpfungspunkt für die nachfolgenden Überlegungen gegeben.

5.4 Gewählter Visualisierungsansatz

5.4.1 Datenprimitive und Visualisierungsform

Für die zu treffenden Festlegungen zur Visualisierungsform von Geodaten in GeoARS wird zunächst ihre **geometrische Dimension** [Bill 2016] näher betrachtet und zusätzlich zwischen **Vektor- und Rasterdaten** unterschieden. Die topologische, thematische und temporale Dimension tritt bei den nachfolgenden Ausführungen in den Hintergrund.

Wie noch gezeigt wird, eignen sich Rasterdaten für eine Texturierung von Geobjekten und für eine übersichtliche kleinmaßstäbige Kartendarstellung aus der exozentrischen AR-Perspektive am Standpunkt des Nutzers (vgl. Abschnitt 8.4.1.2). Vektordaten werden als geeignet angesehen, um Geodaten in ihrer modellierten geometrischen Erscheinungsform maßstabsunabhängig in beliebiger Perspektive zu visualisieren.

Bei der Visualisierung von Vektordaten wird der Ansatz verfolgt, verschieden komplexe Geodaten auf **geometrische Primitive** zurückzuführen, anschließend in geeignete AR-Geometrien zu überführen und bei Bedarf wieder zu komplexen AR-Geometrien zusammenführen.

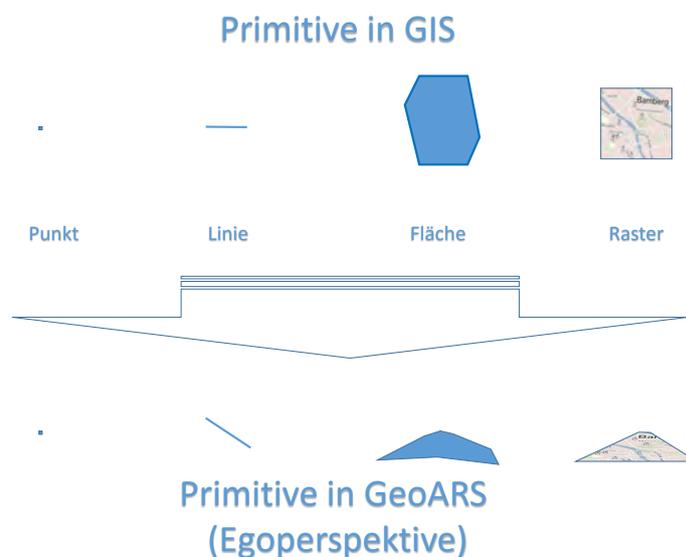


Abbildung 5.1: Ansatz zur Überführung von GIS-Datentypen in AR-Geodatentypen

Es kann festgestellt werden, dass sowohl im GIS-Bereich [Bill 2016] wie auch im Bereich der Computergraphik [Nischwitz u. a. 2007] ähnliche geometrische Primitive existieren. Als Beispiel für geometrische Primitive gelten im GIS-Bereich [Bill 2016] die bereits in Kapitel 4 modellierten, punkt-, linien- und flächenförmigen Geometrien. Die Computergraphik verwendet darüber hinaus noch verschiedenartige Polygone, Dreiecke, Vierecke sowie aus Drei- und Vierecken zusammengesetzte Graphik-Primitive, vgl. [Shreiner u. Chronos 2009], [Nischwitz u. a. 2007]. Darüber hinaus bestehen in beiden Bereichen Möglichkeiten der Rasterdatendarstellung. Abbildung 5.1 zeigt im oberen Teil der Abbildung geometrische Primitive aus dem GIS-Bereich und eine Geometriedatendarstellung als Raster (hier: Topographische Karte des WebAtlasDE.light, vgl. [BKG 2016d]). Der untere Teil der Abbildung bringt zum Ausdruck, dass der **Visualisierungsansatz** darin besteht, die vier aufgeführten Daten-Typen in GeoARS zur Präsentation der Geodaten zu verwenden. Hierzu sind die zwei-

mensionalen Typen (obere Teil der Abbildung) in dreidimensional darstellbare Geometrietypen umzuformen (untere Teil der Abbildung) und später in beliebiger Perspektive als virtuelle Graphikdaten zu visualisieren.

5.4.2 Extensible 3D (X3D)

Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, eignet sich der ISO-Standard ISO/IEC 19775-1.2:2008 Extensible 3D (X3D) zur Modellierung von AR-Geobjekten. Darüber hinaus sind seit der Verabschiedung des Standards diverse Softwareapplikationen (engl. X3D viewer) entstanden, die X3D-Objekte auf Displays darstellen können, vgl. [Brutzman 2016]. Diesen Viewern ist es möglich, über die Beschreibungssprache X3D formulierte dreidimensionale Grafikobjekte und Szenen in Echtzeit in einer virtuellen Welt darzustellen. Es kann mit X3D definiert werden wie dreidimensionale Objekte in Erscheinung treten, wie sie angeordnet werden und wie sie miteinander kommunizieren. Die Steuerung zeitlicher Abläufe in der virtuellen Welt ist möglich sowie Animation und Interaktion. Somit steht ein umfassendes Werkzeug zur Visualisierung der virtuellen Elemente zur Verfügung. Darüber hinaus bietet X3D die Möglichkeit über eine standardisierte Schnittstelle (ISO/IEC 19775-2.2:2010), dem Scene Access Interface, umfassend in die virtuelle Welt einzugreifen und sie in Echtzeit zu verändern. Eine Erweiterung dieser X3D-Viewer um die Einbettung des Live-Kamerabildes erscheint realisierbar. Die X3D-Viewer könnten dann auch als X3D-AR-Viewer angewendet werden. Abbildung 5.2 stellt den Entwurf der Softwarearchitektur eines GeoARS unter Verwendung von X3D dar.

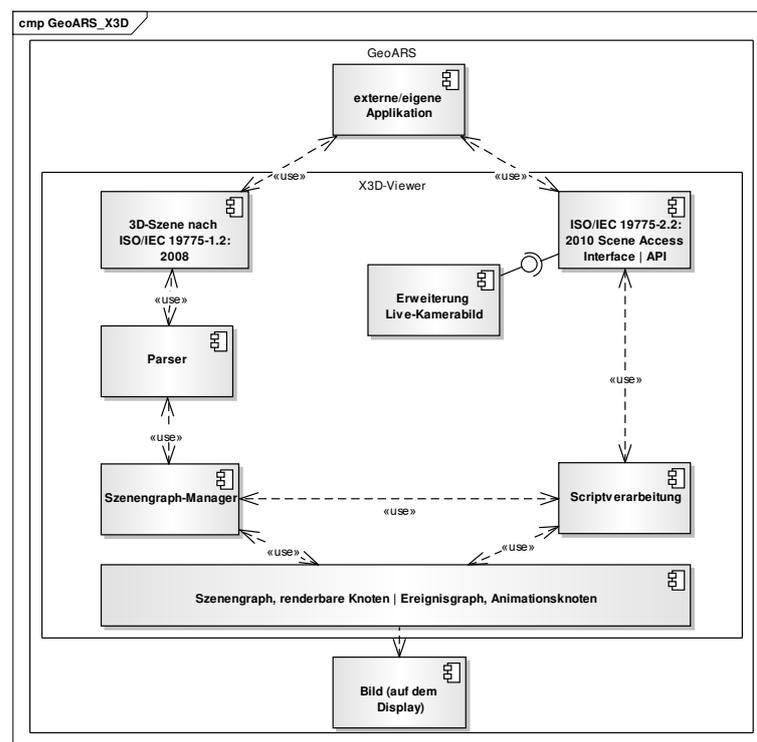


Abbildung 5.2: Übertragbarer Visualisierungsansatz von AR-Geodaten in GeoARS mit X3D

X3D verwendet als Koordinatensystem ein kartesisches dreidimensionales Rechtssystem. Darüberhinaus kann mit X3D eine komplexe 3D-Szene aus Grundbausteinen, den sogenannten Knoten (engl.: Nodes) zusammengesetzt und die gesamte Struktur der Szene in einer Baumstruktur abgebildet werden, dem Szenegraphen. Da

Knoten wiederum Knoten beinhalten können, wird jeder X3D-Baustein so zu einem Knoten in einer baumartigen Struktur. Durch die Verschachtelung von Knoten entstehen immer neue Gruppenknoten und Kindknoten. Jeder Gruppenknoten enthält dabei eine Liste mit Kindknoten, die zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Zur Beschreibung der Eigenschaften von Knoten und zur Speicherung von Daten verwendet man Felder (engl.: fields). Neben den Knoten können X3D-Szenengraphen auch sogenannte Routen enthalten. Hierbei besitzen, zusätzlich zu den vorgenannten Feldern, viele Knoten die Fähigkeit, verschiedene Ereignisse zu empfangen oder zu senden, wodurch auch die Kommunikation zwischen zwei bestimmten Knoten möglich wird. Dabei werden die vom ersten Knoten erzeugten Ereignisse dem zweiten Knoten zugeleitet. Diese Verbindung wird als Route bezeichnet. Für die ausführliche Beschreibung aller Knoten und Knotenarten sei an dieser Stelle auf Brutzman u. Daly [2007] verwiesen.

X3D bietet ein entscheidendes Alleinstellungsmerkmal: die ISO-Spezifikation formuliert auch, dass X3D-Daten als XML-Dateien gespeichert werden können. Dies ermöglicht per Definition standardisierte Datenaustausche und lässt die Kombinationen mit anderen Austauschformaten, wie NAS, als Kombination von AR-Grafik und Semantik zu. Bezüglich des spezifischen Aufbaus der X3D-Dateien wird weiterführend auf [Kloss 2010] verwiesen.

Bei der Realisierung von X3D-Viewern wird wiederum auf 3D-Graphik-Programmierschnittstellen zurückgegriffen - z.B. OpenGL, vgl. [Kloss 2010]. Die Beschreibungssprache X3D kann somit als eine übergeordnete Abstraktionsebene zu den 3D-Graphik-Programmierschnittstellen gesehen werden.

5.4.3 Open Graphics Library (OpenGL)

Eine Abstraktionsebene unterhalb der Beschreibungssprache X3D kann OpenGL eingeordnet werden. Wie eingangs benannt, ist für GeoARS in erster Linie entscheidend, dass die unterschiedlichen Betriebssysteme handelsüblicher mobiler Endgeräte überhaupt 3D-Graphik-Programmierschnittstellen besitzen, um AR-Geodaten in anwendungsspezifischer Ausprägung visualisieren und später auch manipulieren zu können. Ein derart nutzbares Programmiersystem für grafische Computeranwendungen stellt OpenGL dar, vgl. [Shreiner u. a. 2013]. Das Suffix GL steht hierbei für Graphics Library. OpenGL ist derzeit das 3D-Grafik-API mit der größten Marktdurchdringung [Khronos Group 2016a], [Nischwitz u. a. 2007] und ist aktuell auf allen gängigen Betriebssystem vertreten, vgl. [Khronos Group 2016b]. Abbildung 5.3 skizziert die entworfene Softwarearchitektur eines GeoARS unter Verwendung von OpenGL. Auch OpenGL verwendet als Koordinatensystem ein dreidimensionales kartesisches Rechtssystem, vgl. [Nischwitz u. a. 2007]. Komplexe 3D-Szene können aus geometrischen Primitiven [Shreiner u. a. 2013] zusammengesetzt werden. Die gesamte Struktur der Szene kann jedoch nicht wie bei X3D in einer Baumstruktur abgebildet werden. Ebenfalls existiert zunächst keine Ereignis-Verarbeitung zwischen den graphischen Objekten in OpenGL. Hier muss bei Bedarf eine Ereignisprogrammierung und die gewünschte Reaktion der Graphikobjekte individuell vorgenommen werden, z.B. durch Matrix-Operationen (Rotation, Translationen) über den Geometrie-Prozessor auf die graphischen Einzelobjekte.

5.5 Nutzung von GIS-Daten

In Abschnitt 5.4.1 wurde festgestellt, dass in GeoARS sowohl Vektordaten als auch Rasterdaten verwendet werden können. In Abschnitt 5.4.2 und 5.4.3 wurden technische Ansätze erarbeitet, wie die Daten anschließend auf dem Display dargestellt werden. Die vorliegende Arbeit zielt insbesondere auf die Verwendung von

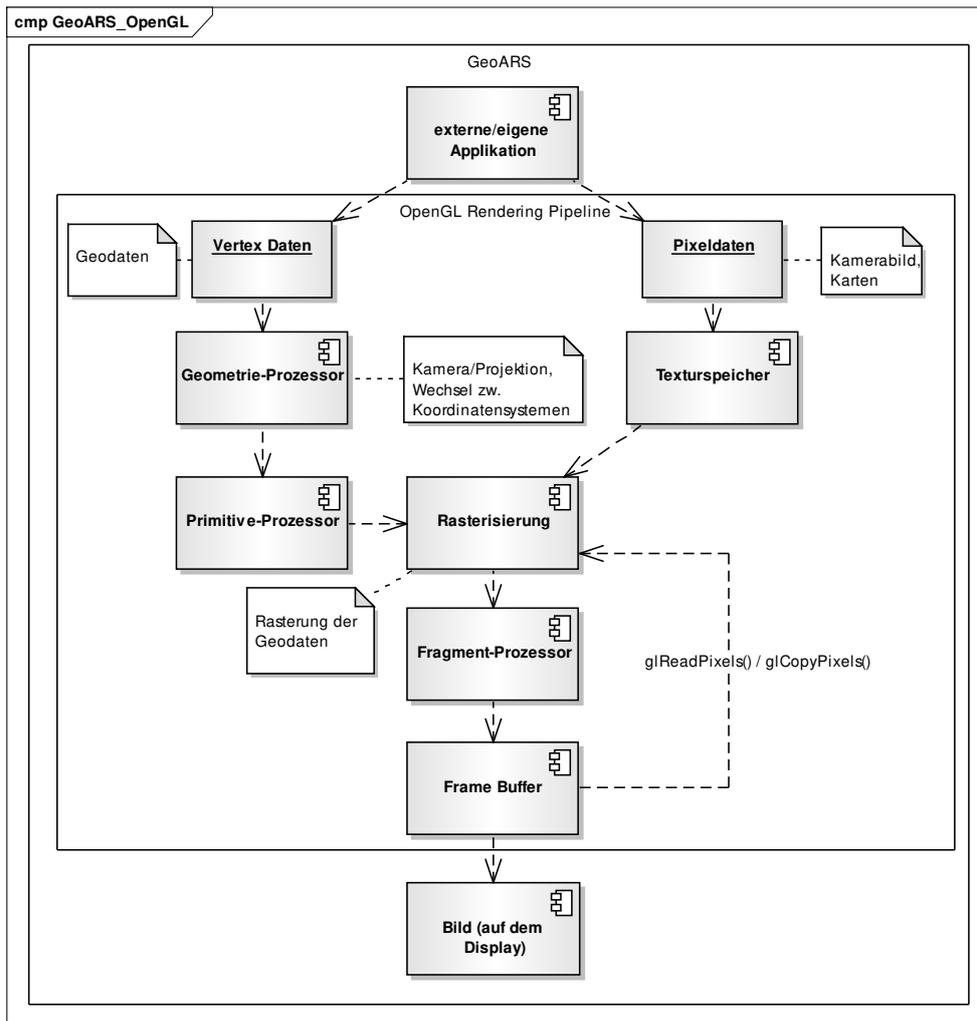


Abbildung 5.3: Übertragbarer Visualisierungsansatz von Geodaten in GeoARS mit OpenGL

Geodaten ab, die regelmäßig in GIS und dabei häufig lediglich in planarer geometrischer Dimension, d.h. zweidimensional ohne Höhenangaben, vorliegen.

5.5.1 Dimensionserweiterung von vektoriiellen 2D-Geodaten

Für GeoARS ist eine planare Visualisierung der Daten grundsätzlich möglich. Nachfolgend wird jedoch eine Möglichkeit erarbeitet, wie 2D-Geodaten über die planare Visualisierung hinausgehend - an die örtliche Geländetopographie angepasst - präsentiert werden können, um letztendlich eine verbesserte 3D-Registrierung zu erzielen. Hierzu wird eine Methode erarbeitet, wie zweidimensionale vektorielle Geodaten in dreidimensionale AR-Vektordaten überführt werden können.

Es wird davon ausgegangen, dass die Geodaten zum einen in Vektorform und zum anderen ausschließlich zweidimensional direkt auf dem GeoARS vorliegen (Dateien oder GeoDBMS) oder über Netzwerkfunktionalität auf externe Datenhaltungen bzw. Geodatenbanken zugegriffen werden kann, vgl. Abschnitt 8.4.6.1. Die letztgenannte Möglichkeit bietet den Vorteil, dass die Daten bedarfsgerecht am Standort des Nutzers heruntergeladen und genutzt werden können und keinerlei vorbereitende Maßnahmen durchgeführt werden

müssen. Da bereits erfasste und abgespeicherte Geodaten fachliche Daten eines thematischen Datenbestandes darstellen, wird nachfolgend von **Bestandsdaten** gesprochen.

Die fehlenden Höhenangaben erhalten die Bestandsdaten aus dem DGM, das als Gitter-Datei im American Standard Code for Information Interchange (ASCII)-Format vorliegt. Ein Auszug aus DGM-Datei zeigt der Quelltextauszug 5.1 mit dem Rechts- und Hochwert sowie der Höhe der Gitterpunkte im 1-Meter Raster:

```

1 ...
2 418516.0 5807653.0 39.292
3 418516.0 5807654.0 39.278
4 418516.0 5807655.0 39.261
5 ...
6 418517.0 5807653.0 39.297
7 418517.0 5807654.0 39.284
8 418517.0 5807655.0 39.265
9 ...

```

Quelltext 5.1: (ASCII) Auszug aus DGM-Daten-Datei

Als Bestandsdaten können beispielsweise die Flurstücksgrenzen des Liegenschaftskatasters dienen. Einen Auszug aus der **Beispiel-Bestandsdatendatei** im NAS-Format stellt der nachfolgende Quelltext 5.2 dar:

```

1 ...
2 <AX_Flurstueck fid="DEBBAL670005Zkbg">
3 ...
4 <position>
5 <gmlx:Polygon srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG::25833">
6 <gmlx:outerBoundaryIs>
7 <gmlx:LinearRing>
8 <gmlx:coordinates>419621.576,5817927.092 419625.734,5817905.624 419651.47,5817831.906
   419657.989,5817830.856 419640.789,5817932.758 419621.576,5817927.092</gmlx:coordinates>
9 </gmlx:LinearRing>
10 </gmlx:outerBoundaryIs>
11 </gmlx:Polygon>
12 </position>
13 ...
14 <flurstueckskennzeichen>12241901100365_____</flurstueckskennzeichen>
15 <amtlicheFlaeche uom="m2">3495.00</amtlicheFlaeche>
16 ...
17 </AX_Flurstueck>
18 ...

```

Quelltext 5.2: (NAS) Auszug aus einer ALKIS-Bestandsdatendatei im Datenaustauschformat NAS

Im Attribut coordinates tragen die Flurstücksgometrien die Koordinaten ihres Umringspolygons. Das Polygon wird in Vorbereitung der durchzuführenden Linienschnitt-Berechnungen durch das GeoARS zunächst in **einzelne Linien** zerlegt, vgl. Quelltext 5.3:

```

1 ...
2 419621.576,5817927.092 419625.734,5817905.624
3 419625.734,5817905.624 419651.47 ,5817831.906
4 419651.47 ,5817831.906 419657.989,5817830.856
5 419657.989,5817830.856 419640.789,5817932.758
6 419640.789,5817932.758 419621.576,5817927.092
7 ...

```

Quelltext 5.3: (ASCII) Extrahierte einzelne Linien des Polygons aus Quelltext 5.2

Jede einzelne Linie wird dann **mit den DGM-Gitter-Linien verschnitten**. Dabei entstehen die zwischen dem Anfangs- und Endpunkt jeder Linie (z.B. rot hervorgehobene Linie in Abbildung 5.4) liegenden Schnittpunkte mit dem DGM-Gitter - nachfolgend als **Stützpunkte** bezeichnet. Die **Berechnung der Höhenwerte**

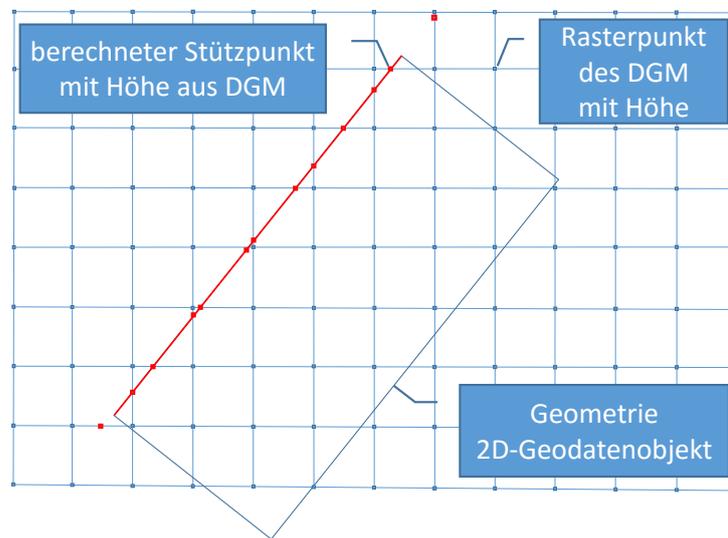


Abbildung 5.4: Verschneidung von 2D-Geodaten mit einem DGM

jedes einzelnen Stützpunktes erfolgt durch Interpolation zwischen den am Linienschnitt beteiligten DGM-Rasterpunkten.

Abschließend werden die dreidimensionalen AR-Geometrieobjekte aus den mit der Höhe versehenen Anfangs- und Endpunkten und den dazwischenliegenden dreidimensionalen Stützpunkten erzeugt. Je nach Gitterweite des DGM erhöht sich die Anzahl der Polygonpunkte des so gebildeten Geometrieobjektes beträchtlich.

Abbildung 5.5 zeigt die resultierenden virtuellen Daten einiger linienförmiger AR-Geoobjekte (hier: Flurstückobjekte). In der Abbildung werden die Geometrien in einer 3D-Egoperspektive dargestellt, wobei im rechten Teil der Abbildung das zugrundeliegende DGM zusätzlich mit visualisiert wird.

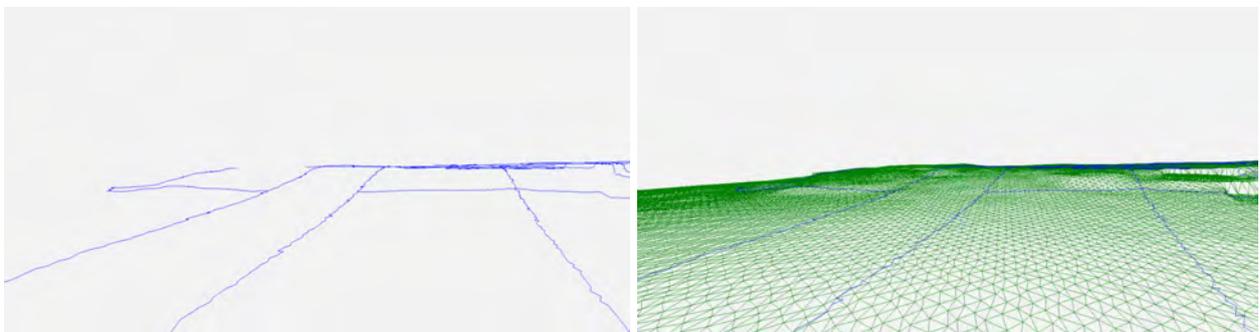


Abbildung 5.5: visualisierte Bestandsdaten (Flurstücksgometrien) nach Dimensionserweiterung von 2D auf 3D in 3D-Egoperspektive; links ohne Darstellung des DGM; rechts mit Darstellung des DGM

5.5.2 Verwendung von Karten und Rasterdaten in GeoARS

Die mit GIS erzeugten oder in GIS vorliegenden Rasterdaten können im Rahmen von GeoARS ebenfalls verwendet werden. Hierbei werden die Daten in einer besonderen Form der Draufsicht betrachtet und können insbesondere zur globalen Orientierung in einem GeoARS nutzbringend verwendet werden.

Wie im rechten Teil der Abbildung 5.1 zu den Daten-Primitiven veranschaulicht, werden Rasterdaten im Bereich der Augmented Reality zur Texturierung von Geländeoberflächen insbesondere in der Datenansicht aus der exozentrischen Perspektive verwendet. Auf den Aspekt der exozentrischen Perspektive als AR-Interaktionstechnik wird in Abschnitt 8.4.1.2 gesondert eingegangen.

Darüber hinaus kann es zur Orientierung im Gelände mittels GeoARS hilfreich sein, wenn die Rasterdaten zusätzlich mit (thematisch beliebigen) Vektordaten (Bestandsdaten) überlagert werden. Abbildung 5.6 gibt einen Eindruck über diese Form der Datenansicht. Der Vorteil dieser Datenansicht für den Anwender besteht in der so möglichen globalen Orientierung in seinem Umfeld. Abbildung 5.6 zeigt im linken Teil die Verwendung einer digitalen topographischen Karte im Maßstab 1 : 10.000 (DTK10 ATKIS, vgl. [LGB 2016]) und im rechten Teil die topographische Karte des WebAtlasDE.light für Maßstäbe kleiner 1 : 15.000, vgl. [BKG 2016d]). Die AR-Ansicht kann interaktiv durch Drehen/Schwenken des GeoARS erkundet oder durch zusätzliche Vektordaten ergänzt und überlagert werden.

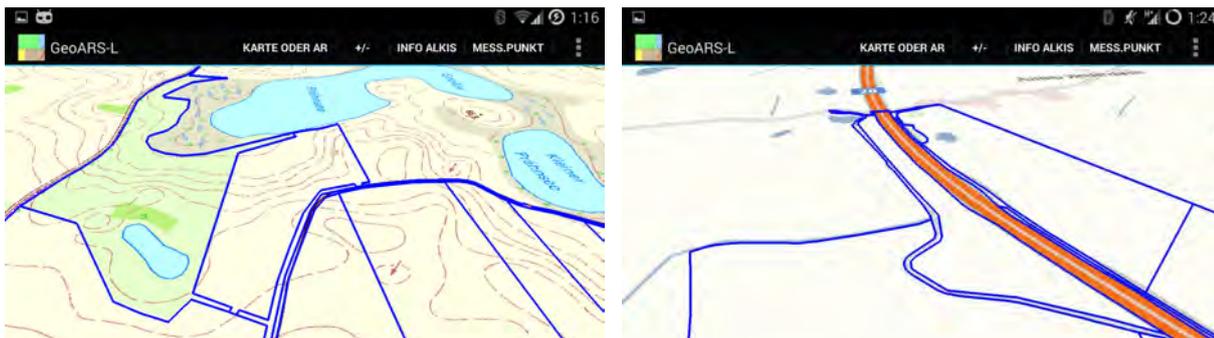


Abbildung 5.6: Verwendung von Karten (GIS-Ausgabeprodukte) überlagert mit 2D-Geofachdaten (Vektordaten blau eingefärbt) in exozentrischer AR-Perspektive; links: Kartengrundlage DTK10 [LGB 2016], rechts: Kartengrundlage WebAtlasDE.light [BKG 2016d]

5.6 Realisierungsbeispiel Visualisierung AR-Objekte: „GeoARS-Landentwicklung“

In Abschnitt 4.2.8 wurde die Bildung und Speicherung von AR-Geoobjekten erläutert. Der Quelltext 4.2 wurde als Beispiel angeführt, bei dem aus einer Folge von Koordinaten (*Koord []*) und einem Feld der Koordinatenindizes (*Indizes[]*) die Bildung von Liniengeometrien sowie eine transiente Abspeicherung (*mVertexBuffer*, *mIndexBuffer*) erfolgt. Im nachstehenden Quelltext 5.4 wird zur Visualisierung der AR-Geoobjekte die Funktion *draw()* hinzugefügt, über die Liniengeometrien (*GL_LINE_STRIP*) auf dem Display gezeichnet werden:

```

1 ...
2 class X3DLinienObjekt {
3 ...
4 public X3DLinienObjekt(float Koord[], byte Indizes[]) {
5     vertices = Koord;

```

```

6  indices = Indizes;
7  ByteBuffer vbb = ByteBuffer.allocateDirect(vertices.length*4);
8  vbb.order(ByteOrder.nativeOrder());
9  mVertexBuffer = vbb.asFloatBuffer();
10 mVertexBuffer.put(vertices);
11 mVertexBuffer.position(0);
12 mIndexBuffer = ByteBuffer.allocateDirect(indices.length);
13 mIndexBuffer.put(indices);
14 mIndexBuffer.position(0);
15  anzahl_i=indices.length;
16 }// end X3DLinienObjekt ()
17 ...
18 public void draw(GL10 gl) {
19     gl.glVertexPointer(3, GL10.GL_FLOAT, 0, mVertexBuffer);
20     gl.glDrawElements(GL10.GL_LINE_STRIP, anzahl_i, GL10.GL_UNSIGNED_BYTE,mIndexBuffer);
21 }//end draw()
22 ...
23 }// end Klasse X3DLinienObjekt
24 ...

```

Quelltext 5.4: (Java) X3DLinienObjekt für OpenGL (Fortführung von Quelltext 4.2)

Das Ergebnis der Visualisierung wird in der Abbildung 5.7 (S. 79) dargestellt. Abbildung demonstriert die Betrachtung der Geometrien in der Augmented Reality Ansicht in Egoperspektive. Auf der linken Seite der Abbildung 5.7 werden die Geometrien originär planar dargestellt, da die Polygonpunkte (noch) keine Geländehöhe besitzen. In der Realität weist die Straße ein Längsgefälle auf, wobei die visualisierten Bestandsdaten im linken Teil der Abbildung dem abfallenden Gelände nicht folgen, sondern stets in einer exakt horizontalen Ebene verlaufen. Daraus resultiert, dass Geodaten und Realität durch den Nutzer als nicht zueinander passend wahrgenommen werden. Im rechten Teil der Abbildung 5.7 wurde die Dimensionserweiterung der Bestandsdaten durch Verschneidung mit dem DGM vorgenommen. Die Geodaten passen sich nun dem örtlichen Verlauf der Topographie der Erdoberfläche an. Der in Abschnitt 5.4 erarbeitete und in Abbildung 5.3 (S. 75)

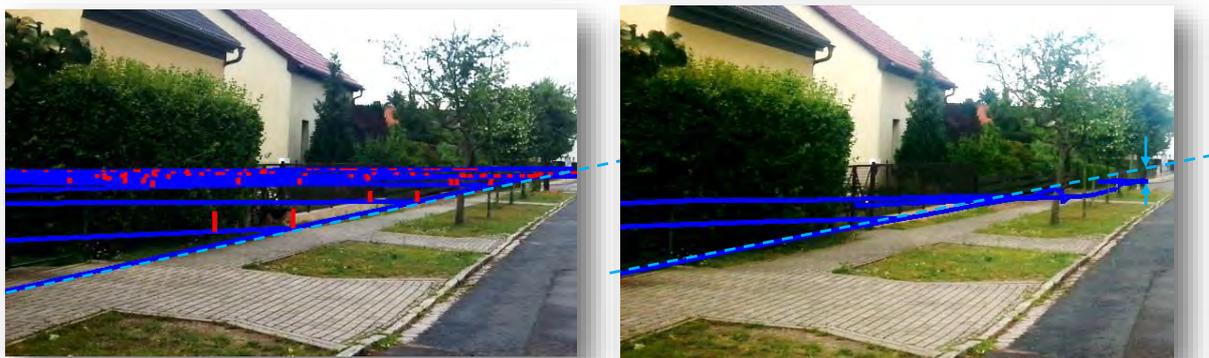


Abbildung 5.7: visualisierte Bestandsdaten (Flurstücksgeometrien) vor (links) und nach (rechts) Dimensionserweiterung von 2D auf 3D in 3D-Egoperspektive

dargestellte übertragbare Visualisierungsansatz von Geodaten in GeoARS mit OpenGL wurde realisiert.

5.7 Realisierungsbeispiel Visualisierung AR-Geobjekte: „GeoARS-Unfallaufnahme“

Für das Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ ist für jede der modellierten Objektarten (vgl. Abschnitt 4.2.7) festgelegt, in welcher Form ihre Visualisierung erfolgt. Die Realisierung der Geodatenvisualisierung wird bei „GeoARS-Unfallaufnahme“ über die Beschreibungssprache X3D gelöst. Dabei werden bei Bedarf einerseits bestehende Bestandsdaten (z.B. Geometrieobjekte aus Mutterskizzen [Taschenmacher u. Eifinger 2014]) und andererseits neu aufgemessene Verkehrsunfallobjekte visualisiert.

Die Unfallobjekte werden durch Einzelpunktmessungen dreidimensional erfasst. Unter Verwendung der Objektart `PunktObjektVR` wird der aufgemessene Punkt persistent in der Datenbank abgespeichert und als `X3DPunktObjekt` in einem X3D-fähigen Viewer angezeigt. Quelltext 5.5 zeigt die X3D-Beschreibung eines visualisierbaren **Punktobjektes**, realisiert als kugelförmiges Graphikobjekt (Sphere).

Implementierungsbeispiel:

```

1 ...
2 <Group DEF="ID255">
3   <Transform DEF="ID255t1" translation="418516.10 39.10 -5807652.32" rotation="1 0 0 1.571">
4     <Transform DEF="ID255t2" translation="0 0 0" rotation="1 0 0 1.571">
5       <Shape>
6         <Appearance>
7           <Material diffuseColor="1 1 0" specularColor=" 0.5 0.5 0.5" transparency="0.0" />
8         </Appearance>
9         <Sphere radius="0.1" />
10        </Shape>
11        <PlaneSensor DEF="ID255s" description="Sonstiges(ID255)" offset="0 0 0" />
12      </Transform>
13    </Transform>
14    <ROUTE fromNode="ID255s" fromField="translation_changed" toNode="ID255t2" toField="translation"
15      />
16  </Group>
17 ...

```

Quelltext 5.5: (X3D) X3DPunktObjekt

Linienförmige Unfallobjekte, z.B. eine Bremsspur, werden ebenfalls über Einzelpunktmessungen (hier als Punktfolge) erfasst, als `LinienObjektVR` in der Datenbank gespeichert und anschließend als Polygon in Form eines `X3DLinienObjekt` auf dem Display visualisiert. Der nachfolgende Quelltext 5.6 zeigt ein X3D-Linienobjekt, bestehend aus zwei Punkten in einem lokalen Koordinatensystem:

Implementierungsbeispiel:

```

1 ...
2 <Group DEF="ID2963">
3   <Shape>
4     <Appearance>
5       <Material emissiveColor="0 1 1" transparency="0.0" />
6     </Appearance>
7     <IndexedLineSet coordIndex=" 0, 1, -1">
8       <Coordinate point=" 4.4 -1.2 -2.4, 4.1 -0.9 -2.9, " />
9     </IndexedLineSet>
10    </Shape>
11    <TouchSensor DEF="ID2963s" description="Materialspur(IID2963), lokales CRS"/>
12  </Group>
13 ...

```

Quelltext 5.6: (X3D) X3DLinienObjekt

Flächenförmige Verkehrsunfallobjekte, wie z.B. Splitterfelder, werden wie Linienobjekte als Folge von räumlichen Einzelpunktmessungen erfasst. Am Ende der so gemessenen dreidimensionalen Punktfolge erfolgt ein Linienschluss zum ersten Punkt. Die so entstandene Fläche wird mit einer Flächenfüllung versehen, die auch Transparenz zulässt. Der nachfolgende Quelltext 5.7 zeigt ein X3D-Flächenobjekt, wobei hier aus Platzgründen lediglich die ersten zwei Punkte aufgeführt werden:

Implementierungsbeispiel:

```

1 ...
2 <Group DEF="ID19">
3   <Shape>
4     <Appearance>
5       <Material diffuseColor="0.0 0.5 0.0" specularColor=".13 .13 .13" transparency="0.0" />
6     </Appearance>
7     <IndexedFaceSet creaseAngle="0.5" solid="false" coordIndex="-1,0,1,2,3,4, [...],-1">
8       <Coordinate point="418516.0 39.292 -5807653.0, 418516.0 39.278 -5807654.0, [...]" />
9     </IndexedFaceSet>
10  </Shape>
11  <TouchSensor DEF="ID19s" description="MaterialspurFeld(ID19)" />
12 </Group>
13 ...

```

Quelltext 5.7: (X3D) X3DFlaechenObjekt

Zur Visualisierung von zweidimensionalen Bestandsdaten kann die oben beschriebene Dimensionserweiterung über ein DGM durchgeführt werden. Der nachstehende Quelltext 5.8 zeigt ein Implementierungsbeispiel eines linienförmigen X3D-Objektes nach der Dimensionserweiterung von 2D auf 3D, wobei wiederum lediglich die ersten Punkte des Polygons aufgeführt sind:

```

1 ...
2 <Group DEF="DEBBAL7100012JvX">
3   <Shape>
4     <Appearance>
5       <Material emissiveColor="0 0 1" transparency="0.0" />
6     </Appearance>
7     <IndexedLineSet coordIndex="-1,0,1,2,3,4, ... ,-1">
8       <Coordinate point="418594.55 32.54 -5807762.75, 418595.87 32.55 -5807762.57, 418595.69 32.65
9         -5807762.30, ..." />
10    </IndexedLineSet>
11  </Shape>
12  <TouchSensor DEF="DEBBAL7100012JiZs" description="AX_Flurstueck(DEBBAL7100012JiZ)" />
13 </Group>
14 ...

```

Quelltext 5.8: (X3D) Bestandsdaten realisiert als X3DLinienObjekt

Der in Abschnitt 5.4 erarbeitete und in Abbildung 5.2 (S. 73) dargestellte übertragbare Visualisierungsansatz von Geodaten in GeoARS mit X3D wurde realisiert. Hierzu wurde ein X3D-Viewer um die Funktionalität zur Darstellung des Live-Bildes einer realen Kamera ergänzt sowie die in Abschnitt 7.10.1 beschriebenen Korrekturmöglichkeit des Live-Bildes der realen Kamera implementiert. Abbildung 5.8 veranschaulicht die Verwendung von punkt-, linien und flächenförmigen Geoobjekten in „GeoARS-Unfallaufnahme“, vgl. [Kreuziger 2015]. Hierbei sind die Objekte mit Berührungssensoren versehen, um bei Berührung eines Objektes über das Display Datenauskunftsfunktionalitäten zu realisieren, z.B. Längenangaben.

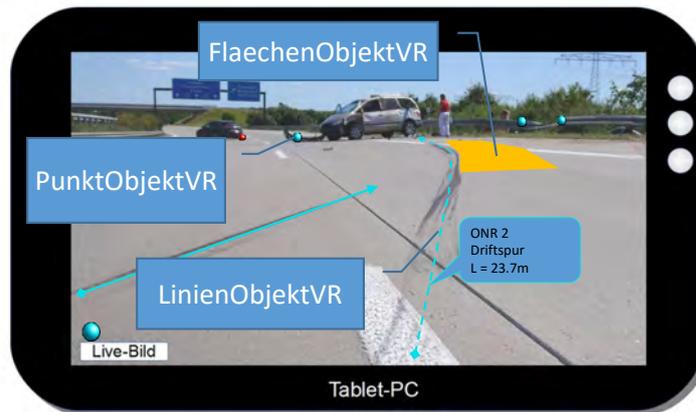


Abbildung 5.8: Visualisierung punkt-, linien- und flächenförmiger Geobjekte in „GeoARS-Unfallaufnahme“, vgl. [Kreuziger 2015]

5.8 Zwischenresümee

In den vorherigen Abschnitten werden übertragbare Lösungen vorgestellt, um verschiedenartige Geodaten in AR-Geobjekte zu überführen und diese anschließend auf dem Display mobiler Endgeräte zu visualisieren. Die Visualisierung erfolgt bei dem realisierten Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ auf Tablet-Basis mit Windowssystem über die Beschreibungssprache X3D durch einen geeigneten 3D-Viewer und bei dem Referenzsystem „GeoARS-Landentwicklung“ auf Android-Smartphone-Basis mit OpenGL, jeweils auf dem Display des Gerätes. Beide Geräteklassen ermöglichen eine performante praxistaugliche Visualisierung von AR-Geobjekten. Sofern die Geodaten nicht dreidimensional vorliegen, können sie über die in Abschnitt 5.5.1 vorgestellte Möglichkeit mit Höhen aus digitalen Geländemodellen versehen werden. Hier wird eine Lösung vorgeschlagen, Geodaten entsprechend der genäherten realen Topographie zu visualisieren und dadurch zu einer verbesserten 3D-Registrierung beizutragen. Die parallele Durchführung aller Rechenprozesse auf den Endgeräten (Berechnungen zur Bestimmung der räumlichen Lage, Registrierung, Rendern) lässt sich in Echtzeit gewährleisten. Lediglich das Kamerabild in der Realisierung „GeoARS-Unfallaufnahme“ ist Verzögerungen im Millisekundenbereich unterworfen, deren Ursache im örtlich getrennten zweigeteilten Hardwareaufbau von stationärer Komponente (mit Kamera) und mobiler Komponente (Tablet-PC) liegen. Das Live-Bild wird hierbei zwischen den Komponenten per Funk übertragen, vgl. Abschnitt 6.4.1.

6 Darstellungskomponente

6.1 Ansatz

AR-Systeme können wie in Tabelle 2.1 (S. 17) und weiterführend in Tabelle 6.1 alle menschlichen Sinne ansprechen und darüber die Realität erweitern. Hiervon sind auch GeoARS grundsätzlich nicht ausgenommen. Visuelle, akustische und haptische Realitätserweiterungen sind mit GeoARS-Komponenten (vgl. Abschnitt 3.6.1) denkbar, wohingegen gustatorische und olfaktorische Darstellungsmöglichkeiten zunächst nicht realisierbar sind. Hinsichtlich GeoARS wird der Schwerpunkt im Folgenden auf die visuelle Darstellung der Geodaten gelegt.

Tabelle 6.1: Übersicht Arten der Darstellung, Erweiterung von Tabelle 2.1

Darstellung	Sinnesorgan	Beispiel	GeoARS
visuell	Augen	Display	●
akustisch	Ohren	Geräusche, Tierstimmen	●
gustatorisch	Zunge	Geschmackssimulation u.a. durch Erinnerungsvermögen	○
olfaktorisch	Nase	Verströmung von Duftstoffen	○
haptisch	Haut	Vibration	●

● $\hat{=}$ prototypische Realisierung geplant | ○ $\hat{=}$ prototypische Realisierung nicht geplant

6.2 Problemstellungen und Herausforderungen

Auf das Display wirken die in Abschnitt 2.5 angeführten Umgebungsfaktoren, wobei drei der dort angeführten Faktoren (Licht, Niederschlag, Temperatur) spürbare Einschränkungen auf die Nutzbarkeit haben, vgl. auch Tabelle 6.2. Wechselnde Lichtverhältnisse, insbesondere direkte Sonneneinstrahlung führen ggf. zur verminderten Lesbarkeit des Displayinhaltes. Niederschlag kann je nach Art und Intensität ebenfalls nutzungseinschränkend wirken. Starker Regen oder Schneefall wirken sich auf die Lesbarkeit aus und behindern Anwendereingaben auf berührungsempfindlichen Displays. Zudem führen Temperaturen außerhalb des gerätespezifischen Arbeitsbereiches (z.B. Thinkpad8: $+5^{\circ}\text{C}$ bis $+35^{\circ}\text{C}$, vgl. Tabelle E.3, S. 242) zu Materialbeeinträchtigungen oder -schäden, z.B. Aussetzen des Displays. Ein großes Display führt dazu, dass ein größerer Ausschnitt der realen und virtuellen Welt betrachtet werden kann, wenn die Geoobjekte in realer Größe dargestellt werden sollen. Für mobile GeoARS sind regelmäßig kleinere Displays üblich. Die Darstellbarkeit und Erkennbarkeit kleiner Objektdetails ist möglicherweise bei kleinen Displays aufgrund der Beschränkung der physikalischen Auflösung des menschlichen Sehapparates und des Auflösungsvermögens des Displays nicht mehr ausreichend.

6.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die in aktuell handelsüblichen Smartphone-Endgeräten verbauten Displays nutzen überwiegend Flüssigkristallanzeigen (Liquid Crystal Display (LCD)). Hierbei wird bei handelsüblichen Geräten das I-Plane Switching - Liquid Crystal Display (IPS-LCD) Verfahren (ca. 75%) oder die Organic Light-Emitting Diode (OLED) Displaytechnologie (ca. 25%) eingesetzt, vgl. [Arena Com 2016].

Tabelle 6.2: Einflussfaktoren auf handgehaltene Displays

Einflussfaktor	Auswirkung
Licht	verminderte Lesbarkeit des Displayinhaltes bei starker Sonneneinstrahlung
Luftfeuchtigkeit/Niederschlag	verminderte Lesbarkeit des Displayinhaltes
Temperatur	Störung/Schäden der Anzeige
Größe	Handhabbarkeit versus Lesbarkeit
Auflösungsvermögen	Lesbarkeit von Inhalten, Erkennbarkeit/Darstellbarkeit von Objekten

Handelsübliche Tablet-Endgeräte sind ebenfalls überwiegend mit IPS-LCD-Displays (ca. 60%) ausgestattet. Auch Displays mit dem thin-film transistor (TFT) Verfahren werden häufig (17%) verbaut, während OLED-Displays derzeit mit etwa 4% kaum Anwendung finden, vgl. [PhoneMore 2016]. Somit stellt IPS den aktuell meist genutzten Displaytyp dar.

Nach Meier [2013] wird bei der IPS-LCD-Technologie eine geringe Blickwinkelabhängigkeit des Displays erreicht. Das begünstigt insbesondere eine Mehrbenutzerfähigkeit für GeoARS positiv, sodass mehrere Nutzer gleichzeitig den dargestellten Inhalt betrachten können. IPS-Displays sind unempfindlich gegen Berührungen, sodass Verschmierungseffekte der Anzeige bei Druckausübung auf das Display kaum auftreten. Sie zeichnen sich zudem durch eine geringe Reaktionszeit aus. OLED-Displays sind dünner als IPS-Displays [Litfin 2004], [Hester u. Harrison 2009] und sie haben einen geringeren Energieverbrauch. Nachteilig ist die erhöhte Anfälligkeit für Verunreinigungen und die kürzere Lebensdauer gegenüber den IPS-Displays, vgl. [Meier 2013]. Herrmann [2016] hat festgestellt, dass LCD-Displays bei Sonneneinstrahlung besser ablesbar sind als OLED-Displays.

6.4 Gewählter Ansatz

6.4.1 Gewählter Ansatz: video see-through mit handgehaltenen Displays

Wie in Kapitel 3 im Rahmen der Systemmodellierung beschrieben, besteht der Ansatz für praktische Realisierungen eines GeoARS – aufgrund ihrer massenhaften Verfügbarkeit, den dadurch geringen Anschaffungskosten sowie durch die Möglichkeit der gleichzeitigen Nutzbarkeit mehrerer Anwender – im video see-through Verfahren mit in der Hand gehaltenen Displays (engl. handheld displays, vgl. [Azuma u. a. 2001]); teilweise in der Literatur auch als Monitor basierte AR bezeichnet (engl. Monitor-based AR, vgl. [Azuma 1997], [Milgram u. a. 1994]). Derartige Displays sind mit hohem Verbreitungsgrad in kompakten mobilen Endgeräten, z.B. in Smartphones und Tablets, verfügbar.

Der Ansatz besteht darin, genau diese auf dem Massenmarkt erhältlichen Geräte zu verwenden und Augmented Reality auf Alltagsgeräte anzuwenden und visuelle, haptische sowie akustische Darstellungsformen zu nutzen, vgl. Tabelle 6.1. Bei dem gewählten Verfahren, video see-through mit in der Hand gehaltenen Displays wird die reale Welt als **Video-Bilddatenstrom** gemeinsam mit den Objekten der virtuellen Welt durch eine Bildfusion zusammengeführt. Hierbei werden zwei zentralperspektivische Projektionen in zwei-dimensionale Abbildungen überführt und auf einer einzigen Displayebene überlagert, vgl. Abbildung 6.1. Die reale Kamera nimmt die reale Welt in einem kameraspezifischen Sichtfeld (engl. field of view) auf und

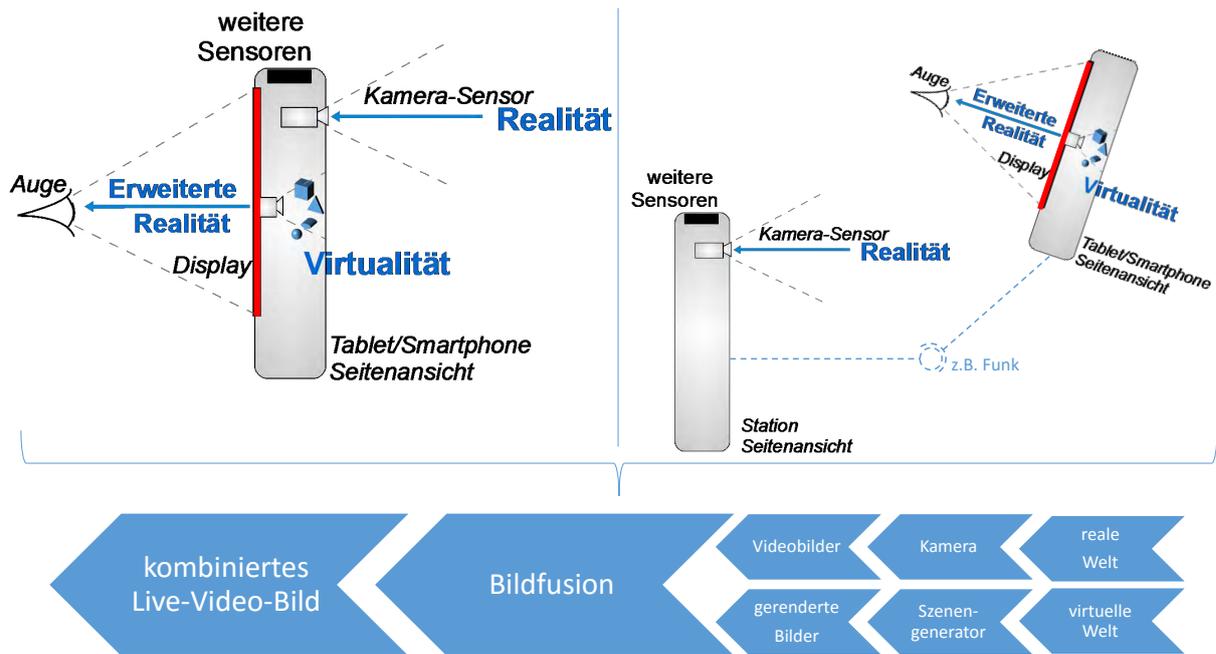


Abbildung 6.1: Video see-through Verfahren; links: mobil-pedestrisches GeoARS, rechts: stationäres GeoARS

realisiert einen Videobild-Datenstrom, nachfolgend als **Live-Bild** bezeichnet. Die virtuelle Kamera nimmt die durch den Szenengenerator erzeugte virtuelle Welt ebenfalls in einem spezifischen virtuellen Sichtfeld auf und erzeugt einen Strom gerendeter Bilder. Aufgabe der Bildfusion ist somit die beiden auf unterschiedliche Weise erzeugten zweidimensionalen Abbildungen passgenau zu verschmelzen und auf dem Display unverzerrt wiederzugeben.

Das Display bildet bei diesem Ansatz eine Art „**Fenster in die Welt**“. Hierbei wird sich an die Begriffe „window“ [Azuma u. a. 2001] und „Window on the World“ [Bimber u. Raskar 2005], [Feiner u. a. 1993] angelehnt. Der Ansatz besteht darin, das in der Hand gehaltene „Fenster in die Welt“ so zu modellieren, dass die Proportionen der Abbildungen der Objekte der realen Welt den Proportionen der Realobjekte entsprechen und keine Verzerrungen (z.B. Affinitäten) auftreten. Hier werden zwei Möglichkeiten der Realisierung gesehen: zentralperspektivische Projektion entsprechend des Öffnungswinkels der realen Kamera oder zentralperspektivische Projektion entsprechend des Sehfeldes der menschlichen Augen.

Für eine Bildfusion werden in GeoARS die in Abbildung 6.2 dargestellten Komponenten herangezogen. Hierbei wird das Bild der realen Kamera (Kamerabild) auf eine interne Visualisierungsfläche ($\text{Visualisierungsfläche-R}$) gelegt. Die virtuelle Kamera nimmt die durch den Szenengenerator erzeugte virtuelle Welt ebenfalls in einem spezifischen virtuellen Sichtfeld auf und erzeugt einen Strom gerendeter Bilder (Render), die ebenfalls an eine Visualisierungsfläche ($\text{Visualisierungsfläche-V}$) übergeben werden, wobei die nicht von virtuellen Objekten belegten Abschnitte der $\text{Visualisierungsfläche-V}$ transparent geschaltet werden. Anschließend wird die $\text{Visualisierungsfläche-V}$ über die $\text{Visualisierungsfläche-R}$ gelegt und auf dem Display oder einem Displaybereich fusioniert dargestellt. Die beiden Kamerabilder, beide Visualisierungsflächen und der Displaybereich beziehungsweise das Display sind hierbei vorzugsweise mit identischen Seitenverhältnissen beziehungsweise Pixeldimensionen einzurichten, um geometrische Überlagerungsfehler und verzerrte Darstellungen der Objekte zu vermeiden.

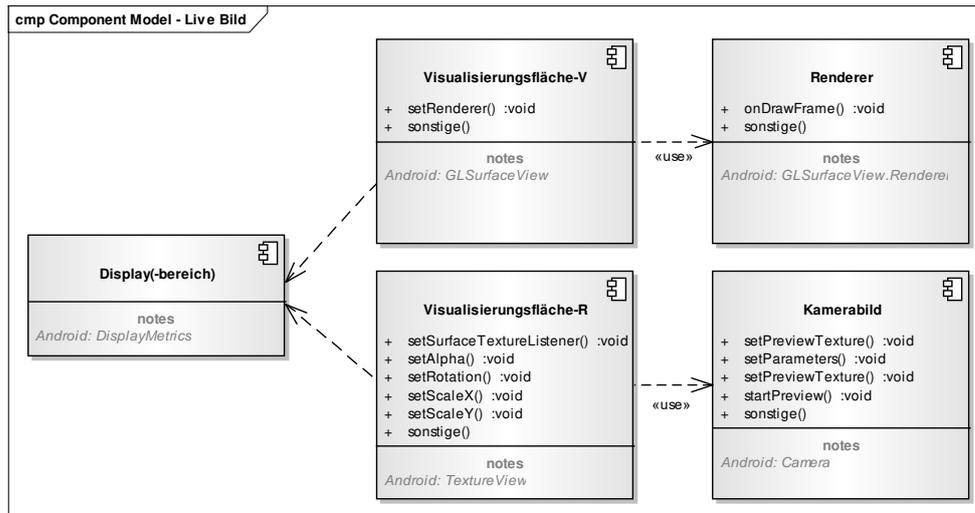


Abbildung 6.2: Komponenten der Bildfusion

Der gewählte Ansatz berücksichtigt die vorgenannte Forderung im Umgang mit **unterschiedlichen Auflösungen** von realer Kamera und Display sowie **unterschiedlichen Seitenverhältnissen** von Kamerabild und Display.

Grundsätzlich ist anzustreben, dass die Seitenverhältnisse von Kamerabild und Display übereinstimmend gewählt werden. Sofern Anwendungen nicht gänzlich im Vollbildmodus erstellt und ausgeführt werden, wird die nutzbare Displayfläche zusätzlich durch Menüleisten reduziert und das Live-Bild dadurch gestaucht, vgl. Abbildung 6.3.

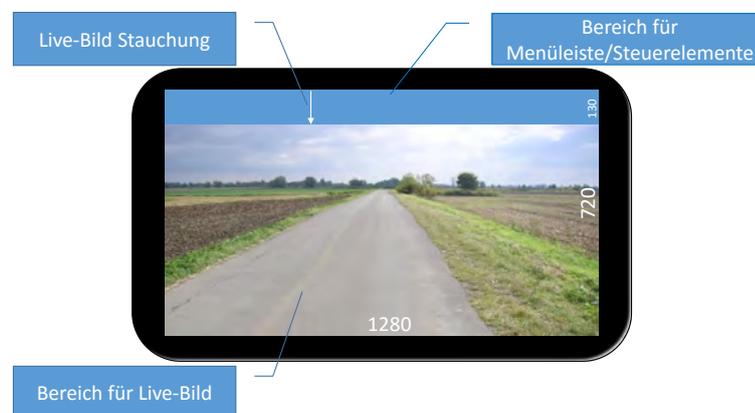


Abbildung 6.3: video see-through Verfahren mobil-pedestrisches GeoARS auf Smartphonebasis, Größenangaben in Pixel

Stimmen die Seitenverhältnisse von Kamerabild und Display nicht überein oder findet die Stauchung einer Bildseite statt, so müssen die nachfolgend beschriebenen Methoden eingesetzt werden. Ihre Bedeutung darf nicht unterschätzt werden, da nur auf diese Weise eine korrekte 3D-Registrierung durch das GeoARS erfolgt.

Zur Lösung werden nachfolgend zwei Herangehensweisen erarbeitet. Bei der ersten Herangehensweise erfolgt eine Anpassung des Live-Bildes an den zur Verfügung stehenden Displaybereich unter Inkaufnahme eines deformierten Seitenverhältnisses und Anpassung der Parameter des Frustums der virtuellen Kamera entsprechend des veränderten Seitenverhältnisses. Hierbei kann die in Abschnitt 6.4.1 beschriebene „Fenster in

die Welt“-Methode nicht mehr realisiert werden, da eine Deformation des Abbildes von Realobjekten erfolgt. Die andere Herangehensweise besteht in der Anpassung des dargestellten Live-Bildes entsprechend der originären Seitenverhältnisse des Kamerabildes.

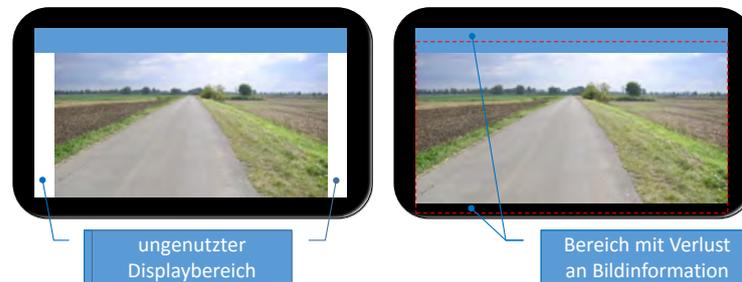


Abbildung 6.4: Varianten der Anpassung des dargestellten Live-Bildes entsprechend der originären Seitenverhältnisse des Kamerabildes

Für GeoARS ist die letzte Variante zu bevorzugen, da sie die Realobjekte im korrekten Seitenverhältnis wiedergibt und somit der „Fenster in die Welt“-Methode nicht entgegensteht.

In Abbildung 6.3 und 6.4 befindet sich jeweils am oberen Rand des Displays ein Element (z.B. Steuerelement, Menüleiste, Statusleiste), das die Displayfläche zusätzlich reduziert. Der Skalierungsfaktor der Reduktion f_r bezogen auf die vertikale Displayauflösung A_v mit der vertikalen Ausdehnung der Steuerelemente b_v auf dem Display berechnet sich zu:

$$f_r = \frac{A_v - b_v}{A_v} . \quad (6.1)$$

Der Skalierungsfaktor kann nunmehr entweder auf die horizontale Bilddimension angewendet oder reziprok mit $1/f_r$ auf die vertikale Bilddimension angewendet werden, vgl. Abbildung 6.4.

Die erste Variante führt zu einer Verkleinerung des Bildbereiches auf dem Display (vgl. Abbildung 6.4, links), die zweite Variante zu einem Informationsverlust der Bilddaten an den Bildrändern (vgl. Abbildung 6.4, rechts).

Für GeoARS kann dies beispielsweise mit `setScaleY()` (vertikal-symmetrisch) oder `setScaleX()` (horizontal-symmetrisch) eines Objektes der `Visualisierungsfläche-R` erreicht werden, vgl. Abbildung 6.2 und Quellcode 6.1.

```

1 ...
2 private TextureView mTextureView;
3 ...
4 mTextureView.setScaleY(1.0f/f_r)
5 ...

```

Quelltext 6.1: (Java) Skalierung des Live-Bildes mit der Klasse `TextureView` (Android-Betriebssystem)

Für mobil-pedestrische GeoARS ist zur Realisierung von „Fenster in die Welt“-Anwendungen mit einem direkt vor das Gesicht gehaltenen Display das visuelle Sehfeld des GeoARS dem binokularen Deckfeld des menschlichen Sehens anzupassen (vgl. Abbildung 6.5), um realgetreue Objektgrößen abzubilden. Als binokulares Deckfeld wird der Bereich bezeichnet, der mit beiden Augen innerhalb des binokularen Gesichtsfeldes gleichzeitig gesehen wird, ohne dass die Augen bewegt werden, vgl. [Jelkmann u. Sinowatz 1996]. Der Winkel des binokularen Deckfeldes beträgt etwa 120° [Eysel 2001], kann jedoch personenabhängig leicht variieren, vgl. [Ulmer 2004]. Hierzu ist zunächst die Anpassung des Öffnungswinkels α der realen Kamera (später auch der

virtuellen Kamera) vorzunehmen. Als Öffnungswinkel wird das Zweifache des Winkel τ des Zentralstrahles zur optischen Achse (vgl. Idealisierte strahlenoptische Abbildung nach Kraus [2004] bzw. [Luhmann 2010b]) bezeichnet, vgl. Abschnitt 7.10 Abbildung 7.20 (S. 139):

$$\alpha = 2 \cdot \tau. \quad (6.2)$$

Der Öffnungswinkel der realen Kamera α_K wird oft auch mit dem englischen Begriff „field of view“ benannt. Hierbei wird zwischen horizontalen α_{K_h} und vertikalem α_{K_v} Öffnungswinkel unterschieden. Aus dem Verhältnis von α_{K_h} und dem Winkel des binokularen Deckfeldes $\alpha_D = 120^\circ$ wird der Skalierungsvfaktor f_D mit

$$f_D = \frac{\alpha_D}{\alpha_{K_h}}. \quad (6.3)$$

eingeführt und kann auf die Bilddimension angewendet werden. Für GeoARS kann Quelltext 6.1 unter Einbeziehung von f_D erweitert werden:

```

1 ...
2 mTextureView.setScaleY(1.0f/f_r * f_D)
3 mTextureView.setScaleX(1.0f      * f_D)
4 ...

```

Quelltext 6.2: (Java) Skalierung des Live-Bildes mit der Klasse TextureView (Android-Betriebssystem) unter Beachtung des binokularen Deckfeldes

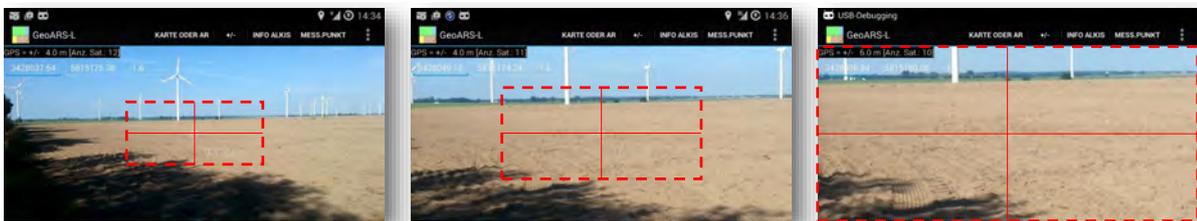


Abbildung 6.5: GeoARS mit Fenster in die Welt: Parameter der realen Kamera (links), des binokularen Deckfeldes der menschlichen Augen (Mitte) sowie des binokularen Gesichtsfeldes der menschlichen Augen (rechts)

Die **mathematische Realisierung der virtuellen Kamera und des Frustums** wird in Abschnitt 7.11 beschrieben sowie weiterführend mit Abschnitt 7.13 die **Zusammenhänge der Koordinatentransformationen** erläutert.

Im Rahmen der Pilotierung hat sich jedoch ergeben, dass der Skalierungsfaktor f_D (bezogen auf das binokulare Deckfeld) eine unzureichende Vergrößerung der Realobjekte bewirkt. Offenbar ist nicht die Zone, die mit beiden Augen gleichzeitig gesehen wird, für die realistische Wahrnehmung im Rahmen der Augmentierung entscheidend, sondern die Gesamtheit des mit beiden unbewegten Augen erfassten Feldes, das binokulare Gesichtsfeld. Für praktische Anwendungen von Fenster in die Welt Realisierungen wird empfohlen den sich ergebenden Skalierungsfaktor des binokularen Gesichtsfeldes f_G mit $\alpha_G = 180^\circ$ [Jelkmann u. Sinowatz 1996] zu verwenden:

$$f_G = \frac{\alpha_G}{\alpha_{K_h}}. \quad (6.4)$$

6.5 Displays

6.5.1 Ermittlung der Leistungsfähigkeit

Im vorliegenden Kapitel werden zum einen Überlegungen zur Leistungsfähigkeit von Displays und zum anderen zu einflussnehmenden Umgebungsfaktoren im Praxiseinsatz angestellt. Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Displays beschränkt sich im Rahmen dieser Arbeit auf die Feststellung zur Nutzbarkeit oder Nichtnutzbarkeit handelsüblicher Geräte des Massenmarktes für GeoARS-Einsatzzwecke.

Maßgeblich für die praktische Nutzbarkeit eines GeoARS ist die Erkennbarkeit realer Objekte auf dem Display des Endgerätes. Tabelle 6.3 stellt eine Übersicht über die einbezogenen Displays dar.

Tabelle 6.3: Übersicht über die einbezogenen Displays

Komponente	Hersteller (Produktbezeichnung)	Auflösung Display (Displaytyp) [Pixel]	Displaydiagonale [cm]	Pixelgröße [μm]
Mobilgerät	Acer (Iconia W700P)	1920 × 1080 (IPS)	29.5	134.1
Mobilgerät	Lenovo (ThinkPad8)	1920 × 1200 (IPS)	21.082	93.1
Mobilgerät	Samsung (GT-I9300)	1.280 × 720 (OLED)	12.19	83.0
Mobilgerät	Samsung (GT-I9250)	1280 × 720 (OLED)	11.81	80.4
Mobilgerät	LG (Nexus 4, E960)	1280 × 768 (IPS)	11.94	80.0
Mobilgerät	LG (Nexus 5)	1920 × 1080 (IPS)	12.57	57.1
Mobilgerät	Sony (Experia ST23)	480 × 320 (TFT)	8.89	154.1
Mobilgerät	Motorola (Moto G)	1280 × 720 (IPS)	12.7	86.5

Entscheidend für GeoARS ist das kleinstmögliche darstellbare bzw. das kleinstmögliche mit dem Auge erkennbare Objekt auf dem Display. Natürlicherweise ist die geometrische Objekt-Erkennbarkeit einerseits von der Objektgröße und andererseits von der Entfernung zum Standpunkt des Nutzers und damit zum Standpunkt der Kamera abhängig.

In den folgenden Ausführungen wird das kleinstmögliche darstellbare Objekt im realen Raum als Punktobjekt und im Darstellungsraum des Displays in Form eines einzelnen Pixels angenommen. Das kleinstmögliche mit dem Auge erkennbare Objekt auf dem Display lässt sich aus den Erkenntnissen aus dem Gebiet der physischen Medizin herleiten. Die Größe L des **kleinstmöglichen erkennbaren Objektes** auf dem Display ergibt sich aus dem Abstand l zweier benachbarter Sehzellen (hier: Zapfen) von ca. $5 \mu\text{m}$ [Kamke u. Walcher 2013], dem Abstand D des Auges zum Display und der Brennweite f des optischen Systems innerhalb menschlichen Auges mit ca. 17 mm [Trautwein u. a. 2014], [Harten 2015]:

$$L = l * \frac{D}{f} \quad (6.5)$$

Handgehaltene Displays, insbesondere kleinere Smartphone-Displays, werden im hier beschreibenden Kontext relativ dicht vor dem Auge geführt, sodass hier ein Abstand von $D = 200 \text{ mm}$ angesetzt wird. Nach Gleichung (6.5) ergibt sich, dass Abbilder von realen (Punkt-)Objekten auf dem Display mit dem bloßen menschlichen Auge erst ab einer Größe von $L = 59 \mu\text{m}$ zu erkennen sind. Dieser Schwellwert gilt als wesentliches Kriterium für die Leistungsfähigkeit eines Displays.

Diesbezüglich kann für ein beliebiges Display die Einhaltung des Kriteriums überprüft werden, in dem die metrische Dimension $p_{[m]}$ eines Pixels auf dem Display mit der Displaybreite $b_{[Pixel]}$ und Displayhöhe $h_{[Pixel]}$ in der Einheit Pixel sowie mit der metrischen Diagonale des Displays $d_{[m]}$ nach:

$$b_{[m]} = \frac{d_{[m]} \cdot b_{[Pixel]}}{\sqrt{b_{[Pixel]}^2 + h_{[Pixel]}^2}} \quad (6.6)$$

und

$$p_{[m]} = \frac{b_{[m]}}{b_{[Pixel]}}. \quad (6.7)$$

berechnet wird. Für das Display des Nexus 5 (vgl. Tabelle 6.3) ergibt sich beispielsweise für die Kantenlänge eines Pixels $p_m \approx 57 \mu m$. Das **geometrische Auflösungsvermögen** der in die Untersuchung einbezogenen Displays liegt zwischen 57 und 154 Mikrometer pro Pixel, vgl. Tabelle 6.3.

Die Erfassung und anschließende Darstellbarkeit eines realen Objektes hängt zudem vom **radiometrischen Auflösungsvermögen** der realen Kamera ab. Nach DIN 18716-3 wird unter radiometrischer Auflösung die Fähigkeit des Bildsensors geringe Strahlungsunterschiede noch messtechnisch erfassen zu können verstanden. Ist das Auflösungsvermögen des Videobildes der Kamera (vgl. Tabelle 6.3 i.V.m. Tabelle 7.16 (S.137)) geringer, als das Auflösungsvermögen des Displays, so kann das Abbild nur auf einer Teilfläche des Displays visualisiert werden (vgl. Thinkpad8) oder es wird vergrößert dargestellt.

Ist die Kameraauflösung höher, so erfolgt eine Herunterskalierung des Bildes zur Darstellung auf dem Display, vgl. z.B. Nexus 4 mit Bildsensor IMX111PQ. Zudem ist eine höhere Kameraauflösung entscheidend, wenn Fenster in die Welt Realisierungen vorgenommen werden sollen. Hierbei erfolgen durch die Anwendung der Skalierungsfaktoren f_D oder f_G digitale Vergrößerungen um etwa Faktor zwei bis drei, vgl. auch Abschnitt 7.10.1.

Zusätzlich zu den geometrischen und radiometrischen Parametern eines GeoARS ist auch die Farbdarstellung von Geoobjekten und Realobjekten für die Darstellung relevant. Gemäß Eysel [2001] umfasst das menschliche Farbsehen etwa zwei Millionen **Farben**. Für Displays wird dieses notwendige Mindestmaß an Farben bereits für Displays ab 24bit Farbtiefe erreicht. Alle Displays der Tabelle 6.3 erfüllen dieses Kriterium.

Ergänzend zu den vorgenannten praxisrelevanten Leistungsparametern sind für einen praktikablen Einsatz die weiteren eingangs in Tabelle 6.2 (84) aufgeführten Einflussfaktoren: Licht, Luftfeuchtigkeit/Niederschlag, Temperatur, Größe, Energiebedarf und Gewicht. In den durchgeführten praktischen Untersuchungen mit den verschiedenen GeoARS-Prototypen kann subsumierend festgestellt werden, dass starkes direkt auf das Display wirkendes Sonnenlicht die Erkennbarkeit sämtlicher Inhalte auf dem Display (in Bezug auf Farbe, Helligkeit und Kontrast) stark einschränkt und damit die Beobachtungen von Meier [2013] und Herrmann [2016] bestätigt.

Zudem wurde festgestellt, dass die Erkennbarkeit von Objekten auf dem Display auch stark von der Farbgebung und Homogenität der örtlichen Umgebung abhängt. Homogene Feldflurstrukturen des ländlichen Raumes im Hintergrund wirken sich hier positiv auf die Erkennbarkeit vordergründiger Objekte aus, während z.B. Waldumgebungen mit heterogenen Flächenstrukturen die Erkennbarkeit realer Objekte des Vordergrundes erschweren. Zudem wurde in Feldversuchen in Wintermonaten mit Temperaturen unter $0^\circ C$ beobachtet, dass die verwendeten Displays verzögert reagieren und die Berührungsempfindlichkeit abnimmt. Wahrnehmbare Verzögerungen bei der Darstellung oder Reaktion auf Berührungen, die die praktische Nutzbarkeit erheblich einschränken, treten bei den verwendeten Geräten aus Tabelle 6.3 jedoch nicht auf. Bei den in die Versuche einbezogenen Gerätetypen mit ihren Displays handelt es sich um nicht wasserdichte Endgeräte, die bei Regen

folglich nicht, stark eingeschränkt oder nur unter Verwendung wasserdichter Hüllen einsetzbar sind. Allerdings ist zu beobachten, dass der Massenmarkt zunehmend auch wasserdichte Geräte mit IP67-Zertifizierung umfasst, vgl. u.a. [Samsung 2015].

6.5.2 Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System

Die Gleichungen (6.5) und (6.7) sind in die Konzeption von GeoARS einzubeziehen. Für die Display-Auswahl des mobilen Endgerätes lassen sich hierzu über die Spezifikationsparameter des Displays nach der Gleichung (6.7) die metrische Dimension p_m eines Pixels auf dem Display berechnen. Sie sollte für praktische Zwecke nach Gleichung (6.5) gleich oder kleiner als $59 \mu m$ (vgl. Gleichung (6.5)) sein, um ein genügend hoch auflösendes Abbild der realen Welt auf dem Display erzeugen zu können, ohne dass die einzelnen Pixel durch das menschliche Auge wahrgenommen werden. Für die jeweilige GeoARS-Applikation ist in Abhängigkeit von der fachlichen Ausrichtung des GeoARS die Displaygröße auszuwählen und bezüglich des vorgenannten Auflösungs-Kriteriums abzuprüfen. Weiterhin ist hinsichtlich der Gesamtkonzeption bereits die geometrische und radiometrische Auflösung und das Seitenverhältnis des Live-Bildes der Kamera zu berücksichtigen. Die Auflösung des Live-Kamerabildes sollte hierbei nicht unterhalb der des Displays liegen, sofern das Live-Bild formatfüllend (Vollbild) auf dem Display dargestellt werden soll. Je nach Nutzungsweise, Dauer und Umgebung sind auch die in Tabelle 6.2 (S. 84) aufgeführten Einflussfaktoren (Umgebungsfaktoren) bei der Systemkonzipierung eines GeoARS zu berücksichtigen.

6.6 Realisierungsbeispiel „GeoARS-Landentwicklung“

Für mobil-pedestrische GeoARS können die in Abschnitt 6.5.2 (Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System) getätigten Aussagen hier übernommen werden, wobei ein besonderes Augenmerk auf Größe und Gewicht des Displays bzw. Gesamtsystems gelegt wird, da sie direkt und andauernd vor dem Gesicht gehalten werden. Aufgrund des geringen Abstandes ist das Auflösungsvermögen des Displays von besonderer Bedeutung und sollte wie in Abschnitt 6.5.2 benannt, Pixelgrößen von $59 \mu m$ nicht unterschreiten. Einige Geräte erzielen trotz der Unterschreitung akzeptable Ergebnisse, wie z.B. das Samsung GT-I9300. Die in der Tabelle 6.3 aufgeführten Geräte sind grundsätzlich nur eine kleine Auswahl. Geräte der neusten Generation haben höhere Displayauflösungen und sind mit Eigenschaften wie bruch sicherem Glas oder Wasserdichtheit ausgestattet. Eigene Feldversuche haben ergeben, dass für kurze Zeiträume handelsübliche Geräte mit ihren Displays auch bei Temperaturen unter $0^\circ C$ eingesetzt werden können. Als Variante zur Anpassung des dargestellten Live-Bildes an den zur Verfügung stehenden Platz auf dem Display wird die Variante eines größtmöglich dargestellten Live-Bildes unter Hinnahme des Verlustes an Bildinformation an den Bildrändern bevorzugt, vgl. rechter Teil der Abbildung 6.3 (S. 86).

6.7 Realisierungsbeispiel „GeoARS-Unfallaufnahme“

Auch für stationäre GeoARS können die in Abschnitt 6.5.2 (Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System) getätigten Aussagen übernommen werden. Allerdings unterscheidet sich das Hardware-Konzept des Prototypen von den mobil-pedestrischen Implementierungen. Das Kamerabild wird hierbei über die auf einem Stativ fixierte Aufnahmeeinheit, z.B. per Funk, an die mobile Komponente (Tablet) geliefert, vgl. rechter Teil der Abbildung 6.1. Die modulare Kamera (hier: Sony QX-100, vgl. Tabelle 7.16, S. 137) befindet sich

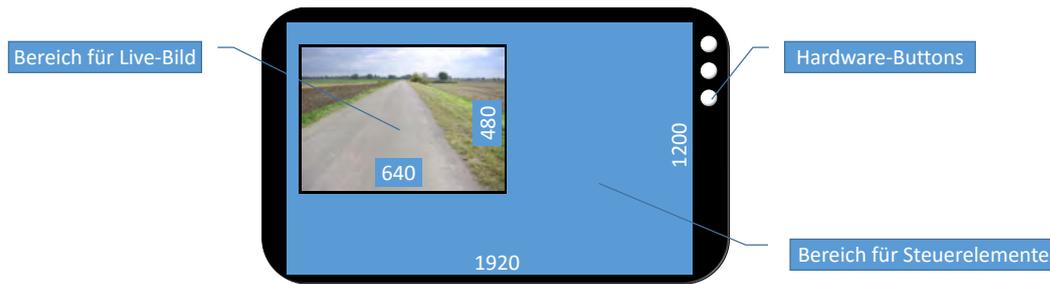


Abbildung 6.6: Video see-through Verfahren stationäres GeoARS auf Tabletbasis, Größenangaben in Pixel

auf dem Stativ und kann zudem aufgabenspezifisch ausgetauscht werden. Das Display muss zur Augmentierung nicht ständig vertikal vor dem Gesichtsfeld getragen werden, um die reale Welt über die rückseitige Kamera aufzunehmen, sodass auch größere und schwerere Displays eingesetzt werden können. Das Display kann somit groß genug gewählt werden, um zusätzlichen Raum für Steuerelemente (u.a. Auswahllisten, Buttons, Textfelder) zur fachspezifischen Erfassung von Realobjekten zu erhalten. Das Live-Bild der Kamera weist im implementierten Prototypen eine sehr geringe Auflösung mit 640×480 Pixeln auf. Diesbezüglich bietet sich die Möglichkeit an, das Bild lediglich auf einem Teil des Displays darzustellen oder ggf. eine Skalierung des Kamerabildes mit Qualitätsverlust bei der Abbildung auf dem Display vorzunehmen, vgl. Abbildung 6.6.

7 Position, Orientierung, Registrierung

7.1 Beschreibung der Ausgangssituation

Im vorliegenden Unterkapitel werden zunächst allgemeine Begriffe zum Thema Position und Orientierung von GeoARS definiert und die Beschreibung der Ausgangssituation in Bezug auf die **reale Welt** – Bestimmungsgrößen der räumlichen Lage, Unterschiede und Gemeinsamkeiten stationärer und mobil-pedestrischer GeoARS in Bezug auf die Position und Orientierung – sowie auf die **virtuelle Welt** (Parameter der räumlichen Lage) vorgenommen.

Wie eingangs in Kapitel 2 dargelegt, stellt die fehlerfreie Überlagerung virtueller Geodaten mit den Daten der Realität – die sogenannte **3D-Registrierung** – für GeoARS eine besondere Herausforderung dar, weil sie mit hoher Präzision und in Echtzeit vorzunehmen ist, um tatsächlich den Eindruck der Erweiterung der Realität beim Anwender zu erreichen. Über die zuvor beschriebenen Komponenten sind an der 3D-Registrierung maßgeblich die Positionierungs- und Orientierungskomponenten eines GeoARS beteiligt.

7.1.1 Beschreibung der Ausgangssituation in Bezug auf die reale Welt

GeoARS besitzen sechs voneinander unabhängige Bewegungsmöglichkeiten – drei Rotationen um die Systemachsen sowie drei Translationen entlang der Achsen – und somit sechs Freiheitsgrade (Freiheitsgrad $f = 6$). Ziel der Untersuchung ist es, die notwendigen sechs Bestimmungsgrößen aus den Sensormesswerten abzuleiten, um die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten des GeoARS-Zentrums sowie die drei Winkel der Orientierung des GeoARS in der realen Welt zu bestimmen und hinsichtlich ihrer Verwendung in stationären und mobilen Anwendungsfällen zu beurteilen.

Die konkreten **Bestimmungsgrößen** des GeoARS im erdfesten Bezugssystem (I-System) sind:

- x-Wert
 - y-Wert
 - z-Wert
- } Position des GeoARS jeweils in der Einheit [m];
-
- Gierwinkel ψ
 - Nickwinkel θ
 - Rollwinkel ϕ
- } Orientierung des GeoARS jeweils in der Einheit [°].

In Anlehnung an die DIN ISO 8855 (Straßenfahrzeuge) und ISO1151-1/DIN 9300 (Luft- und Raumfahrt) wird für GeoARS der Gier-Winkel ψ (Psi, engl. yaw angle) als horizontaler Rotationswinkel um die vertikale Achse, der Nick-Winkel θ (Theta, engl. pitch angle) als vertikaler Rotationswinkel um die Querachse und der Roll-Winkel ϕ (Phi, engl. roll angle) als vertikaler Rotationswinkel um die Längsachse definiert, vgl. Abbildung 7.1. Der Wertebereich für ψ ist von 0° bis 360° festgelegt, während θ und ϕ , in Abhängigkeit der verwendeten Hardware und teilweise in Abhängigkeit des Betriebssystems (z.B. bei Mobilgeräten) in einem Bereich von $\pm 90^\circ$ oder $\pm 180^\circ$ definiert sind.

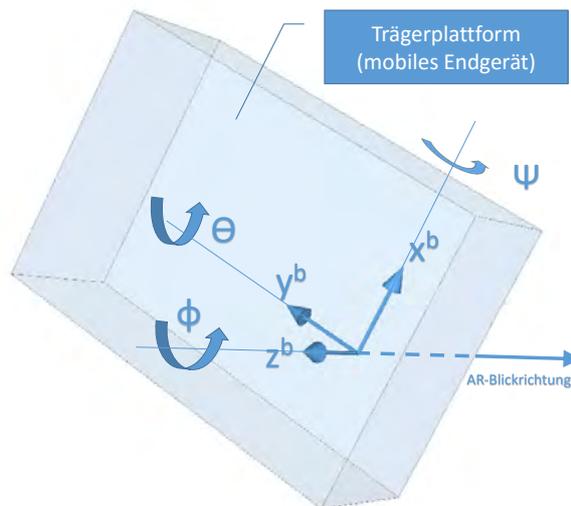


Abbildung 7.1: Nick-, Roll- und Gierwinkel im b -System

Voraussetzung für eine erfolgreiche 3D-Registrierung ist die Bestimmung der räumlichen Lage der realen Kamera. Unter dem Begriff **räumliche Lage** wird in dieser Arbeit die Kombination von Position **und** Orientierung im dreidimensionalen Raum verstanden. Aus dem Anwendungsfeld der Robotik stammend wird häufig im AR-Umfeld der Begriff *Pose* nach DIN EN ISO 8373 verwendet. Im Kapitel „Geometrie und Kinematik“ dieser Norm ist der Begriff Pose als „Kombination von Position und Orientierung im Raum“ definiert.

Ebenfalls ist die Bestimmung der inneren Orientierung der realen Kamera (k -System) für die 3D-Registrierung von erheblicher Bedeutung.

Darüber hinaus bildet die Kenntnis über die räumlichen Lagen der Sensoren (Sensor-Systeme) relativ zur realen Kamera (k -System, b -System) eine weitere Voraussetzung. Diese sind im Rahmen der Systemkalibrierung einmalig zu bestimmen und werden in der späteren Anwendung als fixe Parameter verwendet.

Hinsichtlich der Bestimmung von Position und Orientierung weisen stationäre und mobil-pedestrische AR-Systeme (vgl. auch Abschnitt 2.5.4) sowohl Gemeinsamkeiten als auch deutliche Unterschiede auf, die es später bei der Bestimmung der räumlichen Lage zu verarbeiten gilt. Es lässt sich feststellen, dass sie ähnliche Arbeitsbereiche der Orientierungswinkel (Roll-, Nick-, Gierwinkel) aufweisen bzw. benötigen, vgl. Tabelle 7.1. Die Rotation mit dem größten Arbeitsbereich von 0° bis 360° ist bei beiden Systemen die horizontale Rotation um die vertikale Achse (Gierwinkel). Hinsichtlich des Kippwinkels (Nickwinkel) arbeitet das mobil-pedestrische System in einem Bereich von $0-180^\circ$ von Zenit bis Nadir, wobei in der Praxis beide Extrema selten oder gar nicht auftreten. Dem stationären System ist es bauartbedingt gegebenenfalls nicht möglich in die Nadir-Position zu fahren, da die auf einem Stativ befestigte Trägerplattform dies nicht zulässt (z. B. bei „GeoARS-Unfallaufnahme“). Beide Systeme weisen relativ kleine Kantungswinkel (Rollwinkel $< \pm 10^\circ$) während der aktiven Benutzung auf. Dies liegt bei statischen Systemen zum einen an der Vorhorizontierung, z.B. mittels Dosenlibelle und bei mobil-pedestrischen Systemen (in der Regel $< \pm 30^\circ$) an der natürlichen synchronen Haltung von Augen und Systemdisplay. Mobil-pedestrische Systeme weisen die Besonderheit gegenüber stationären Systemen auf, dass der Kantungswinkel in Abhängigkeit der Benutzerbewegung bis zu seinem Maximalbereich von 90° geführt werden kann. Hinsichtlich der Rotationsgeschwindigkeit weisen mobil-pedestrische AR-Systeme teilweise deutlich höhere Geschwindigkeiten auf. Sie liegt bei Normalnutzung bei maximal $\approx 500^\circ/s$, vgl. Abschnitt 7.6.

Tabelle 7.1: Arbeitsbereiche stationärer und mobil-pedestrischer GeoARS

Art	Bemerkung	stationäres System	mobil-pedestrisches System
Azimutaldrehung	Gierwinkel	0° bis 360°	0° bis 360°
Kippung	Nickwinkel	< ±90°	±90°
Kantung	Rollwinkel	< ±10°	< ±30°, (±90°)
Rotationsgeschwindigkeit		≪ 500°/s	< 500°/s
Translation, horizontal		= 0 m	> 0 m
Translation, vertikal		= 0 m	> 0 m
Translationsgeschwindigkeit, horizontal		0 km/h	0 – 6 km/h
Translationsgeschwindigkeit, vertikal		0 km/h	nicht relevant, wird vor dem Gesicht getragen

7.1.2 Beschreibung der Ausgangssituation in Bezug auf die virtuelle Welt

Während oben im Abschnitt 7.1.1 noch von Bestimmungsgrößen der räumlichen Lage gesprochen wurde, so kann man nunmehr von **Parametern** der räumlichen Lage sprechen, da es sich nicht mehr um zu bestimmende Größen, sondern lediglich um variable mit jeder Änderung der räumlichen Lage des GeoARS in der realen Welt neu einzugebende bzw. zu übergebende Parameter handelt.

Die räumliche Lage des Systemzentrum der virtuellen Welt ist analog der Systemfestlegung der realen Welt durch dreidimensionale kartesische Koordinaten sowie die drei Winkel der Orientierung festgelegt.

Die konkreten Parameter des AR-Systems im virtuellen Bezugssystem (w-System) sind:

- x-Wert
 - x-Wert
 - z-Wert
- } Position der virtuellen Kamera jeweils in der Einheit [m];
- Gierwinkel ψ
 - Nickwinkel θ
 - Rollwinkel ϕ
- } Orientierung der virtuellen Kamera jeweils in der Einheit [°];

Wie oben bereits benannt, ist es eine Voraussetzung für eine erfolgreiche 3D-Registrierung – neben der Bestimmung der räumlichen Lage der realen Kamera – ebenfalls die Bestimmung der inneren Orientierung der realen Kamera, aber auch die Festlegung der Parameter der inneren Orientierung der virtuellen Kamera (vgl. Abschnitt 7.11), entsprechend den Parametern der inneren Orientierung der realen Kamera.

7.2 Problemstellungen und Herausforderungen

Die besondere Schwierigkeit bei der Durchführung des dreidimensionalen Registrierungsprozesses besteht in der Notwendigkeit der gesamtheitlichen verzögerungsfreien Echtzeitprozessierung durch das GeoARS:

- Bestimmung der räumlichen Lage
- Live-Bild-Korrektur
- Visualisierung der Geodaten
- Ausführen von Benutzerinteraktionen
- Speicherung von Daten
- Analyse von Daten

bei gleichzeitig anwendungskonformer Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Diese Arbeit zielt primär auf zwei Anwendungsfälle von GeoARS ab: stationär und mobil-pedestrisch. Bei mobil-pedestrischen GeoARS ist die Bewegung der Anwender während der Navigation (Erkunden oder Suchen in einer Feld-Umgebung) durch inhomogene dynamische Bewegungsgeschwindigkeiten und nicht präzifizierbare Schwenkbewegungen gekennzeichnet und stellen höchste Herausforderungen an die Berechnung der räumlichen Lage. Ebenfalls wird das AR-System teilweise bei Nichtbenutzung aus dem Gesichtsfeld in eine andere Haltposition überführt. Bei stationären AR-Systemen reduziert sich der Registrierungsprozess hinsichtlich der Bestimmung der räumlichen Lage, nach der einmaligen Bestimmung der Position, auf die Orientierung des Systems und vereinfacht dadurch den Registrierungsprozess.

Die Algorithmen müssen echtzeitfähig gehalten werden, da die mobilen in ihrer Hardware begrenzten Endgeräte neben der Orientierungsprozessierung auch weitere Aufgaben parallel zu bewältigen haben, u.a. aufwendige Visualisierungsberechnungen.

Darüber hinaus gestaltet sich die Anwendungsumgebung insgesamt durch einen heterogenen Untergrund (Boden/Erdboden/Gelände) oft mit bewegter Topographie (Böschungen, Gräben, Hügel, Berge). Die Anwendungsumgebung ist insbesondere für die korrekte dreidimensionale Georeferenzierung und die Modellierung der virtuellen Objekte von Bedeutung und muss deshalb besonders beachtet werden. Diesbezüglich wird auf die Ausführungen in Abschnitt 5.5.1 (Dimensionserweiterung von vektorialen 2D-Geodaten) verwiesen.

Hinsichtlich der praktischen Interaktion sind auch an das Display hohe Ansprüche zu stellen. Der Inhalt auf dem Display muss selbst bei starker Sonneneinstrahlung gut zu erkennen sein und auch in jedem Temperaturbereich sowie bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeitsverhältnissen noch funktionsfähig sein.

7.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Für die in Abschnitt 2.3 (Allgemeiner Aufbau von AR- und Geo-AR-Systemen) vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage wurden in den zurückliegenden Jahren vielfältigste Lösungen erarbeitet. Es wird erwartet, dass einige der Lösungen, zumindest teilweise, auf den Kontext von GeoARS passen könnten. Bereits in Abschnitt 2.5.3 (Stand der Wissenschaft und Technik) wurden wichtige Aussagen zum Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben. Dort wurde ausgeführt, dass einzelne wissenschaftliche Arbeiten

als Grundlage vorliegen, jedoch nicht sofort auf den Kontext von GeoARS und die dabei verwendeten kostengünstigen Sensoren in Alltagshardware übertragen werden können. Die möglichen Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage richten sich stark nach der technischen Leistungsfähigkeit und damit auch Genauigkeit der eingesetzten Sensoren. Der Stand der Technik ermöglicht es hierbei grundsätzlich, kompakte handelsübliche Mobilgeräte mit integrierter Sensorik oder Einzelmodule für die Bestimmung der räumlichen Lage eines GeoARS zu verwenden. In dieser Arbeit ist die Leistungsfähigkeit der kostengünstigen in aktuellen Alltagsgeräten vorhandenen Sensoren und die Genauigkeit ihrer Messwerte bezogen auf die resultierende geometrische Genauigkeit zunächst noch nicht bekannt. Die beispielsweise in Wild-Pfeiffer [2015], Dörner u. a. [2014], Kluge [2012], Bauer [2011], Farrell [2008], Titterton u. Weston [2004], Hoff u. Azuma [2000] aufgeführten Erkenntnisse zu Sensorik und Algorithmik dienen als erste Einstiegspunkte in die Bestimmung der räumlichen Lage mit kostengünstigen Sensoren (Microelectromechanical Systems (MEMS)), Modulen und mobiler Alltagshardware.

7.4 Ansätze

Für die 3D-Registrierung ist sowohl die virtuelle und reale Kamera übereinstimmend zu orientieren als auch die beiden Projektionszentren in einem gemeinsamen Punkt zusammenzuführen. Im Rahmen der GeoARS-Systemmodellierung ist diesbezüglich beabsichtigt, das Projektionszentrum der virtuellen Kamera auf die Position des Projektionszentrums der realen Kamera zu verschieben sowie die räumliche Lage ($f = 6$) der realen Kamera im erdfesten Koordinatensystem auf die virtuelle Kamera zu übertragen. Der Vorgang zur Bestimmung der räumlichen Lage des AR-Systems wird in der Literatur regelmäßig als Tracking bezeichnet. Diesbezüglich wurde bereits im Jahr 2001 eine grundlegende Klassifizierung verschiedener Tracking-Technologien durch [Rolland u. a. 2001] erarbeitet, die nach wie vor Gültigkeit und Aktualität besitzt, vgl. Abschnitt 2.3.

Mobile handelsübliche kompakte Alltagshardware beinhaltet bereits verschiedenartige Sensoren, die sich auch für GeoARS nutzen lassen, um die Orientierung und Position des Systems zu bestimmen. Auf genau diese tiefpreisigen und weit verbreiteten Geräte, z.B. Smartphones oder Tablets, zielt die vorliegende Arbeit ab. Darüber hinaus lassen sich modular aufgebaute GeoARS aus kostengünstigen und ebenfalls handelsüblich erhältlichen Einzelkomponenten zusammenstellen. Auch diese System-Hardware wird in dieser Arbeit untersucht (Schwerpunkt: stationäres GeoARS). In Anlehnung an das eingangs gesteckte Ziel (Hype-Zyklus, vgl. Abschnitt 2.1) wird damit beabsichtigt, einen Beitrag zur Integration von AR in den (Arbeits-)Alltag, zu denen auch die sicherheitsrelevanten bzw. rechtssicheren Anwendungen (z.B. die Verkehrsunfallaufnahme der Polizei) zählen, zu leisten.

Als Ansätze für geeignete Positionierungs- und Orientierungsverfahren werden in dieser Arbeit Lösungsansätze aus den Bereichen terrestrische Vermessung, GNSS, inertielle Navigationssysteme sowie Computergrafik und Bildverarbeitung verfolgt, um diese auf GeoARS mit niedrigpreisigen Sensorkomponenten anzuwenden und so die Bestimmungsgrößen einzeln oder gemeinsam im Rahmen einer Sensorfusion zu berechnen.

Eine besondere Situation tritt bei von in der Hand gehaltenen GeoARS auf, wenn das System in eine inaktive Position überführt wird. Dieser Fall tritt beispielsweise ein, wenn das System aufgrund von Ermüdung der Extremitäten (Arm/Hand) in eine passive Nutzung geführt wird. Das Abwenden des Displays von der Augenpartie und das vorübergehende vertikal nach unten gerichtete (entspannte) Halten in der Hand oder das vorübergehende Ablegen oder Verstauen des Gerätes führt zum Verlassen des regulären System-Arbeitsbereiches. Während bei Normalnutzung des mobil-pedestrischen Systems Drehungen bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung mit gemäßigten Winkelgeschwindigkeiten zu rechnen ist, so lässt das recht schnelle

Herunternehmen des Systems in die entspannte Armhaltung wesentlich höhere Winkelgeschwindigkeiten erwarten. Des Weiteren ist das mobil-pedestrische GeoARS viel stärker durch die Anwendungseigenschaften und Verhaltensweisen des jeweiligen Nutzers geprägt und weist stärkere dynamische Orientierungsänderungen und -wechsel auf, als das stationäre System. Hier sind die maximalen Endgeschwindigkeiten durch die Motorsteuerung festgelegt. Weiterhin sind die Unterschiede beider Systemausprägungen hinsichtlich ihrer Positionsänderung komplementär. Während stationäre Systeme keine Positionsänderung erfahren, so wirkt sich das Nutzerverhalten in der Handhabung von mobil-pedestrischen AR-Systemen direkt auf die resultierenden Bewegungsgeschwindigkeiten und deren Dynamik aus. Hier treten von Stillstand bis zur schnellen Schwenk- oder zügigen Gehbewegung unterschiedliche Translationsgeschwindigkeiten auf. Der Lösungsansatz zur Behandlung der Systemunterschiede hinsichtlich der Bestimmung der räumlichen Lage wird in einer für jede Systemausprägung unterschiedlichen Sensorkonfiguration beziehungsweise -konstellation gesehen, um mit den unterschiedlichen Eigenschaften beider Systemausprägungen umzugehen. Hierzu sollen im ersten Schritt die Arbeitsbereiche und Eigenschaften der Sensoren anhand geeigneter Feldversuche untersucht werden und für jede Systemart eine geeignete Sensorkonstellation erarbeitet werden.

Im Abschnitt 7.1.1 wurde die Anwendungsumgebung von GeoARS im Außenbereich näher beschrieben. Nachfolgend wird der Einfluss der einzelnen Umgebungsfaktoren auf GeoARS – insbesondere auf die Sensoren – und die Auswirkungen in Bezug auf die Bestimmung der räumlichen Lage untersucht. Diese Vorüberlegungen sollen als Ansatz dazu dienen, die Einsatzmöglichkeiten des jeweiligen Sensors zu beurteilen und helfen, die für jede Systemausprägung geeignete Sensorkonstellation zu finden.

Es soll untersucht werden, ob und wie sich die einzelnen Sensoren des Niedrigpreissegments für GeoARS nutzen lassen und ggf. welche Beschränkungen hierbei bestehen.

Einige Sensoren sind nur wenige Millimeter groß (1-3 mm) und werden mit hohem Verbreitungsgrad in Alltagsgeräten verbaut. Demzufolge besteht der Ansatz darin, nicht mit hochpreisigen Speziälsensoren zu arbeiten, sondern mit in kostengünstiger Alltagshardware integrierten Sensoren und ergänzend dazu mit niedrigpreisigen Einzelsensoren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die nachfolgenden Komponenten näher betrachtet, da sie das Potential haben einen Beitrag zur Positionierung oder/und Orientierung von GeoARS zu leisten:

- Beschleunigungssensor (auch Akzelerometer)
- Drehratensensor (auch Gyroskop, Kreisel)
- Magnetfeldsensor (auch Hall-Sensor, Kompass)
- GNSS-Modul
- Bildsensor
- Sonstige Sensoren/Module: Thermometer, ext. Laser.

Die Einflüsse der Umgebungsfaktoren in der Anwendungsumgebung der GeoARS wurden bereits in Tabelle 2.4 aufgeführt und werden nun in Tabelle 7.2 hinsichtlich ihres Einflusses auf den jeweiligen Sensor untersucht. In Tabelle 7.2 ist ersichtlich, dass jede Sensorart von mindestens einem Umgebungsfaktor tangiert wird. Hierbei fällt auf, dass der **Bildsensor** besonders stark von den Umgebungsbedingungen abhängt, sofern aus seinen Sensorwerten die räumliche Lage des AR-Systems bestimmt werden soll, insbesondere da mehrere Umgebungsfaktoren auf ihn wirken. **Beschleunigungssensoren** und **Drehratensensoren** sind vor allem dadurch

Tabelle 7.2: Umgebungsfaktoren mit Einfluss auf die Sensorik

Umgebungsfaktor	Bemerkung	betroffener Sensor
Licht	wechselnde Lichtverhältnisse (Intensitätsänderungen, Gegenlicht, Schatten, etc.)	Bildsensor
Temperatur	Temperaturschwankungen während der Verwendung möglich; jahreszeitliche Temperaturunterschiede	alle
Luftfeuchtigkeit, Niederschlag	Niederschlag und Sichtbehinderung durch Regen, Nebel, etc.	Bildsensor
Wind	Realobjekte werden bewegt	Bildsensor
Erdrotation	ggf. außerhalb der Empfindlichkeit des Sensors	Drehratensensor
Gravitation		Beschleunigungssensor
Erdmagnetismus	Änderungen während der Verwendung; Störung des Erdmagnetfeldes im Einflussbereich der Sensorik durch Realobjekte (z.B. elektr. Geräte, Fahrzeuge)	Magnetfeldsensor
(Jahres-)Zeit	jahreszeitliche Änderungen (z.B. Vegetationsperioden) bewirken Abschattung und Verdeckung	GNSS-Modul, Bildsensor
Dynamik	Eigenbewegung von Realobjekten (Äste, Blätter, Fahrzeuge, Personen, etc.)	Bildsensor
Oberflächenbeschaffenheit	Farbe und Struktur von Realobjekten; Reflektion in Systemnähe, Multipath	Bildsensor; GNSS-Modul
Ionosphäre, Troposphäre		GNSS-Modul

gekennzeichnet, dass ihre Messwerte, bis auf Temperaturabhängigkeit und Gravitation (nur für Beschleunigungssensor), durch keinen der aufgeführten Umweltfaktoren gestört werden. Die Bereitstellung korrekter Positionierungsergebnisse des **GNSS-Moduls** hängt neben den in der Tabelle 7.2 angeführten Auswirkungen jahreszeitlicher Änderungen durch Bewuchs und Belaubung noch von einer Reihe weiterer Faktoren, unter anderem Satellitenbahnfehler, Satelliten- und Empfängeruhrfehler, atmosphärische Laufzeitverzögerungen der Satellitensignale in der Ionosphäre und troposphärische Störungen (Refraktion), Mehrwegeausbreitungen an der Antenne (Multipath) sowie Empfängerrauschen ab. Hierzu wird auf weiterführende Fachliteratur verwiesen, u.a. Seeber [1993], Hofmann-Wellenhof u. a. [2008], Flury u. a. [2006], Bauer [2011], Mansfeld [2013]. **Magnetfeldsensoren** unterliegen den Variationen von Magnetfeldern, insbesondere des Erdmagnetfeldes sowie aus technischen Gründen der Temperatur. Der Lösungsansatz zur Behandlung der unterschiedlichen Einflussfaktoren der Anwendungsumgebung hinsichtlich der Bestimmung der räumlichen Lage wird auch hier in einer für jede Systemausprägung unterschiedlichen Sensorkonfiguration beziehungsweise -konstellation gesehen.

7.5 Sensorparameter

In den nachfolgenden Kapiteln werden die für GeoARS auf unterschiedliche Weise geeigneten Sensoren näher untersucht. In Vorbereitung darauf werden wesentliche gemeinsame technische Sensorparameter definiert und erläutert. Die Begriffsdefinitionen der Sensorparameter beruhen auf Foust u. Puig [2013], Hesse u. Schnell [2014], Wild-Pfeiffer [2015], Bernstein [2014], Aggarwal u. a. [2010] und Grewal u. a. [2007].

Sensor: Hiernach wird unter dem Begriff Sensor (lat. sensus: Gefühl/Empfindung) ein „... technisches Bauteil, das aus einem Prozess zeitvariable physikalische oder auch elektrochemische Größen erfasst und in ein eindeutiges elektrisches Signal umsetzt“ [Hesse u. Schnell 2014] verstanden. In DIN 1319 (Grundlagen der Meßtechnik) wird hierfür der Begriff Aufnehmer (Messgrößen-Aufnehmer) verwendet. Alle im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Sensoren sind digitale Sensoren. Hierbei werden stets diskrete Werte ausgegeben (Ausgangsmesswerte).

Signal, Daten, Information: Die Norm ISO/ITC 2382:2015 (DIN-Norm 44300 wurde offiziell zurückgezogen) definiert die Begriffe Signal, Nachricht und Daten. Ein Signal wird hierbei als Variation einer physikalischen Größe definiert, die verwendet wird, um damit Daten darzustellen bzw. wiederzugeben. Daten sind hierbei wiederinterpretierbare Darstellungen von Informationen und eine Information wiederum wird als Wissen über Objekte, wie z.B. Fakten, die in einem bestimmten Kontext eine besondere Bedeutung haben, definiert.

Die Sensoren liefern einzeln oder in Kombination ihre Beiträge zur Bestimmung der eingangs genannten Parameter der räumlichen Lage (Orientierung und Position). Tabelle 7.3 gibt hierzu einen ersten Überblick, wobei die einzelnen Sensoren in den nachfolgenden Kapiteln bezüglich ihrer Verwendbarkeit in GeoARS noch eingehend betrachtet werden.

Tabelle 7.3: GeoARS-Sensoren und ihre Funktion bei der 3D-Registrierung in GeoARS

Sensor	Orientierung	Geschwindigkeit	Position	Korrektur
GNSS-Sensor	○	◐	●	○
Drehratensensor	●	●	◐	○
Beschleunigungssensor	●	●	●	○
Magnetfeldsensor	●	○	○	○
Bildsensor	●	○	●	○
Temperatursensor	○	○	○	●

● ≙ beteiligt | ○ ≙ nicht beteiligt | ◐ ≙ teilweise/optional beteiligt

Messbereich: Im Rahmen von GeoARS wird unter einem Messbereich die algebraische Differenz zwischen höchstem und niedrigsten noch erfassbaren Messwert verstanden.

Bit-Tiefe: Die Bit-Tiefe gibt im Rahmen von GeoARS an, wie viele Zustände bei der Digitalisierung der Werte eingenommen werden können. Diese Zustände werden nachfolgend auch als Stufen bezeichnet.

Auflösung: Die Auflösung eines Sensors ergibt sich aus dem minimalen Unterschied zweier erfassbarer Objektzustände, die im Ausgangssignal gerade noch eine Änderung am Ausgangssignal bewirkt. Sie errechnet sich, indem man den Messbereich durch die Anzahl der Zustände (vgl. Bit-Tiefe) dividiert.

Für die Bewertung von Sensoren im Einsatzbereich von GeoARS sind sowohl der Messbereich wie auch die Auflösung des Sensors im Zusammenhang zu betrachten: je kleiner der Messbereich oder je höher die Bit-Tiefe, desto kleiner ist die detektierbare Messwertänderung und desto höher ist die Auflösung des Sensors eines GeoARS. Sie ergibt sich in der Einheit der Messwerte des jeweiligen Sensors pro Least Significant Bit (LSB)⁷ zu:

$$\text{Auflösung} = \text{kleinste detektierbare Messwertänderung} = \frac{\text{Messbereich}}{\text{Auflösung des A/D-Wandlers}} \quad (7.1)$$

⁷niederwertiges Bit, vgl. [Bernstein 2014], [Hesse u. Schnell 2014]

Rauschen: Unter Rauschen wird hier eine Störgröße mit einem breiten Frequenzspektrum verstanden, die nicht durch eine Kalibrierung entfernt werden kann. Es ist nicht deterministisch⁸, sondern stochastisch. Das Rauschen kann durch Filterung verringert werden. In technischen Spezifikationen wird es als Rauschleistungsdichte (Power Spectral Density, PSD - Einheit z.B. [g^2/Hz], [$(^\circ/s)^2/Hz$]) oder auch als Standardabweichung der Rauschleistung (total Root Mean Square (RMS) - Einheit z.B. [g], [$^\circ/s$]) angegeben. Die Wurzel der Rauschleistungsdichte wird mit Random Walk (RW), Einheit z.B. [g/\sqrt{Hz}], [$(^\circ/s)/\sqrt{Hz}$]) bezeichnet.

Die Umrechnung ist über den Zusammenhang $RMS = \sqrt{PSD \cdot \text{Bandbreite}} = RW \cdot \sqrt{\text{Bandbreite}}$ möglich. Unter der Bandbreite wird der Bereich verstanden, in dem der Sensor Eingangswerte detektieren kann. Die Qualität von Signalen wird im Signal-Rausch-Verhältnis (Störabstand) ausgedrückt.

Querachsen-Empfindlichkeit: Unter Querachsenempfindlichkeit (engl. cross-axis sensitivity, cross-coupling) wird der Einfluss einer senkrecht zur sensitiven Achse gemessenen Beschleunigung oder Winkelgeschwindigkeit („Messgröße“) auf diese verstanden bzw. der Einfluss der beiden anderen Achsen auf die Empfindlichkeit der sensitiven Achse. Dies bedeutet, dass ein bestimmter Prozentsatz aller Messungen in Richtung der Achse eine Auswirkung in Richtung der Achsen zwei und drei haben.

Nichtlinearität: Unter Nichtlinearität (engl. nonlinearity) wird die Abweichung der Empfindlichkeitskennlinie von einer Geraden bezeichnet, d.h. Nichtproportionalitäten von Eingangs- und Ausgangswerten.

Nullpunktverschiebung: Unter der Nullpunktverschiebung (engl. Offset, Bias) wird die Ausgabe eines von Null abweichenden Wertes verstanden, obwohl der Soll-Ausgabewert Null beträgt. Der konstante Teil der Nullpunktverschiebung ändert sich bei jedem Einschaltvorgang (engl. initial zero g offset, initial zero g bias, initial zero rate offset, initial zero rate bias, turn on bias). Die Nullpunktverschiebung ist temperaturabhängig und wird durch einen Temperaturkoeffizienten (engl. offset temperature coefficient, zero temperature coefficient) ausgedrückt. Dieser variable Anteil ändert sich mit der Zeit bzw. Temperatur. Nach Wild-Pfeiffer [2015] wird die Drift des zeitlich veränderlichen Anteils der Nullpunktverschiebung als **Bias-Instabilität** (engl. bias instability, in run bias stability, zero bias drift, in run bias) bezeichnet.

Wie noch gezeigt wird, genügen die vorstehenden Parameter, um die Leistungsfähigkeit in Bezug auf GeoARS einzuschätzen. Für vertiefte Informationen und zu weiteren Sensorfehlerarten wird auf die eingangs benannte Fachliteratur verwiesen.

7.6 Drehratensensor

7.6.1 Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik

Mit Drehratensensoren (engl. gyroscope) kann die Winkelgeschwindigkeit ω in der Einheit Radiant pro Sekunde rad/s oder Dezimalgrad pro Sekunde $^\circ/s$ gemessen werden. Drehratensensoren lassen sich in die drei Typen – mechanische Kreisel, optische Kreisel und Vibrationskreisel – einteilen, vgl. [Wild-Pfeiffer 2015] und [Wild-Pfeiffer u. Schäfer 2011]. Seit etwa Mitte der 1990er Jahre wurden miniaturisierte sehr kostengünstige Kreisel als MEMS entwickelt, die regelmäßig die Technik der Vibrationskreisel realisieren. Alle in dieser Arbeit verwendeten Drehratensensoren gehören zum Typus der MEMS-Vibrationskreisel und besitzen drei orthogonal zueinander angeordnete sensitive Achsen. Das Funktionsprinzip basiert hierbei auf dem Coriolis-Effekt. Hierzu wird eine Prüfmassse kontrolliert mit einer spezifischen Frequenz in Schwingung versetzt, sodass die Geschwindigkeit der Prüfmassse periodisch variiert. Wird dieses System mit einer Winkelgeschwindigkeit

⁸Deterministisches Signal: Signalwert ist zu jedem beliebigen Zeitpunkt verfügbar, vgl. [Hesse u. Schnell 2014]

senkrecht zur Schwingungsrichtung gedreht, wirkt ebenfalls senkrecht zur Schwingungsrichtung die messbare Corioliskraft, die als Maß für die Drehrate umgerechnet werden kann. Eine detaillierte Beschreibung und Verweise auf weiterführende Literatur findet sich in Wild-Pfeiffer [2015]. Dort werden Drehratensensoren

Tabelle 7.4: Parameter der einbezogenen Drehratensensoren

Bez.	Größe	Messbereich	Nicht-linearität	zero rate bias	Temperaturabhängigkeit	Rauschen (RW)	Rauschen (RMS)	Bit-Tiefe	Auflösung
	[mm^3]	[$^{\circ}/s$]	[% Messbereich]	[$^{\circ}/s$]	[$^{\circ}/s/^{\circ}C$]	[$^{\circ}/s/\sqrt{Hz}$]	[$^{\circ}/s$]		[($^{\circ}/s$)/LSB] bei ± 2000 [$^{\circ}/s$]
MPU-3050	4.0×4.0×0.90	±250, ±500, ±1000, ±2000	±0.20	±20	±0.030	0.010	0.10	16	≈ 0.06
MPU-6500/6515	3.0×3.0×0.90	±250, ±500, ±1000, ±2000	±0.10	±05	±0.240	0.010	0.10	16	≈ 0.06
BNO055	3.8×5.2×1.13	±125, ±250, ±500, ±1000, ±2000	±0.05	±01	±0.015	0.014	0.10	16	≈ 0.06
LSM330DLC	4.0×5.0×1.10	±250, ±500, ±2000	\	±10 bis ±25	±0.050	0.030	\	16	≈ 0.06
ITG-3200	4.0×4.0×0.90	±2000	±0.20	±40	±40.00	0.030	0.38	16	≈ 0.06

\ ≐ nicht verfügbar

für Navigationsanwendungen nach der Güteklasse der Anwendung (engl. Grade) entsprechend ihrer Bias-Instabilität in Genauigkeitsklassen kategorisiert: Strategic Grade (0.0001 – 0.01 $^{\circ}/h$), Inertial/Navigation Grade (0.01 – 0.1 $^{\circ}/h$), Tactical Grade (0.1 – 10 $^{\circ}/h$) und Rate Grade (Consumer/Commercial) (10 – 1000 $^{\circ}/h$). Tabelle 7.4 zeigt die in dieser Arbeit verwendeten Drehratensensoren. Zwar konnten in den Spezifikationen der in Tabelle 7.4 aufgeführten GeoARS-Drehratensensoren keine Angaben zur Bias-Instabilität ermittelt werden, jedoch wird bereits anhand des **zero rate bias** deutlich (Bereich von ± 1 – $\pm 40^{\circ}/s$), dass die verwendeten Sensoren der Gruppe der Rate Grade zuzuordnen sind. Die nachfolgenden Untersuchungen sollen die vorliegenden Genauigkeiten weiterführend illustrieren.

Abbildung 7.2 stellt die aufgezeichneten Messwerte der vertikalen (lotrechten) Achse des in Ruhelage befindlichen Drehratensensors MPU-6500 im Zeitraum von einer Stunde dar. Neben der Streuung der Messwerte ist ein typisches zero rate bias (≈ 0.01 $^{\circ}/s$) sichtbar. Dieser Effekt hat, wie oben erläutert, deutlichen Einfluss auf die Berechnung des Drehwinkels. In Anlehnung an Titterton u. Weston [2004] kann ein Drehwinkel α aus der Summe der inkrementellen Messwerte ω des Drehratensensors berechnet werden. Der Drehwinkel α errechnet

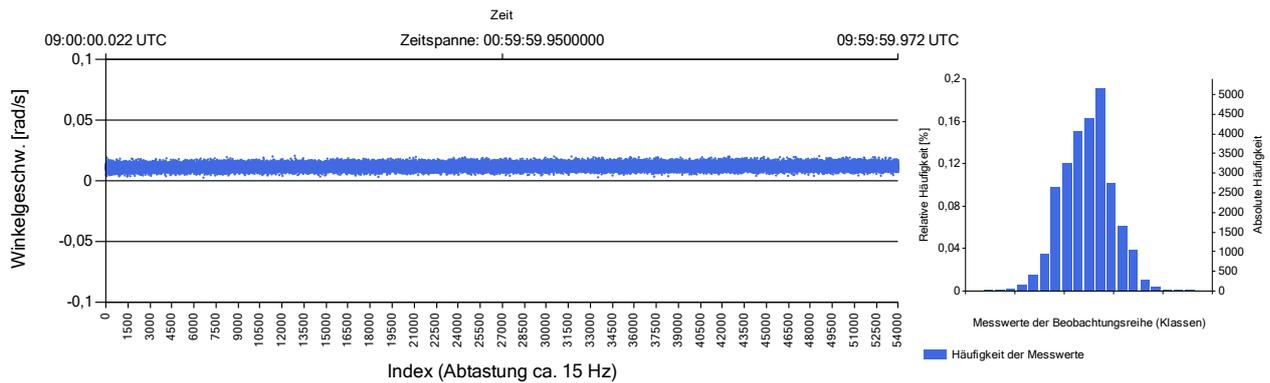


Abbildung 7.2: Messwerte der vertikalen Achse des in Ruhelage befindlichen Drehratensensors MPU-6500

sich dann mit:

$$\alpha = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \omega \, dt \quad (7.2)$$

nach

$$\alpha_{[k+1]} = \alpha_{[k]} + \omega_{[k+1]} \cdot \Delta t. \quad (7.3)$$

Die Berechnung des Drehwinkels aus den originären Messwerten der z-Achse (Abbildung 7.2) nach Gleichung 7.3 ergibt einen Wert von $\alpha = 2446^\circ$ für den Zeitraum einer Stunde. Die Zuordnung der gegenständlichen Drehratensensoren zu dem Typ Rate Grade ist somit gerechtfertigt.

Tabelle 7.4 kann entnommen werden, dass alle Drehratensensoren über eine Bit-Tiefe von 16 bit verfügen, damit 65536 Stufen in jedem Messbereich messbar sind und einen Messbereich bis maximal $\pm 2000^\circ/s$ abdecken. Für diesen Messbereich ergibt sich eine Auflösung von ca. $0.06^\circ/s/LSB$. Der Random Walk der Sensoren liegt zwischen 0.010 und $0.030^\circ/s/\sqrt{Hz}$. Eine Querachsenempfindlichkeit weist lediglich der BNO055 in seiner Spezifikation mit 1% aus.

Wie in Tabelle 7.4 ersichtlich, unterliegen Drehratensensoren einer **Temperaturabhängigkeit** (± 0.015 - $\pm 40^\circ/s$). Die Herstellerangabe des ITG-3200 („GeoARS-Unfallaufnahme“) weist hier den höchsten Wert der einbezogenen Sensoren mit $\pm 40^\circ/s$ aus. Zur Überprüfung dieses Temperaturverhaltens wurde eine 24-stündige Messung vorgenommen, bei der sich der Sensor in absoluter Ruhelage in einem geschützten Außenbereich befand. Abbildung 7.3 zeigt den Verlauf der Messwerte einer der drei Achsen dieses Drehratensensors, vgl. auch [Kreuziger 2014]. Der Verlauf der Messwerte korreliert mit den zeitgleich gemessenen Temperaturen (vgl. unterer Teil der Abbildung 7.3).

Darüber hinaus werden einige typische Sensorfehler sichtbar. Die Nummer 1 in Abbildung 7.3 lässt eine Nullpunktverschiebung erkennen. Die Nummer 2 markiert das Rauschen und durch Nummer 3 wird der Temperaturgang signalisiert. Ebenfalls sind in der Grafik Messwertausreißer (Definition vgl. Anhang A) sichtbar, z.B. Nummer 4.

Im Folgenden wird untersucht, welche Winkelgeschwindigkeiten bei GeoARS auftreten bzw. zu erwarten sind und ob der Messbereich der einbezogenen Drehratensensoren hierfür ausreichend ist.

Es ist beabsichtigt, **auf tretende Winkelgeschwindigkeiten bei Normalnutzung** von mobil-pedestrischen AR-Systemen zu ermitteln. Abbildung 7.4 zeigt die Winkelgeschwindigkeiten, die bei einer Normalnutzung mit

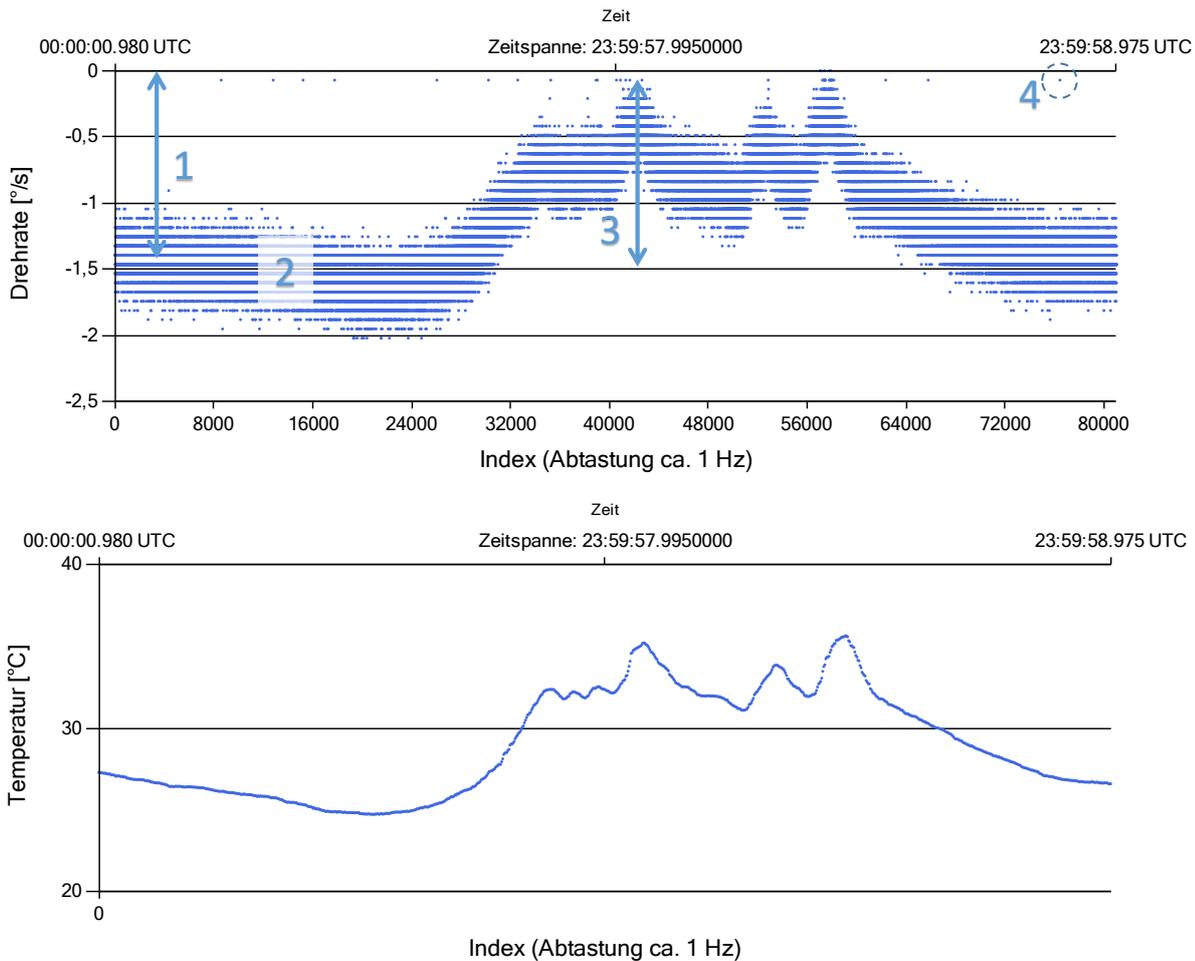
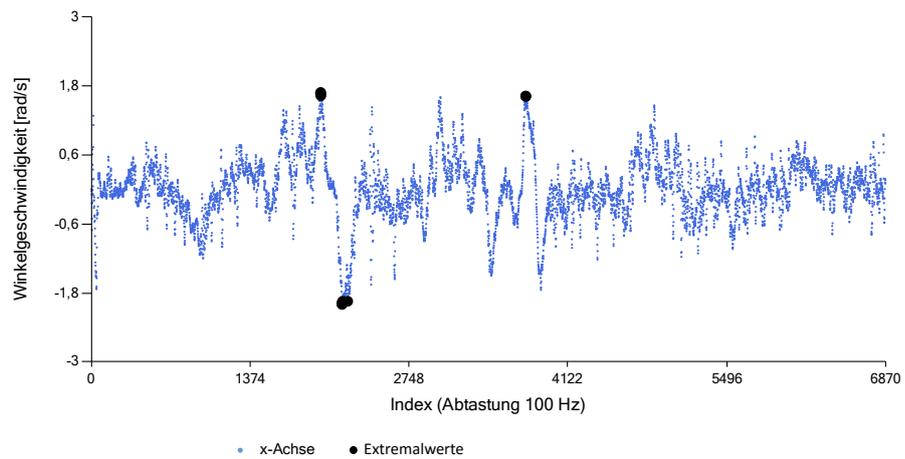


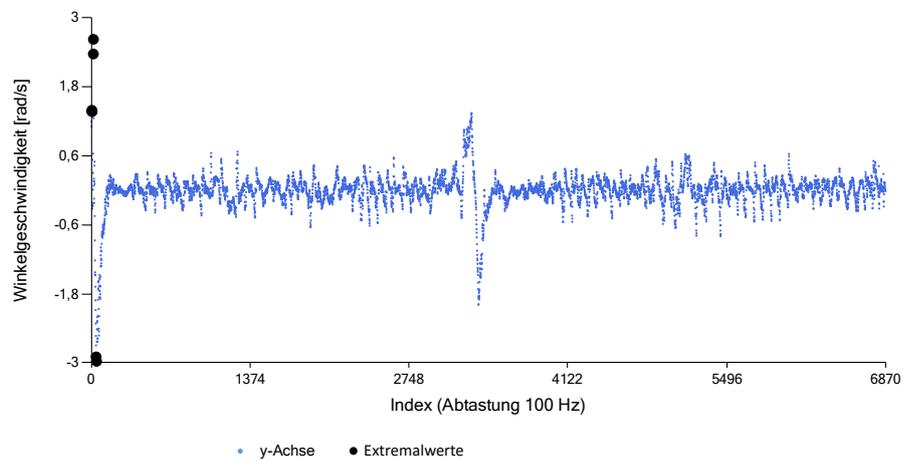
Abbildung 7.3: Drehratensensor: Messwerte einer Achse des in Ruhelage befindlichen dreiachsigen Drehratensensors ITG-3200 („GeoARS-Unfallaufnahme“) über einen Zeitraum von 24 Stunden

nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung eines mobil-pedestrischen AR-Systems auftreten. Der Ausschlag am Anfang aller drei Diagramme zeigt das Einschalten des AR-Systems. Das Diagramm der Abbildung 7.4a bildet deutlich die Gier-Bewegung des Benutzers während der Exploration ab. Im mittleren Diagramm (Abbildung 7.4b) ist eine markante Nick-Bewegung des AR-Systems, zuerst durch eine Ankipfung nach oben und anschließend nach unten, ersichtlich. Es ist auch erkennbar, dass keine signifikante Roll-Rotationen während eines normalen AR-Erkundungsvorganges auftreten, vgl. Abbildung 7.4c. Die Schwenkbewegungen weisen Winkelgeschwindigkeiten um die eigene Körperachse von unter $180^\circ/\text{s}$ auf und lassen sich mit den einbezogenen Drehratensensoren detektieren. Für weitere Details wird auf den Anhang B.1.1 verwiesen.

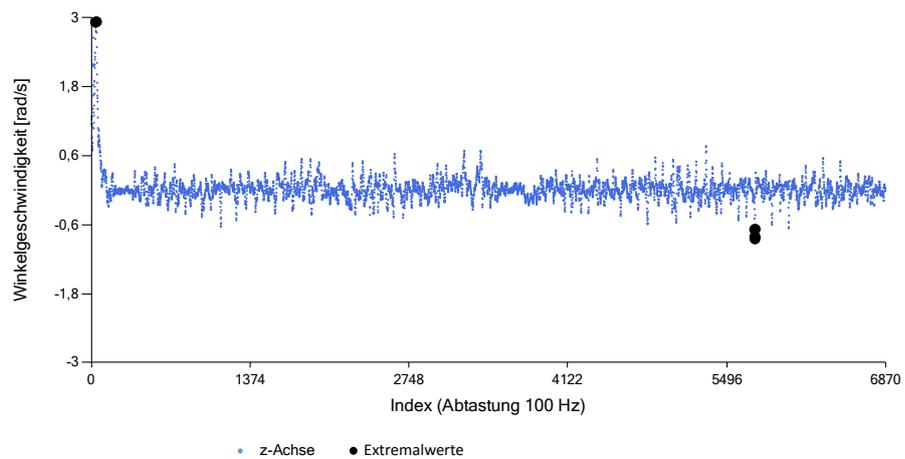
Weiterhin ist beabsichtigt, **auf tretende Winkelgeschwindigkeiten bei einer von der Normalnutzung von mobil-pedestrischen AR-Systemen abweichenden Bewegung des Benutzers** zu ermitteln. Abbildung 7.5 zeigt einen exemplarischen Versuch, bei dem die typische Bewegung des Benutzers ausgeführt wird, wenn das mobil-pedestrische AR-System von einer Nutzungs- in eine konkrete temporäre Nichtnutzungsphase überführt wird. Die Nutzungshaltung zeichnet sich dadurch aus, dass das AR-System mit mindestens einer Hand führend im Leseabstand vor das Gesichtsfeld gehalten wird. Die Haltung der Nichtnutzungsphase ist durch eine für den Nutzer eher entspannte Haltung gekennzeichnet. Hierbei ist der Arm des Nutzers



(a) Drehratensensor x-Achse



(b) Drehratensensor y-Achse



(c) Drehratensensor z-Achse

Abbildung 7.4: Drehratensensor: x-, y- und z-Achse; ca. 1 min. Einsatz eines mobil-pedestrischen GeoARS unter realen Bedingungen (vgl. Anhang B.1.1)

näherungsweise senkrecht nach unten gerichtet, wobei sich das System nach wie vor in der Hand des Nutzers befindet. Abbildung 7.5 zeigt eine dreimalige Wiederholung dieses Vorgangs. Beim Herunternehmen eines in der Hand gehaltenen mobil-pedestrischen AR-Systems treten höhere Winkelgeschwindigkeiten mit ca. $500^\circ/s$ auf, als während der explorativen Normalnutzung des vorherigen Versuches B.1.1. Für weitere Details wird auf den Anhang B.1.2 verwiesen.

In einem abschließenden Versuch soll eine zügige Anwenderbewegung bei der Nutzung eines mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger kontinuierlicher **visueller Rückkopplung** durchgeführt und dabei beobachtet werden, welche Winkelgeschwindigkeiten hierbei auftreten. Bei diesem exemplarischen Versuch hält der Nutzer das mobil-pedestrische AR-System in einer Hand führend im Leseabstand vor dem Gesichtsfeld. Es erfolgt eine Drehung von 360° um die vertikale Körperachse des Nutzers im Uhrzeigersinn. Anschließend geht der Nutzer etwa 3 m geradeaus, bleibt dann stehen und schwenkt das System aus der Waagerechten heraus zunächst schräg nach unten und danach schräg nach oben sowie anschließend wieder in die Waagerechte.

Beim zügigen horizontalen Drehen und Schwenken um die eigene vertikale Achse des Nutzers eines in der Hand gehaltenen mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger kontinuierlicher visueller Rückkopplung treten Winkelgeschwindigkeiten von ca. $90^\circ/s$ (Gier-Bewegung) auf. Das zügige vertikale Drehen, Schwenken und Neigen ruft Winkelgeschwindigkeiten von ca. $35^\circ/s$ (Nick-Bewegung) hervor. Hinsichtlich der Roll-Bewegung treten eine maximale Winkelgeschwindigkeiten von ca. $15^\circ/s$ auf, vgl. Abbildung 7.6 und Anhang B.1.3.

Für motorische **stationäre Systeme** hat die Motorleistung und die Beschaffenheit der Mechanik (z.B. Kunststoffgetriebe) Einfluss auf die maximal zulässigen Drehgeschwindigkeiten des GeoARS. Der Prototyp des „GeoARS-Unfallaufnahme“ weist Winkelgeschwindigkeiten von bis zu $\approx 400^\circ/s$ auf, vgl. Abbildung 7.7c.

Für weitere Details zu allen Versuchen wird auf den Anhang B.1 verwiesen.

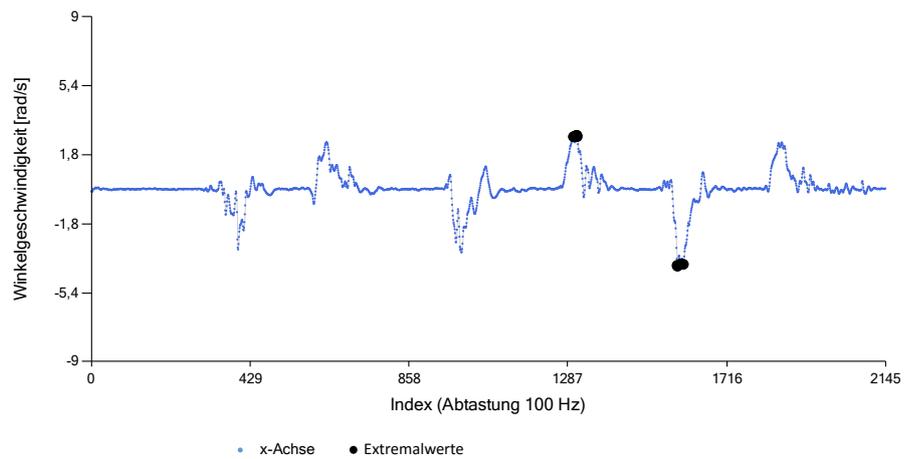
7.6.2 Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System

In den durchgeführten Untersuchungen wurden die Bereiche und Größenordnungen der **zu erwartenden Winkelgeschwindigkeiten für GeoARS** erarbeitet. Tabelle 7.5 fasst zunächst die zu erwartenden Winkelgeschwindigkeiten zusammen. Es kann festgestellt werden, dass die Messbereiche der Drehratensensoren

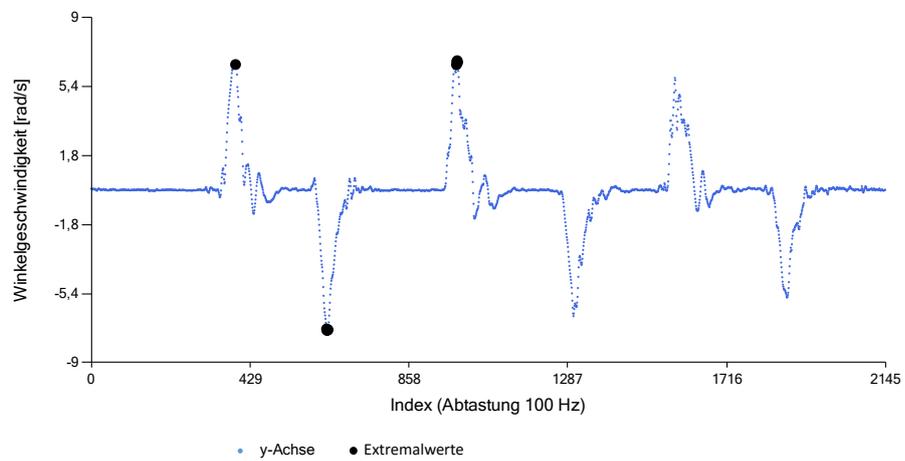
Tabelle 7.5: Winkelgeschwindigkeiten in GeoARS

Handlung	max. Geschwindigkeit	Systemart
Exploration in Feld-Umgebung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung, Translationsgeschwindigkeit $< 3\text{ km/h}$	$< 110 - 180^\circ/s$	mobil-pedestrisch
Exploration mit kontinuierlicher visueller Rückkopplung	$< 90^\circ/s$	mobil-pedestrisch
zügiges Senken des AR-Systems	$\approx 500^\circ/s$	mobil-pedestrisch
Auftreten eines außergewöhnlichen Ereignisses (z.B. Herunterfallen, Stolpern)	$> 500 - 2000^\circ/s$	mobil-pedestrisch
Bewegung um vertikale/horizontale Achse	$< 500^\circ/s$	stationär

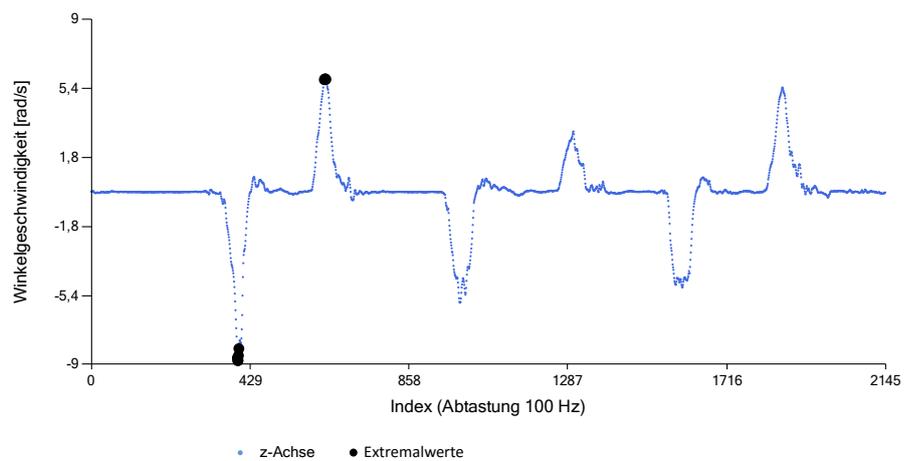
grundsätzlich die zu erwartenden Winkelgeschwindigkeiten abdecken. Die Wahl des Messbereiches hängt stark von der jeweiligen AR-Anwendung und den dabei zu erwartenden Winkelgeschwindigkeiten ab. Es kann



(a) Drehratensensor x-Achse

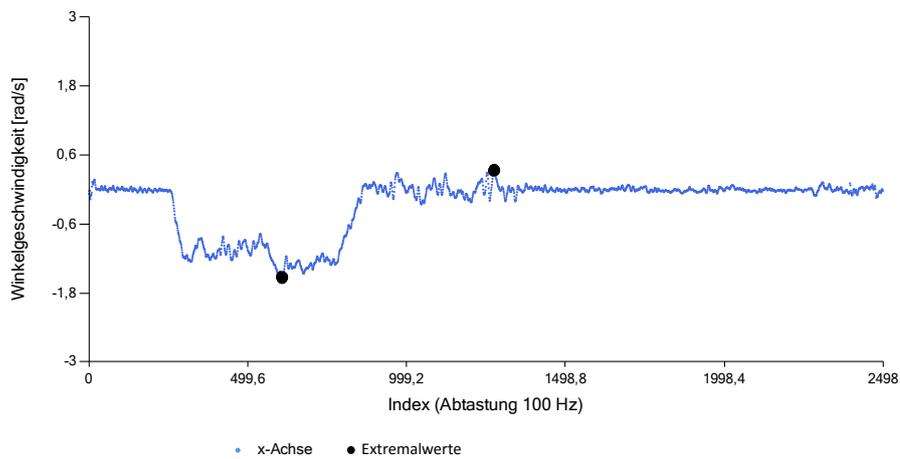


(b) Drehratensensor y-Achse

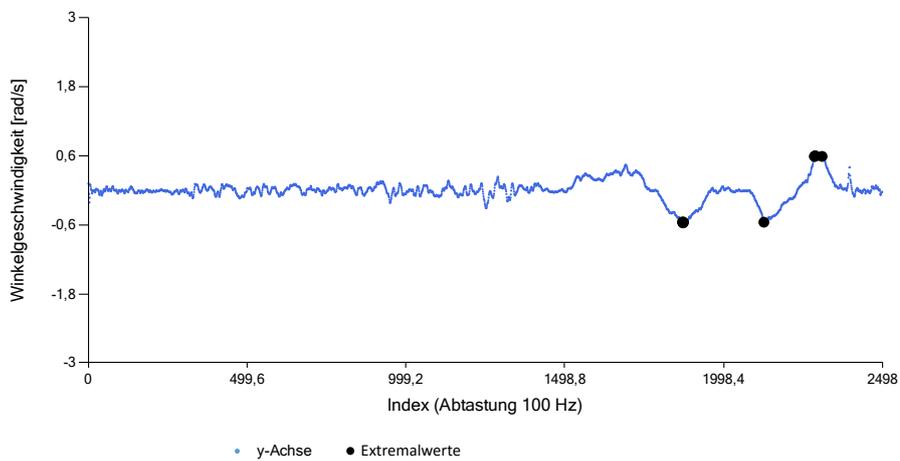


(c) Drehratensensor z-Achse

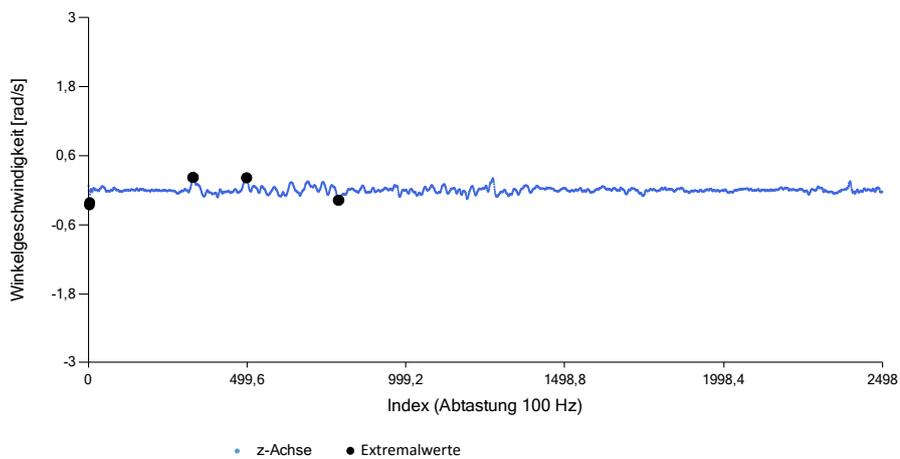
Abbildung 7.5: Drehratensensor: x-, y- und z-Achse; Überführung mobil-pedestrisches GeoARS von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung (vgl. Anhang B.1.2)



(a) Drehratensensor x-Achse



(b) Drehratensensor y-Achse



(c) Drehratensensor z-Achse

Abbildung 7.6: Drehratensensor: x-, y- und z-Achse; zügige Drehung und Schwenkung eines mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer (vgl. Anhang B.1.3)

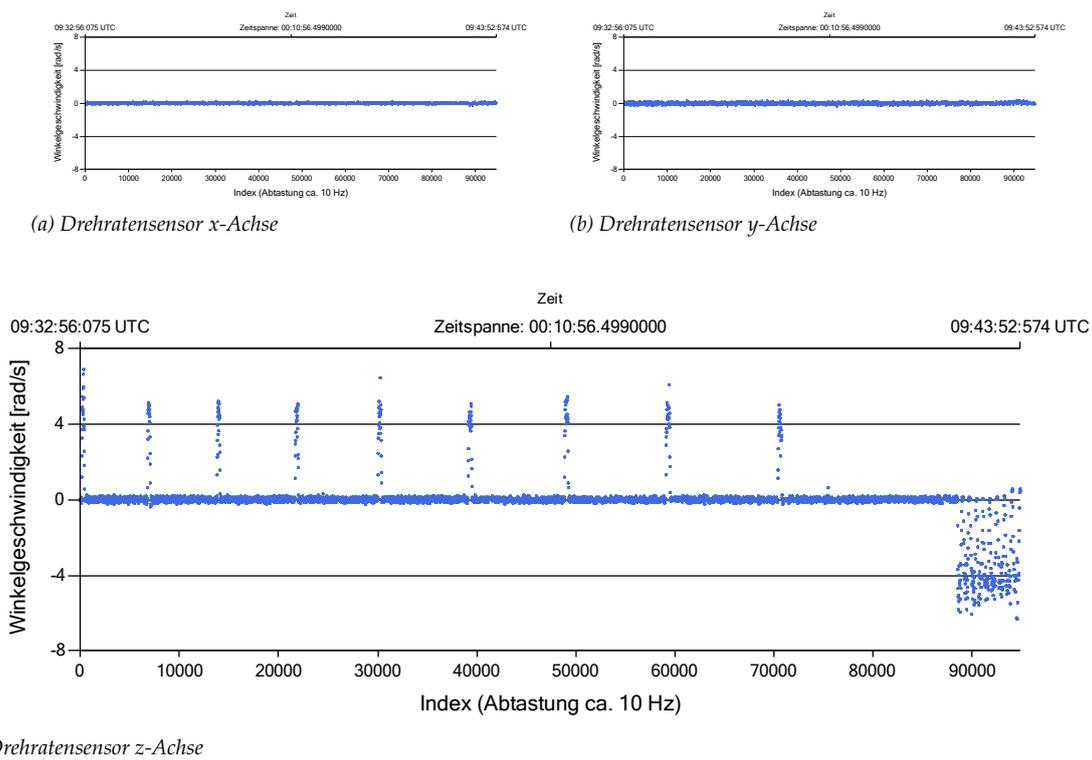


Abbildung 7.7: Drehratensensor: x-, y- und z-Achse; Drehung eines stationären GeoARS in 10° -Schritten und in kurzen Intervallen im Gegenuhrzeigersinn zurück (vergrößerte Darstellung: vgl. Anhang B.1.4)

jedoch pauschalisiert die Aussage getroffen werden, dass für mobil-pedestrische GeoARS ein Messbereich ab $\pm 500^\circ/s$ und für stationäre GeoARS in Abhängigkeit der Gesamtmechanik ein Messbereich von nicht größer als $\pm 500^\circ/s$ empfohlen wird. Alle einbezogenen Drehratensensoren erfüllen dieses Kriterium. Der Messbereich ist grundsätzlich je nach GeoARS-Anwendung spezifisch festzulegen.

In eigenen Versuchsreihen wurde ermittelt, dass die Bewegung der Anwender bei der Navigation mit mobil-pedestrischen AR-Systemen (Erkunden oder Suchen in einer Feld-Umgebung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung) durch eine Geh-Geschwindigkeit von ca. 2-3 km/h sowie durch häufiges Stehenbleiben und visuelles Erkunden, verbunden mit Schwenkbewegungen mit Winkelgeschwindigkeiten um die eigene Körperachse von regelmäßig unter ca. $110-180^\circ/s$, gekennzeichnet ist. Für Nutzungszeiten des AR-Systems mit kontinuierlicher visueller Rückkopplung sind die Winkelgeschwindigkeiten etwas geringer und liegen bei einer Größenordnung von maximal ca. $90^\circ/s$. Die beabsichtigte Bewegungsrichtung und Orientierung des GeoARS kann nahezu nicht präzisiert werden, da unklar ist, welches Vorhaben der Anwender als Nächstes verfolgt.

Beim Herunternehmen eines mobil-pedestrischen Systems aus der Anwendungsposition (vor dem Gesicht gehalten) treten höhere Winkelgeschwindigkeiten mit ca. $500^\circ/s$ auf. In weiteren Versuchen wurde durch heftiges Schütteln eines AR-System der maximale Arbeitsbereich vieler handelsüblicher Drehratensensoren mit Winkelgeschwindigkeiten von $\pm 2000^\circ/s$ erreicht und möglicherweise überschritten. Diese Maxima zählen nicht zum Arbeitsbereich während der AR-Nutzung und können lediglich in Extremsituationen auftreten (z. B. Herunterfallen eines Gerätes). Die Sensorkonzeption des GeoARS sollte diese Ausnahme berücksichtigen.

Für die in Abschnitt 7.12.2 vorgestellten Navigationsverfahren wird der Drehratensensor von essentieller Bedeutung sein, da er maßgeblich an der Berechnung von Nick-, Roll- und Gierwinkel sowie an der Projektion der Schwerebeschleunigung auf die Systemachsen beteiligt ist. Fehlerhafte Winkel führen zu fehlerhaften Berechnungen der linearen Beschleunigung und dies wiederum zu fehlerhaften Geschwindigkeiten und Positionen.

Für stationäre GeoARS sind die auftretenden maximalen Winkelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Motorleistung und Getriebe fest konfigurierbar und daher kalkulierbar. Der Messbereich des Drehratensensors kann darauf abgestimmt gewählt werden. Dadurch wird eine optimale Sensitivität erreicht. Für das Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ liegen die maximalen Winkelgeschwindigkeiten bei $\approx 400^\circ/s$, sodass für die einbezogenen Drehratensensoren ein entsprechend kleiner Messbereich (z.B. $\pm 500^\circ/s$) eingestellt werden sollte, vgl. Tabelle 7.4.

Die Konzeption von GeoARS sollte ebenfalls die eingangs genannten Fehler-Aspekte der Drehratensensoren bei der Sensorauswahl berücksichtigen, sodass grundsätzlich auf möglichst kleine Beträge der Fehlerparameter zu achten ist.

Insgesamt können Drehratensensoren mit den oben genannten Erkenntnissen für verschiedenartige Aufgaben innerhalb eines GeoARS eingesetzt werden, z.B.

- als Detektor für außergewöhnliche Ereignisse („GeoARS-Unfallaufnahme“: Gerät/Stativ wird durch Fremdeinwirkung versetzt, weitere Messungen wären unbrauchbar)
- für die Glättung von Winkelmesswerten des Beschleunigungssensores (vgl. Abschnitt 7.12.8.1) oder
- für sehr kurze Zeiträume zur Navigation und Positionierung (vgl. Abschnitt 7.12.2/7.12.5).

7.7 Beschleunigungssensor

7.7.1 Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik

Beschleunigungssensoren (engl. accelerometer) sind Sensoren, die auf eine Probemasse wirkende Trägheitskraft in Form einer Beschleunigung messen. Ihre Messwerte werden in der Einheit Meter pro Quadratsekunde (m/s^2) ausgegeben. Teilweise wird auch die Einheit *Gal* (nach Galileo Galilei) verwendet, wobei $1 \text{ Gal} = 0.01 \text{ m/s}^2$ beträgt (in Geodäsie und Geophysik: *mgal* und μgal üblich). In Spezifikationen werden technische Parameter auch als Vielfaches des Betrages der Schwerebeschleunigung der Erde (kurz Schwere g ; $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$) angegeben und auch in den nachfolgenden Erläuterungen teilweise in dieser Darstellungsart verwendet. Die Differenz der Schwerebeschleunigung am Äquator und an den Polen beträgt wegen der breitenabhängigen Zentrifugalbeschleunigung etwa 0.034 m/s^2 .

Beschleunigungssensoren lassen sich nach den verwendeten Verfahren zur Messung der Trägheitskraft in die drei Verfahrenstypen – Auslenkungsprinzip, Kraftkompensationsprinzip und Vibrationsprinzip – einteilen. Eine detaillierte Beschreibung und Verweise auf weiterführende Literatur findet sich hierzu in Wild-Pfeiffer [2015]. Wie bei den Drehratensensoren können Beschleunigungssensoren für Navigationsanwendungen hinsichtlich ihrer Genauigkeitsklasse nach der Güteklasse der Anwendung entsprechend ihrer Bias-Instabilität kategorisiert werden: Strategic Grade ($< 1 \cdot 10^{-3} \text{ mg}$), Inertial/Navigation Grade ($0.001 - 0.01 \text{ mg}$), Tactical Grade ($0.01 - 1.0 \text{ mg}$) und Rate Grade (Consumer/Commercial) ($> 1.0 \text{ mg}$). Tabelle 7.6 zeigt die in dieser Arbeit

Tabelle 7.6: Parameter der in die Untersuchung zu GeoARS einbezogenen Beschleunigungssensoren

Bez.	Größe	Messbereich ^a	Nicht-linearität	zero g bias	Temperaturabhängigkeit	Rauschen (RW)	Querachsenempfindlichkeit	Bit-Tiefe	Auflösung
	[mm]	[g]	[% Messbereich]	[mg]	[mg/°C]	[$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]	[%]		[m/s^2 / LSB] bei $\pm 2g$
BMA 220	1.0×2.0× 0.98	± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16	± 2.0	± 95	± 2.0	2000	± 2.0	6	≈ 0.613
MPU-6500/6515	3.0×3.0× 0.90	± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16	± 0.5	± 60	± 0.64 bis ± 1.0	300	± 2.0	16	≈ 0.0006
LSM330DLC	4.0×5.0× 1.10	± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16	\	± 60	± 0.5	220	\	16	≈ 0.0006
BNO055	3.8×5.2× 1.13	± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16	± 0.5	± 80	± 1.0	150	± 1.0	14	≈ 0.002
BMC150	2.2×2.2× 0.95	± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16	± 0.5	± 80	± 1.0	150	± 1.0	12	≈ 0.010
MMA7455L	1.0×0.7× 1.00	± 2 , ± 4 , ± 8	± 1.0	\	± 0.5	\	± 5.0	8	≈ 0.153

\ $\hat{=}$ nicht verfügbar

^ain der Regel fix, teilweise in Stufen regelbar

verwendeten Beschleunigungssensoren. Zwar konnten in den Spezifikationen der in Tabelle 7.6 aufgeführten GeoARS-Beschleunigungssensoren (wie bei den Drehratensensoren) keine Angaben zur Bias-Instabilität ermittelt werden, jedoch wird bereits anhand des **zero g bias** (Bereich von ± 60 – ± 95 mg) und der **Temperaturabhängigkeit** (± 0.5 – ± 2.0 mg/°C) deutlich, dass die verwendeten Sensoren der Gruppe der Rate Grade zuzuordnen sind. Die nachfolgenden Untersuchungen sollen die vorliegenden Genauigkeiten weiterführend verdeutlichen.

Abbildung 7.8 stellt die aufgezeichneten Messwerte einer horizontalen Achse des in Ruhelage befindlichen Beschleunigungssensors MMA7455L bei einer 24-stündigen Messung exemplarisch dar. Analog zu den Ergebnissen der Drehratensensoren sind auch in den Messergebnissen des Beschleunigungssensors in Abbildung 7.8 einige typische Sensorfehler sichtbar. Die Nummer 1 lässt eine Nullpunktverschiebung (zero g bias) erkennen. Die Messwerte weisen ein Rauschen (Nummer 2) auf und auch eine Temperaturbeeinflussung (Nummer 3) ist erkennbar. Darüber hinaus sind in der Grafik Messwertausreißer (Definition vgl. Anhang A) erkennbar, u.a. Nummer 4. Allgemein ist der Tabelle 7.6 zu entnehmen, dass der RW der Sensoren zwischen 150 und 2000 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ und die Querachsenempfindlichkeit bei ± 1 – $\pm 5\%$ liegt. Tabelle 7.6 kann weiter entnommen werden, dass die Bit-Tiefe der Beschleunigungssensoren zwischen 6 bit bis 16 bit variiert. Eine Bit-Tiefe von 6 bit bedeutet, dass $2^6 = 64$ Quantisierungsstufen aufgelöst und dargestellt werden können, vgl. Gleichung (7.1). Bei einer Empfindlichkeitseinstellung von $\pm 2g$ verteilen sich die 64 Stufen auf je 32 + 32 Stufen im

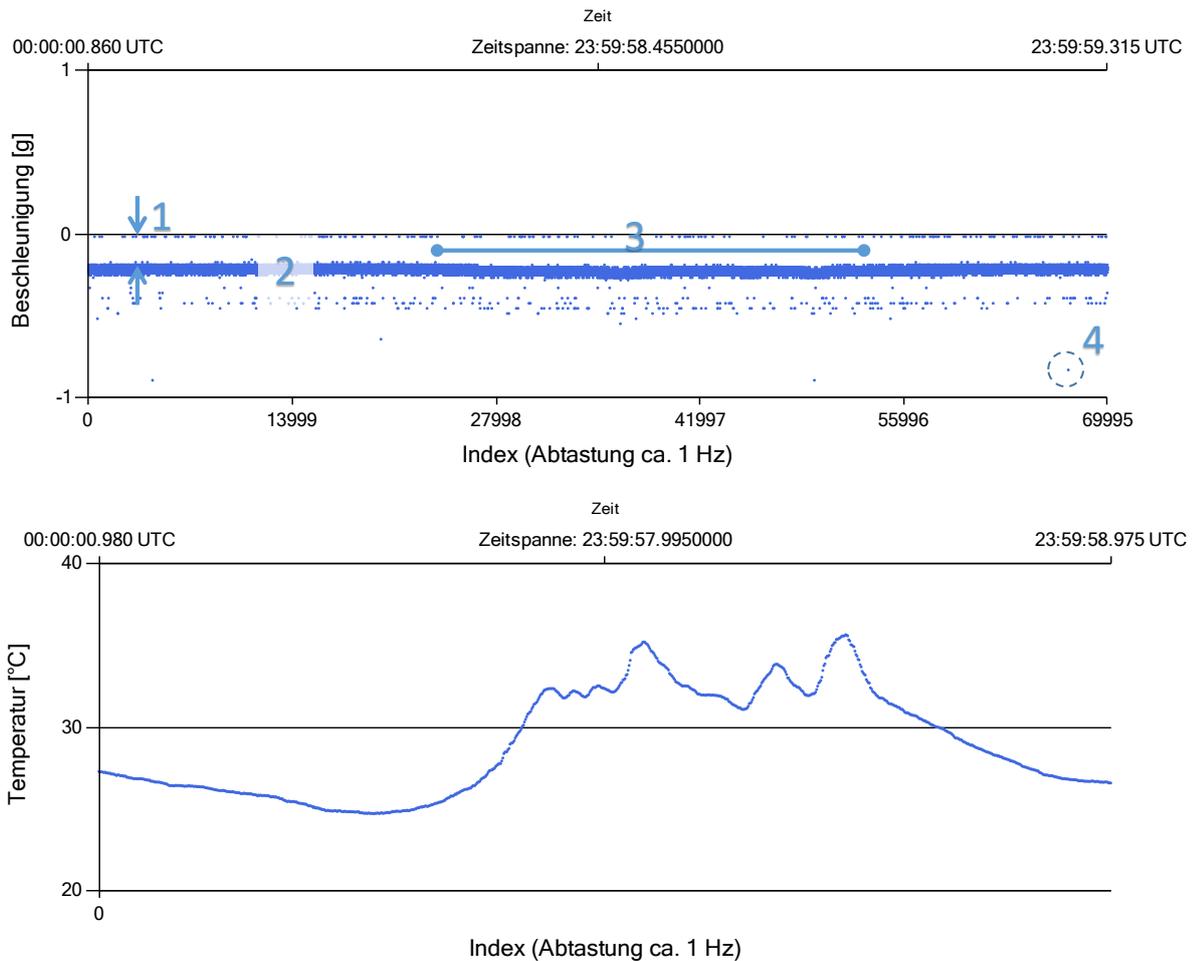


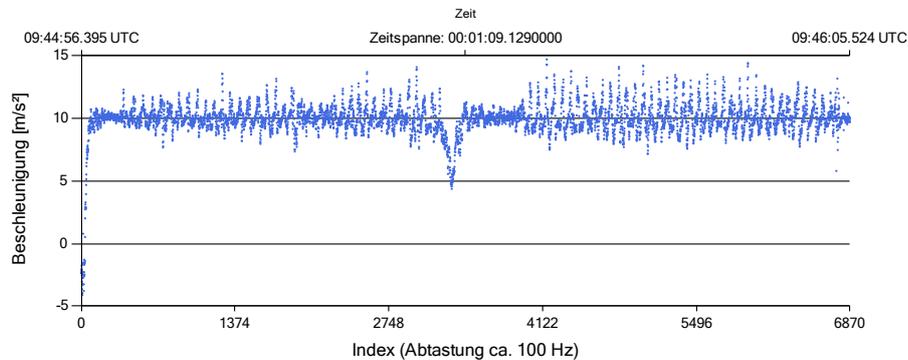
Abbildung 7.8: Messwerte einer horizontalen Achse des in Ruhelage befindlichen Beschleunigungssensors MMA7455L über einen Zeitraum von 24 Stunden

negativen und positiven Wertebereich. Eine Stufe lässt sich somit ausdrücken als $\frac{1g}{32}$ und entspricht damit ca. $9.81 \text{ m/s}^2 / 32 \approx 0.307 \text{ m/s}^2$ oder 30.7 Gal bzw. 30656 mGal . Für einen höher auflösenden Beschleunigungssensor (z.B. MPU6500) mit einer Bit-Tiefe von 16 bit ergeben sich 65536 Stufen und eine Stufe mit 0.0006 m/s^2 bzw. ca. 60 mGal . Damit besitzt dieser Sensor eine etwa 500 mal höhere Auflösung als ein Beschleunigungssensor mit einer Bit-Tiefe von 6 bit .

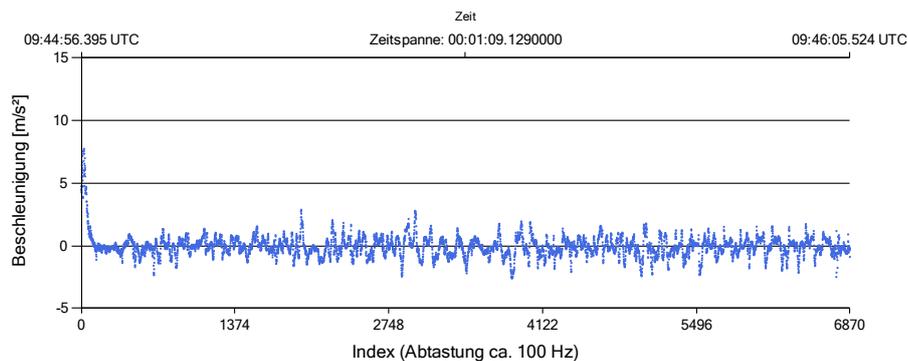
Im Folgenden wird untersucht, welche Beschleunigungen in GeoARS auftreten bzw. zu erwarten sind und welcher Messbereich hierfür optimal ist. Die einbezogenen Sensoren, mit Ausnahme des MMA7455L, lassen sich in Messbereiche von $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$ einstellen.

Es ist beabsichtigt, **aufretende Beschleunigungen bei Normalnutzung** von mobil-pedestrischen AR-Systemen zu ermitteln. Abbildung 7.9 zeigt die Beschleunigungen, die bei einer Normalnutzung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung eines mobil-pedestrischen AR-Systems auftreten. Der Ausschlag am Anfang aller drei Diagramme zeigt das Einschalten des Systems. In den Abbildungen 7.9a und 7.9c ist eine markante Nick-Bewegung des Systems, zuerst durch eine Ankippung nach oben und anschließend nach unten, ersichtlich. Es sind in allen Diagrammen Beschleunigungen (Messwertschwankungen) sichtbar, die durch die menschliche Gehbewegung hervorgerufen werden: in Abbildung 7.9a vertikale Beschleunigungen

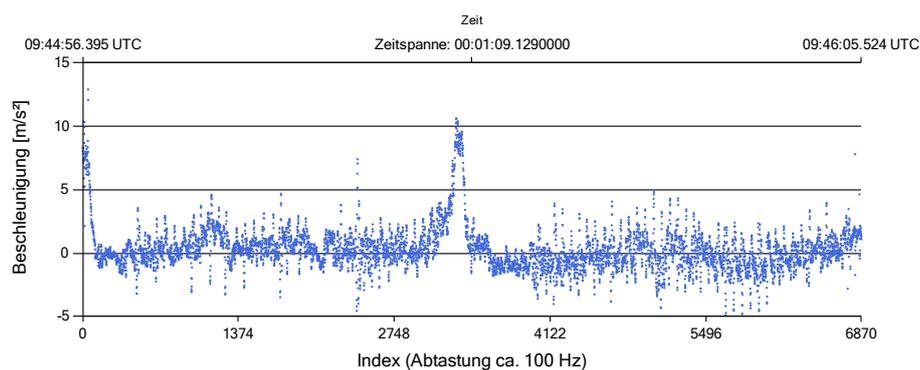
sowie anteilig Roll- und Nick-Bewegung; in Abbildung 7.9b Roll-Bewegung (Verkantungen); in Abbildung 7.9c Nick-Bewegung. Die Schwenk- und Gehbewegungen bei diesem Explorationsvorgang in der Umgebung weisen insgesamt Beschleunigungen von maximal $+14.67 \text{ m/s}^2$ und -5.12 m/s^2 auf, die zunächst nicht nach inertiellem und gravitativem Anteil unterschieden wurden. Aus den ermittelten Beschleunigungen ergibt sich zunächst ein geeigneter Messbereich von $\pm 2 \text{ g}$.



(a) Beschleunigungssensor x-Achse



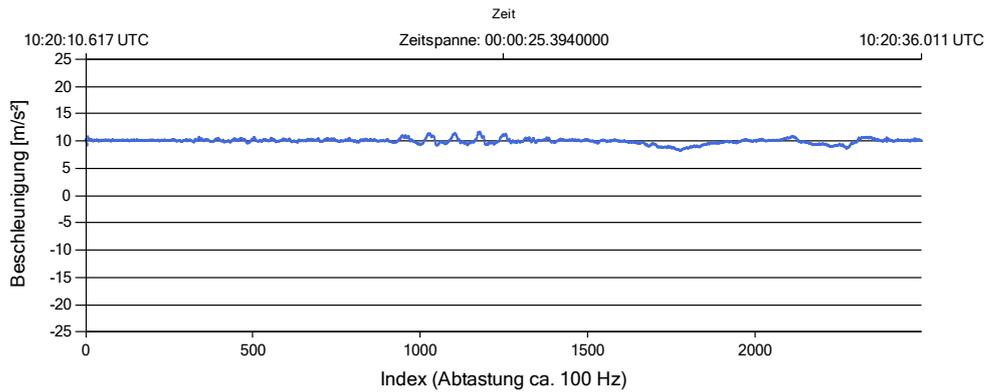
(b) Beschleunigungssensor y-Achse



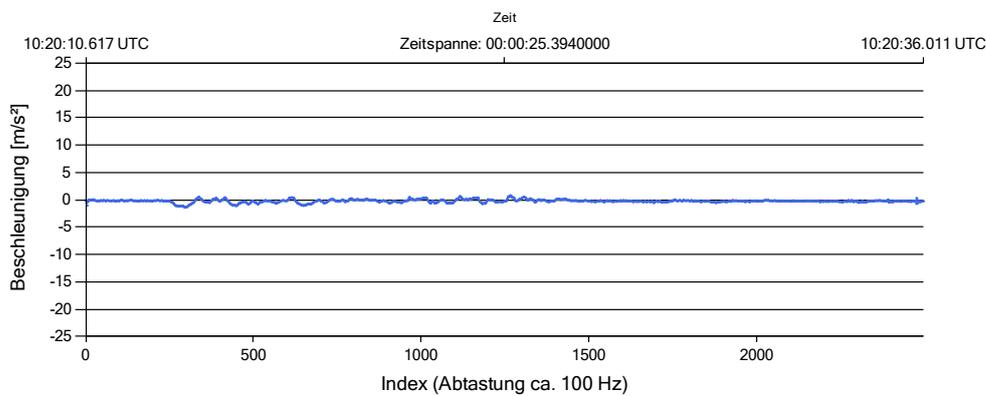
(c) Beschleunigungssensor z-Achse

Abbildung 7.9: Beschleunigungssensor: x-, y- und z-Achse; ca. 1 min. Einsatz eines mobil-pedestrisches GeoARS unter realen Bedingungen (vgl. Anhang B.2.1)

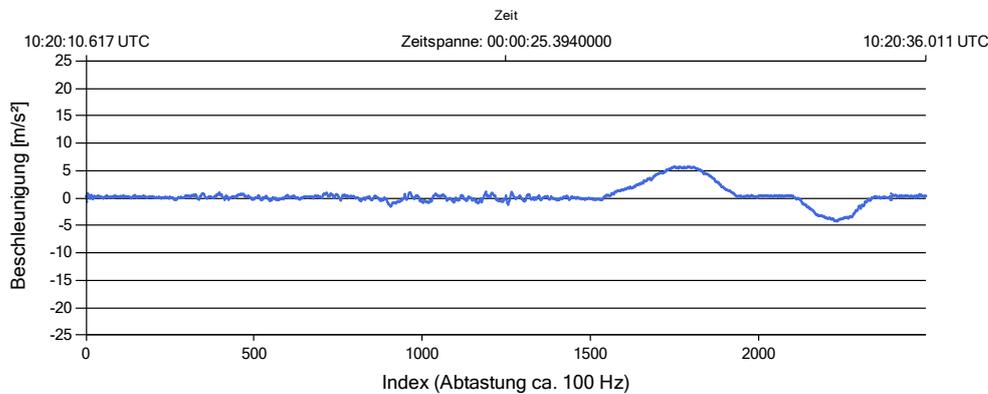
In einer zweiten Untersuchung soll eine zügige Anwenderbewegung bei der Nutzung eines mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger kontinuierlicher **visueller Rückkopplung** durchgeführt werden und dabei beobachtet werden, welche Beschleunigungen hierbei auftreten.



(a) Beschleunigungssensor x-Achse



(b) Beschleunigungssensor y-Achse



(c) Beschleunigungssensor z-Achse

Abbildung 7.10: Beschleunigungssensor: x-, y- und z-Achse; zügige Drehung und Schwenkung eines mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer (vgl. Anhang B.2.2)

Bei dieser Untersuchung hält der Nutzer das mobil-pedestrische AR-System in einer Hand führend im Leseabstand vor dem Gesichtsfeld. Es erfolgt eine Drehung von 360° um die eigene Achse des Nutzers im Uhrzeigersinn. Anschließend geht der Nutzer etwa 3 m geradeaus, bleibt dann stehen und schwenkt das System aus der Waagerechten heraus zunächst schräg nach unten und danach schräg nach oben und anschließend wieder in die Waagerechte. Abbildung 7.10 zeigt die resultierenden Messwerte. Es wird deutlich, dass beim zügigen horizontalen Drehen/Schwenken um die eigene vertikale Achse des Nutzers eines in der

Hand und vor dem Gesicht gehaltenen mobil-pedestrischen AR-Systems bei gleichzeitiger kontinuierlicher visueller Rückkopplung Beschleunigungen von maximal ca. 12 m/s^2 bzw. ca. 1.2 g auftreten, sodass daraus ebenfalls ein optimaler Meßbereich von $\pm 2 \text{ g}$ resultiert. Beim zügigen vertikalen Drehen/Schwenken (Nick-Bewegung) treten Beschleunigungen von ca. 5.80 m/s^2 bzw. ca. 0.6 g und bei Roll-Bewegungen von maximal ca. 1.39 m/s^2 bzw. ca. 0.1 g auf. Es ist zudem festzustellen, dass für Nick- und Roll-Bewegungen die horizontalen Achsen (y-Achse und z-Achse) empfindlicher als die vertikale Achse (x-Achse) sind.

In der dritten Untersuchung für mobil-pedestrische GeoARS ist beabsichtigt, **aufretende Beschleunigungen bei einer von der Normalnutzung abweichenden Bewegung des Benutzers** zu ermitteln. Abbildung 7.11 zeigt einen exemplarischen Versuch, bei dem die typische Bewegung des Benutzers ausgeführt wird, wenn das mobil-pedestrische GeoARS von einer Nutzungs- in eine konkrete temporäre Nichtnutzungsphase überführt wird. Die Nutzungshaltung zeichnet sich dadurch aus, dass das GeoARS mit mindestens einer Hand führend im Leseabstand vor das Gesichtsfeld gehalten wird. Die Haltung der Nichtnutzungsphase ist durch eine für den Nutzer entspannte Haltung gekennzeichnet. Hierbei ist der Arm des Nutzers näherungsweise senkrecht nach unten gerichtet, wobei sich das System in der Hand des Nutzers befindet. Abbildung zeigt eine dreimalige Wiederholung dieses Vorgangs. Beim Herunternehmen eines in der Hand gehaltenen Systems treten höhere Beschleunigungen mit einem Betrag von maximal $\approx 25 \text{ m/s}^2$ bzw. ca. $\approx 2.5 \text{ g}$ auf, als während der explorativen Normalnutzung, wodurch die Einstellung eines höheren Messbereiches z.B. $\pm 4 \text{ g}$ notwendig wird.

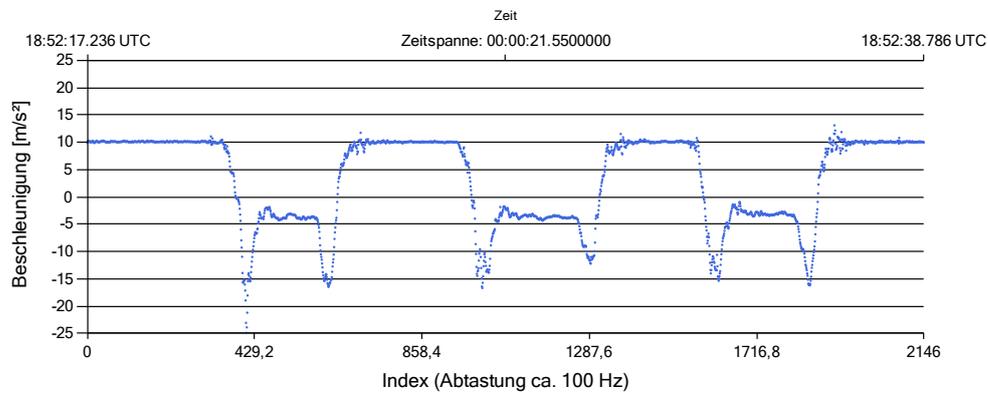
In weiteren Versuchen wurden die Beschleunigungen natürlicher Bewegungen des Unterarmes mit maximal $18.4 \text{ m/s}^2 \approx 2 \text{ g}$ und maximale Beschleunigungen durch heftiges Schütteln des Sensors mit $39.3 \text{ m/s}^2 \approx 4 \text{ g}$ bestimmt.

Motorische **stationäre Systeme** stehen überwiegend und insbesondere für den Zeitpunkt einer Punktmessung bei gleichzeitiger Visualisierung völlig still. Inertielle Beschleunigungen treten hier nicht auf, sodass die einzig wirksame Beschleunigung die Schwerebeschleunigung in Ruhelage ist.

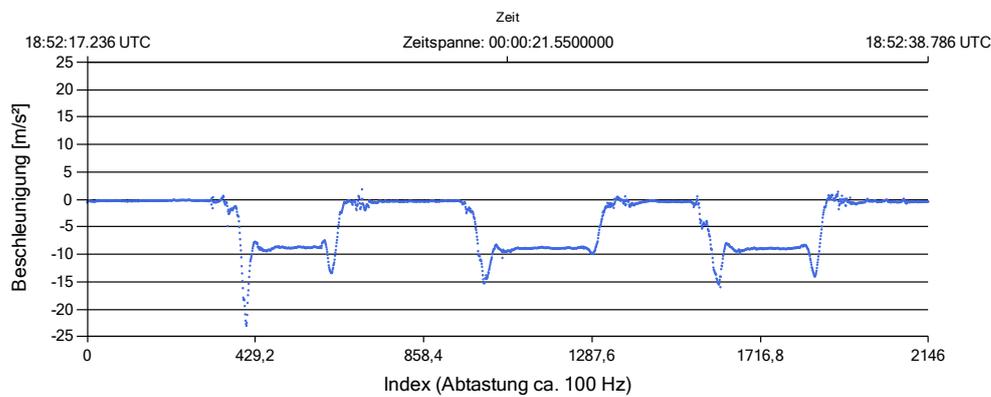
Abbildung 7.12 zeigt hierzu die Messwerte eines Beschleunigungssensors in absoluter Ruhelage in genähert horizontaler Position. Die Standardabweichung einer Beobachtung der zweistündigen Messung beträgt für alle Achsen durchschnittlich etwa $\pm 0.023 \text{ m/s}^2$, wobei ca. 4.3 % der Messwerte f2-Ausreißer und 0.2 % der Messwerte f3-Ausreißer (Definition vgl. Anhang A) sind.

Für weitere Details zu den Untersuchungen wird auf den Anhang B.2 verwiesen.

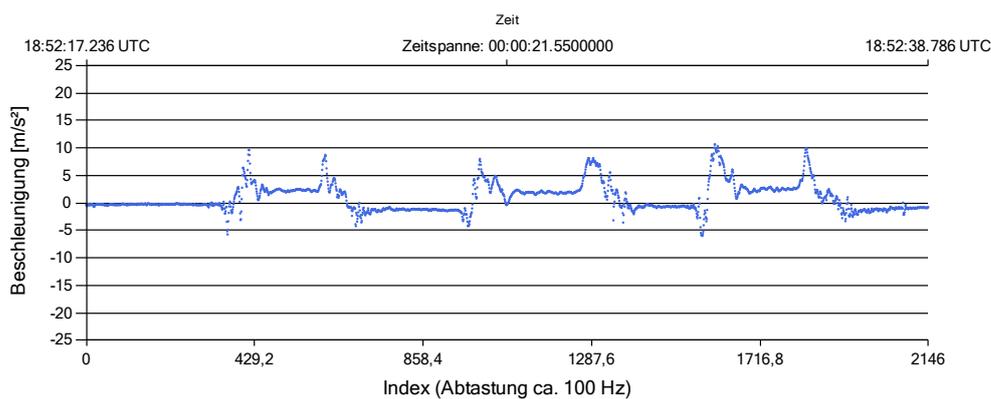
Für die Auswahl geeigneter Beschleunigungssensoren im avisierten AR-Anwendungsbereich ist die Frage nach der **Arbeitsweise** bzw. dem Verhalten kostengünstiger Beschleunigungssensoren und die Frage nach der (geo)**metrischen Genauigkeit** zu beantworten. Hierbei sollen insbesondere das Auflösungsvermögen des Analog-Digital-Wandlers und die Wahl des Empfindlichkeitsbereiches, die sich beide direkt auf die mögliche Genauigkeit auswirken, betrachtet werden.



(a) Beschleunigungssensor x-Achse

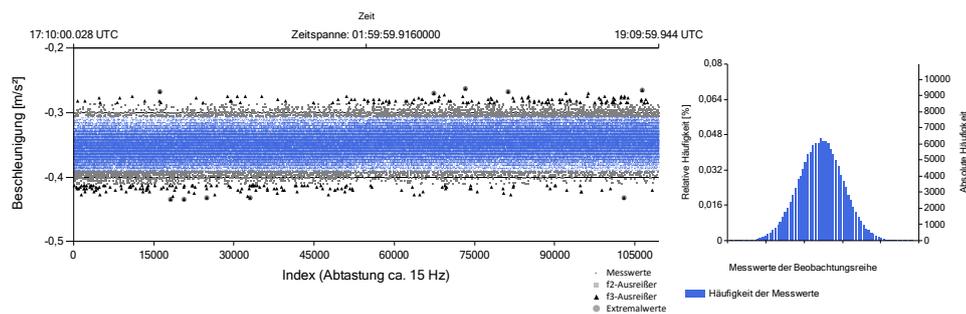


(b) Beschleunigungssensor y-Achse

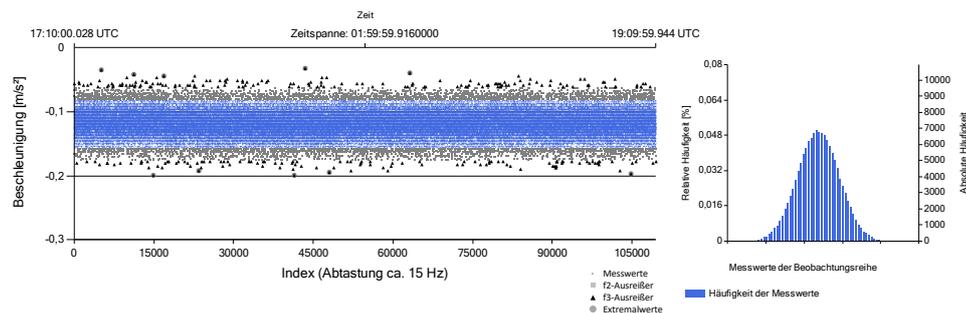


(c) Beschleunigungssensor z-Achse

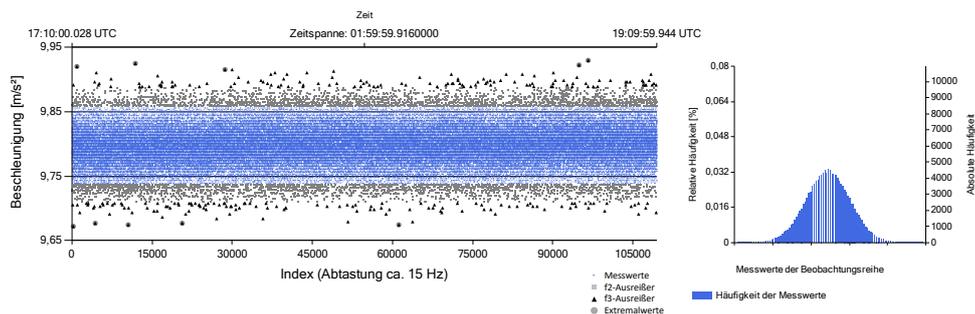
Abbildung 7.11: Beschleunigungssensor: x-, y- und z-Achse; Überführung mobil-pedestrisches AR-System von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung (vgl. Anhang B.2.3)



(a) Beschleunigungssensor x-Achse



(b) Beschleunigungssensor y-Achse



(c) Beschleunigungssensor z-Achse

Abbildung 7.12: Beschleunigungssensor: x-, y- und z-Achse; Sensor in Ruhelage (vgl. Anhang B.2.4)

Alle in dieser Arbeit verwendeten Beschleunigungssensoren, vgl. Tabelle 7.6, sind handelsübliche kostenkünstige MEMS-Beschleunigungssensoren, die das Auslenkungsprinzip mit einer kapazitiven Wandlungsform verwenden. Das Funktionsprinzip basiert auf der messbaren Auslenkung einer Probemasse, vgl. [Wild-Pfeiffer 2015].

Hierbei wird die auf eine Prüfmasse wirkende Trägheitskraft bestimmt, indem die Auslenkungen einer auf Federn (meistens Silizium-Strukturen) befestigten Prüfmasse bestimmt wird. Die Trägheitskraft der Masse wirkt dabei der Federkraft entgegen. Mit der bekannten Federkraft stellt die Auslenkung ein Maß für die Trägheitskraft dar. Aus dem zweiten Newton'schen Gesetz folgt für die Trägheitskraft, vgl. u.a. [Titterton u. Weston 2004]:

$$F = m \cdot a \quad (7.4)$$

- F : Kraft

- m : Masse
- a : Beschleunigung

bzw. für die Federkraft

$$F = k \cdot \Delta l \quad (7.5)$$

- F : Federkraft
- k : Federkonstante
- Δl : Auslenkung.

Durch Gleichsetzen beider Kräfte aus Gleichung (7.4 und (7.5) folgt nach Wild-Pfeiffer [2015]:

$$a = \frac{k}{m} \cdot \Delta l. \quad (7.6)$$

Die vorgenannten Gleichungen sind zunächst in dieser Form noch nicht für die Aufgaben in GeoARS verwendbar, da die Messungen im Schwerfeld der Erde durchgeführt werden. Hierbei messen Beschleunigungssensoren in Anwesenheit von Gravitation eine Beschleunigung f , nachfolgend als **spezifische Kraft** bezeichnet, die sich aus einem **kinematischen (inertiellen) Beschleunigungsanteil** (a) und einem durch die **Schwerkraft hervorgerufenen Beschleunigungsanteil** (g) zusammensetzt – die jedoch mit unterschiedlichen Vorzeichen wirken. Damit muss die Gleichung (7.4) nach Titterton u. Weston [2004] erweitert werden zu:

$$F = m \cdot a = m \cdot f + m \cdot g. \quad (7.7)$$

Daraus folgt:

$$a = f + g \quad (7.8)$$

beziehungsweise nach Umstellung

$$f = a - g \quad (7.9)$$

die sogenannte Navigationsgleichung, vgl. [Titterton u. Weston 2004], die später in Abschnitt 7.12.3 als Grundgleichung der Inertialgeodäsie im inertialen Koordinatensystem eingeführt und für die Positionsberechnung ohne GNSS-Sensormodul im Rahmen von GeoARS verwendet wird

$$\mathbf{f}^i = \mathbf{\ddot{x}}^i - \mathbf{G}^i. \quad (7.10)$$

Für GeoARS nimmt die (genäherte) Ruhelage – zur Messung oder Betrachtung von Geodaten – eine besonders wichtige Stellung ein, womit sich bei $a = 0$ aus Gleichung (7.9)

$$f = -g \quad (7.11)$$

ergibt.

Statt für jede Raumrichtung drei einzelne Beschleunigungssensoren zu verwenden, werden regelmäßig dreiaxige Beschleunigungssensoren eingesetzt, deren Achsen orthogonal zueinander stehen und als ein Tripel von Beschleunigungsmesswerten (f_x, f_y, f_z) seitens des Sensors als Messwert-Komponenten bereitgestellt werden. Alle in dieser Arbeit untersuchten Beschleunigungssensoren sind **dreiaxige Beschleunigungssensoren**.

Damit lässt sich die Gleichung (7.9) unter Einbeziehung des Messwertetripels in der Komponentendarstellung [Bronstein u. a. 2015] formulieren:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix}. \quad (7.12)$$

Richtet man einen dreiachsigen Beschleunigungssensor so aus, dass zwei Achsen entlang der Horizontalen und die dritte Achse entlang der lokalen Lotrichtung verlaufen, so ergibt sich (unter Vernachlässigung der Schein- bzw. Störbeschleunigungen) für die beiden horizontalen Achsen $f_x = f_y \approx 0.0$ und für die vertikale Achse $f_z = g$:

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \approx 0.0 \\ \approx 0.0 \\ g \end{pmatrix}. \quad (7.13)$$

Der Messwert g stellt hierbei die resultierende Beschleunigung der Kraft dar, die den Beschleunigungssensor auf seiner Position entgegen der Schwerebeschleunigung der Erde hält. Der Betrag der Schwerebeschleunigung ist jedoch orts- und zeitvariabel und kann daher nicht als Konstante im Rahmen von GeoARS verwendet werden. Im System WGS84 lässt sie sich mit den gegebenen Systemparametern berechnen (vgl. Abschnitt 3.6.2.2) und beträgt am Äquator ca. 9.764 m/s^2 und an den Polen ca. 9.798 m/s^2 ; Differenz ca. 0.034 m/s^2 .

Wird der Beschleunigungssensor leicht geneigt, sodass die z-Achse nicht mehr exakt in der Lotlinie ausgerichtet ist, so wird die Schwerebeschleunigung anteilig auf die beiden vormals horizontalen Achsen projiziert. Dieser Effekt wird später für die Berechnung der Neigung (Nick- und Rollwinkel) des GeoARS ausgenutzt, vgl. Abschnitt 7.12.1.

Zu den nachfolgenden Überlegungen sollen Aussagen zur (geo)metrischen Genauigkeit angestellt werden. Hierfür wird zunächst die kleinste messbare Beschleunigung eines Beschleunigungssensors betrachtet. Aus dem Vorgenannten lässt sich zunächst feststellen, dass sie sich direkt auf den kleinsten messbaren Neigungswinkel auswirkt. Die kleinste messbare Beschleunigungsänderung einer Achse des Beschleunigungssensors MPU-6500 (vgl. Tabelle 7.6) beträgt nach Gleichung (7.1) für den $\pm 4 \text{ g}$ Messbereich $\frac{1}{8192} \text{ g/LSB}$. In Anlehnung an [Farrell 2008] und [Aggarwal u. a. 2010] steht der gemessene Beschleunigungswert und der Neigungswinkel α in folgendem Zusammenhang:

$$a = 1 \text{ g} \cdot \sin(\alpha) \rightarrow f = 1 \text{ g} \cdot \sin(\alpha), \quad (7.14)$$

sodass sich nach Umstellung der Gleichung mit $f_{\min} = \frac{1 \text{ g}}{8192} \approx 0.0001 \text{ g} \approx 0.001 \text{ m/s}^2$

$$\alpha_{\min} = \arcsin\left(\frac{1}{8192}\right) \approx 0.000122 \approx 0.007^\circ \quad (7.15)$$

ergibt. Daraus lässt sich die (geo)metrische Genauigkeit eines GeoARS (unter Verwendung dieses Sensors) für einer Distanz (d) von 100 m mit

$$\Delta q = d \cdot \sin(\alpha_{\min}) \rightarrow \Delta q_{100\text{m}} \approx \pm 0.012 \text{ m} \quad (7.16)$$

die theoretische Auflösung abschätzen, mit der Geoobjekte mit einer **Querabweichung** Δq von ca. $\pm 0.012 \text{ m}$ erfasst bzw. visualisiert werden können. Im Vergleich dazu ergibt sich für die kleinste messbare Beschleuni-

gungsänderung einer Achse des (ungenaueren) Beschleunigungssensors MMA7455L (vgl. Tabelle 7.6) mit $\alpha = 1.8^\circ$ eine Genauigkeit in der Querabweichung von ca. $\pm 3.1 m$.

Die Standardabweichung der Beschleunigungssensormesswerte (vgl. oben, Abbildung 7.12) ruft ebenfalls einen geometrischen Lagefehler hervor. Den Gleichungen ab (7.14) folgend, ergibt sich hier für den Beschleunigungssensors MPU-6500 mit der ermittelten Standardabweichung von $\pm 0.023 m/s^2$ ($\approx 0.0023 g$) eine **zusätzliche Querabweichung** von $\Delta q \approx \pm 0.2 m$ in einer Entfernung von $100 m$. Diese Aussage wird durch Farrell [2008] gestützt, wonach $1 mg$ Sensorrauschen zu einem Fehler von $1 mrad$ führt. Dadurch beträgt die resultierende Querabweichung etwa das Zwanzigfache der theoretisch erreichbaren Genauigkeit aus Gleichung (7.15) und (7.16) und eine praktisch erreichbare Genauigkeit der Neigungswinkel von ca. $\pm 0.2^\circ$.

Je nach Genauigkeitsanforderung der AR-Anwendung kann auf dem gezeigten Weg ein Kriterium für die geeignete Sensorauswahl gefunden werden.

7.7.2 Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System

In den durchgeführten Untersuchungen wurden einerseits die Bereiche und Größenordnungen der zu erwartenden Beschleunigungen für eine GeoARS-Nutzung erarbeitet und andererseits untersucht, ob die Messbereiche der Beschleunigungssensoren die zu erwartenden Beschleunigungen abdecken bzw. welcher Messbereich für GeoARS am Beschleunigungssensor einzustellen ist. Tabelle 7.7 fasst zunächst die zu erwartenden Beschleunigungen bei GeoARS zusammen. Es kann festgestellt werden, dass die Messbereiche

Tabelle 7.7: Beschleunigungen in GeoARS

Handlung	max. Beschleunigung	Systemart
Exploration in Feld-Umgebung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung, $< 3km/h$	$\approx 15 m/s^2$	mobil-pedestrisch
Exploration mit kontinuierlicher visueller Rückkopplung	$\approx 12 m/s^2$	mobil-pedestrisch
zügiges Senken des AR-Systems	$\approx 25 m/s^2$	mobil-pedestrisch
Auftreten eines außergewöhnlichen Ereignisses (z.B. Herunterfallen, Stolpern)	$\approx 20 m/s^2 - \approx 40 m/s^2$	mobil-pedestrisch
Bewegung um vertikale/horizontale Achse	$\pm g$	stationär

der Beschleunigungssensoren grundsätzlich die zu erwartenden Beschleunigungen abdecken. Die Wahl des Messbereiches hängt stark von der jeweiligen Anwendung und den dabei zu erwartenden Beschleunigungen ab. Es kann jedoch pauschalisiert die Aussage getroffen werden, dass für mobil-pedestrische GeoARS ein Messbereich ab $\pm 4 g$ und für stationäre GeoARS in Abhängigkeit der Gesamtmechanik ein Messbereich von nicht größer als $\pm 1 g$ empfohlen wird, um höchstmögliche Sensitivität zu erzielen. Alle einbezogenen Beschleunigungssensoren erfüllen diese Kriterien. Der Messbereich ist grundsätzlich je nach GeoARS-Anwendung spezifisch festzulegen.

In eigenen Versuchsreihen wurde ermittelt, dass die Bewegung der Anwender bei der Navigation mit mobil-pedestrischen AR-Systemen (Erkunden oder Suchen in einer Feld-Umgebung mit nichtkontinuierlicher visueller Rückkopplung) mit einer Geschwindigkeit von ca. $2-3 km/h$ erfolgt (häufiges Stehenbleiben) und durch Beschleunigungen um die eigene Körperachse (vertikale sowie horizontale Schwenkbewegungen) von regelmäßig unter $\approx 15 m/s^2$ gekennzeichnet ist. Für Nutzungszeiten des GeoARS mit kontinuierlicher visueller

Rückkopplung sind die Beschleunigungen nur unwesentlich kleiner und liegen bei einer Größenordnung $\approx 12 m/s^2$. Beim zügigen Senken eines mobil-pedestrischen Systems aus der Anwendungsposition (vor dem Gesicht gehalten) treten höhere Beschleunigungen mit $\approx 25 m/s^2$ auf und erfordern somit bereits den Messbereich von $\pm 4 g$. In weiteren Versuchen wurde durch heftiges Schütteln eines AR-System die Obergrenze des $\pm 4 g$ -Arbeitsbereich mit Beschleunigungen von $\approx 40 m/s^2$ erreicht. Diese Maxima zählen nicht zum Arbeitsbereich während der GeoARS-Nutzung und können lediglich in Extremsituationen auftreten (z.B. Herunterfallen eines Gerätes). Die Sensorkonzeption des GeoARS sollte diese Ausnahme in geeigneter Weise berücksichtigen.

Für stationäre GeoARS sind die auftretenden maximalen Beschleunigungen in Abhängigkeit von Motorleistung und Getriebe systemseitig fest einstellbar und daher kalkulierbar. Zudem befinden sie sich überwiegend und insbesondere für den Zeitpunkt einer Punktmessung sowie Visualisierung der Geodaten in Ruhelage. Inertielle Beschleunigungen treten hier nicht auf, sodass die einzig wirksame Beschleunigung die Schwerebeschleunigung in Ruhelage ist und ein Messbereich von $\pm 1 g$ verwendet werden kann. Dadurch wird eine optimale Empfindlichkeit erreicht.

Die Konzeption von GeoARS sollte ebenfalls die eingangs genannten Fehler-Aspekte der Beschleunigungssensoren berücksichtigen und avisierte Sensoren grundsätzlich möglichst kleine Beträge der Fehlerparameter aufweisen.

Für die in Abschnitt 7.12.2 vorgestellten Navigationsverfahren ist der Beschleunigungssensor von essentieller Bedeutung, da er maßgeblich an der Berechnung von Nick-, Rollwinkel sowie unter Anwendung der Integrationsverfahren an der Berechnung von Geschwindigkeiten und Positionen von GeoARS beteiligt ist.

Insgesamt sind Beschleunigungssensoren mit den oben genannten Erkenntnissen geeignet, um grundsätzlich für verschiedenartige Aufgaben innerhalb eines GeoARS eingesetzt werden zu können, z.B.:

- Berechnung des Nickwinkels, vgl. Abschnitt 7.12.1
- Berechnung des Rollwinkels, vgl. Abschnitt 7.12.1
- als Detektor für außergewöhnliche Ereignisse („GeoARS-Unfallaufnahme“: Gerät/Stativ wird durch Fremdeinwirkung versetzt, weitere Messungen wären unbrauchbar)
- Einbeziehung in die Bestimmung des Gierwinkels in Verbindung mit dem Magnetfeldsensor, vgl. Abschnitt 7.8
- für sehr kurze Zeiträume zur Navigation und Positionierung, vgl. Abschnitt 7.12.2/7.12.5.

7.8 Magnetfeldsensor

Nach GFZ [2016c], Janle u. Schulz [2003], Lowes [2010] sowie Knödel u. a. [2005] wird das inhomogene zeitlich variable Magnetfeld der Erde dominierend durch dynamische Prozesse im äußeren Erdkern, dem Hauptfeld, erzeugt und kann näherungsweise als magnetisches Dipolfeld betrachtet werden. Das Hauptfeld ist der erste Bestandteil des sogenannten internen Feldes. Die Achse des Feldes weist aktuell eine Abweichung von etwa 10° zur Rotationsachse der Erde auf und führt zu einer Abweichung von geographischer und magnetischer Nordrichtung. Die Stärke des Erdmagnetfeldes wird in der Einheit Tesla (T) angegeben und beschreibt die magnetische Flussdichte, die sich proportional zur Feldstärke verhält. Das Erdmagnetfeld ist, wie noch erläutert wird, in mehrfacher Hinsicht zeitlichen Änderungen unterworfen. Der Beitrag des auf

der Erdoberfläche messbaren Hauptfeldes am gesamten Erdmagnetfeld wird mit ca. 90 % (bis zu 70.000 nT) beziffert und ist langsamen Änderungen unterworfen (Säkularvariation). Darüber hinaus tragen weitere Komponenten, wie magnetische Gesteine der Erdkruste (Krustenfeld, zweiter Bestandteil des internen Feldes, Beitrag 10 – wenige 100 nT), elektrische Ströme in der Ionosphäre (Tagesgang) und Magnetosphäre (einige nT bis einige Tausend nT) sowie elektromagnetisch im Erdboden (10 – wenige 100 nT) und den Ozeanen (wenige nT) induzierte Felder zum gesamten Erdmagnetfeld bei. Die außerhalb der Erde erzeugten Feldanteile werden als externe Anteile bezeichnet. Bei Messungen auf der Erdoberfläche enthalten die Messwerte somit Überlagerungen von Magnetfeldern unterschiedlichen Ursprungs.

Die nachfolgenden Überlegungen dienen dazu, die vorgenannten Aussagen zusammenzufassen und die Orts- und Zeitabhängigkeit der Feldkomponenten in Bezug auf GeoARS abzuschätzen.

Tabelle 7.8: Orts- und Zeitabhängigkeit der Erdmagnetfeldanteile in Bezug auf einen GeoARS-Einsatz

Teilfeld	Größenordnung Magnetfeldstärke im Regelfall [nT]	ortsabhängig für GeoARS	zeitabhängig für GeoARS
Hauptfeld	10 ⁴	●	○
Krustenfeld	10 ²	●	○
externes Feld	10 ¹	●	●

● ≙ ja | ○ ≙ nein

Hierzu wird zunächst angenommen, dass die Dauer eines GeoARS-Einsatzes nicht mehr als drei Stunden und die avisierte Gebietsdimension (Reichweite, Einsatzbereich) für mobil-pedestrische Systeme maximal 1500 m × 1500 m sowie für stationäre GeoARS maximal 500 m × 500 m beträgt.

Das **Hauptfeld** weist im Normalfall Totalintensitäten (F) von etwa 25.000 nT am Äquator sowie bis etwa 70.000 nT an den Polen auf und ist damit als ortsabhängig einzustufen. Die zeitliche Änderung des Hauptfeldes (Säkularvariation) geht so langsam vor sich (mehrere Jahre), dass es für den Zeitraum eines GeoARS-Einsatzes als zeitlich konstant eingestuft werden kann.

Der Anteil des **Krustenfeldes** ist mit einem etwa zwei Zehnerpotenzen geringeren Beitrag am Gesamtbetrag des Magnetfeldes beteiligt und für das kleinräumige AR-Einsatzgebiet als zeitlich konstant zu betrachten. Das Krustenfeld weist für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland einen Anteil in der Größenordnung von bis zu wenigen 100 nT [Korte u. Thébaud 2007] auf, kann jedoch weltweit wenige Tausend Nanotesla betragen [GFZ 2016c] und ist somit ebenfalls als ortsabhängig zu betrachten.

Die **externen Anteile** werden nach GFZ [2016d] für mittlere Breiten mit ca. 20 nT angegeben. Mit wenigen zehn oder hundert Nanotesla ist die Auswirkung gegenüber dem Hauptfeld im Normalfall als gering einzustufen. Sie sind jedoch stark von der Sonnenaktivität abhängig, können sich bei Auftreten magnetischer Stürme auf einen vielfachen Wert erhöhen und sind kurzfristigen zyklischen und zufälligen Änderungen unterworfen und damit zeitvariant, vgl. [Janle u. Schulz 2003].

Tabelle 7.8 fasst die vorstehenden Aussagen zusammen. Insgesamt ist die Abschätzung jedoch eine starke Verallgemeinerung der von Ausnahmen geprägten und im Allgemeinen schwer trennbaren Magnetfeldanteile.

7.8.1 Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik

In den geowissenschaftlichen Disziplinen werden die Messwerte von Magnetfeldsensoren in der Regel im Nanoteslabereich angegeben, wohingegen im Kontext der GeoARS aufgrund der reduzierten Genauigkeit in der Einheit Mikrottesla formuliert wird.

Die in dieser Arbeit verwendeten Magnetfeldsensoren nutzen den Hall-Effekt. Sie zeichnen sich durch gute Linearität, Richtungsempfindlichkeit, Langlebigkeit/Robustheit (keine beweglichen Teile) und einen ausgedehnten Temperatureinsatzbereich aus; jedoch besitzen sie grundsätzlich auch eine eingeschränkte Empfindlichkeit und Temperaturstabilität gegenüber anderen Magnetfeldsensorarten, wie z.B. induktive oder magnetoresistive Sensoren, vgl. [Michalowsky 2006], [Honeywell 1998], [Glück 2005], [Kohlrausch 2012].

Tabelle 7.9: Parameter der in die Untersuchung zu GeoARS einbezogenen Magnetfeldsensoren

Bezeichnung	Größe [mm ³]	Art	±Messbereich [μT]	Linearität [%Messbereich]	Bit-Tiefe	Auflösung [μT/LSB]	Temperaturbereich [C°]
AK8975	4.0×4.0×0.75	Hall	1229	\	13	0.30	-30/+85
AK8975C	2.0×2.0×0.60	Hall	2000	\	16	0.06	-30/+85
AK8963	3.0×3.0×0.75	Hall	4912	\	16	0.15	-30/+85
BMC150	2.2×2.2×0.95	Hall	1300	<1.0	13	0.30	-40/+85
			2500	<1.0	15	0.30	-40/+85
BMM150	1.6×1.6×0.60	Hall	1300	<1.0	13	0.30	-40/+85
			2500	<1.0	15	0.30	-40/+85

\ ≙ nicht verfügbar

Tabelle 7.9 kann entnommen werden, dass bei den Magnetfeldsensoren A/D-Wandler mit einer Bit-Tiefe von 13 bit bis 16 bit eingesetzt und Messbereiche von ±1200 μT bis ±4912 μT abgedeckt werden. Die Auflösung der Sensoren (nach Gleichung (7.1)) liegt zwischen 0.06 μT/LSB und 0.3 μT/LSB.

Um einerseits aus den Messwerten des Magnetfeldsensors den Gierwinkel ψ eines GeoARS zu berechnen und andererseits eine Möglichkeit zur Abschätzung der Genauigkeit der Magnetfeldsensoren zu erhalten, wird nachfolgend eine geeignete Gleichung entwickelt.

Über zwei senkrecht zueinander angeordnete horizontale Komponenten (x nach Norden, y nach Osten) sowie die senkrecht zu dieser Ebene verlaufende z-Komponente (vertikal nach unten) lässt sich das Magnetfeld an jedem Ort auf der Erdoberfläche (m-System, vgl. Abschnitt 3.6.2.6 und Anhang C) beschreiben und mit Magnetfeldsensoren messen. Die regelmäßig in GeoARS eingesetzten dreiachsigen Magnetfeldsensoren liefern Messwerte im Mikrottesla-Bereich ($10^{-6}T$) und sind dabei etwa drei Zehnerpotenzen ungenauer, als die in den Geowissenschaften eingesetzten Sensoren.

Überträgt man den geometrischen Ansatz der Abbildung 7.26 (S.147) auf die Magnetfeldthematik, so lässt sich daraus zunächst der Gierwinkel ψ_0 nach

$$\psi_0 = \arctan \frac{y}{x} \quad (7.17)$$

berechnen, vgl. auch [Caruso 2000]. Entscheidend ist die Verwendung der beiden horizontalen Achsen, denn je nach verwendeter Trägerplattform kann die Orientierung des Magnetfeldsensors und damit auch die Ausrichtung der Achsen variieren. Aus der Abbildung 7.26 und Gleichung (7.17) wird deutlich, dass zunächst die x- und y-Achsen (x-y-Ebene) zur Berechnung von ψ notwendig sind, was gleichzeitig dazu führt, dass bei Neigungen des Systems gegenüber der Horizontalen der horizontale Erdmagnetfeldanteil anteilig auf die vertikale Achse abgebildet wird. Aus diesem Grund muss die obige Gleichung erweitert und die Neigung und Kantung des GeoARS beachtet werden. Mit Hilfe der im Anhang D.1 definierten Rotationsmatrizen kann die Ausrichtung von Erdmagnetfeld und GeoARS miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Nach Farrell [2008] und Ozyagcilar [2013] stehen der Magnetfeldvektor im körperfesten System (b-System) \mathbf{m}^b und im Navigationssystem \mathbf{m}^n (n-System) allgemein über die drei Elementardrehungen in Verbindung:

$$\mathbf{m}^b = R_x(\phi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi^m) \mathbf{m}^n \quad (7.18)$$

wobei $R_z(\psi^m)$ noch um den oberen Index m erweitert wird, um zu verdeutlichen, dass es sich um den Gierwinkel bezogen auf das detektierte Erdmagnetfeld, d.h. zunächst ohne Beachtung der Deklination, handelt. Selbst bei vollständiger horizontaler Lage des GeoARS (vertikale Komponente zeigt entlang der Lotrichtung) wird regelmäßig eine Inklination i des Magnetfeldes am jeweiligen Standort vorliegen ($i \neq 0$). Nimmt man die y-Achse als Rotationsachse hinsichtlich der Inklination an, so ergibt sich als Zusammenhang von i und \mathbf{m}^n :

$$\mathbf{m}^n = \begin{pmatrix} \cos i \\ 0 \\ \sin i \end{pmatrix}. \quad (7.19)$$

Mit den Inversen $R_x^{-1}(\phi)$ und $R_y^{-1}(\theta)$ erhält man

$$R_y^{-1}(\theta) R_x^{-1}(\phi) \mathbf{m}^b = R_z(\psi^m) \mathbf{m}^n, \quad (7.20)$$

bzw. aufgrund der im Anhang D.1 beschriebenen Orthogonalität der Drehmatrizen

$$R_y^T(\theta) R_x^T(\phi) \mathbf{m}^b = R_z(\psi^m) \mathbf{m}^n. \quad (7.21)$$

Es ergibt sich für den rechten Teil der Gleichung:

$$R_z(\psi^m) \mathbf{m}^n = \begin{pmatrix} \cos \psi^m & \sin \psi^m & 0 \\ -\sin \psi^m & \cos \psi^m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{m}^n = \begin{pmatrix} \cos \psi^m & \sin \psi^m & 0 \\ -\sin \psi^m & \cos \psi^m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos i \\ 0 \\ \sin i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi^m \cdot \cos i \\ -\sin \psi^m \cdot \cos i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7.22)$$

und für den linken Teil, nach Anhang D.1:

$$R_y^T(\theta) R_x^T(\phi) \mathbf{m}^b = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \mathbf{m}^b. \quad (7.23)$$

Für das gesamte Gleichungssystem erhält man die Zusammenfassung:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \mathbf{m}^b = \begin{pmatrix} \cos \psi^m \cdot \cos i \\ -\sin \psi^m \cdot \cos i \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (7.24)$$

Nach Ausmultiplizieren ergibt sich für die erste Zeile $\cos \theta \mathbf{m}_x^b + \sin \theta \sin \phi \mathbf{m}_y^b + \sin \theta \cos \phi \mathbf{m}_z^b = \cos \psi^m \cdot \cos i$ sowie für die zweite Zeile $-(\sin \theta \mathbf{m}_x^b + \cos \phi \mathbf{m}_y^b - \sin \phi \mathbf{m}_z^b) = \sin \psi^m \cdot \cos i$.

Abschließend erhält man über den Zusammenhang $\frac{\sin \psi^m}{\cos \psi^m} = \tan \psi^m$, unter Wegfall des Inklinationstermes, den auf magnetisch-Nord bezogenen neigungskompensierten Gierwinkel ψ^m des GeoARS:

$$\psi^m = \arctan \frac{\sin \psi^m}{\cos \psi^m} = \arctan \frac{-(\cos \phi \mathbf{m}_y^b - \sin \phi \mathbf{m}_z^b)}{\cos \theta \mathbf{m}_x^b + \sin \theta \sin \phi \mathbf{m}_y^b + \sin \theta \cos \phi \mathbf{m}_z^b}. \quad (7.25)$$

Für praktische Implementierungen ist zu beachten, dass für Nick- und Rollwinkel noch das Vorzeichen zu tauschen ist, da es sich bei beiden Winkeln um Rückdrehungen handelt. Harteiseneffekte sind als Korrekturen gesondert anzubringen.

Den endgültigen Gierwinkel erhält man durch Anbringung der Deklination D (vgl. Anhang C) und unter Beachtung der Quadrantenbeziehungen zu

$$\psi = \psi^m - D. \quad (7.26)$$

Positive Deklinationen bedeuten hierbei eine Abweichung der magnetischen Ausrichtung einer gedachten Magnetnadel nach Osten und negative Werte eine Abweichung nach Westen. Für einen Punkt in Zentraldeutschland mit $\varphi = 51^\circ$ und $\lambda = 10^\circ$ beträgt die Deklination aktuell $\approx 2.5^\circ$.

Die für GeoARS notwendige Genauigkeit eines Magnetfeldsensors lässt sich anhand der Gleichung (7.17) aus dem Verhältnis der Messwerte der beiden horizontalen Achsen des Magnetfeldsensors abschätzen: Wählt man beispielhaft als kleinste Winkeländerung $\delta\psi$ eines GeoARS einen Wert von einer Bogenminute $1' \approx 0.017^\circ$, dann beträgt das Verhältnis zwischen den Intensitäten der beiden beteiligten Horizontalachsen etwa $1/3437$. Somit sollte der Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) eines GeoARS mindestens eine Abtastung von 3437 Stufen pro Achse zur Erreichung der Winkelgenauigkeit von einer Bogenminute ermöglichen. Da sowohl im negativen wie auch im positiven Bereich Messwerte auftreten können, ist die Stufenzahl zu verdoppeln (≈ 6875) und ein A/D-Wandler mit einer Auflösung von mindestens 2^{13} bit notwendig. Für höhere Winkelgenauigkeiten ist eine entsprechend höhere Auflösung erforderlich.

Bei horizontaler Lage eines GeoARS sind für die Berechnung des Gierwinkels, wie gezeigt, in erster Linie die beiden horizontalen Achsen des Magnetfeldsensors beteiligt.

Im folgenden Implementierungsbeispiel sind dies die y- und z-Achse des GeoARS. Abbildung 7.13 zeigt eine Folge von Magnetfeld-Messwerten eines GeoARS (Sensor AK8975C) mit der Blickrichtung nach magnetisch Nord. Nach einer Ruhelage von Messwert 1 bis 90 wird das GeoARS kontinuierlich um insgesamt 25° genähert horizontal im Uhrzeigersinn gedreht. Es kann in diesem Beispiel folgendes beobachtet werden: Die detektierte Feldstärke der einen horizontalen Achse (hier: z-Achse) bleibt genähert konstant bei etwa $-14 \mu T$, während die Feldstärke an der zweiten horizontalen Achse (hier: y-Achse) ab dem Messwert 90 von genähert $0 \mu T$ auf etwa $8 \mu T$ zunimmt. Folglich bewirkt ein Delta des Intensitätsmesswertes der y-Achse (δy) unter Verwendung der Gleichung (7.17) direkt ein Delta des resultierenden Gierwinkels und erlaubt die

Einführung der nachfolgenden Näherungsgleichung zur Abschätzung der Größenordnung der Beziehung von Sensorauflösung und Gierwinkel:

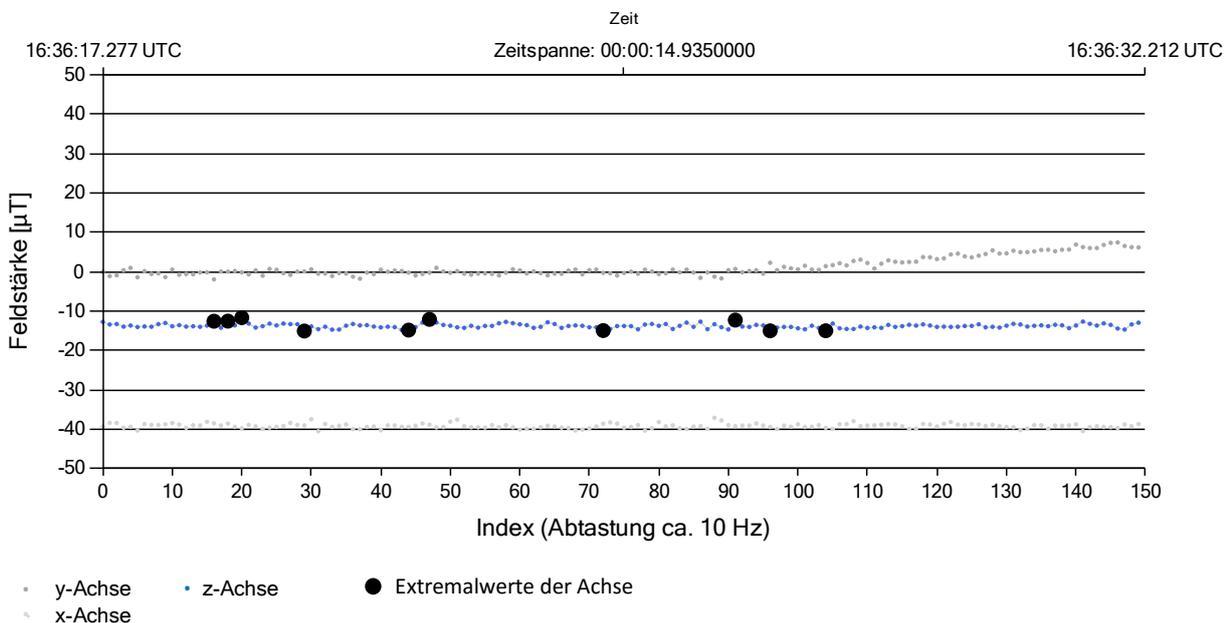


Abbildung 7.13: Magnetfeldsensor: Messwerte bei einer horizontalen Drehung von ca. 25° im Uhrzeigersinn

$$\psi \pm \delta\psi = \arctan \frac{y \pm \delta y}{z} \tag{7.27}$$

Im Ergebnis bewirkt eine kleinste detektierbare Intensitätsänderung $\delta y = \pm 0.06 \mu T$ des Sensors AK8975C (vgl. Tabelle 7.9) eine **resultierende Gierwinkeländerung** von $\delta\psi \approx \pm 0.2^\circ$. Für Objekte in einer Entfernung von 50 m vom GeoARS resultiert daraus eine Lagegenauigkeit in der Querabweichung von etwa $\pm 0.2 m$ für diesen Sensor.

Um das Verhalten von GeoARS mit integrierten Magnetfeldsensoren in einer realen Umwelt über einen längeren Zeitraum beobachten zu können, werden nachfolgend verschiedene Untersuchungen angestellt. Hierzu werden in einer nichtmagnetischen Referenzumgebung im Außenbereich Magnetfeldsensormesswerte an verschiedenen Tagen in Ruhelage beobachtet. Die Beobachtungsdauer beträgt mindestens dreieinhalb Stunden und entspricht damit dem zukünftig avisierten Einsatzzeitraum eines GeoARS. Die ersten 30-60 Minuten sind bei diesen Untersuchungen für die Temperaturanpassung der Hardware reserviert. Weiterhin wird zunächst davon ausgegangen, dass keine signifikanten Magnetfeldänderungen während des Messverlaufes stattfinden und zur Überprüfung die Messwerte der ca. 85 km entfernten Referenzstation des Geomagnetischen Observatoriums Niemegk herangezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.10 zusammengetragen. Es ist ersichtlich, dass die Standardabweichung s_0 der Beobachtungen nach erfolgter Temperaturanpassung zwischen $\pm 0.2 \mu T$ und $\pm 0.4 \mu T$ liegt. Weiterhin geht aus der Tabelle 7.10 hervor, dass etwa 4 – 5 % der Messwerte einen zweifach höheren Wert als die Standardabweichung aufweisen und als Messwert-Ausreißer (vgl. Anhang A) betrachtet werden. Noch einmal etwa 0.2 % der Messwerte weisen eine noch höhere Standardabweichung auf, sodass insgesamt etwa 4.4 – 5.3 % aller Messwerte eine mehr als die zweifache Standardabweichung aufweisen und resultierend den Gierwinkel kurzzeitig verfälschen. Abbildung 7.14 zeigt exemplarisch den Verlauf der Horizontalintensität am Beispiel des Magnetfeldsensors AK8963, vgl. Tabelle 7.10 über einen Zeitraum

Tabelle 7.10: Vergleich der Horizontalintensitäten von Magnetfeldsensoren (nach erfolgter Temperaturanpassung, 30-60min)

Bezeichnung	H^a [μT]	σ_x	s_0 [μT]	f2-Ausreißer [%]	f2- und f3- Ausreißer [%]	H Niemeck [μT]
AK8975	26.202	± 0.003	± 0.4	4.2	4.5	18.900 ± 0.018
AK8975C	18.220	± 0.002	± 0.2	4.2	4.5	18.900 ± 0.015
AK8963	24.216	± 0.003	± 0.3	4.3	4.5	18.900 ± 0.018
BMC150	20.347	± 0.004	± 0.4	4.9	5.1	18.900 ± 0.010
BMM150	23.491	± 0.004	± 0.4	5.0	5.3	18.900 ± 0.015

^aH': genähert horizontal, unkompensiert

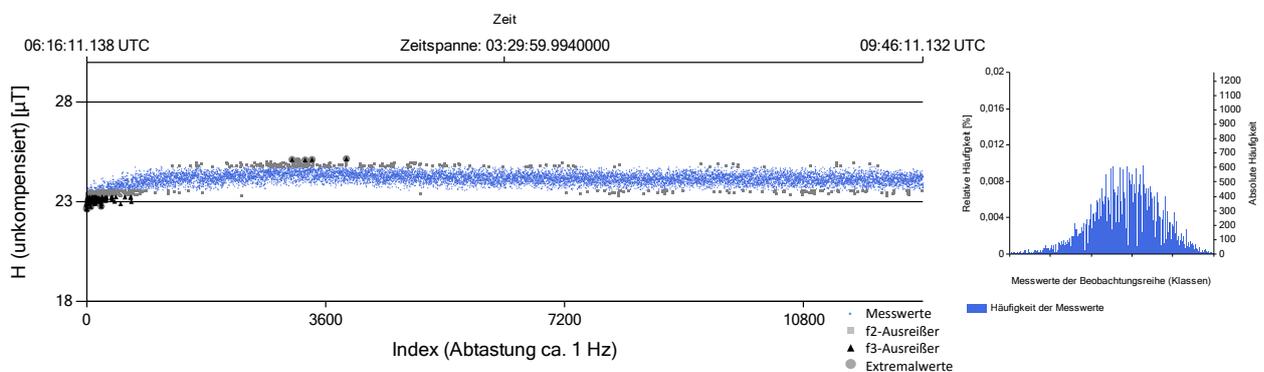


Abbildung 7.14: Magnetfeldsensor: Verlauf der Horizontalintensität; Zeitraum der Messung ca. 3.5 h

von 3.5 Stunden. Darin ist ersichtlich, dass die Temperaturanpassung nach etwa 30 Minuten weitestgehend abgeschlossen ist und die Horizontalintensität in diesem Zeitraum um etwa $1 \mu T$ ansteigt. Insgesamt sind die Messwerte der Beobachtungsreihe genähert normalverteilt, vgl. Histogramm im rechten Teil der Abbildung 7.14. Es wird angenommen, dass sich die Dauer des Anpassungszeitraumes an die Umgebungstemperatur auch maßgeblich nach der Höhe des anzupassenden Temperaturunterschiedes zwischen GeoARS und Umwelt richtet, aber auch weitere Faktoren, wie z.B. das Material des Sensors und der Gerätehardware insgesamt, die Anpassungsdauer beeinflussen können. Abbildung 7.15 gibt den Verlauf des nicht neigungskompensierten Gierwinkels für die ersten 30 min des Messungszeitraumes an. Es ist nahezu kein Anstieg des Gier-Winkels (ca. 0.03°) erkennbar. Das lässt den Schluss zu, dass sich die Temperaturanpassung relativ wenig auf die Berechnung des Gierwinkels aus Magnetfeldsensorwerten auswirkt. Eine Begründung wird darin gesehen, dass beide horizontalen Sensorachsen gleichgerichtet die Temperaturanpassung vollziehen. Abbildung 7.16 stellt die Messwerte der beiden maßgebenden Achsen der ersten 30 min dar. In beiden Achsen nehmen die Sensormesswerte mit positivem Betrag zu, wobei die Betragszunahme für die y-Achse größer ist, als für die z-Achse. Ein Temperaturgang ist nicht auszuschließen, konnte aber bei den durchgeführten Messungen nicht beobachtet werden. Weiterhin haben die Untersuchungen ergeben, dass die eingesetzten Magnetfeldsensoren sogar in der Lage sind, Variationen der Deklination zu sensieren, vgl. Anhang B.3.1. Diese Variation ist folglich in den Werten σ_0 der Tabelle 7.10 explizit noch mit enthalten. Im Anhang B.3.2 wird das Verhalten des Gier-

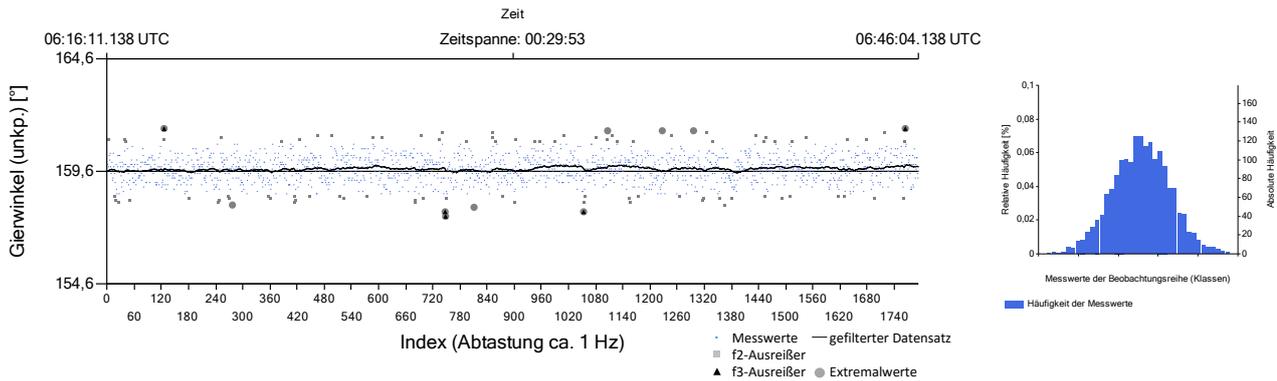


Abbildung 7.15: Magnetfeldsensor: Änderung des Gierwinkels während der Temperaturanpassung in den ersten 30 min der Messung

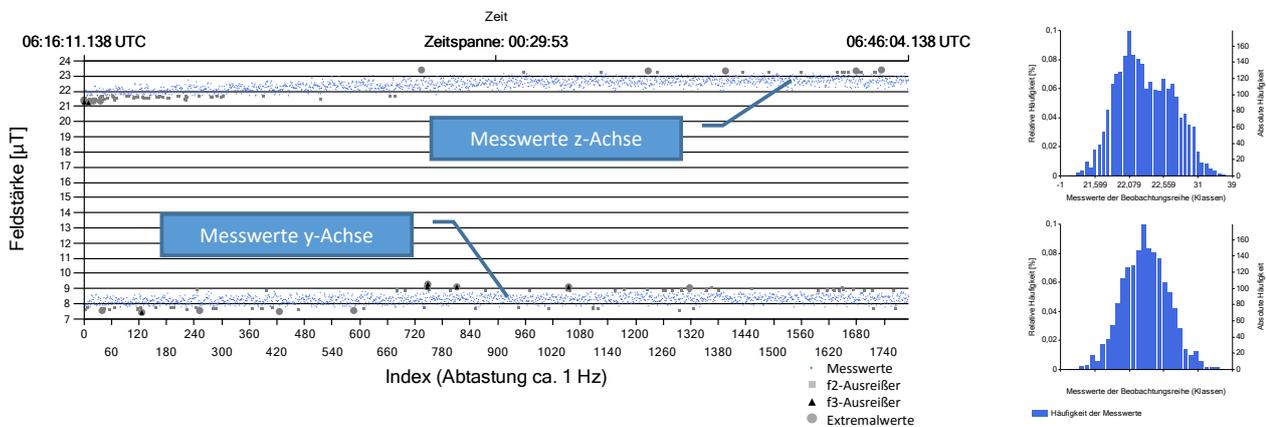


Abbildung 7.16: Magnetfeldsensor: Messwerte der beiden (für den Gierwinkel) maßgebenden Achsen; in den ersten 30 min der Messung (Temperaturanpassung)

winkels ψ eines GeoARS für diskrete fest vorgegebene Richtungsänderungen untersucht mit dem Ergebnis, dass Horizontalwinkel durch den Magnetfeldsensor mit durchschnittlich $\pm 0.4^\circ$ aufgelöst werden können und damit im Einklang mit den in Tabelle 7.10 ermittelten Werten stehen. Für Objekte in einer Entfernung von 50 m vom GeoARS resultiert daraus eine Lagegenauigkeit in der Querabweichung von etwa ± 0.35 m.

Im Folgenden soll die Größenordnung und Variation der Deklination näher untersucht sowie die resultierenden Auswirkungen auf GeoARS abgeleitet werden.

1. Feststellung: Für das Gebiet von Deutschland variiert die ortsabhängige Deklination nach dem International Geomagnetic Reference Field (IGRF) oder des World Magnetic Model (WMM) aktuell in der **Größenordnung** von ca. 1° bis 4° , vgl. Tabelle 7.11.

2. Feststellung: Außerdem geht aus Abbildung 7.17 hervor, dass für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, eine starke Abhängigkeit der Deklination von der geographischen **Länge** und damit ein Ost-West-Gefälle der Deklination für Deutschland besteht.

3. Feststellung: Es lässt sich zudem zeigen, dass sich die aus globalen Erdmagnetfeldmodellen berechnete Deklination (z.B. Deklinationsrechner IGRF [GFZ 2016f]) für ein zentral in Deutschland gelegenes Gebiet von 1.58 km Nord-Süd-Ausdehnung und 1.17 km Ost-West-Ausdehnung (Ableitung der Gebietsdimension, vgl.

Tabelle 7.11: Deklinationswerte geographische Lage Deutschlands; WMM2015 und IGRF12 am 15.06.2016

Beschreibung	geographische Breite φ	geographische Länge λ	Deklination D IGRF12 $h = 0.0\text{ m}$	Deklination D WMM $h = 0.0\text{ m}$
Südwesten	47°	6°	$1^\circ 31'$	$1^\circ 31'$
Nordwesten	55°	6°	$1^\circ 14'$	$1^\circ 11'$
Südosten	47°	15°	$3^\circ 41'$	$3^\circ 39'$
Nordosten	55°	15°	$4^\circ 18'$	$4^\circ 14'$

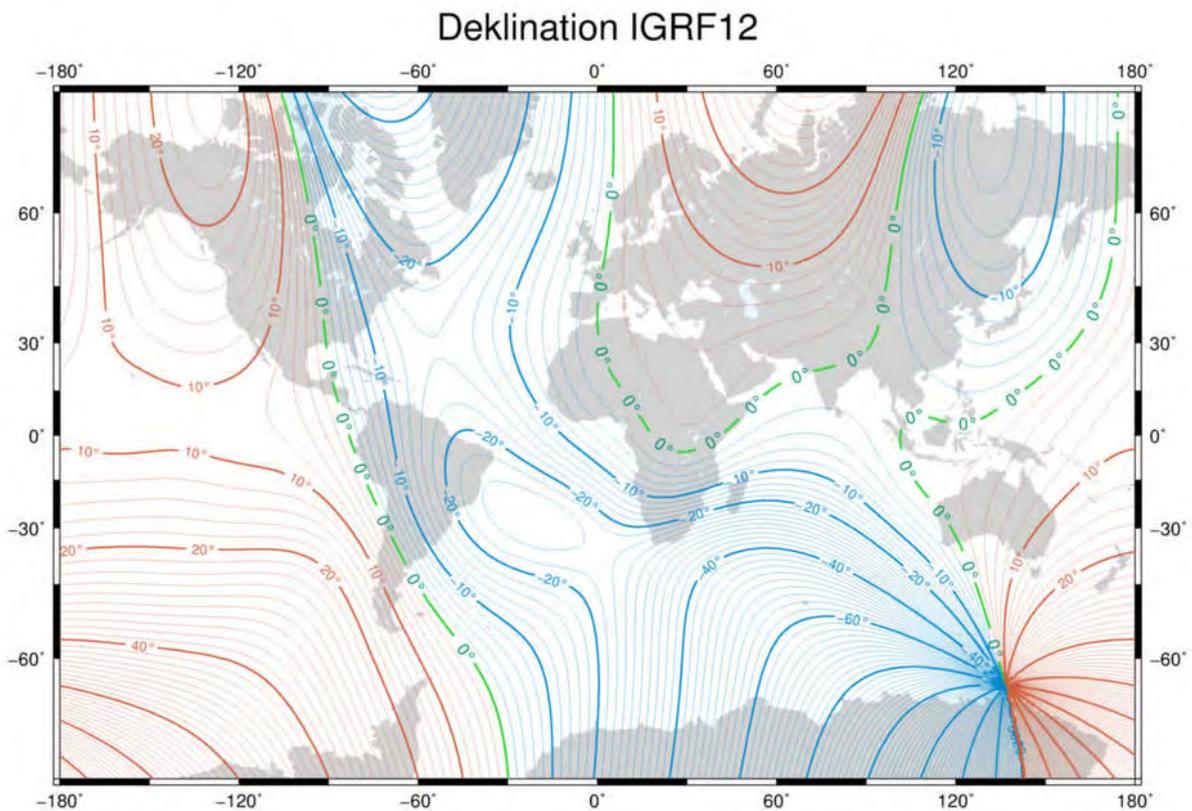


Abbildung 7.17: Deklination IGRF12, vgl. [GFZ 2015]

Anhang C.2) um weniger als eine Bogenminute ($1'$) ändert. Diese Gebietsdimension entspricht zum einen in etwa der oben genannten avisierten Größe des Einsatzgebietes eines mobil-pedestrischen GeoARS. Zum anderen kann für diese Flächengröße die Deklination für die praktische Verwendung von GeoARS als genähert konstant (weil $< 1'$) angesehen werden. Eine Bogenminute ($\approx 0.017^\circ$) entspricht hierbei in der Ebene nach dem Seitenkosinussatz [Bronstein u. a. 2015] für Objekte in einer Entfernung von 50 m einem Lagefehler von 1.5 cm.

4. Feststellung: Nach Aussage von GFZ [2016b] sind über die Distanz der beiden bundesdeutschen Magnetfeldreferenzstationen Niemegek und Wingst ($\approx 300\text{ km}$) die Feldanteile bei Normalbedingungen annähernd homogen, sodass für deutlich geringere Entfernungen ebenfalls davon ausgegangen werden kann, dass die geomagnetischen Feldanteile für die Gebietsdimension von GeoARS unter normalen Bedingungen ebenfalls **homogen** sind.

5. Feststellung: Über die mit globalen Erdmagnetfeldmodellen berechnete Deklination (z.B. Deklinationsrechner IGRF [GFZ 2016f]) lässt sich zeigen, dass die Variation der Deklination neben der geographischen Länge auch essentiell von der **Zeit** abhängt. Die zeitliche Änderung der Deklination beträgt pro Monat etwa $1'$ (vgl. [GFZ 2016f], [NOAA 2016a]) und kann für die Nutzungsdauer und derzeitige Genauigkeit von GeoARS innerhalb eines Tages als zeitlich konstant betrachtet werden. Geringe Abhängigkeit besteht mit der **Höhe** und der geographischen **Breite**.

6. Feststellung: Vergleicht man die gerechneten Deklinationswerte für Zentraldeutschland zwischen dem IGRF und WMM so lässt sich ein Unterschied von $\Delta D \approx 2'$ feststellen, was auf Modelldifferenzen hindeutet.

7. Feststellung: Die berechneten Deklinationen der internationalen Referenzsysteme werden mit einer Genauigkeit von einer Bogenminute ($1' \approx 0.017^\circ$) herausgegeben, vgl. [GFZ 2016f], [NOAA 2016a]. Für das WMM wird zusätzlich eine Formel zur Berechnung der modellbedingten Deklinationsgenauigkeit bereitgestellt:

$$\delta D = \sqrt{0.23^2 + \left(\frac{5430}{H}\right)^2}, \quad (7.28)$$

vgl. [Chulliat u. a. 2015]. Hiernach kann für Zentraldeutschland ein $\delta D \approx 0.36^\circ$ ermittelt werden.

8. Feststellung: In den Versuchen hat sich gezeigt, dass das Magnetfeld korrumpiert ist, wenn Totalintensitäten von $50\text{-}60 \mu T$ unter- oder überschritten werden. Nicht immer ist das Feld dann unbrauchbar, jedoch ist es ein Indiz auf geminderte Verlässlichkeit. Für GeoARS sind hier Sicherungen notwendig, die den Nutzer auf die eingeschränkte Integrität hinweisen.

7.8.2 Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System

Magnetfeldsensoren sind grundsätzlich geeignet, um aus ihren Messwerten den Gierwinkel ψ eines GeoARS mit einer Auflösung von $\approx \pm 0.4^\circ$ zu berechnen. Hierfür sind Bit-Tiefen von mindestens 2^{13} bit notwendig.

Die Messbereiche von $\pm 1200 \mu T$ bis $\pm 4912 \mu T$ der einbezogenen Sensoren sind grundsätzlich geeignet. Sie sind jedoch für die Anwendung in GeoARS zu weit gefasst. Ein Messbereich von $\pm 100 \mu T$ wäre für GeoARS wegen der höheren Empfindlichkeit deutlich geeigneter.

Für mobil-pedestrische GeoARS mit dem avisierten Einsatzgebiet von ca. $\Delta\varphi = \Delta\lambda = 1'$ ($1.85 \text{ km} \times 1.17 \text{ km}$) kann das Erdmagnetfeld als genähert homogen und während des Einsatzzeitraumes von 1-3 Stunden als konstant angenommen werden. Tageszeitliche Variationen liegen im Bereich weniger Bogenminuten ($< \pm 6'$) und wirken sich im Bereich von einigen Zehntel Grad ($< \pm 0.2^\circ$) im Gierwinkel aus.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Deklination regional und temporal in GeoARS zu berücksichtigen und als Korrekturterm an den aus den Sensorwerten errechneten Gierwinkel anzubringen ist. Es lässt sich zeigen, dass die Variation der Deklination neben der geographischen Länge zwar essentiell von der Zeit (pro Monat etwa $1'$) abhängt, jedoch für die Nutzungsdauer und derzeitige Genauigkeit von GeoARS innerhalb eines Tages als zeitlich konstant betrachtet werden kann. Geringe Abhängigkeit besteht mit der Höhe und der geographischen Breite. Die Genauigkeit der Deklination selbst beträgt ebenfalls $\approx \pm 0.4^\circ$ und führt gemeinsam mit der Auflösung der Magnetfeldsensorik zu einer resultierenden Gesamtgenauigkeit des Gierwinkels eines GeoARS von etwa $\approx \pm 0.8^\circ$. Für mobil-pedestrische GeoARS ist die aktuelle Deklination in Abhängigkeit der jeweiligen Position während der Anwendung kontinuierlich in Echtzeit zu berechnen, wenn die Gebietsdimension von $\Delta\varphi = \Delta\lambda = 1'$ ($1.85 \text{ km} \times 1.17 \text{ km}$) überschritten wird, anderenfalls einmalig pro GeoARS-Einsatz.

Für stationäre GeoARS ist stets die aktuelle Deklination pro GeoARS-Einsatz einmalig zu berechnen und zu verwenden, wobei aufgrund der statischen Position eine positionsabhängige Änderung der Deklination während der Nutzung nicht zu beachten ist. Die Implementierung zur Korrektur des in Echtzeit berechneten Gierwinkels um die Deklination kann auf vielfältige Weise erfolgen. Zum einen kann mit Hilfe der bereitgestellten Kugelfunktionskoeffizienten des IGRF und WMM die Deklination direkt durch das GeoARS berechnet oder es können Online-Services⁹ genutzt werden.

Neben der reinen Messgenauigkeit des Sensors sind die nicht konstanten Magnetfeldeigenschaften, z.B. die eingangs genannten zeitlichen Varianzen und Anomalien, die Temperatur sowie Einflussfaktoren in unmittelbarer Nähe des Sensors (Hart- und Weicheiseneffekt, z.B. durch übrige Hardwarekomponenten oder nahe metallische Objekte) für die Verwertbarkeit der Sensorergebnisse und zur Konzeption von GeoARS zu beachten. Im Ergebnis der Untersuchungen wird empfohlen, das jeweilige GeoARS vor der erstmaligen Verwendung individuell zu kalibrieren und die Linearität diskreter Richtungen zu prüfen. Während der Anwendung kann die Integrität der aktuellen Messwerte gegenüber globaler Störungen oder Störungen durch Objekte in der unmittelbaren Umgebung (z.B. Weicheisen) nur durch Kombination mehrerer Methoden sichergestellt werden. Eine erste Methode ist die Prüfung der Totalintensität F in Abhängigkeit der geographischen Lage. Hier kann der grob gefasste Gültigkeitsbereich von $40 \mu T < T < 60 \mu T$ für Deutschland verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit ist der Vergleich der Messwerte der einzelnen Achsen des Magnetfeldsensors untereinander. Für Momente, in denen sich das GeoARS in genäherter horizontaler Lage befindet, ist der Betrag der vertikalen Achse stets größer als die Summe der Beträge der beiden horizontalen Achsen. Ebenfalls empfiehlt es sich die aktuelle Variation des Erdmagnetfeldes mit einer präzisen Referenzstation (z.B. Niemeck oder Wingst) abzugleichen, um Fehler im Gierwinkel auszuschließen. Dies kann zum einen in Echtzeit oder durch Nachprozessierung erfolgen. Spezifische Kennziffern der geomagnetischen Aktivität, z.B. der Kp-Index (planetarische Kennziffer) als Maß für die natürlichen geomagnetische Störungen, können zur Beurteilung des aktuellen Zustandes des Erdmagnetfeldes in Echtzeit und als Vorschau herangezogen werden, vgl. [NOAA 2016b], [GFZ 2016e], [GFZ 2016g].

Das realisierte stationäre Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ ist mit einem Magnetfeldsensor ausgerüstet und nutzt diesen zur Verbesserung der Gesamtintegrität des Systems. Die Berechnung der Orientierung selbst erfolgt hier jedoch über die Schrittmotorik. Für mobil-pedestrische GeoARS (z.B. „GeoARS-Landentwicklung“) können für die Berechnung des Gierwinkels zusätzlich die Methoden der Inertialnavigation und Bildauswertung eingesetzt werden.

⁹z.B. <http://app.geomag.bgs.ac.uk/wmm/compute?latitude=-80&longitude=240&altitude=0&date=2017-07-02>

7.9 GNSS-Modul

Bauer [2011] folgend, lassen sich GNSS-Empfänger nach Kategorien einordnen, in denen sie verwendet werden: Navigationsempfänger, Zeitempfänger und geodätische Empfänger. Navigationsempfänger werten die Codephasen einer Frequenz von mindestens vier Satelliten aus und berechnen daraus die Position des Standortes in Echtzeit. Dies sind in der Praxis in der Regel L1-Codephasen, weshalb man diese Empfängerklasse oft auch als Coarse/Acquisition (C/A)-Code-Navigationsempfänger bezeichnet. Zeitempfänger weisen gegenüber den Navigationsempfängern große Hardware-Ähnlichkeit auf und verfügen über spezielle Möglichkeiten zur Zeit- und Frequenzausgabe. Die Kategorie der geodätischen Empfänger unterscheidet sich von den beiden vorhergehenden dadurch, dass zusätzlich zu den Pseudostrecken auch Trägerphasen (mehrerer Frequenzen) ausgewertet und gespeichert werden.

7.9.1 Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik

Tabelle 7.12 zeigt die in die Untersuchung zu GeoARS einbezogenen GNSS-Module. Sie gehören zur Kategorie der Navigationsempfänger, verwenden die Trägerwelle L1 (Frequenz 1575.42 MHz) und besitzen die Fähigkeit, Signale von satellitengestützten Erweiterungssystemen zu empfangen.

Tabelle 7.12: Parameter der in die Untersuchung zu GeoARS einbezogenen GNSS-Module

Bezeichnung	Größe [mm]	Art	GPS	GLONASS	Frequenz	SBAS
WTR1605L	25 mm ²		●	●	L1	●
BCM47511	2.85×3.02×0.50		●	●	L1	●
SiRFstarIV	3.40×2.70×0.68		●	○	L1	●
NEO-6	16.0×12.2×2.40		●	○	L1	●

● ≙ wird ausgewertet | ○ ≙ wird nicht ausgewertet

Hinsichtlich dieser Empfängerklasse soll zunächst abgeschätzt werden, welche Genauigkeit zu erwarten ist und anschließend, welche Positionsgenauigkeit praktisch erreicht wird.

Hinsichtlich Einzelpunktbestimmungen aus Pseudostrecken in topozentrischen Koordinatensystemen ergibt sich nach Bauer [2011] eine Genauigkeit von weit unter 10 m.

Satellitenbahn-, Satelliten- und Empfängeruhrfehler, atmosphärische Laufzeitverzögerungen der Satellitensignale in der Ionosphäre und troposphärische Störungen (Refraktion), Mehrwegeausbreitungen an der Antenne (Multipath) sowie Empfängerrauschen führen dazu, dass die Genauigkeit bauartbedingt zunächst nicht höher realisierbar ist, vgl. [Zogg 2011], [Schmidt 2009], [Seeber 1993], [Hofmann-Wellenhof u. a. 2008], [Mansfeld 2013], [Flury u. a. 2006].

Durch verschiedene Verfahren lässt sich die Position jedoch verbessern. Genannt seien hier die differentiellen Verfahren, wie Satellite Based Augmentation System (SBAS) (z.B. European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)), Differential GNSS (DGNSS) oder Real Time Kinematik-Dienste (z.B. der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) als Hochpräziser Echtzeit-Positionierungsservice (HEPS)).

Für differentielle GNSS-Verfahren mit Genauigkeiten im Bereich von ca. 1-3 Metern (z.B. mit EGNOS) oder im Submeterbereich (z.B. mit SAPOS-Echtzeit-Positionierungs-Service (EPS)) werden in der Praxis die Codemesungen mittels Korrekturdaten verbessert.

Tabelle 7.13 stellt die Größenordnung der Fehleranteile der Echtzeitpositionierung dar. Hierbei weist der Einfluss der Ionosphäre ohne Verwendung von SBAS mit ca. 3.0 m den höchsten Betrag auf. In der Tabelle ist ersichtlich, dass sich die Satellitenbahn- und -uhrenfehler bzw. Ionosphäre mittels SBAS in Echtzeit korrigieren lassen. Der Einfluss des Empfängers – Bauer [2011] unterteilt ihn noch in die Anteile Messrauschen (0.5 m) und Hardware-Verzögerungen (dm bis m) – kann jedoch nicht durch SBAS reduziert werden.

Tabelle 7.13: Standortgenauigkeit Echtzeitpositionierung ohne und mit SBAS, nach [Zogg 2011]

Fehlerursache und Fehlerart	Fehler ohne SBAS [m]	Fehler mit SBAS [m]
Ephemeridendaten	1.5	0.1
Satellitenuhren	1.5	0.1
Einfluss der Ionosphäre ^a	3.0	0.2
Mehrwegempfang (Multipath)	1.0	1.4
Einfluss des Empfängers	0.5	0.5

^a2-Frequenz: cm-dm und 1-Frequenz: 5m [Bauer 2011, S. 220]

Abbildung 7.18 zeigt die Messwerte des in Ruhelage befindlichen GNSS-Moduls WTR1605L für den Zeitraum von 16 Stunden auf einem koordinativ bekannten Referenzpunkt (Festpunkt). Tabelle 7.14 stellt die Häufigkeiten der Messwerte ergänzend zur Abbildung 7.18 dar. Es wird deutlich, dass die Positionierung starken

Tabelle 7.14: Häufigkeiten zu Abbildung 7.18

Kategorie ^a :	< 1 m	1 bis 3 m	3 bis 5 m	5 bis 10 m	> 10 m
Häufigkeit [%] (Anzahl):	10.38 (3725)	48.43 (17386)	27.21 (9768)	13.68 (4910)	0.30 (110)

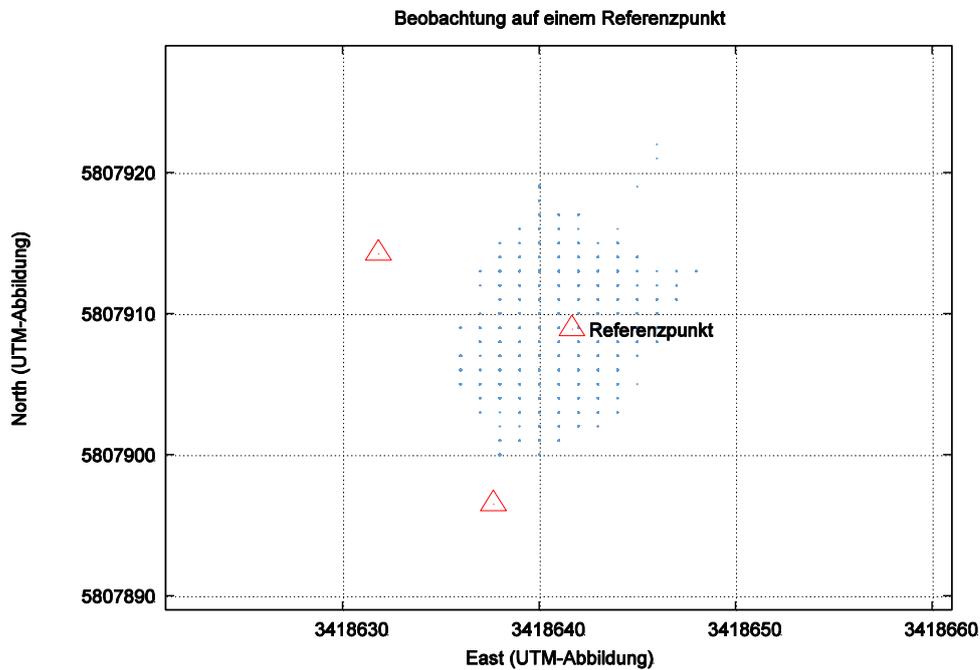
$$^a \Delta s = \sqrt{\Delta Ost^2 + \Delta Nord^2}$$

Schwankungen unterliegt. Die Häufigkeitsanalyse ergibt, dass ca. 86 % der bereitgestellten Koordinaten eine Positionierung im Genauigkeitsbereich von $< \pm 5.0 m$ ermöglichen. Etwa 10% der Messwerte erlauben eine Positionierung von unter einem Meter. Als Genauigkeitsmaß für den Echtzeit-Einsatz kann die Standardabweichung der Beobachtung herangezogen werden. Sie liegt für Ost- und Nordwert bei etwa $\pm 2 m$ bis $\pm 3 m$ ($\sigma_{0_{Ost}} \approx \pm 1.89 m$ / $\sigma_{0_{Nord}} \approx \pm 2.88 m$). Die Differenz des Mittelwertes dieser Messreihe zum Sollwert (Soll-Ist) des Punktes beträgt $\Delta Nord = -0.061 m$ und $\Delta Ost = 0.002 m$. Weitere Resultate können der Tabelle 7.14 sowie dem Anhang B.4 entnommen werden.

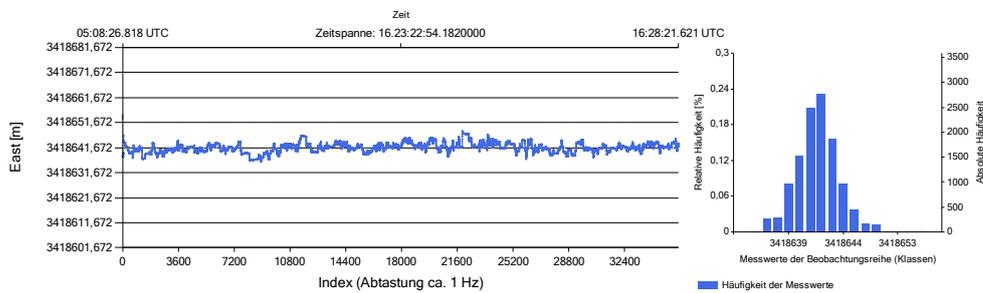
7.9.2 Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System

GNSS-Module können (müssen aber nicht) im Rahmen von GeoARS für die Bestimmung der räumlichen Systemlage (Ost- und Nordwert im r-System) Anwendung finden.

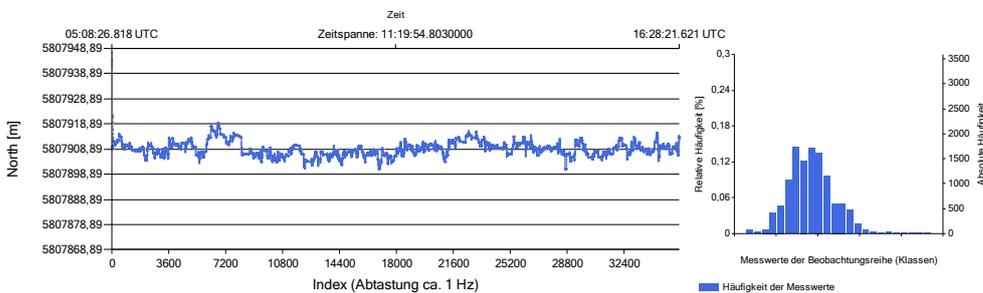
In den durchgeführten praktischen und theoretischen Untersuchungen wurden Bereiche und Größenordnungen von den zu erwartenden technischen Positionierungsgenauigkeiten erarbeitet. Mit Navigationsempfängerlösungen können unter Einbeziehung von SBAS Genauigkeiten von 1 bis 5 m erreicht werden.



(a) GNSS-Modul: Ost- und Nord-Werte



(b) GNSS-Modul: Ost-Werte



(c) GNSS-Modul: Nord-Werte

Abbildung 7.18: GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage, (vgl. Anhang B.4.1)

Die Positionierungsgenauigkeit kann jedoch durch folgende Maßnahmen gesteigert werden, wenn es für den spezifischen GeoARS-Anwendungsbereich erforderlich ist:

- algorithmische Beachtung der Unterschiede zwischen den verwendeten Bezugssystemen (vgl. Abschnitt 7.12.6)
- Verwendung eines präzisen externen GNSS-Empfängers
- Stationierung über bekannte Passpunkte nach terrestrischen Verfahren.

Die vorgenannten Maßnahmen werden nachfolgend erläutert. Für GeoARS-Einzelempfängerprozessierungen ist über die vorgenannten technisch bedingten Gesichtspunkte hinaus noch ein weiterer Aspekt zu beachten: Bei Echtzeit-Koordinatenberechnungen kann angesichts der stetig andauernden Kontinentaldrift der eurasischen Platte der resultierende Positionierungsfehler zwischen e-System und r-System nicht mehr vernachlässigt werden. Wie die Berücksichtigung aus praktischer Sicht innerhalb eines GeoARS erfolgen kann, wird in Abschnitt 7.12.6 erläutert. Für hohe Genauigkeiten im Zentimeterbereich werden präzise GNSS-Empfänger mit Trägerphasenmessung (Geodätische Empfänger) benötigt. Hierzu können GeoARS mit den präzisen externen Empfängern kombiniert (z.B. Bluetooth oder WLAN) werden, vgl. Abbildung 7.19. Mit Ausnahme von SBAS gilt es zu berücksichtigen, dass für die differentiellen Verfahren eine zusätzliche Kommunikationsverbindung zum Empfang der Korrekturdaten notwendig wird, die insbesondere in ländlichen oder unerschlossenen Regionen nicht immer zur Verfügung steht. Sofern für ein GeoARS die Positionierung durch einen (internen)



Abbildung 7.19: Gekoppelte GeoARS mit Verwendung eines präzisen GNSS-Empfängers (hier: geodätischer Empfänger Trimble R10)

Navigationsempfänger oder eine externe präzisere GNSS-Empfangseinheit erfolgen soll, ist abschließend die Frage nach der Kalibrierbarkeit des Moduls zu beantworten. Im Idealfall soll die Antenne einen mathematischen Punkt darstellen, an dem sich die zu den verschiedenen Satelliten gemessenen Raumstrecken schneiden [Campbell u. a. 2004], der in der Praxis jedoch wegen Ablenkungen und Störungen der Radiowellen bzw. wegen Einbauungenauigkeiten nicht erreicht wird. Die Kalibrierung von GNSS-Antennen kann durch eine relative Feldkalibrierung (mit GNSS-Messungen), durch absolute Feldkalibrierung (mit einem Roboter) oder durch Laborkalibrierung (in mikrowellentoten Räumen, Kammermessungen) durchgeführt werden [Rothacher u. Schmid 2002]. Hierzu werden im Rahmen der Kalibrierung die Lage des mittleren Antennenphasenzentrums und die Terme für die azimut- und elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen berechnet [Frevert u. a. 2003]. Präzise GNSS-Empfänger sind in der Regel durch den Hersteller typenkalibriert, d.h. es

wird die Antennenbaureihe mit den entsprechenden Eigenschaften vom Hersteller überprüft und Korrekturen für jeden Antennentyp angegeben. Eine präzise Positionierung mit den (internen) Navigationsempfängern im Zentimeterbereich ist derzeit nicht möglich. Ob und in welcher Form hierfür eine Herstellerkalibrierung vorgenommen wurde, konnte nicht ermittelt werden. Ebenfalls konnte keine Möglichkeit recherchiert werden, wie und in welcher Form der Anwender Kalibrierungen selbst vornehmen kann. Es bleibt festzustellen, dass es nicht möglich ist, Kalibrierungen am internen GNSS-Empfänger des GeoARS selbst vorzunehmen. Eine Kalibrierung der Antennen extern angeschlossener präziser GNSS-Empfänger ist grundsätzlich möglich, jedoch für den avisierten Genauigkeitsbereich der GeoARS-Anwendung von wenigen Dezimetern regelmäßig nicht erforderlich.

7.10 Bildsensor

Bildsensoren sind Bestandteil der realen Kamera eines GeoARS und erzeugen das Abbild der realen Welt für die 3D-Registrierung. Sie gehören zur Klasse der optischen Sensoren, vgl. [Bernstein 2014]. Der Bildsensor ist integraler Bestandteil der realen Kamerakomponente sowie Bestandteil des mathematischen Modells des Kamerakoordinatensystems (k-System). Aus diesem Grunde werden Bildsensor und Kamera in den nachfolgenden Untersuchungen im Zusammenhang betrachtet. Das so zusammengesetzte Kamerasystem nutzt im Regelfall ausschließlich die vorhandene natürliche Strahlung (reflektierte Sonnenstrahlung) als passives System oder für den Fall, dass das GeoARS eine eigene Lichtquelle verwendet (bei Dämmerung/Dunkelheit) als aktives System, vgl. [Richter u. Teichert 2009].

Auf Sensor und Kamera wirken ebenfalls die in Abschnitt 2.5 angeführten Umgebungsfaktoren, wobei zwei der dort aufgeführten Faktoren – Licht und Niederschlag – spürbare Einschränkungen auf die Nutzbarkeit bewirken, vgl. auch Tabelle 7.15. In der Tabelle werden neben den speziell auf den Bildsensor wirkenden Umgebungsfaktoren weitere Faktoren benannt, die maßgeblich zum einen die Kamera betreffen und zum anderen auf das GeoARS insgesamt wirken, z.B. Auflösungsvermögen des Sensors und Gewicht der Kamera.

Tabelle 7.15: Kamera- und Bildsensor-spezifische Einflussfaktoren auf GeoARS

Einflussfaktor	Auswirkung
Licht/Gegenlicht	verminderte Objekterkennbarkeit bei starker Sonneneinstahlung mit Gegenlicht
Temperatur	Veränderung der Parameter der inneren Orientierung der Kamera durch Materialverformungen möglich
Luftfeuchtigkeit/Niederschlag	verminderte Objekterkennbarkeit
Größe	Handhabbarkeit und Mobilität ggf. eingeschränkt
Gewicht	Handhabbarkeit und Mobilität ggf. eingeschränkt
Auflösungsvermögen	Detailgrad/Erkennbarkeit/Darstellbarkeit von Objekten
Energiebedarf	Einsatzdauer des Endgerätes

7.10.1 Ermittlung der Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Sensorik

Alle in dieser Arbeit einbezogenen Bildsensoren verwenden das Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) (dt.: sich ergänzender Metall-Oxid-Halbleiter) Verfahren, vgl. [Richter u. Teichert 2009]. Das Funktions-

prinzip beruht nach Hering u. Schönfelder [2012] auf der Basis von Fotodioden. Hierbei sind die Fotodioden in einer Matrix angeordnet. Durch die Zeilen- und Spaltenadressierung können die einzelnen Dioden direkt und in beliebiger Reihenfolge angesprochen werden. Während des Belichtungsprozesses wird die Sperrschicht jeder einzelnen Fotodiode durch die einfallende Lichtstrahlung aufgeladen (Belichtung) und die Ladung abgetastet [Hering u. Schönfelder 2012] und in Form eines Videosignals ausgelesen, vgl. Richter u. Teichert [2009]. Aus der „orts- und wertdiskreten, in physikalischen Größen definierten Bildfunktion (z.B. Grauwert als Bestrahlungsäquivalent), die durch eine Bildmatrix repräsentiert wird“ (DIN 18716-2), entsteht das digitale Bild mit der Flächeneinheit *Pixel* (DIN 18716-2, Nr. 3.2.4).

CMOS-Sensoren zeichnen sich durch einen geringen Energie bzw. Leistungsbedarf sowie Temperaturstabilität und geringe Störempfindlichkeit aus, vgl. [Hesse u. Schnell 2014].

Tabelle 7.16: Parameter der in die Untersuchung zu GeoARS einbezogenen Bildsensoren

Produkt- bezeichnung	maximale Auflösung Live-Bild ^a [<i>Pixel</i> × <i>Pixel</i>]	aktive Pixel [<i>Pixel</i> × <i>Pixel</i>]	Sensordiagonale oder Abmessung	Pixel- größe [μm]	Bit- Tiefe	fps	Dyna- mik [dB]
S5K6A3	1280 × 720	1412 × 1412	2.7 mm	1.75	\	60	≈ 30
S5K4E5	960 × 720	2608 × 1960	3.7 × 2.7 mm ²	1.40	\	30	≈ 30
IMX111PQ	1280 × 960	3296 × 2512	4.6 mm	1.12	\	30	≈ 40
IMX 175	970 × 720	3264 × 2448	6.18 × 5.85 mm ²	1.40	10	30	\
IMX 179	1920 × 1080	3280 × 2464	6.18 × 5.85 mm ²	1.40	10	30	\
QX-10	640 × 480	4896 × 3672	6.17 × 4.55 mm ²	1.25	\	≤30	\
QX-100	640 × 480	5472 × 3648	13.2 × 8.8 mm ²	2.40	\	≤30	\

\ ≙ nicht verfügbar

^ahardwareabhängig

Die in die Untersuchungen einbezogenen Sensoren sind in der Tabelle 7.16 dargestellt.

Nach DIN 18716-3 wird als radiometrische Auflösung die Fähigkeit eines Sensors bezeichnet, (geringe) Strahlungsunterschiede noch messtechnisch zu erfassen. Sie wird folglich durch die Anzahl der (Grau-)Stufen und damit durch die Bit-Tiefe bestimmt. Nicht alle Sensorhersteller geben eine Bit-Tiefe in ihren Spezifikationen an. Zwei der einbezogenen Sensoren besitzen eine Bit-Tiefe von 10 *bit* und somit 1024 Stufen, vgl. Tabelle 7.16. Darüber hinaus kann als Parameter die Messdynamik herangezogen werden. Nach Hering u. Schönfelder [2012] kann das menschliche Auge in einem Bild eine Dynamik¹⁰ von bis zu 140 dB verarbeiten, wohingegen ein CMOS-Sensor bedingt durch die verwendbaren elektrischen Schaltungen lediglich bis zu etwa 70 dB abdecken kann. Insbesondere im Einsatzgebiet von GeoARS, dem Außenbereich, werden einige Bildteile

¹⁰Verhältnis von kleinstmöglichem Messwert und Messwertspanne in [dB], vgl. [Hering u. Schönfelder 2012], [Hesse u. Schnell 2014]

häufig unter- oder überbelichtet und die Dynamik von Schlagschatten oder Gegenlicht beansprucht. Tabelle 7.16 kann entnommen werden, dass sie (sofern vom Hersteller angegeben) für die GeoARS-Sensoren etwa 30 – 40 dB beträgt.

Alle in Tabelle 7.16 aufgeführten Sensoren ermöglichen eine Bildwiederholrate von mindestens 30 Bildern pro Sekunde bei einer Auflösung von 1920 Pixel × 1080 Pixel. Mit dieser Wiederholrate kann das Live-Bild für das menschliche Auge flüssig (≈ 20 – 25 Bilder pro Sekunde) dargestellt werden, vgl. [Schenk u. Rigoll 2010]. Es gibt jedoch Einschränkungen, falls die Sensoren für eine Orientierungsberechnung verwendet werden sollen. Für einige Anwendungsfälle genügt die Leistungsfähigkeit dann nicht, vgl. Abschnitt 7.12.7.

Das geometrische Auflösungsvermögen eines Aufnahmesystems beschreibt nach Luhmann [2010b] die Fähigkeit der Detailwiedergabe eines Sensors und kann im Objektraum oder im Bildraum angegeben werden. Hierbei wird auf die Dimension eines Pixels (in μm) und auf die Dimension eines Objektes in der Natur (in m) Bezug genommen. Nachfolgend soll untersucht werden, welche minimale Dimension Objekte in der Natur in einer bestimmten Aufnahmeentfernung haben dürfen, um gerade noch vom Bildsensor des GeoARS erfasst und anschließend als Live-Videobild dargestellt werden zu können. Analog zu diesem Zusammenhang kann auch das geometrische Auflösungsvermögen eines GeoARS verstanden und formuliert werden.

Hierzu ergibt sich mit der Breite eines Pixels des Bildsensors b , der Breite eines mit dem Pixel gerade noch erfassbaren Objektes B , der Brennweite (Kammerkonstante) c des Kamerasystems und der Aufnahmeentfernung D zu dem Objekt in der Natur das Verhältnis:

$$\frac{b}{B} = \frac{c}{D}. \quad (7.29)$$

Umgestellt nach der Objektbreite ergibt sich die Breite des kleinst möglich erfassbaren Objektes B_{min} , welche durch genau ein Pixel repräsentiert wird.

$$B_{min} = \frac{b}{c} \cdot D \quad (7.30)$$

Als maximale Aufnahmeentfernung wird für ein GeoARS eine Distanz von $D = 100 m$ angenommen. Mit der Brennweite $c = 3.43 mm$ und der Dimension eines Pixels des Bildsensors von $b = 1.4 \mu m$ ergibt sich ein kleinstmöglich erfassbares Objekt mit der Breite von $0.04 m$:

$$B_{min}(b, c, D) = \frac{b}{c} \cdot D = \frac{1.4}{3.43} \cdot 100.0 = 0.04 m. \quad (7.31)$$

Objektiv- und Einbaufehler der Kamerakomponenten führen zu Mängeln bei der 3D-Registrierung eines GeoARS. Nach Luhmann [2010b] entstehen Bildfehler bei der realen Kamera u.a. durch radial-symmetrische Verzeichnungen des Objektivs, sphärische Aberration (Öffnungsfehler), chromatische Aberration (Farblängsfehler, Farbquerfehler), Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma, Dezentrierung von Linsen, Sensorschiefen oder unebene Sensorflächen. Um hierzu die Größenordnung der zu erwartenden Fehler für die verwendete kostengünstige Hardware abzuschätzen, können die existierenden bewährten Verfahren der Photogrammetrie genutzt werden. Diese auf analytischen Ansätzen beruhenden Verfahren wurden über viele Jahrzehnte entwickelt und verfeinert. Nach Luhmann [2010b] kann die Kamera hierbei als räumliches System angesehen werden, das sich aus der Sensorfläche (Bildfläche) und dem davor eingebauten Objektiv mit Projektionszentrum zusammensetzt. Dieses System kann mit dem mathematischen Modell der Zentralperspektive beschrieben werden. Dem Modellansatz folgend wird mit den Parametern der inneren Orientierung die Lage des Projektionszentrums innerhalb des Bildkoordinatensystems der Kamera (k-System) und den Abweichungen von dem Modell der Zentralperspektive beschrieben, vgl. [Luhmann 2010b], Kraus [2004]. Im Bereich der Computer Vision wird diesbezüglich auch der Begriff der intrinsischen Parameter (engl. intrinsic parameters) verwendet,

vgl. [Luhmann 2010a]. Nach Luhmann [2010b] sind die Parameter der inneren Orientierung: der Bildhauptpunkt ($H'(x_0, y_0)$), die Kammerkonstante (c) und die Parameter von Bildfehler beschreibenden Funktionen (insbesondere die radial-symmetrische Verzeichnung ($\Delta r'(A1, A2, A3)$), die tangentiale und asymmetrische Verzeichnung ($B1, B2$) sowie die Affinität und Scherung des Bildkoordinatensystems ($C1, C2$)), vgl. Abbildung 7.20. Die Ermittlung der Parameter ($x_0, y_0, c, A1, A2, A3, C1, C2$) kann über eine 3D-Testfeldkalibrierung oder

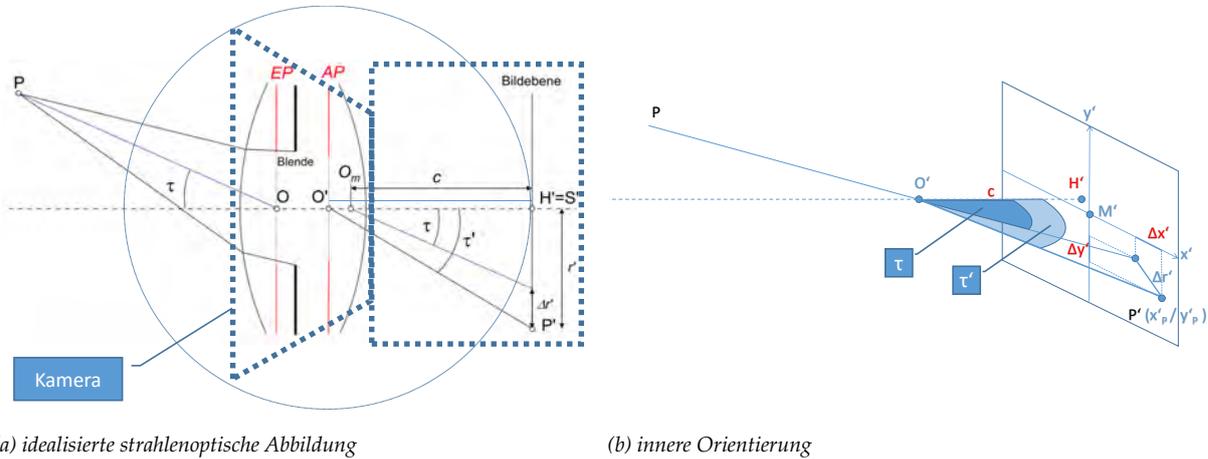


Abbildung 7.20: Idealisierte strahlenoptische Abbildung und innere Orientierung der realen Kamera eines GeoARS (in Anlehnung an Luhmann [2010b] und Kraus [2004])

mittels Prüfkörper [GMA 2002] vorgenommen werden. Nach Luhmann [2010b] können die Abweichungen von der idealen zentralperspektivischen Abbildung durch Korrekturfunktionen ($\Delta x', \Delta y'$) der Bildkoordinaten ausgedrückt werden.

Hierzu werden die gemessenen Bildkoordinaten (x'_P, y'_P) zunächst um die Koordinaten des Bildhauptpunktes (x'_0, y'_0) korrigiert, da die Verzeichnung auf den Bildhauptpunkt bezogen ist. Die auf den Hauptpunkt bezogenen Bildkoordinaten ergeben sich damit zu:

$$\begin{aligned} x^\circ &= x'_P - x'_0 \\ y^\circ &= y'_P - y'_0. \end{aligned} \quad (7.32)$$

- x'_P, y'_P : gemessene Koordinaten des Bildpunktes P' , vgl. Abbildung 7.20 (rechter Teil)
- x'_0, y'_0 : Koordinaten des Bildhauptpunktes H' , vgl. Abbildung 7.20 (rechter Teil)

Die Korrektur der auf den Hauptpunkt bezogenen Bildkoordinaten erfolgt weiterführend durch:

$$\begin{aligned} x' &= x^\circ - \Delta x' \\ y' &= y^\circ - \Delta y'. \end{aligned} \quad (7.33)$$

- $\Delta x', \Delta y'$: achsenbezogenen Korrekturwerte der Abbildungsfehler, vgl. Abbildung 7.20 (rechter Teil)
- x', y' : korrigierte Bildkoordinaten

Die achsenbezogenen Korrekturwerte der Abbildungsfehler berechnen sich aus der Summe der einzelnen Abbildungsfehler für die x- und y-Achse zu:

$$\Delta x' = \Delta x'_{\text{rad}}(A1, A2, A3) + \Delta x'_{\text{tan}}(B1, B2) + \Delta x'_{\text{aff}}(C1, C2) \quad (7.34)$$

und

$$\Delta y' = \Delta y'_{\text{rad}}(A_1, A_2, A_3) + \Delta y'_{\text{tan}}(B_1, B_2) + \Delta y'_{\text{aff}}. \quad (7.35)$$

Hierbei berechnet sich der erste Korrekturterm der radial-symmetrischen Verzeichnung mit:

$$\Delta x'_{\text{rad}} = x' \cdot \frac{\Delta r'_{\text{rad}}}{r'} \quad (7.36)$$

sowie

$$\Delta y'_{\text{rad}} = y' \cdot \frac{\Delta r'_{\text{rad}}}{r'}. \quad (7.37)$$

mit dem Bildradius r' als Abstand vom Bildhauptpunkt:

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}. \quad (7.38)$$

Nach dem photogrammetrischen Ansatz wird die Verzeichnungskurve in Form einer Reihenentwicklung (Seidel-Reihe) mit den Verzeichnungsparametern (A_1, A_2, A_3, A_n) ausgedrückt:

$$\Delta r'_{\text{rad}} = A_1 r'^3 + A_2 r'^5 + A_3 r'^7 - r'(A_1 r_0^2 + A_2 r_0^4 + A_3 r_0^6). \quad (7.39)$$

Durch diese Linearisierung werden nach Luhmann [2010b] die Abweichungen aus der Geraden $\Delta r' = r' - c \cdot \tan \tau$ modelliert. Über den Parameter A_1 werden hierbei tonnenförmige ($-A_1$) und kissenförmige ($+A_1$) Verzeichnungen sowie mit den Parametern A_2 und A_3 die Abweichungen der Verzeichnungskurve von der kubischen Parabelform modelliert. Insbesondere durch A_3 gelingt es, die primär an den Bildrändern auftretenden großen Verzeichnungswerte zu berücksichtigen.

Die radial-asyymmetrische und tangentiale Verzeichnung ergibt sich mit

$$\Delta x'_{\text{tan}} = B_1(r'^2 + 2x'^2) + 2B_2x'y' \quad (7.40)$$

und

$$\Delta y'_{\text{tan}} = B_2(r'^2 + 2y'^2) + 2B_1x'y'. \quad (7.41)$$

Sie wird hauptsächlich durch Dezentrierung der Linsen verursacht und tritt bei den einfachen (nicht photogrammetrischen) Objektiven der GeoARS auf. Der verbleibende Korrekturterm zur Affinität und Scherung berechnet sich mit

$$\Delta x'_{\text{aff}} = C_1x' + C_2y' \quad (7.42)$$

sowie:

$$\Delta y'_{\text{aff}} = 0. \quad (7.43)$$

Tabelle 7.17: Parameter der inneren Orientierung mobil-pedestrisches GeoARS, Beispiel: GT-I9250/S5K4E5

$x'_0 = -0.08441 \text{ mm}$	$y'_0 = +0.06233 \text{ m}$	$c = +3.53668 \text{ mm}$
$A_1 = +0.0167947$	$A_2 = -0.0074596$	$A_3 = +0.0009896$
$B_1 = -0.0001465$	$B_2 = +0.0000588$	
$C_1 = +0.0273394$	$C_2 = 0.0$	

Für GeoARS ist es erforderlich die Kamera individuell zu kalibrieren, um das zu korrigierende Fehlerausmaß zu ermitteln und durch Korrekturen eine bestmögliche 3D-Registrierung zu erzielen. Nachfolgend wird hierzu exemplarisch das Kameramodul des GT-I9250, vgl. Tabelle 6.3 (S. 89), kalibriert und diskutiert. Die Parameter der inneren Orientierung mit den Parametern der Bildfehler beschreibenden Funktionen für das Kameramodul GT-I9250 mit dem CMOS-Sensor S5K4E5 können zunächst der Tabelle 7.17 entnommen werden. Abbildung 7.21 zeigt ergänzend dazu exemplarisch die Verzeichnungskurve der radial-symmetrischen Verzeichnung dieses Kameramoduls. Sie beträgt bis zu einem Abstand von etwa 2 mm wenige Mikrometer, steigt dann aber bis zu 30 Mikrometer zu den Bildrändern hin an. Mit einer Auflösung von $2608 \times 1960\text{ Pixel}$ ergibt sich ein Bildhauptpunktfehler von $x'_0 = 60\text{ Pixel}$ und $y'_0 = 45\text{ Pixel}$ sowie die weiteren Korrekturen an den Bildrändern von $\Delta x = 51\text{ Pixel}$ (Größenordnung: 2 – 3%) und $\Delta y = 13\text{ Pixel}$ (Größenordnung: 1 – 2%). Die maximale Gesamtfehlerauswirkung an den Bildrändern bewirkt in einer Entfernung von 100 m einen Lagefehler von 5.2 m . Als größte Fehlerwerte lassen sich der Bildhauptpunktfehler und die Affinität feststellen. In GeoARS können Affinität und Scherung z.B. durch ungleichmäßige Anordnung der Bildsensorelemente oder nicht quadratische Pixel entstehen.

Um die im Rahmen der zuvor beschriebenen Kamerakalibrierung bestimmten Parameter ($x_0, y_0, c, A1, A2, A3, C1, C2$) auf das Live-Bild des GeoARS anzuwenden, wird der **nachfolgende Echtzeitkorrekturansatz** durch Zugriff auf die Grafikipipeline (engl. rendering pipeline) unter Anwendung von Schattierer-Programmen (engl. shader) vorgeschlagen.

„Die Bilder werden hierzu auf einer beliebig geometrisch modellierbaren Oberfläche angeheftet und als Textur weiterverarbeitet. Schattierer ermöglichen es zum einen die modellierte dreidimensionale geometrische Trägerfläche zu verändern, wie auch Veränderungen an jedem einzelnen Pixel der Textur vorzunehmen.“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015]. Die Abbildung 7.22 verdeutlicht diese Verfahrensweise mit Pixel- und Vertex-Schattierern.

Nach Gleichung (7.33),(7.44) und (7.45) ergeben sich die auf den Hauptpunkt bezogenen Bildkoordinaten nach:

$$x' = x^o - (\Delta x'_{rad}(A1, A2, A3) + \Delta x'_{tan}(B1, B2) + \Delta x'_{aff}(C1, C2)) \quad (7.44)$$

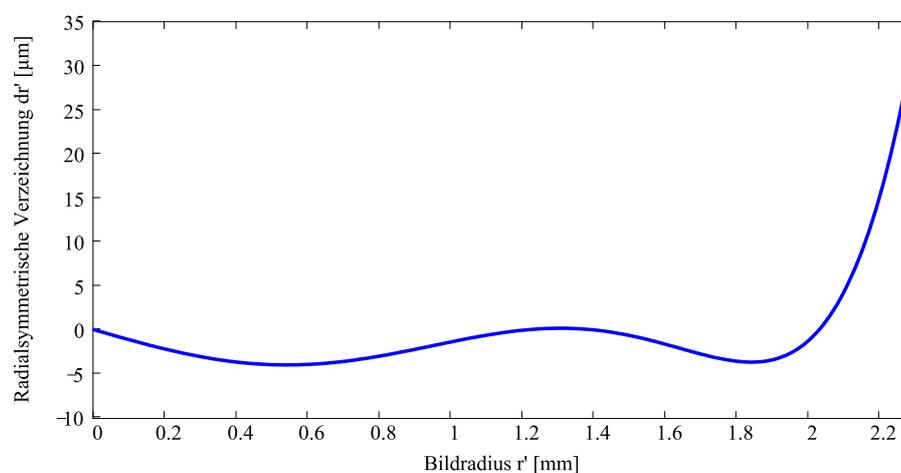


Abbildung 7.21: Verzeichnungskurve: radial-symmetrische Verzeichnung Kamera-modul GT-I9250 mit CMOS-Sensor S5K4E5

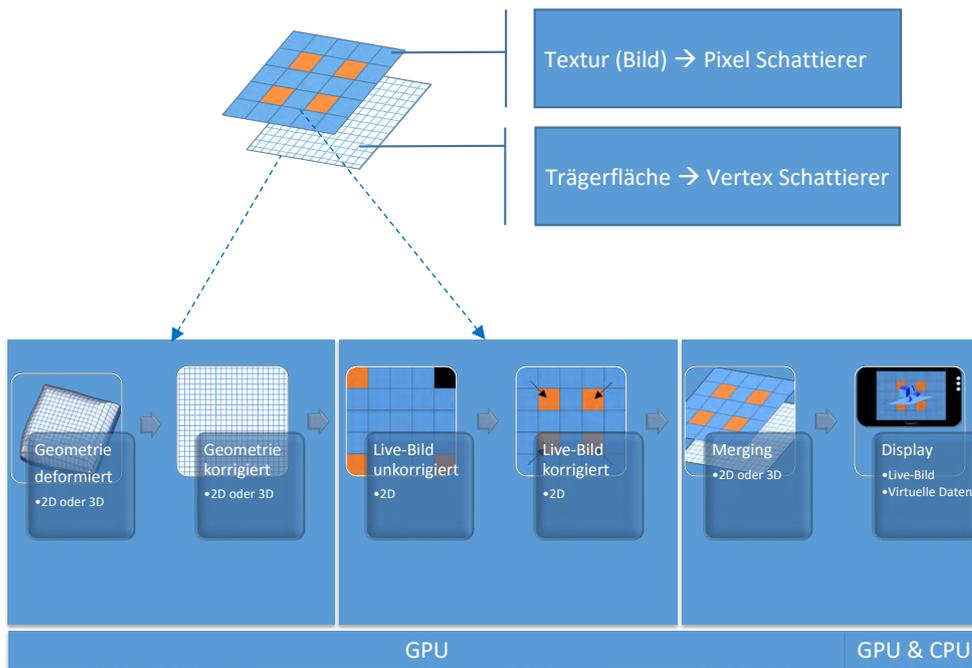


Abbildung 7.22: Echtzeitkorrektur des Live-Bildes mit Schattierern

und für die y-Achse zu:

$$y' = y^o - (\Delta y'_{rad}(A1, A2, A3)) + \Delta y'_{tan}(B1, B2) + \Delta y'_{aff} . \tag{7.45}$$

Da die Rechenoperationen des Pixel-Schattierers im Texturkoordinatensystem (t-System) erfolgt, die Korrekturformeln aus der Kamerakalibrierung jedoch im Bildkoordinatensystem (d-System) erfolgen, ist im Schattierer-Programm noch ein Zwischenschritt durchzuführen und vom t-System in das d-System zu transformieren, vgl. Abbildung 7.23. Die Koordinatentransformation erfolgt nach dem Konzept homogener Koordinaten (vgl.

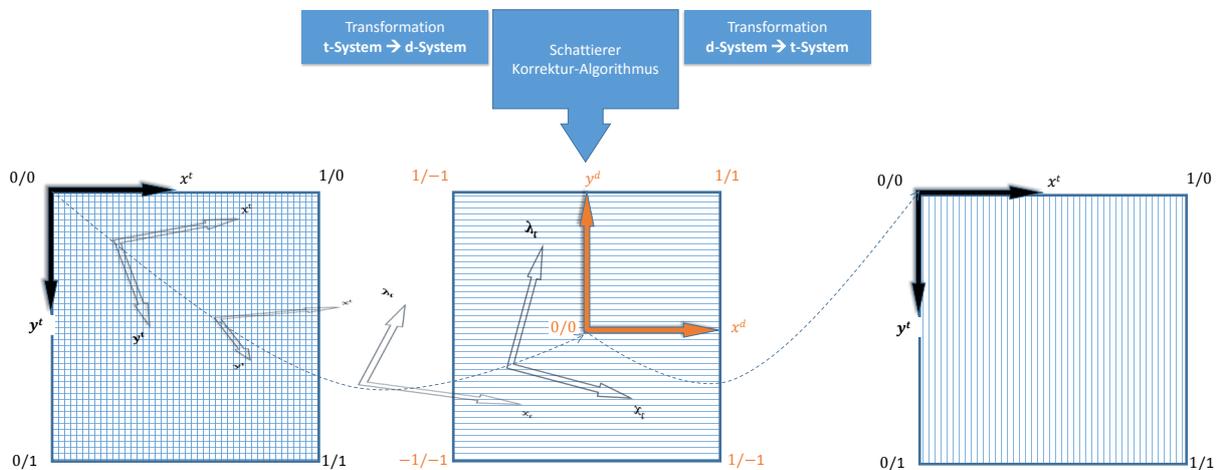


Abbildung 7.23: Koordinatensystemtransformation zwischen t-System und d-System

[Foley u. a. 2010]) über die folgende Matrizenmultiplikation:

$$\begin{pmatrix} x^d & y^d & 1 \end{pmatrix}^T = \mathbf{T}_{[3 \times 3]} \cdot \mathbf{S}_{[3 \times 3]} \cdot \mathbf{D}_{[3 \times 3]} \cdot \begin{pmatrix} x^t & y^t & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (7.46)$$

Hierbei werden die Koordinaten im Quellsystem x^t, y^t mithilfe der Drehmatrix \mathbf{D} , Skalierungsmatrix \mathbf{S} und Translationsmatrix \mathbf{T} in das Zielsystem x^d, y^d überführt. Anschließend werden die Bildkorrekturen entsprechend der Korrekturformeln der Gleichungen (7.44) und (7.45) durchgeführt. Abschließend erfolgt die Rücktransformation in das t-System:

$$\begin{pmatrix} x^t & y^t & 1 \end{pmatrix}^T = \mathbf{D}_{[3 \times 3]}^{-1} \cdot \mathbf{S}_{[3 \times 3]}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{[3 \times 3]}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x^d & y^d & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (7.47)$$

Der in der Programmiersprache OpenGL Shading Language (GLSL) geschriebene Quellcode 7.1 zeigt den relevanten Auszug aus dem Pixel-Schattierer, der die Hin- und Rücktransformationen beschreibt.

```

1 ...
2 //Pixel-Schattierer
3 uniform samplerExternalOES shaderTexturLivebild;
4 varying vec2 varying2D_TexturKoordinate;
5 vec2 vec2D_TexturKoordinate = varying2D_TexturKoordinate;
6 vec3 vecH2D_TexturKoordinate;
7 mat3 T;
8 mat3 M;
9 mat3 D;
10 vec3 XT;
11 vec3 XB;
12 ...
13 void main() {
14     T = mat3(1.0,0.0,-1.0, 0.0,1.0,-1.0, 0.0,0.0,1.0);
15     M = mat3(2.0,0.0,0.0, 0.0,2.0, 0.0, 0.0,0.0,1.0);
16     D = mat3(cos(al),sin(al),0.0, -sin(al),cos(al),0.0, 0.0,0.0,1.0);
17     XT = vec3(varying2D_TexturKoordinate.x,varying2D_TexturKoordinate.y,1.0);
18     XB = vec3(-1.0,-1.0,0.0) + M * D * XT;
19     vec2D_TexturKoordinate = vec2(XB.x,XB.y);
20     r = sqrt(vec2D_TexturKoordinate.x*vec2D_TexturKoordinate.x+vec2D_TexturKoordinate.y*
21         vec2D_TexturKoordinate.y);
22     dr = A1 * pow(r, 3.0) + A2 * pow(r, 5.0) + A3 * pow(r, 7.0);
23     dx_sym = vec2D_TexturKoordinate.x * dr / r;
24     dy_sym = vec2D_TexturKoordinate.y * dr / r;
25     dx_asym = B1*( pow(r, 2.0) + 2.0 * pow(vec2D_TexturKoordinate.x, 2.0) ) + 2.0 * B2 * vec2D_
26         TexturKoordinate.x * vec2D_TexturKoordinate.y;
27     dy_asym = B2*( pow(r, 2.0) + 2.0 * pow(vec2D_TexturKoordinate.y, 2.0) ) + 2.0 * B1 * vec2D_
28         TexturKoordinate.x * vec2D_TexturKoordinate.y;
29     dx_aff = C1 * vec2D_TexturKoordinate.x + C2 * vec2D_TexturKoordinate.y;
30     dy_aff = 0.0;
31     vec2D_TexturKoordinate.x = vec2D_TexturKoordinate.x + xH + dx_sym + dx_asym + dx_aff;
32     vec2D_TexturKoordinate.y = vec2D_TexturKoordinate.y + yH + dy_sym + dy_asym + dy_aff;
33     XT = vec3(vec2D_TexturKoordinate.x, vec2D_TexturKoordinate.y, 1.0);
34     XT = Matrix.InvertM(mat3(2.0,0.0,0.0, 0.0,2.0, 0.0, 0.0,0.0,1.0)) * ( XT + vec3(1.0,1.0,0.0) )
35         ;
36     vec2D_TexturKoordinate = vec2(XT.x, XT.y);
37     gl_FragColor = texture2D(shaderTexturLivebild, vec2D_TexturKoordinate); }

```

Quelltext 7.1: (GLSL) Algorithmus zur Echtzeit-Bild-Korrektur, Auszug aus dem Pixel-Schattierer

Mit dem erarbeiteten Verfahren lassen sich Kamerafehler korrigieren und in Echtzeit auf die einzelnen Live-Bilder des Bilddatenstromes anwenden. Das Verfahren trägt somit seinen Teil zu einer verbesserten 3D-Registrierung im Gesamtsystem bei.

7.10.2 Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System

Tabelle 7.18: Aufgaben Bildsensor und Aufgabenerweiterung im Rahmen dieser Arbeit

Aufgabe	Beschreibung	stationäres GeoARS	mobiler pedestrisches GeoARS
Darstellung	Bereitstellung von Abbildern der Realität für video see-through Systeme (Hauptaufgabe), vgl. Abschnitt 6.4.1	●	●
Detektion	Objekterkennung, Bewegungserkennung, Objektverfolgung	●	●
räumliche Lagebestimmung	inside-out/outside-in tracking mittels Landmarken (Markern)	◐	◐
Aufgabenerweiterung im Rahmen dieser Arbeit:			
Orientierung	Berechnung von Horizontalwinkel- und Vertikalwinkelberechnung aus dem Bild bzw. aus Bildfolgen	●	●
Schalter	Aktivierung bzw. Deaktivierung anderer Sensoren	●	●
Integrität	Beitrag zur Integrität durch Schaffung von Überbestimmung für die Orientierungsberechnung	●	●
Kontrolle	Definitionsgrundlage von „Nullrichtungen“ stationärer Systeme	●	○

● ≙ nutzbar | ○ ≙ nicht nutzbar | ◐ ≙ teilweise nutzbar

Die Bereitstellung von Abbildern der Realität für die Darstellungskomponente in video see-through Systemen stellt für die in dieser Arbeit vorgestellten GeoARS die Hauptaufgabe eines Bildsensors und Kamerasystems dar. In einigen Anwendungsbereichen der Augmented Reality und insbesondere im Indoorbereich nimmt die Detektion von Landmarken, im AR-Umfeld auch als Marker bezeichnet, mittels Bildsensor einen besonders hohen Stellenwert ein, da hierüber die Bestimmung der räumlichen Lage (entweder der Kamera oder der umgebenden Objekte) erfolgt. Eine Landmarke ist gemäß DIN EN ISO 8373 ein „erkennbares künstliches oder natürliches Objekt, das zur Lokalisierung ... dient“. Für GeoARS kann dieses Verfahren jedoch regelmäßig nicht angewendet werden, da der Bildsensor für diese Aufgabe durch diverse Umgebungsfaktoren, z.B. wechselnde Lichtverhältnisse oder dynamische Realobjekte, konterkariert wird, vgl. Tabelle 2.4 (S. 20). Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch Lösungen erarbeitet, die es ermöglichen eine echtzeitfähige Nutzung des Bildsensors über die Hauptaufgabe (Darstellung) hinaus auch für Orientierungsprozessierung (vgl. Abschnitt 7.12.7) zu nutzen und damit weiterführend den Bildsensor auch für Schalt-, Integritäts- und Kontrollaufgaben einzusetzen.

Eine Übersicht über die möglichen Aufgabenbereiche eines Bildsensors und Kamerasystems stellt die Tabelle 7.18 zusammenfassend dar.

7.11 Virtuelle Kamera

Das Koordinatensystem der virtuellen Kamera (v-System) wurde bereits in Abschnitt 3.6.2.11 definiert. Es gilt nun noch festzulegen, wie groß der Sichtbereich der virtuellen Kamera zur Darstellung der virtuellen Daten (Geodaten) ist.

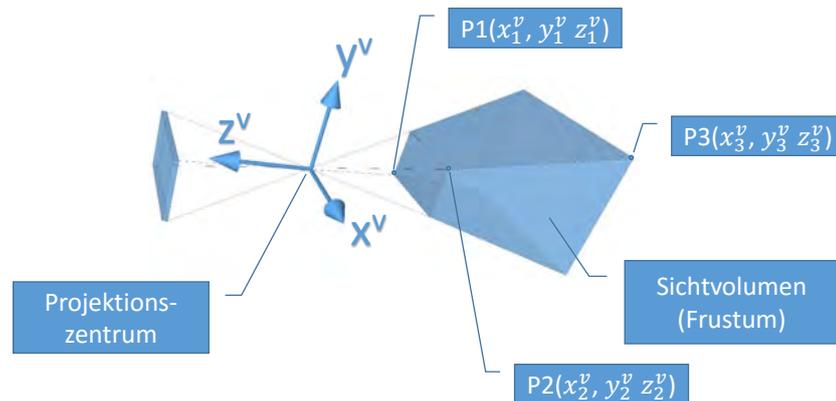


Abbildung 7.24: Koordinatensystem der virtuellen Kamera (v-System) mit Sichtvolumen

In Anlehnung an Sellers u. a. [2015] wird für GeoARS der Sichtbereich der virtuellen Kamera geometrisch über das Sichtvolumen (Frustum) und mathematisch über die dazugehörige Projektionsmatrix \mathbf{P} in metrischen Koordinaten des Koordinatensystems der virtuellen Kamera (vgl. Abbildung 7.24) definiert:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \frac{2 \cdot z_1^v}{x_2^v - x_1^v} & 0.0 & \frac{x_2^v + x_1^v}{x_2^v - x_1^v} & 0.0 \\ 0.0 & \frac{2 \cdot z_1^v}{y_2^v - y_1^v} & \frac{y_2^v + y_1^v}{y_2^v - y_1^v} & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & \frac{-(z_1^v + z_3^v)}{z_3^v - z_1^v} & \frac{-2 \cdot z_1^v \cdot z_3^v}{z_3^v - z_1^v} \\ 0.0 & 0.0 & -1.0 & 0.0 \end{pmatrix}, \quad (7.48)$$

in Anlehnung an [Shreiner u. a. 2013]. Zur Herleitung der vorgenannten Projektionsmatrix wird auf Nischwitz u. a. [2007] verwiesen. Die Projektionsmatrix wird im Renderer des GeoARS eingesetzt und deren Verwendung im gesamten Kontext in Abschnitt 7.13 gezeigt.

Es wird anhand der Projektionsmatrix deutlich, dass Koordinaten von drei räumlichen Punkten zur Definition des Frustums dienen und damit der horizontale und vertikale Öffnungswinkel der virtuellen Kamera und der minimale und maximale Sichtbereich zur Visualisierung der Geodaten festgelegt wird.

Für GeoARS tritt der Fall auf, dass die reale Kamera nicht mittig am mobilen Endgerät bzw. mittig hinter dem Display angebracht ist. Der entstehende optische Versatz ist dann als Korrekturwert in der Projektionsmatrix zu berücksichtigen. Hier kann nach dem Vorschlag von Kooima [2008] in Verbindung mit Bimber u. Raskar [2005] verfahren werden.

Für Implementierungen, in denen das Abbild auf dem Display zusätzlich gestaucht wird, z.B. durch Menüleisten oder ähnliches, ist darüber hinaus ein weiterer Korrekturfaktor einzuführen, vgl. Abschnitt 6.4.1.

Auf die **Steuerung der virtuellen Kamera** und die damit zusammenhängenden Koordinatentransformationen wird weiterführend in Abschnitt 7.13 eingegangen.

7.12 Bestimmung der räumlichen Lage eines GeoARS

7.12.1 Berechnung von Nick- und Rollwinkel

Über den allgemeinen zweidimensionalen trigonometrischen Zusammenhang:

$$\sin \alpha = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}} \rightarrow \alpha = \arcsin \frac{f}{g} \quad (7.49)$$

- g = Schwerebeschleunigung; $g = |\mathbf{g}|$
- f = gemessene Beschleunigung (spezifische Kraft) einer Sensorachse

entsteht der für GeoARS relevante Ansatz zur Bestimmung des Nick- θ und Rollwinkels ϕ eines GeoARS, vgl. Abbildung 7.25.

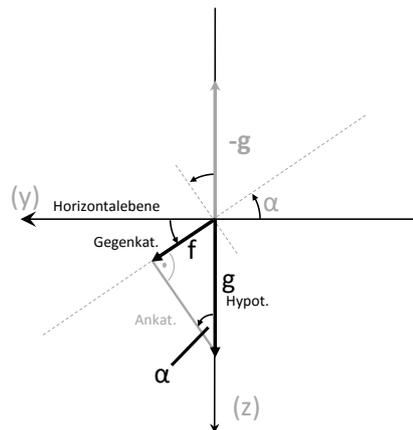


Abbildung 7.25: Schwerebeschleunigung (g) und gemessene Beschleunigung (f)

Für den praktisch regelmäßig vorliegenden Fall dreiachsiger Beschleunigungssensoren ergibt sich der in Abbildung 7.26 dargestellte Fall der Bestimmung von Richtungswinkeln im dreidimensionalen Vektorraum. Die Gleichung (7.49) kann jedoch entgegen den Ausführungen in [Aggarwal u. a. 2010] nicht in derselben Form zur Bestimmung der übrigen Richtungswinkel des dreidimensionalen Vektors angewendet werden. Für den Fall des dreidimensionalen Richtungsvektors der Beschleunigungswerte ergeben sich drei voneinander abhängige Richtungswinkel des Vektors, vgl. [Bronstein u. a. 2015].

Der Ansatz erweitert sich nach Abbildung 7.26 zu:

$$\tan \alpha = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} \rightarrow \alpha = \phi = \arctan \frac{y}{z} \quad (7.50)$$

und

$$\tan \beta = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} \rightarrow \beta = \theta = \arctan \frac{x}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (7.51)$$

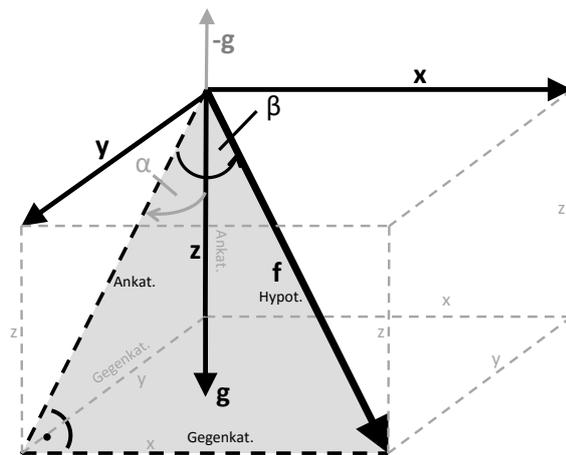


Abbildung 7.26: Richtungswinkel im dreidimensionalen Vektorraum

Nach Gleichung (7.51) und (7.50) ergeben sich der Nick- und Rollwinkel eines GeoARS zu

$$\theta = \arctan \frac{f_x}{\sqrt{(f_y)^2 + (f_z)^2}} \quad (7.52)$$

beziehungsweise

$$\phi = \arctan \frac{f_y}{f_z}. \quad (7.53)$$

Diese Gleichungen werden durch Angaben in Farrell [2008] und STMicroelectronics [2014] gestützt.

7.12.2 Echtzeittransformationen mit Navigationsformeln

Die Sensoren von GeoARS ermöglichen grundsätzlich auch eine Bestimmung der Position über die Methoden der Inertialnavigation. Bewegt sich das GeoARS geradlinig und sind die Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeit bekannt, so kann aus den **Messwerten des Beschleunigungssensors** in Verbindung mit den **Messwerten des Drehratensensors** durch mehrfaches Integrieren die Position bestimmt werden, vgl. [Knickmeyer 2003]. In diesem Kapitel werden zunächst die grundsätzlichen Gleichungen der Inertialnavigation erarbeitet. Danach erfolgt die Feststellung, wie und unter welchen Voraussetzungen diese explizit für GeoARS anzuwenden sind. Abschließend wird ein Implementierungsalgorithmus für GeoARS erarbeitet.

7.12.3 Gleichungen der Inertialnavigation

Für Körper gelten die Newtonschen Gesetze der Mechanik, Kinematik und der Dynamik. Um die Bewegung eines Körpers nach diesen physikalischen Gesetzen im Raum zu beschreiben, wird die Form des Körpers (hier: des GeoARS) zunächst vernachlässigt und das GeoARS vereinfacht als Massepunkt abstrahiert.

Die Position dieser Punktmasse im Raum kann in dreidimensionalen Koordinatensystem wie folgt beschrieben werden:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (7.54)$$

Dieser Vektor bestimmt die Lage des Punktes im Raum ausgehend vom Koordinatenursprung bis hin zum Punktort und wird als Ortsvektor \mathbf{x} bezeichnet, vgl. [Heck 2003]. Der Betrag des Ortsvektors errechnet sich ebenfalls nach [Heck 2003] mit $N = 3$ zu:

$$|\mathbf{x}| = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i)^2} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}. \quad (7.55)$$

Ändert sich die Position der Punktmasse mit der Zeit, so ergibt sich die Geschwindigkeit \mathbf{v} der Bewegung, vgl. [Woernle 2011]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}(t) \quad (7.56)$$

Eine Änderungen der Geschwindigkeit mit der Zeit ergibt weiterführend die Beschleunigung \mathbf{a} , vgl. [Woernle 2011]:

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \frac{d}{dt} \dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{d}{dt} \mathbf{v}(t) = \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{a}(t) \quad (7.57)$$

Gleichung (7.57) kann jedoch nicht direkt für die Inertialnavigation verwendet werden. Aufbauend auf dem Einstein'schen Äquivalenzprinzip, nach dem träge und schwere Masse als äquivalent anzusehen sind, kann ein Sensor nicht zwischen gravitativer und kinematischer Beschleunigung unterscheiden. Insbesondere der Beschleunigungssensor eines GeoARS kann nicht zwischen beiden Beschleunigungsarten unterscheiden. Die Beschleunigungsmesser eines GeoARS messen, da sie sich innerhalb eines Gravitationsfeldes befinden, stets die Summe aus kinematischer und gravitativer Beschleunigung – die spezifische Kraft, vgl. [Knickmeyer 2003]. Es gilt hier die Grundgleichung der Inertialgeodäsie im inertialen Koordinatensystem:

$$\mathbf{f}^i = \ddot{\mathbf{x}}^i - \mathbf{G}^i, \quad (7.58)$$

vgl. u.a. [Titterton u. Weston 2004], [Knickmeyer 2003] mit

- $\ddot{\mathbf{x}}^i$: inertielle Beschleunigung; Vektor der Beschleunigung des GeoARS
- \mathbf{G}^i : gravitative Beschleunigung; Vektor der Gravitation
- \mathbf{f}^i : Vektor der spezifischen Kraft.

Die Navigationsberechnung des GeoARS wird im n-System durchgeführt. Hierzu ist die nur im i-System gültige Gleichung (7.58) über das e-System in das n-System zu überführen. Dabei treten neben der Beschleunigung $\ddot{\mathbf{x}}^i$ im b-System noch weitere Trägheitsbeschleunigungen auf: **Zentripetalbeschleunigung**, **Coriolisbeschleunigung**, **Euler-Beschleunigung** (Kreiselbeschleunigung) [Knickmeyer 2003], die der Gleichung hinzuzufügen sind.

Für die Navigationsrechnung im n-System nach Titterton u. Weston [2004] kann die nachfolgende Gleichung aufgestellt werden. Zur Herleitung aller grundlegenden Gleichungen zur Beschreibung inertialer Navigations-

systeme wird diesbezüglich auf Titterton u. Weston [2004] und Jekeli [2001] verwiesen

$$\mathbf{f}^n = \dot{\mathbf{v}}^n + (2 \boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}^n - (\mathbf{C}_i^n \mathbf{G}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie} \times [\boldsymbol{\omega}_{ie} \times \mathbf{x}]). \quad (7.59)$$

Dabei bedeutet:

- $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n \times \mathbf{v}^n$: Anteil der Coriolis-Beschleunigung (resultiert aus der eigenen Geschwindigkeit)
- $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$: Drehrate des n-Systems in Bezug auf das erdfeste System, Transportrate
- $\mathbf{C}_i^n \mathbf{G}^i$: gravitative Anteil an der Gravitationsbeschleunigung im n-System
- $\boldsymbol{\omega}_{ie} \times [\boldsymbol{\omega}_{ie} \times \mathbf{x}]$: Zentrifugalbeschleunigung
- $(\mathbf{C}_i^n \mathbf{G}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie} \times [\boldsymbol{\omega}_{ie} \times \mathbf{x}])$: Die Differenz zwischen dem gravitativen Anteil im n-System und dem Zentrifugaleil entspricht dem Schwerevektor \mathbf{g}^n :

$$\mathbf{C}_i^n \mathbf{G}^i - \boldsymbol{\omega}_{ie} \times [\boldsymbol{\omega}_{ie} \times \mathbf{x}] = \mathbf{g}^n. \quad (7.60)$$

Damit ergibt sich zunächst:

$$\mathbf{f}^n = \dot{\mathbf{v}}^n + (2 \boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}^n - \mathbf{g}^n \quad (7.61)$$

In Jekeli [2001] ist zudem die nachfolgende Variante aufgeführt, die mit schiefsymmetrischen Matrizen $\boldsymbol{\Omega}$ (vgl. auch Gleichung 7.86) ohne Kreuzprodukte auskommt:

$$\mathbf{f}^n = \dot{\mathbf{v}}^n + (2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n)\mathbf{v}^n - (\mathbf{C}_i^n \mathbf{G}^i - \mathbf{C}_e^n \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \boldsymbol{\Omega}_{ie}^e \mathbf{x}^e). \quad (7.62)$$

Sphärische Approximation der Erdfigur:

Titterton u. Weston [2004] verwenden für die Terme der Gleichung (7.59) folgende Notation:

$$\boldsymbol{\omega}_{ie}^n = \begin{pmatrix} \omega \cos \varphi & 0 & -\omega \sin \varphi \end{pmatrix}^T, \quad (7.63)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{v_E}{(R_0 + h) \cos \varphi}, \quad (7.64)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{v_N}{R_0 + h}, \quad (7.65)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{en}^n = \begin{pmatrix} \dot{\lambda} \cos \varphi & -\dot{\varphi} & -\dot{\lambda} \sin \varphi \end{pmatrix}^T, \quad (7.66)$$

$$\mathbf{v}_e^n = \begin{pmatrix} v_N & v_E & v_D \end{pmatrix}^T, \quad (7.67)$$

$$\mathbf{f}^n = \begin{pmatrix} f_N & f_E & f_D \end{pmatrix}^T, \quad (7.68)$$

sodass sich mit R_0 als Erdradius und der Höhe h

$$\boldsymbol{\omega}_{en}^n = \begin{pmatrix} \frac{v_E}{R_0 + h} & -\frac{v_N}{R_0 + h} & -\frac{v_E}{R_0 + h} \tan \varphi \end{pmatrix}^T \quad (7.69)$$

$\boldsymbol{\omega}_{en}^n$ als sphärische Berechnungsvariante ergibt.

Der Schwerevektor \mathbf{g}^n berechnet sich nach Titterton u. Weston [2004] zu:

$$\mathbf{g}^n = -\frac{\omega^2 \cdot (R_0 + h)}{2} \begin{pmatrix} \sin 2\varphi & 0 & 1 + \cos 2\varphi \end{pmatrix}^T + \mathbf{g}. \quad (7.70)$$

Durch Einsetzen der vorgenannten Elemente in die Gleichung (7.59) ergeben sich die Beschleunigungskomponenten der *Navigationsgleichung im topozentrischen System (sphärische Approximation)* wie folgt:

$$\mathbf{f}^n = \begin{pmatrix} f_N \\ f_E \\ f_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{v}_N + v_E (2\omega + \dot{\lambda}) \sin \varphi - v_D \dot{\varphi} - \zeta g \\ \dot{v}_E - v_N (2\omega + \dot{\lambda}) \sin \varphi - v_D (2\omega + \dot{\lambda}) \cos \varphi + \eta g \\ \dot{v}_D + v_E (2\omega + \dot{\lambda}) \cos \varphi + v_N \dot{\varphi} + g \end{pmatrix} \quad (7.71)$$

bzw. ausführlich:

$$\mathbf{f}^n = \begin{pmatrix} f_N \\ f_E \\ f_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{v}_N + 2\omega v_E \sin \varphi - \frac{v_N v_D + v_E^2 \tan \varphi}{R_0 + h} - \zeta g \\ \dot{v}_E - 2\omega (v_N \sin \varphi + v_D \cos \varphi) - \frac{v_E}{R_0 + h} (v_D + v_N \tan \varphi) + \eta g \\ \dot{v}_D + 2\omega v_E \cos \varphi + \frac{v_E^2 + v_N^2}{R_0 + h} - g \end{pmatrix}. \quad (7.72)$$

- ζ : Nord-Süd-Komponente der Lotabweichung θ
- η : Ost-West-Komponente der Lotabweichung
- ω : Drehrate der Erde
- R_0 : für sphärische Variante

Erweiterung auf ellipsoidische Approximation der Erdfigur:

Bei Verwendung von Rotationsellipsoidmodellen, statt der Kugel als Rechenfläche, muss der sphärische Radius R_0 durch den Meridiankrümmungsradius beziehungsweise Querkrümmungsradius wie folgt ersetzt werden [Heck 2003], [Titterton u. Weston 2004]:

$$M = R_N = \frac{c}{(1 + e'^2 \cos^2 \varphi)^{3/2}}, \quad (7.73)$$

$$N = R_E = \frac{c}{(1 + e'^2 \cos^2 \varphi)^{1/2}}. \quad (7.74)$$

Mit

- M : Meridiankrümmungsradius
- N : Querkrümmungsradius
- c : Polkrümmungsradius $c = \frac{a^2}{b}$
- e' : zweite numerische Exzentrizität $e' = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$

ergibt sich dann für die Rechnung auf Rotationsellipsoiden für λ und ϕ :

$$\dot{\lambda} = \frac{v_E}{(R_E + h) \cos \varphi} \quad (7.75)$$

und

$$\dot{\phi} = \frac{v_N}{R_N + h}. \quad (7.76)$$

Einsetzen in Gleichung (7.66) führt zur ω_{en}^n in der Form:

$$\omega_{en}^n = \begin{pmatrix} \frac{v_E}{R_E + h}, & -\frac{v_N}{R_N + h}, & -\frac{v_E}{R_E + h} \tan \varphi \end{pmatrix}^T. \quad (7.77)$$

Die Realisierung der *Navigationsgleichung im topozentrischen System (ellipsoidische Approximation)* erfolgt abschließend durch Einsetzen der vorstehenden Terme in Gleichung (7.71).

Schwerevektor \mathbf{g} und Approximation:

Wie eingangs beschrieben, kann sensorisch aufgrund des Einstein'schen Äquivalenzprinzip nicht zwischen Gravitation und inertialer Beschleunigung unterschieden werden. Somit wird es zunächst erforderlich, dass ein GeoARS intern gespeicherte Informationen über das Schwerfeld im Arbeitsgebiet verwendet.

Der für viele Gebiete der Erde kleine Winkel zwischen der Richtung von \mathbf{g} und der breitenabhängigen Normalschwere γ wird als Lotabweichung bezeichnet. Bezüglich der Bezugsrichtung existieren in der Literatur verschiedene Definitionen: Definition nach Moldenski, nach Helmert und nach Pizetti, vgl. [Torge u. Müller 2012]. In dieser Arbeit wird der Helmert-Definition gefolgt, bei der die Normale durch die ellipsoidischen Koordinaten festgelegt wird, vgl. Abbildung 7.27. Die Lotabweichungen betragen in Deutschland wenige

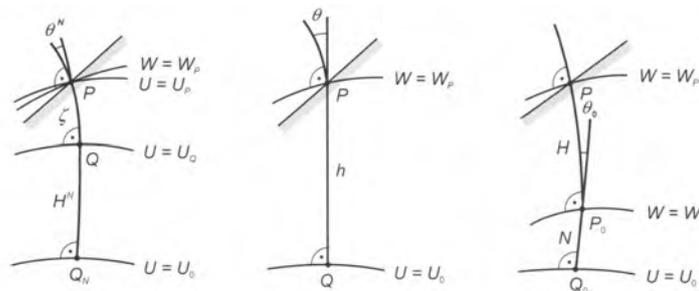


Abbildung 7.27: Lotabweichung verschiedene Definitionen: nach Molodenski (links), Helmert (mitte), Pizetti (rechts), vgl. [Torge u. Müller 2012], [Torge 2003]

Bogenaltsekunden. Voigt [2013] gibt in seiner Dissertationsschrift globale Abweichungen von $\pm 20''$ ($\approx 0.006^\circ$) und für das Hochgebirge $\pm 100''$ ($\approx 0.03^\circ$) an.

Die tatsächliche Schwerebeschleunigung kann für GeoARS durch die errechenbare breitenabhängige Normalschwere γ approximiert werden ($g \approx \gamma$). Als Normalschwere bezeichnet man den Betrag des Vektors der Schwerebeschleunigung, wobei sich der Normalschwerevektor γ seinerseits als Gradient des skalaren Normalschwerepotentials bildet, vgl. [Torge 2001].

Nach Moritz [2000], Torge [2001] sowie Rülke u. Liesch [2013] ergibt sich, der Formel von Somigliana (1929) folgend, für die Normalschwere auf dem Ellipsoid:

$$\gamma_0 = \gamma_a \frac{1 + k \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (7.78)$$

Hierbei bedeuten:

- e : erste numerische Exzentrizität $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$
- a : große Halbachse des gewählten Rotationsellipsoids
- b : kleine Halbachse des gewählten Rotationsellipsoids
- k : Hilfsgröße $k = \frac{b}{a} \frac{\gamma_b}{\gamma_a} - 1$
- γ_a : Normalschwere am Äquator
- γ_b : Normalschwere am Pol .

Da sich im praktischen Einsatz der Systemstandpunkt des GeoARS in der Regel nicht direkt auf dem Rotationsellipsoid befindet, ist der Abstand zu diesem zu beachten. Torge [2001] bietet hierzu nachstehende Gleichung zur Berechnung der Normalschwere $\gamma(\varphi, h)$ in Abhängigkeit von φ und der Höhe h über dem Ellipsoid an:

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{2}{a} (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) h + \frac{3}{a^2} h^2 \right) \quad (7.79)$$

mit

- f : Abplattung $f = \frac{a-b}{a}$, vgl. [Moritz 2000]
- m : $m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM}$, vgl. [Moritz 2000]
- ω : Drehrate der Erde
- GM : Produkt aus Newtonscher Gravitationskonstante und Masse der Erde (inklusive Atmosphäre), vgl. [Moritz 2000].

Somit lässt sich die Gleichung (7.72) unter Verwendung der Normalschwere sowie unter Einbeziehung der Lotabweichungskomponenten und der Schwerestörung δg , wobei $\delta g = g - \gamma$ [Torge 2003], schreiben:

$$\mathbf{f}^n = \begin{pmatrix} f_N \\ f_E \\ f_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{v}_N + 2 \omega v_E \sin \varphi - \frac{v_N v_D + v_E^2 \tan \varphi}{R_0 + h} - \xi \gamma \\ \dot{v}_E - 2 \omega (v_N \sin \varphi + v_D \cos \varphi) - \frac{v_E}{R_0 + h} (v_D + v_N \tan \varphi) + \eta \gamma \\ \dot{v}_D + 2 \omega v_E \cos \varphi + \frac{v_E^2 + v_N^2}{R_0 + h} - (\gamma + \delta g) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \xi \gamma \\ \eta \gamma \\ (\gamma + \delta g) \end{pmatrix}. \quad (7.80)$$

- R_0 : für sphärische Variante

Die Berechnung des Normalschwerevektors setzt das Bekanntsein der Position (geographische Koordinaten) des Standpunktes und Daten zum Erdschwerefeld ($\xi \gamma, \eta \gamma, \delta g$) voraus.

7.12.3.1 Anwendung der Navigationsformeln auf GeoARS

In Abhängigkeit der Genauigkeit der Sensoren des verwendeten GeoARS können einzelne Terme der Ausgangsgleichung (7.59) vernachlässigt werden, andere wiederum nicht:

Zentrifugalbeschleunigung:

Die Zentrifugalbeschleunigung erreicht am Äquator mit etwa $0.034 \text{ m/s}^2 = 3400 \text{ mGal}$ ihr Maximum. Die Auflösung der Beschleunigungssensoren beträgt ca. 0.0006 m/s^2 bzw. ca. 60 mGal , vgl. Abschnitt 7.7, sodass der Term für die Zentrifugalbeschleunigung beachtet werden muss.

Für sehr genaue Berechnungen ist die Kenntnis über die genaue Schwere und die Lotabweichung am Standpunkt erforderlich. Hierbei treten globale Lotabweichungen von $\pm 20''$ bis etwa $\pm 100''$ auf. Die Neigungswinkelauflösung der einbezogenen Sensoren liegt nicht unter 0.003° , vgl. Abschnitt 7.7, sodass eine Beachtung des Termes zur Schwerebeschleunigung notwendig ist. Von einer Implementierung der Schwerefelddaten mit den horizontalen Lotabweichungskomponenten kann jedoch derzeit noch abgesehen werden, da die Horizontalwinkelauflösung eines mobil-pedestrischen GeoARS derzeit insgesamt noch größer als 0.2° beträgt, vgl. Abschnitt 7.8.1.

Coriolisbeschleunigung:

Der Term $2 \boldsymbol{\omega}_{ie} \times \boldsymbol{v}_e$ kann vernachlässigt werden, da die maximale Coriolis-Beschleunigung bei einer Geschwindigkeit von ca. 4 km/h mit $1.6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$ etwa zwei Zehnerpotenzen unterhalb des Auflösungsvermögens der kostengünstigen Beschleunigungsmesser mobiler Endgeräte liegt, vgl. Abschnitt 7.7.

[Titterton u. Weston 2004] geben zudem an, dass für kurze zeitliche Perioden oder für kurze Distanzen unter Verwendung eines Bezugspunktes (fester Ausgangspunkt) auf der Erde oder für Berechnungen in einem lokalen Koordinatensystem die vorstehende Formel vereinfacht werden kann. Diesbezüglich kann ein erdfester topozentrischer Referenzrahmen mit dem Ursprung des erdfesten Bezugspunktes definiert werden. Für Zeiträume von weniger als 10 Minuten können die Effekte der Erdrotation und somit die Coriolis-Korrekturen in der Navigationsgleichung vernachlässigt werden, vgl. [Titterton u. Weston 2004].

Euler-Beschleunigung:

Auf die Einführung eines Terms zur Berücksichtigung der Euler-Beschleunigung ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_{ie} \boldsymbol{x}$) in den vorstehenden Gleichungen wird verzichtet. Die Variation der Erddrehrate erreicht nach Torge [2001] etwa $10^{-8} \omega_{ie}$. Die daraus resultierende Beschleunigung liegt mit $< 0.3 \text{ mGal}$ deutlich unterhalb der Auflösung der Beschleunigungssensoren (ca. $0.0006 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ bzw. ca. 60 mGal , vgl. Abschnitt 7.7).

Die vorstehenden Überlegungen führen dazu, dass sich die Navigationsgleichungen (7.59) und (7.61) in Abhängigkeit der Genauigkeit der Sensoren vereinfachen zu:

$$\boldsymbol{f}^n = \dot{\boldsymbol{v}}^n - \boldsymbol{\gamma}(\phi, h, \gamma_0, f, m, \omega, GM). \quad (7.81)$$

7.12.3.2 Implementierungsalgorithmus für GeoARS

Die Berechnung der räumlichen Lage eines GeoARS im n-System erfolgt über die Messwerte der Inertialsensoren – Drehraten und Beschleunigungen. Hierzu wird die Gleichung (7.81) nach $\dot{\boldsymbol{v}}^n$ umgestellt, die Notation in Anlehnung an die Gleichung (7.58) – Grundgleichung der Inertialgeodäsie – von $\dot{\boldsymbol{v}}^n$ nach $\dot{\boldsymbol{x}}^n$ geändert und die Drehmatrix \boldsymbol{C} eingeführt:

$$\dot{\boldsymbol{x}}^n = \boldsymbol{C}_b^n \boldsymbol{f}_b^n + \boldsymbol{\gamma}. \quad (7.82)$$

Die Drehmatrix \mathbf{C} als Richtungskosinusmatrix dient hierbei zur Aktualisierung der Ausrichtung zwischen dem b-System und dem n-System. Mit ihr werden die Messwerte des Drehratensensors vom b-System in das n-System überführt.

Die Richtungskosinusmatrix \mathbf{C}_b^n errechnet sich durch aufeinanderfolgende Multiplikation der Elementardrehungen nach der in Abschnitt D.1.1 beschriebenen Konvention:

$$\mathbf{C}_n^b = \mathbf{R}_{xyz}(\phi, \theta, \psi) = \mathbf{R}_x(\phi) \cdot \mathbf{R}_y(\theta) \cdot \mathbf{R}_z(\psi) \quad (7.83)$$

und Bilden der Transponierten

$$\mathbf{C}_b^n = \mathbf{C}_n^b{}^\top. \quad (7.84)$$

\mathbf{C}_b^n enthält somit die aktuellen (bzw. zu Beginn die initialen) Orientierungsdaten zu ϕ, θ, ψ . Die Elemente der Drehmatrix sind zeitvariant, sodass die zeitliche Ableitung dieser Drehmatrix über den Zusammenhang:

$$\dot{\mathbf{C}}_b^n = \mathbf{C}_b^n \cdot \boldsymbol{\Omega}_{nb}^b \quad (7.85)$$

zu berechnen ist, vgl. [Titterton u. Weston 2004].

Die Richtungskosinusmatrix \mathbf{C}_b^n wird durch den Vektor der aktuellen (im b-System gemessenen) Drehraten des b-Systems $\boldsymbol{\omega}_{bn}^b$ aktualisiert, indem sie mit der zum Vektor der Drehraten schiefssymmetrischen Matrix $\boldsymbol{\Omega}_{nb}^b$ multipliziert wird, vgl. [Titterton u. Weston 2004]:

$$\boldsymbol{\Omega}_{nb}^b = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (7.86)$$

Differentialgleichung (7.85) kann nach Titterton u. Weston [2004] in folgender Form für die Implementierung gelöst werden:

$$\mathbf{C}_{k+1} = \mathbf{C}_k \cdot \exp \int_{t_k}^{t_{k+1}} \boldsymbol{\Omega}_{nb}^b dt, \quad (7.87)$$

$$[\boldsymbol{\sigma} \times] = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \boldsymbol{\Omega}_{nb}^b dt, \quad (7.88)$$

$$[\boldsymbol{\sigma} \times] = \begin{pmatrix} 0 & -\sigma_z & \sigma_y \\ \sigma_z & 0 & -\sigma_x \\ -\sigma_y & \sigma_x & 0 \end{pmatrix} \quad (7.89)$$

mit:

- Zeitpunkt t_k und Zeitpunkt t_{k+1}
- $\Delta t = konst.$: z.B. $100 \text{ ms} = 10 \text{ Hz}$
- $\sigma_x = \omega^{bx}[t_{k+1}] \cdot \Delta t$: neuer Messwert x-Achse des Drehratensensors im b-System
- $\sigma_y = \omega^{by}[t_{k+1}] \cdot \Delta t$: neuer Messwert y-Achse des Drehratensensors im b-System

- $\sigma_y = \omega^{by}[t_{k+1}] \cdot \Delta t$: neuer Messwert z-Achse des Drehratensensors im b-System
- $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$

$$\mathbf{C}_{[k+1]} = \mathbf{C}_{[k]} \cdot \left(I + \frac{\sin \sigma}{\sigma} [\sigma \times] + \frac{1 - \cos \sigma}{\sigma^2} [\sigma \times]^2 \right). \quad (7.90)$$

Gleichung (7.82) kann dann geschrieben werden als:

$$\ddot{\mathbf{x}}_{[k+1]}^n = \mathbf{C}_{[k+1]} \cdot \mathbf{f}_{[k+1]}^b + \boldsymbol{\gamma}_{[k+1]} \quad (7.91)$$

Durch Anwendung eines der numerischen Integrationsverfahren (vgl. Abschnitt 7.12.4) – in diesem Falle nach dem Trapezverfahren – ergibt sich für die Geschwindigkeit:

$$\dot{\mathbf{x}}_{[k+1]}^n = \dot{\mathbf{x}}_{[k]}^n + \left(\frac{\ddot{\mathbf{x}}_{[k]}^n + \ddot{\mathbf{x}}_{[k+1]}^n}{2} \right) \cdot \Delta t \quad (7.92)$$

und abschließend für die Position des GeoARS:

$$\mathbf{x}_{[k+1]}^n = \mathbf{x}_{[k]}^n + \left(\frac{\dot{\mathbf{x}}_{[k]}^n + \dot{\mathbf{x}}_{[k+1]}^n}{2} \right) \cdot \Delta t. \quad (7.93)$$

7.12.4 Numerische Integrationsverfahren

Durch die Verfahren der numerischen Integration kann aus den gemessenen Beschleunigungen sowohl die Geschwindigkeit als auch die Position errechnet werden. Integrationsverfahren werden z.B. in den Gleichungen in Abschnitt 7.12.3.2 angewendet. In Jekeli [2001] sowie Titterton u. Weston [2004] werden verschiedene Verfahren beschrieben.

Bei dem Rechteck- und Trapezoid-Verfahren wird das Integral durch Rechtecke bzw. Trapeze mit zeitdiskreten Abtastwerten als Eckpunkte angenähert:

$$\mathbf{x}_{[k+1]}^n = \mathbf{x}_{[k]}^n + \dot{\mathbf{x}}_{[k+1]}^n \cdot \Delta t \quad (\text{Rechteck-Regel}) \quad (7.94)$$

$$\mathbf{x}_{[k+1]}^n = \mathbf{x}_{[k]}^n + \left(\frac{\dot{\mathbf{x}}_{[k]}^n + \dot{\mathbf{x}}_{[k+1]}^n}{2} \right) \cdot \Delta t \quad (\text{Trapez-Regel}). \quad (7.95)$$

Bei einer zu geringen Abtastrate ergibt sich ein relativ großer Fehler bei der Integration hochfrequenter Beschleunigungen. Für derartige Anwendung, z.B. in Luftfahrtanwendungen, werden genauere Integrationsverfahren, nach der Simpson's Regel:

$$\mathbf{x}_{[k+1]}^n = \mathbf{x}_{[k]}^n + \left(\frac{\dot{\mathbf{x}}_{[k-1]}^n + 4\dot{\mathbf{x}}_{[k]}^n + \dot{\mathbf{x}}_{[k+1]}^n}{3} \right) \cdot \Delta t \quad (\text{Simpson's-Regel}) \quad (7.96)$$

oder der Runge-Kutta Algorithmus [Jekeli 2001] benötigt.

In Anbetracht der Genauigkeit der verwendeten GeoARS-Sensoren wird eingeschätzt, dass das Rechteck- und Trapezoid-Verfahren für Anwendungen von GeoARS genügen. Im nachfolgenden Implementierungsbeispiel wird für das „GeoARS-Landentwicklung“ die Trapez-Regel als numerisches Integrationsverfahren verwendet:

```

1 ...
2 geschw_ausAcc = geschw_ausAcc_iminus1 + 1.0/2.0 * (beschl_ausAcc_iminus1 + beschl) * 1.0/Hz;
3 pos_ausAcc = pos_ausAcc_iminus1 + 1.0/2.0 * (geschw_ausAcc_iminus1 + geschw_ausAcc) * 1.0/Hz;
4 beschl_ausAcc_iminus1 = beschl;
5 geschw_ausAcc_iminus1 = geschw_ausAcc;
6 pos_ausAcc_iminus1 = pos_ausAcc;
7 ...

```

Quelltext 7.2: (Java) Numerische Integration nach Trapez-Regel

7.12.5 Inertialnavigation mit mobil-pedestrischen GeoARS

Für den Fall, dass die verwendeten Inertialsensoren der mobil-pedestrischen GeoARS hohe Driften im Sinne der Inertialnavigation aufweisen, wird nachfolgend eine algorithmische Lösung erarbeitet, mit der eine Inertialnavigation angenähert durchgeführt werden kann.

Zunächst wird untersucht, in welcher Größenordnung die Drift der hier gegenständlichen Inertialsensoren auftritt.

Die nachfolgende grobe Genauigkeitsabschätzung soll für eine GeoARS-Konzeption als Grundlage dienen, den avisierten **Drehratensensor** und **Beschleunigungssensor** hinsichtlich seiner Eignung einzustufen. Die Ansätze hierzu stammen u.a. aus Aggarwal u. a. [2010] und Wild-Pfeiffer [2015]. Den Aussagen liegt zugrunde, dass der Drehratensensor in Ruhelage verharrt und originäre unkompenzierte Messwerte erzeugt werden.

In Anlehnung an die Gleichung (7.2) kann ein Drehwinkel α aus den gemessenen Winkelgeschwindigkeiten ω des Drehratensensors nach:

$$\alpha = \int \omega dt \quad (7.97)$$

berechnet werden.

Dabei führen die Messwertfehler $\Delta\omega$ der Winkelgeschwindigkeiten, z.B. durch eine nicht korrigierte Nullpunktverschiebung (vgl. Abschnitt 7.5) zu Drehwinkel Fehlern $\Delta\alpha$, proportional zur Zeit t :

$$\Delta\alpha = \int \Delta\omega dt = \Delta\omega \cdot t \quad (7.98)$$

Die (vermeintlich kleinen) Winkelfehler führen zu fehlerhaften Projektionen der Schwerebeschleunigung auf die einzelnen Achsen des Systems und weiterführend, wie nachfolgend gezeigt wird, im Rahmen der Integration zu einem Anwachsen des Fehlers zuerst in der Geschwindigkeit und abschließend in der Position.

Nach Gleichung (7.14) ergibt sich mit der Beschleunigung a , der Schwerebeschleunigung g und dem Drehwinkel α in Verbindung mit der Gleichung (7.98) der Zusammenhang:

$$a = g \cdot \sin \alpha \rightarrow \Delta a \approx g \cdot \Delta \alpha = g \cdot \Delta \omega \cdot t \quad (7.99)$$

In Anlehnung an die Aussagen in Abschnitt 7.12.3 (Gleichungen der Inertialnavigation) ergibt sich durch

Integration der Beschleunigung der resultierende Geschwindigkeitsfehler Δv :

$$v = \int a \, dt \rightarrow \Delta v = \int \Delta a \, dt = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \Delta \omega \cdot t^2 \quad (7.100)$$

sowie der resultierende Positionsfehler Δs :

$$s = \int v \, dt \rightarrow \Delta s = \int \Delta v \, dt = \frac{1}{6} \cdot g \cdot \Delta \omega \cdot t^3 \quad (7.101)$$

Für die in Tabelle 7.4 (S. 102) aufgeführten Drehratensensoren ergeben sich für den konstanten Teil der Nullpunktverschiebung (zero rate bias) nach Gleichung 7.101 bereits nach zehn Sekunden der Positionsfehler Δs im Bereich von $\approx 30 \, m$ bis $\approx 1140 \, m$. Für den variablen Anteil der Nullpunktverschiebung (bias instability) kann man nach Wild-Pfeiffer [2015] davon ausgehen, dass er ein bis zwei Größenordnungen kleiner ist, als der konstante Anteil und somit auch die Positionsfehler entsprechend kleiner ausfallen.

Die übrigen eingangs in Abschnitt 7.5 aufgeführten Fehler der hier einbezogenen Drehratensensoren führen im Rahmen von Navigationsanwendungen ebenfalls zu Positionsfehlern, jedoch im Verhältnis zum konstanten Teil der Nullpunktverschiebung zu deutlich geringeren. Sie liegen in der Größenordnung von bis zu wenigen Metern für einen Zeitraum von zehn Sekunden, vgl. [Wild-Pfeiffer 2015], [VectorNav 2016], [Grewal u. Andrews 2010], [Niu u. a. 2006], [El-Sheimy u. Niu 2007], [Hou 2004].

Die Fehler lassen sich teilweise durch Kalibrierung vor oder während (Alignment, Echtzeit-Kalibrierung) der Verwendung des Drehratensensors verringern, vgl. [Hehl u. Martin 2012], [Wild-Pfeiffer [2015], [VectorNav 2016], [Heinze 1996].

Abbildung 7.28 zeigt die Messwerte einer der beiden horizontal ausgerichteten Achsen des Drehratensensors (LSM330DLC) einer zehnminütigen Messreihe in Ruhelage. Wendet man die Gleichungen der Inertialnavigati-

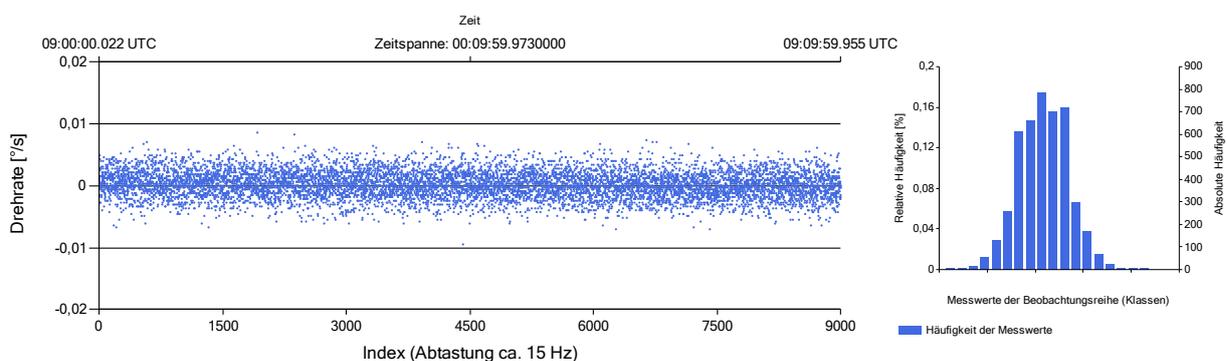


Abbildung 7.28: Drehratensensor: horizontale Achse: Messwerte gemessen in Ruhelage bei horizontaler Ausrichtung; Dauer: 10 min

on aus Abschnitt 7.12.2 und 7.12.4 an, so resultiert daraus bei diesem Beispiel, nach Beseitigung des konstanten Anteils der Nullpunktverschiebung, immer noch eine Winkeländerung von $\approx 5^\circ$ innerhalb von 10 Minuten, trotz absoluter Ruhelage, vgl. Abbildung 7.29.

Die Genauigkeit der derzeitigen kostengünstigen Drehratensensoren genügt aktuell **noch nicht** für eine klassische Inertialnavigation – technischer Sensorfortschritt wird jedoch erwartet.

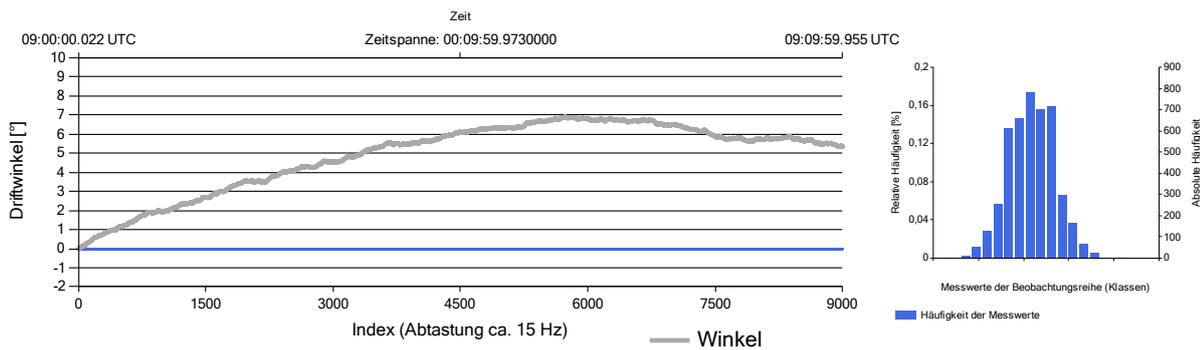


Abbildung 7.29: Drehratensensor: aus Abbildung 7.28 resultierende Winkeländerung

Die Nullpunktverschiebung (vgl. Abschnitt 7.5) des Beschleunigungssensors führt, wie nachfolgend gezeigt wird, im Rahmen der Integration auch hier zu einem Anwachsen des Fehlers zuerst in der Geschwindigkeit und abschließend in der Position.

Nach Gleichung (7.14) ergibt sich mit der Beschleunigung a und in Anlehnung an die Aussagen in Abschnitt 7.12.3 (Gleichungen der Inertialnavigation) durch Integration der Beschleunigung der resultierende Geschwindigkeitsfehler Δv :

$$v = \int a \, dt \rightarrow \Delta v = \int \Delta a \, dt = \Delta a \cdot t \quad (7.102)$$

sowie der resultierende Positionsfehler Δs :

$$s = \int v \, dt \rightarrow \Delta s = \int \Delta v \, dt = \frac{1}{2} \cdot \Delta a \cdot t^2. \quad (7.103)$$

Für die in Tabelle 7.6 aufgeführten Beschleunigungssensoren ergeben sich für den konstanten Teil der Nullpunktverschiebung (zero g bias: $\pm 60 \, mg$ bis $\pm 95 \, mg$) nach Gleichung (7.103) bereits nach zehn Sekunden der Positionsfehler Δs im Bereich von $\approx 30 \, m$ bis $\approx 47 \, m$. Für den variablen Anteil der Nullpunktverschiebung (bias instability) kann man nach Wild-Pfeiffer [2015] davon ausgehen, dass er ein bis zwei Größenordnungen kleiner ist, als der konstante Anteil und somit auch die Positionsfehler entsprechend kleiner ausfallen.

Wie bei den Drehratensensoren gilt auch für die Beschleunigungssensoren, dass die übrigen eingangs in Abschnitt 7.5 aufgeführten Fehler der hier einbezogenen Beschleunigungssensoren im Rahmen von Navigationsanwendungen ebenfalls zu Positionsfehlern führen, jedoch im Verhältnis zum konstanten Teil der Nullpunktverschiebung zu deutlich geringeren. Sie liegen in der Größenordnung von bis zu wenigen Metern für einen Zeitraum von zehn Sekunden, vgl. Wild-Pfeiffer [2015], [VectorNav 2016], [Grewal u. Andrews 2010], [Niu u. a. 2006], [El-Sheimy u. Niu 2007], [Hou 2004].

Die Fehler lassen sich teilweise, genau wie bei Drehratensensoren, durch Kalibrierung vor oder während (Alignment, Echtzeit-Kalibrierung) der Verwendung des Beschleunigungssensors verringern, vgl. [Hehl u. Martin 2012], [Wild-Pfeiffer 2015], [VectorNav 2016], [Heinze 1996].

Abbildung 7.30 zeigt die Messwerte einer der beiden horizontal ausgerichteten Achsen des Beschleunigungssensors (LSM330DLC) einer zehnminütigen Messreihe in Ruhelage. Wendet man die Gleichungen der Inertialnavigation aus Abschnitt 7.12.2 und 7.12.4 an, so resultiert daraus bei diesem Beispiel nach Beseitigung des konstanten Anteils der Nullpunktverschiebung immer noch eine Positionsänderung von $\Delta x = 8.3 \, m$

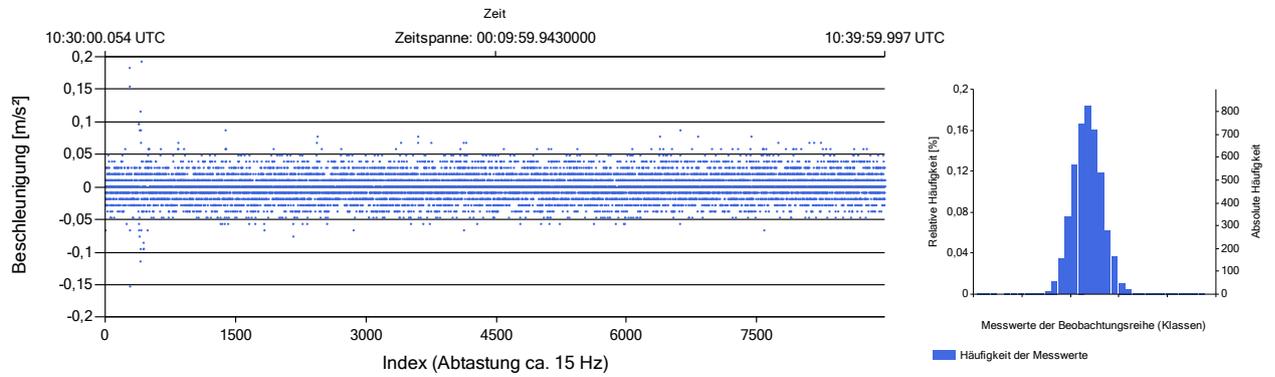


Abbildung 7.30: Beschleunigungssensor: eine der horizontalen Achsen: Messwerte gemessen in Ruhelage bei horizontaler Ausrichtung; Dauer: 10 min

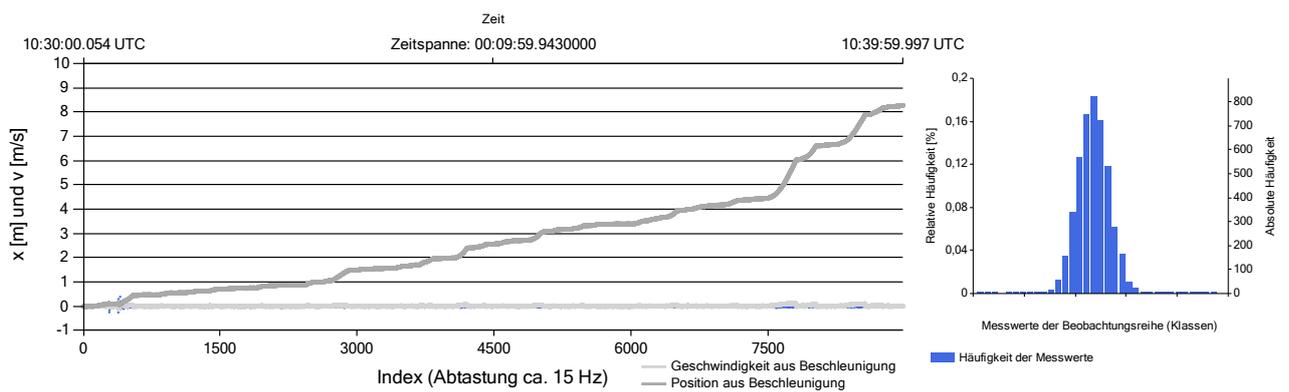


Abbildung 7.31: Beschleunigungssensor: aus Abbildung 7.30 resultierende Positionsänderung

innerhalb von 10 Minuten, trotz absoluter Ruhelage (vgl. Abbildung 7.31). Wendet man die Gleichungen der Inertialnavigation aus Abschnitt 7.12.2 und 7.12.4 an, so resultiert daraus bei diesem Beispiel nach Beseitigung des konstanten Anteils der Nullpunktverschiebung immer noch eine Positionsänderung von $\Delta x = 8.3\text{ m}$ innerhalb von 10 Minuten, trotz absoluter Ruhelage (vgl. Abbildung 7.31).

Die Genauigkeit der derzeitigen kostengünstigen Beschleunigungssensoren genügt aktuell **noch nicht** für eine klassische Inertialnavigation. Durch weiter fortschreitende Technologie werden zukünftig Genauigkeitssteigerungen erwartet.

Aus den vorgenannten Beispielen wird deutlich, dass zwischenzeitlich andere Lösungen benötigt werden, die trotz noch ungenügender Leistung der kostengünstigen Sensoren der GeoARS eine an die Inertialnavigation (Inertial Navigation System (INS)) angelehnte Navigationslösung ermöglichen (GeoARS-INS).

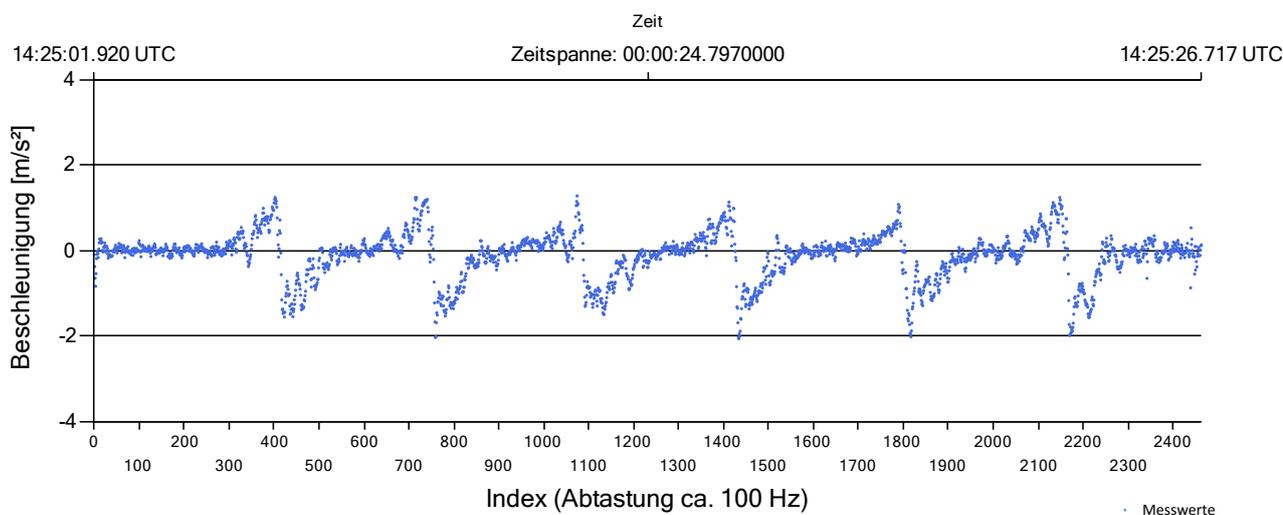


Abbildung 7.32: Beschleunigungssensor: Beschleunigungswerte der sensitiven Achse (hier: horizontale Achse, z-Achse) eines mobil-pedestrischen GeoARS während einer vorwärtsschreitenden Bewegung des Nutzers

Abbildung 7.32 zeigt die linearen Beschleunigungsmesswerte der sensitiven Achse eines beidhändig vor dem Gesicht gehaltenen mobil-pedestrischen GeoARS. Hierbei ist sichtbar, dass der Anwender sechs Vorwärtsschritte absolviert hat. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Ruhephasen zwischen den Schritten mit einer abrupten Bremsbewegung verbunden sind (negative Sensormesswerte). Aus diesem Bewegungsmuster heraus wurde ein Algorithmus erarbeitet, der sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsbewegungen erkennt und unter Zuhilfenahme des Magnetfeldsensors zur Berechnung des Gierwinkels eine vereinfachte Inertialnavigation ermöglicht. Abbildung 7.33 zeigt die schematische Übersicht der realisierten Lösung.

Hierbei erfolgt kontinuierlich unter Zuhilfenahme des Drehratensensors eine Prüfung, ob sich das GeoARS in einer angenäherten Ruhelage befindet, d.h. keine starken Schwenkbewegungen (z.B. $\psi < 40^\circ/s$) stattfinden und die Ausrichtung etwa horizontal (z.B. $\theta < 3^\circ$, $\phi < 3^\circ$) ist. Sind diese Bedingungen eingehalten, so erfolgt bei einer translativen Bewegung des Anwenders die Berechnung der linearen Beschleunigung (vgl. Abschnitt 7.12.3.2), der Geschwindigkeit und Position (Strecke) sowie mittels Gierwinkel über das Verfahren des polaren Anhängens der terrestrischen Vermessung (vgl. z.B. [Resnik u. Bill 2009]) die Standpunktberechnung des GeoARS.

Stellt man die berechneten Geschwindigkeiten und Positionen (zurückgelegte Strecke) gemeinsam mit dem Diagramm aus Abbildung 7.32 dar, so ergibt sich die Darstellung der Abbildung 7.34.

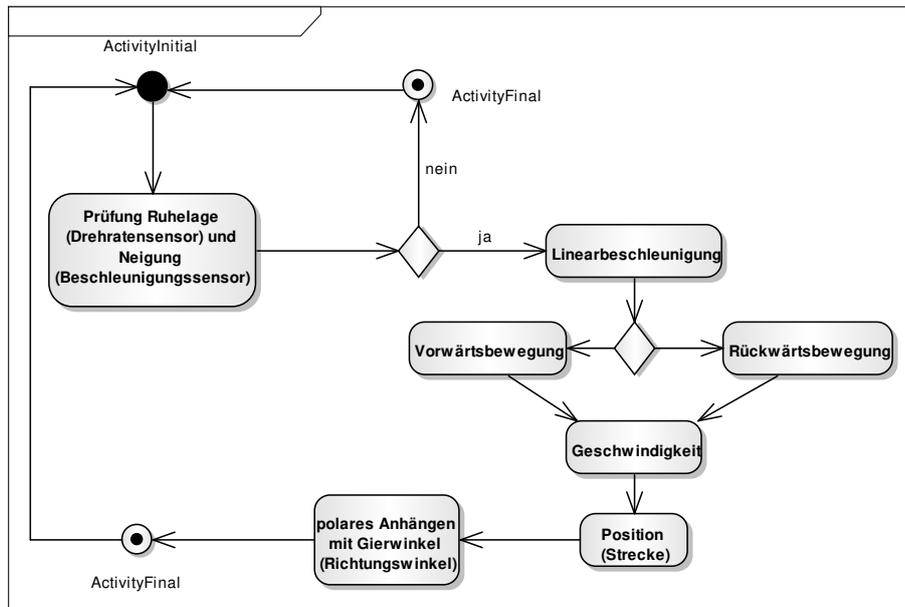


Abbildung 7.33: Schematische Übersicht GeoARS-INS

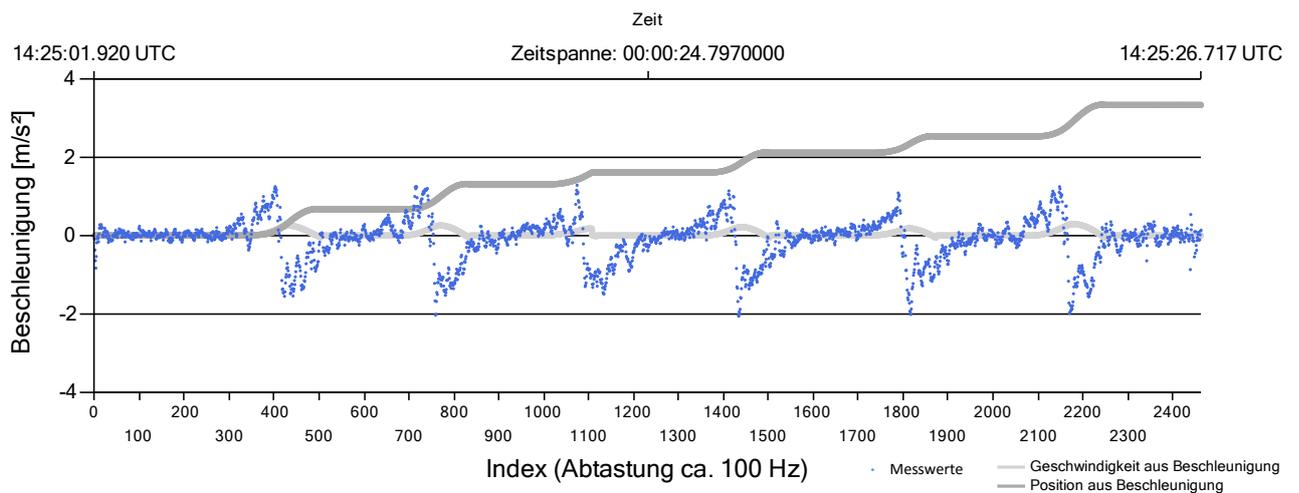


Abbildung 7.34: Beschleunigungssensor: Beschleunigungswerte sensitive Achse (hier: horizontale z-Achse) sowie berechnete Geschwindigkeit und Position (Strecke)

Der Algorithmus verhindert zwar eine Drift der Position, ermöglicht aber unter Verwendung der in die Untersuchungen einbezogenen MEMS derzeit lediglich eine Navigation im Meter-Bereich.

7.12.6 Echtzeitfähige 14-Parametertransformation

Nachfolgend wird eine Lösung erarbeitet, mit der die (durch den Navigationsempfänger bereitgestellten) zeitabhängigen Koordinaten des Standortes eines GeoARS in das zeitinvariante Koordinatensystem der Geodaten umgerechnet werden können.

„Als Grundlage für die Echtzeit-Positionsbestimmung verwenden Navigationsempfänger Broadcast-Satellitenbahndaten mit einer Genauigkeit von ca. 1-3 m, sodass sich Standortkoordinaten im System des jeweils verwendeten Globalen Navigationssatellitensystems (GNSS) mit lediglich Metergenauigkeit [Görres 2010], in der Praxis etwa 3-8 m, bestimmen lassen. Durch gleichzeitige Verwendung mehrerer GNSS lassen sich keine Genauigkeitssteigerungen realisieren [Hoffmann-Wellenhof 2013]. Die Genauigkeit lässt sich allerdings deutlich steigern, wenn regionale und satellitengestützte, differentielle bzw. kinematische Echtzeitverfahren einbezogen werden.“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015] und Abschnitt 7.9.

„Bei GNSS handelt es sich generell um globale erdfeste geozentrische Referenzsysteme, die sämtliche Veränderungen der Erdkruste, z.B. aufgrund von Plattentektonik, berücksichtigen müssen. Die für die Realisierung der jeweiligen GNSS einbezogenen Referenzpunkte (Stationen) liegen auf verschiedenen Kontinenten der Erde und sind ständigen Änderungen unterworfen. Die Eurasische Kontinentalplatte bewegt sich beispielsweise jährlich etwa um 2.5 cm in Richtung Nordosten [Altamimi u. a. 2011], vgl. Abb. 7.35, sodass daraus bis heute bereits eine Verschiebung von über 60 cm seit dem Jahr 1989 (s.u. ETRS89) resultiert und damit Konsequenzen für die Koordinatenbeziehungen zwischen GNSS und auf dem europäischen Kontinent gelagerten Geodaten entstehen. Dies hat zur Folge, dass sich die mittels GNSS ermittelten Standpunktkoordinaten auf der Erdoberfläche ständig ändern. Mit einem beliebigen GNSS bestimmte Punkte der Erdoberfläche haben folglich zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Koordinaten – sie sind also zeitabhängig! Aus diesen Gründen werden von Zeit zu Zeit Koordinaten für eine bestimmte Anzahl an Passpunkten auf der Erdoberfläche exakt berechnet und als Referenzrahmen veröffentlicht. Beispiele für Referenzrahmen sind für WGS84 die Rahmen G1150 oder G1674 und für das Internationale Referenzsystem ITRS die Realisierungen ITRF2000 oder ITRF2008.“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015] sowie die aktuelle Lösung ITRF2014.

Wie der Tabelle 3.2 (S. 36) entnommen werden kann, weist beispielsweise das WGS84-Ellipsoid, bis auf den dynamischen Formfaktor, exakt die gleichen Werte auf wie das GRS80-Ellipsoid und ist daher nahezu identisch mit diesem. Darüber hinaus besitzen das System ITRS und das System WGS84 per Definition die selbe Orientierung [Kahmen 2005]. Die jüngste WGS84-Realisierung stimmt mit der jüngsten ITRS-Realisierung auf Zentimeterlevel überein. Das bedeutet, dass man aktuelle ITRF-Koordinaten und WGS84-Koordinaten innerhalb der Zentimetergenauigkeit als identisch betrachten kann, vgl. [Wong u. a. 2012], [IGN / LAREG 2013], [Görres 2010]. „Für Geodaten möchte man jedoch regelmäßig konstante, zeitlich unabhängige Koordinaten vorhalten, um nicht ständig die Koordinaten der Geobjekte fortschreiben zu müssen. Das Bezugssystem der Positionsbestimmung unterscheidet sich hierin gegenüber dem Bezugssystem der verwendeten Geodaten deutlich und muss zwingend für eine Präzisionssteigerung der dreidimensionalen AR-Registrierung beachtet werden, wenn höhere Genauigkeiten des AR-Systems realisiert werden sollen. Eine signifikante Bedeutung für die Nutzung europäischer Geodaten hat das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89). Es stellt ein europaweit einheitliches, für alle europäischen Staaten gemeinsam nutzbares erdfestes regionales Bezugssystem dar, das mit der Europäischen Kontinentalplatte fest verbunden ist und sich mit ihr gemeinsam bewegt. Es ist beispielsweise in Deutschland im Bereich der Landesvermessung und im Liegenschaftskataster das geltende Bezugssystem. Auch in den übrigen europäischen Staaten erfolgt im Rahmen verschiedener Vereinheitlichungsprozesse, z. B. INSPIRE, die Umstellung auf ETRS89 in vielen Bereichen. Diese INfrastructure

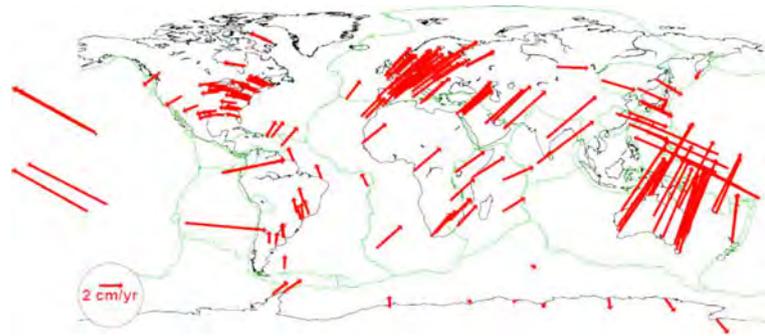


Abbildung 7.35: Verschiebungen der Referenzstationen im globalen erdfesten Referenzrahmen, hier ITRF, vgl. [Altamimi u. a. 2011]

for SPatial InfoRmation in Europe (INSPIRE) ist eine bindende Richtlinie der Europäischen Union für ihre Mitgliedsstaaten und soll die grenzübergreifende Nutzung von Geodaten in Europa erleichtern [BKG 2016b]. Die Richtlinie schreibt für das Bezugssystem der Lage das System ETRS89 vor [BKG 2016c].“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015].

Die folgenden Aussagen beziehen sich auf das Navstar GPS der USA als weitverbreitetstem Vertreter der GNSS [GSA 2015] mit dem dazugehörigen System WGS84 und sind auf andere GNSS übertragbar. „Für Koordinatenberechnungen im WGS84 können aufgrund der Übereinstimmung auf Zentimeterlevel mit dem Internationalen terrestrischen Referenzsystem ITRS [Wong u. a. 2012], [IGN / LAREG 2013], [Görres 2010] die veröffentlichten Parameter des ITRS Product Center des Institut Géographique National (IGN France) herangezogen werden. Es gilt zu beachten, dass die Parameter des jeweiligen Datensatzes jeweils nur für einen ganz bestimmten Zeitpunkt berechnet wurden und ausschließlich für diesen gelten. Mit Hilfe weiterer veröffentlichter zeitabhängiger und für Europa gültiger Parameterdatensätze des IGN [2008] und Boucher u. Altamimi [2011] lassen sich die in Echtzeit ermittelten Navstar GPS-Koordinaten des GNSS-Empfängers durch zwei aufeinanderfolgende zeitabhängige Ähnlichkeitstransformationen in das Koordinatensystem ETRS89 überführen. Boucher u. Altamimi [2011] verwenden in diesem Zusammenhang den Begriff ‘14 parameter transformation’ (14-Parametertransformation). Dieser Ansatz soll im folgenden vorgestellt werden. Eine Übersicht des Berechnungsablaufs kann der Abb. 7.36 entnommen werden.“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015]. Die ITRF-Parameterdatensätze wurden zwischentzeitlich aktualisiert, sodass seit 2016 die Parametersätze des ITRF2014 gelten, vgl. [IGN 2016].

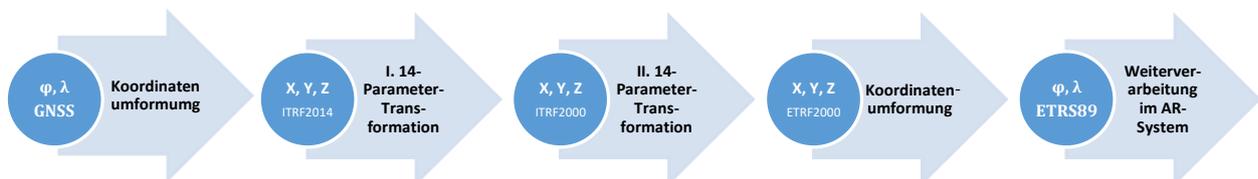


Abbildung 7.36: Berechnungsablauf für die Überführung von Standort-Koordinaten aus GNSS-Echtzeitmessungen in das europäische System der Geodaten ETRS89, in Weiterführung von [Kreuziger u. a. 2015]

„Hierbei werden die durch den Satellitenempfänger berechneten Standortkoordinaten (φ = ellipsoidische Breite, λ = ellipsoidische Länge) durch Koordinatenumformung in geozentrisch kartesische Koordinaten

überführt und anschließend zwei 14-Parameter-Transformationen sowie eine weitere Koordinatenumformung in das Geodaten-Koordinatensystem ETRS89 prozessiert, wobei die beiden Koordinatentransformationen nachfolgend näher erläutert werden.“, vgl. [Kreuziger u. a. 2015].

Tabelle 7.19: Transformationsparameter des ITRF2014 in zurückliegende Realisierungen, vgl. [IGN 2016]

Transformation parameters from ITRF2014 to past ITRFs.

SOLUTION	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOCH
UNITS----->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
	·	·	·	·	·	·	·	
RATES	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
UNITS----->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/y	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2008	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2005	2.6	1.0	-2.3	0.92	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.3	0.0	-0.1	0.03	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	0.7	1.2	-26.1	2.12	0.00	0.00	0.00	2010.0
rates	0.1	0.1	-1.9	0.11	0.00	0.00	0.00	
ITRF97	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	7.4	-0.5	-62.8	3.80	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	-50.4	3.3	-60.2	4.29	-2.81	-3.38	0.40	2010.0
rates	-2.8	-0.1	-2.5	0.12	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	15.4	1.5	-70.8	3.09	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	27.4	15.5	-76.8	4.49	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	25.4	11.5	-92.8	4.79	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	30.4	35.5	-130.8	8.19	0.00	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	25.4	-0.5	-154.8	11.29	0.10	0.00	0.26	2010.0
rates	0.1	-0.5	-3.3	0.12	0.00	0.00	0.02	

Tabelle 7.19 zeigt die Transformationsparameter des ITRF2014 in die älteren Referenzrahmen ITRF2008, ITRF2000, ITRF97, ITRF96, etc. [IGN 2016] sowie Tabelle 7.20 die Transformationsparameter von ITRF-Realisierungen in das System ETRS89. Die Parameter wurden hierbei für einen ganz bestimmten Zeitpunkt berechnet und gelten auch ausschließlich für diesen. Die Parameter gelten für den expliziten Zeitpunkt 1.1.2010 (Epoche 2010.0).

Die ersten sieben Transformationsparameter eines jeden Parameterdatensatzes werden aus den drei Verschiebungen entlang der X-, Y- und Z-Achse (T_1, T_2, T_3) in der Einheit Millimeter [mm], einem Maßstabsfaktor (D) in der Einheit Teile pro Billionen [ppb] sowie den drei Drehwinkeln um die Koordinatenachsen (R_1, R_2, R_3) in der Einheit Milliarcsekunde [mas] gebildet.

Zweistufige Lösung nach IGN [2016]:

Die vom IGN [2016] vorgeschlagene zweistufige Transformation umfasst im ersten Schritt die Anpassung der Parameter innerhalb der Realisierung, also des jeweiligen ITRF, über folgenden Zusammenhang:

$$P(t) = P(EPOCH) + \dot{P} \cdot (t - EPOCH) \tag{7.104}$$

Tabelle 7.20: Transformationsparameter der ITRF_{yy} in den ETRF2000 zur Epoche 2000.0 [Boucher u. Altamimi 2011]**Table 5:** Transformation parameters from ITRF_{yy} to ETRF2000 at epoch 2000.0 and their rates/year

ITRF Solution	T1 mm	T2 mm	T3 mm	D 10 ⁻⁹	R1 mas	R2 mas	R3 mas
ITRF2008	52.1	49.3	-58.5	1.34	0.891	5.390	-8.712
Rates	0.1	0.1	-1.8	0.08	0.081	0.490	-0.792
ITRF2005	54.1	50.2	-53.8	0.40	0.891	5.390	-8.712
Rates	-0.2	0.1	-1.8	0.08	0.081	0.490	-0.792
ITRF2000	54.0	51.0	-48.0	0.00	0.891	5.390	-8.712
Rates	0.0	0.0	0.0	0.00	0.081	0.490	-0.792
ITRF97	47.3	46.7	-25.3	-1.58	0.891	5.390	-8.772
Rates	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF96	47.3	46.7	-25.3	-1.58	0.891	5.390	-8.772
Rates	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF94	47.3	46.7	-25.3	-1.58	0.891	5.390	-8.772
Rates	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF93	76.1	46.9	-19.9	-2.07	2.601	6.870	-8.412
Rates	2.9	0.2	0.6	-0.01	0.191	0.680	-0.862
ITRF92	39.3	44.7	-17.3	-0.87	0.891	5.390	-8.772
Rates	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF91	27.3	30.7	-11.3	-2.27	0.891	5.390	-8.772
Rates	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF90	29.3	34.7	4.7	-2.57	0.891	5.390	-8.772
Rates	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF89	24.3	10.7	42.7	-5.97	0.891	5.390	-8.772
Rates	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812

wobei die Konstante EPOCH bezogen auf die Tabelle 7.19 (S.164) den Wert $EPOCH = 2010.0$ annimmt, $\dot{\mathbf{P}}$ die Änderungen der Parameter darstellt [IGN 2016] und $t = t_c$ den Zeitpunkt der aktuellen Messung bildet:

$$\mathbf{P}(t_c) = \mathbf{P}(2010.0) + \dot{\mathbf{P}} \cdot (t_c - 2010.0). \quad (7.105)$$

Ausführlicher ergibt sich:

$$\mathbf{P}(t_c) = \begin{pmatrix} T1_{t_c} \\ T2_{t_c} \\ T3_{t_c} \\ D_{t_c} \\ R1_{t_c} \\ R2_{t_c} \\ R3_{t_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T1_{2010.0} \\ T2_{2010.0} \\ T3_{2010.0} \\ D_{2010.0} \\ R1_{2010.0} \\ R2_{2010.0} \\ R3_{2010.0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}1_{2010.0} \\ \dot{T}2_{2010.0} \\ \dot{T}3_{2010.0} \\ \dot{D}_{2010.0} \\ \dot{R}1_{2010.0} \\ \dot{R}2_{2010.0} \\ \dot{R}3_{2010.0} \end{pmatrix} \cdot (t_c - 2010.0). \quad (7.106)$$

Für die Durchführung der Transformation wird das nachfolgende Standardmodell empfohlen [IGN 2016]:

$$\begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}. \quad (7.107)$$

Hierbei stellen X, Y, Z , die zu transformierenden Koordinaten des Quell-ITRF (ITRF2014) dar und X_S, Y_S und Z_S die Koordinaten in der jeweiligen zurückliegenden Realisierung.

Auch in [Boucher u. Altamimi 2011] ist diese Zwei-Schritt-Transformation aus (7.104) und (7.107) für IERS Terrestrial Reference Systeme (ITRS) und ihren Realisierungen, den ITRFs, beschrieben.

Darüber hinaus gehören zu den vorgenannten sieben Parametern jeweils die Werte der jährlichen Änderungen der Parameter ($\dot{T}_1, \dot{T}_2, \dot{T}_3$ in der Einheit Millimeter pro Jahr [mm/a], \dot{D} in der Einheit Teile pro Billionen pro Jahr [ppb/a], $\dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$ in der Einheit Millialtsekunde pro Jahr [mas/a]).

Es bietet sich an, die o.g. Zwei-Schritt-Transformation zu einer 14-Parametertransformation zusammenzufassen. Hierbei wird gleichzeitig die Notation etwas verändert, indem das Quell-System der Transformation mit dem Index A und das Zielsystem mit dem Index B bezeichnet wird:

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 + \dot{T}_1(t-t_0) \\ T_2 + \dot{T}_2(t-t_0) \\ T_3 + \dot{T}_3(t-t_0) \end{pmatrix} + \left(1.0 + D + \dot{D}(t-t_0)\right) \cdot \begin{pmatrix} 1 & -R_3 + \dot{R}_3(t-t_0) & R_2 + \dot{R}_2(t-t_0) \\ R_3 + \dot{R}_3(t-t_0) & 1 & -R_1 + \dot{R}_1(t-t_0) \\ -R_2 + \dot{R}_2(t-t_0) & R_1 + \dot{R}_1(t-t_0) & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix}. \quad (7.108)$$

I. 14-Parametertransformation:

In der ersten 14-Parametertransformation gilt es, unter Verwendung der veröffentlichten Parameter des IGN [2016] (vgl. Tabelle 7.19) den Systemübergang aus dem ITRS mit der aktuell gültigen Realisierung ITRF2014 zum Zeitpunkt der aktuellen Messung t_c und $t_0 = 2010.0$ in das ITRF2000 zu berechnen:

$$\begin{pmatrix} X_A^{ITRF2014} & Y_A^{ITRF2014} & Z_A^{ITRF2014} \end{pmatrix}^T \rightarrow \text{I. 14-Parametertransformation} \rightarrow \begin{pmatrix} X_B^{ITRF2000} & Y_B^{ITRF2000} & Z_B^{ITRF2000} \end{pmatrix}^T.$$

Unter Beachtung der Einheiten der gegebenen Parameter ergibt sich nach Gleichung (7.108) ausführlicher:

$$\begin{pmatrix} X_B^{ITRF2000} \\ Y_B^{ITRF2000} \\ Z_B^{ITRF2000} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T_1}{1000} + \frac{\dot{T}_1}{1000} \cdot (t-t_0) \\ \frac{T_2}{1000} + \frac{\dot{T}_2}{1000} \cdot (t-t_0) \\ \frac{T_3}{1000} + \frac{\dot{T}_3}{1000} \cdot (t-t_0) \end{pmatrix} + \left(1.0 + D \cdot 10^{-9} + \dot{D} \cdot 10^{-9} \cdot (t-t_0)\right) \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{R_3 + \dot{R}_3 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & \frac{R_2 + \dot{R}_2 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} \\ \frac{R_3 + \dot{R}_3 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & 1 & -\frac{R_1 + \dot{R}_1 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} \\ -\frac{R_2 + \dot{R}_2 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & \frac{R_1 + \dot{R}_1 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_A^{ITRF2014} \\ Y_A^{ITRF2014} \\ Z_A^{ITRF2014} \end{pmatrix}.$$

II. 14-Parametertransformation:

Mit der zweiten 14-Parametertransformation für den Zeitpunkt t_c wird die Überführung in das System ETRS89 realisiert. Die für diesen Transformationsschritt zu verwendenden Parameter können der Veröffentlichung von Boucher u. Altamimi [2011] (vgl. Tabelle 7.20) entnommen werden.

$$\begin{pmatrix} X_A^{ITRF2000} & Y_A^{ITRF2000} & Z_A^{ITRF2000} \end{pmatrix}^T \rightarrow \text{II. 14-Parametertransformation} \rightarrow \begin{pmatrix} X_B^{ETRF2000} & Y_B^{ETRF2000} & Z_B^{ETRF2000} \end{pmatrix}^T$$

Nach Gleichung (7.108) ergibt sich ausführlich:

$$\begin{pmatrix} X_B^{ETRF2000} \\ Y_B^{ETRF2000} \\ Z_B^{ETRF2000} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{T1}{1000} + \frac{\dot{T}1}{1000} \cdot (t - t_0) \\ \frac{T2}{1000} + \frac{\dot{T}2}{1000} \cdot (t - t_0) \\ \frac{T3}{1000} + \frac{\dot{T}3}{1000} \cdot (t - t_0) \end{pmatrix} + \left(1.0 + D + \dot{D} \cdot (t - t_0) \right) \cdot \begin{pmatrix} X_A^{ITRF2000} \\ Y_A^{ITRF2000} \\ Z_A^{ITRF2000} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{R3 + \dot{R}3 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & \frac{R2 + \dot{R}2 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} \\ \frac{R3 + \dot{R}3 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & 1 & -\frac{R1 + \dot{R}1 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} \\ -\frac{R2 + \dot{R}2 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & \frac{R1 + \dot{R}1 \cdot (t-t_0)}{3600} \cdot \frac{PI}{180} & 1 \end{pmatrix}$$

Im letzten Schritt der Echtzeit-Prozessierung erfolgt die Koordinatenumformung in die ellipsoidischen Standortkoordinaten des GeoARS mit den Formeln aus Anhang D.2 im gültigen Referenzsystem europäischer Geodaten (φ_{ETRS89} und λ_{ETRS89}).

7.12.7 Orientierung-Prozessierung mittels Bildsensor in Echtzeit

Ziel des Verfahrens ist die Berechnung der Orientierung eines GeoARS mittels der realen Kamera in Echtzeit. Die Untersuchungen haben ergeben, dass das Verfahren entweder auf Folgebildsequenzen (Bildfolgen) oder von Live-Bild zu Live-Bild angewendet werden kann. Das Verfahren zur Orientierungs-Prozessierung kann als Vergleichsverfahren verstanden werden. Wie in Abschnitt 7.10.2 (Zusammenfassung Nutzen und Anwendungsfeld im AR-System) benannt, beruht der hier dargestellte Ansatz auf der Annahme, dass die den Bildsensor beeinflussenden Umgebungsfaktoren (vgl. Abschnitt 7.10) innerhalb eines Momentes als konstant betrachtet werden können. Der Begriff „Moment“ kann hier ein Zeitraum von wenigen Millisekunden bis mehrere Minuten sein oder in Einzelfällen auch darüber hinaus gehen und hängt, wie nachfolgend gezeigt wird, vom spezifischen Anwendungsfall ab. Während dieses Zeitraumes kann der Bildsensor für Orientierungsaufgaben genutzt werden.

Eine Voraussetzung zur Nutzung dieses Verfahrens ist die vorherige Kalibrierung der realen Kamera, d.h. die Parameter der inneren Orientierung liegen vor und werden in Echtzeit (nach dem in Abschnitt 7.10.1 beschriebenen Verfahren der Live-Bild-Korrektur) auf das Echtzeit-Bild angewendet.

Eine weitere Voraussetzung ist eine dem Anwendungsfall angepasste Bildwiederholrate des Systems.

7.12.7.1 Große Rotationsgeschwindigkeiten des GeoARS

Je höher die Bildwiederholrate eines GeoARS ist, desto höher dürfen die Winkelgeschwindigkeiten ω_{GeoARS} des GeoARS sein, um aus den Bildvergleichen die Orientierung zu berechnen. Es gilt allgemein für die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega_{GeoARS} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (7.109)$$

bzw. bei konstanter Winkelgeschwindigkeit

$$\omega_{GeoARS} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (7.110)$$

Der Zeitraum Δt_{ij} zwischen den Einzelbildern i und j kann als Zeitraum von Bildwiederholungen aufgefasst werden. Mit dem Rotationswinkel $\Delta\varphi_{ij}$ des Systems zwischen den Einzelbildern ergibt sich:

$$\omega_{GeoARS} = \frac{\Delta\varphi_{ij}}{\Delta t_{ij}} \quad (7.111)$$

bzw. für Δt_{ij} :

$$\Delta t_{ij} = \frac{\Delta\varphi_{ij}}{\omega_{GeoARS}} \quad (7.112)$$

und kann damit in Verbindung mit der Bildwiederholrate fps (nach engl. frames per second) gebracht werden

$$fps = \Delta t_{ij}^{-1} = \frac{\omega_{GeoARS}}{\Delta\varphi_{ij}}. \quad (7.113)$$

Beispiel: Es lässt sich für eine praxisnahe Winkelgeschwindigkeit eines GeoARS von $90^\circ/s$ (vgl. Abschnitt 7.6) und einem willkürlich gewählten Rotationswinkel („Abstand“) zwischen den Einzelbildern von 5° (95° Überlappung) ein Zeitraum Δt_{ij} zwischen den Einzelbildern von $1/18$ s nach

$$\Delta t_{ij} = \frac{\Delta\varphi}{\omega_{GeoARS}} = \frac{5^\circ}{90^\circ/s} = 1/18 \text{ s} \quad (7.114)$$

berechnen. Die für diesen konkreten Anwendungsfall notwendige Systemleistung hinsichtlich der benötigten Bildwiederholrate des GeoARS beträgt 18 Bilder pro Sekunde. Der maximale (aber nicht sinnvolle) Rotationswinkel $\Delta\varphi_{ij_{max}}$ ergibt sich für den Fall, dass das System soweit gedreht wurde, dass zwei benachbarte Einzelbilder sich nicht mehr überlappen, sondern aneinandergrenzen. Der minimale Rotationswinkel $\Delta\varphi_{ij_{min}}$ von 0° ergibt sich, wenn zwischen den Einzelbildern keine Systemdrehung stattgefunden hat.

Untersucht man nun das Grenzwertverhalten von $\Delta\varphi_{ij}$ und $fps (= \Delta t_{ij}^{-1})$ im Falle von (unendlich) hohen Rotationswinkelgeschwindigkeiten eines beliebigen GeoARS, bei gleichbleibendem Rotationswinkel ($\Delta\varphi_{ij} = konst.$) zwischen den Einzelbildern, so ergeben sich folgende Betrachtungen, wobei $\omega_{GeoARS} \in \mathbb{R}$ und $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{0\}$:

$$\Delta t_{ij}(\omega_{GeoARS}) = \frac{\Delta\varphi_{ij}}{\omega_{GeoARS}} \quad (7.115)$$

$$\lim_{\omega_{GeoARS} \rightarrow \infty} \frac{\Delta\varphi_{ij}}{\omega_{GeoARS}} = 0 \quad (7.116)$$

bzw. bezogen auf die Bildwiederholrate:

$$fps(\omega_{GeoARS}) = \frac{\omega_{GeoARS}}{\Delta\varphi_{ij}} \quad (7.117)$$

$$\lim_{\omega_{GeoARS} \rightarrow \infty} \frac{\omega_{GeoARS}}{\Delta\varphi_{ij}} = \infty \quad (7.118)$$

Daraus folgt, je höher die bei beliebigen GeoARS auftretenden Rotationswinkelgeschwindigkeiten sind, desto kleiner muss der Zeitraum zwischen den beiden Folgebildern gehalten werden (7.115) und (7.116) und umso höher muss die Bildwiederholrate sein (7.117) und (7.118), wenn eine Orientierungsberechnung aus Folgebildern erfolgen soll.

Beispiel: Bei für GeoARS sehr hohen Rotationsgeschwindigkeiten von z.B. $500^\circ/s$ und einem Rotationswinkel von 5° wäre eine Bildwiederholrate des GeoARS von 100 Bildern pro Sekunde notwendig.

Die Konsequenz für die Praxis besteht darin, dass man für individuelle GeoARS-Implementierungen mit schnellen Rotationen auch Systemkomponenten mit hohen Bildwiederholraten benötigt.

7.12.7.2 Kleine Rotationsgeschwindigkeiten des GeoARS

Für die Betrachtung des Einflusses besonders langsamer Rotationen auf die Orientierungs-Prozessierung mittels Bildsensor in Echtzeit ist neben der Bildwiederholrate die geometrische Auflösung der Bilddaten des spezifischen GeoARS einzubeziehen.

Aus den Ausführungen zur idealisierten strahlenoptischen Abbildung nach Kraus [2004] bzw. [Luhmann 2010b] lässt sich über den Abstand eines Bildpunktes zum Bildhauptpunkt r' , dem Achsenwinkel τ und der Kammerkonstanten c die Strahlengeometrie in die Gleichung

$$r' = c \cdot \tan \tau \quad (7.119)$$

oder umgestellt nach τ

$$\tau = \arctan \frac{r'}{c} \quad (7.120)$$

überführen. Im Kamerakoordinatensystem kann der Winkel zwischen dem Bildhauptpunkt und einem dicht daneben liegenden Punkt i des Bildes als kleiner Bruchteil des Achsenwinkels τ berechnet werden:

$$\tau_i = \arctan \frac{r'_i}{c}. \quad (7.121)$$

Betrachtet man sodann die Bildebene in der Pixeldimension, dann ist τ_i der kleinste messbare Winkel zweier benachbarter Pixel. GeoARS besitzen regelmäßig konstante Bildwiederholraten und konstante Bildauflösungen (in Pixel). Das bedeutet, Δt_{ij} und τ_i können zunächst in die Gleichung (7.113) mit $\Delta t_{ij} = f p s^{-1} = \textit{konstant}$ und $\tau_i = \textit{konstant}$ eingesetzt werden. Mit $\Delta \varphi = \tau_i$ und Umstellung erhält man die zulässige Mindestrotationsgeschwindigkeit des GeoARS zu:

$$\omega_{GeoARS_{min}} = \frac{\tau_i}{\Delta t_{ij}} = \frac{\arctan \frac{r'_i}{c}}{\Delta t_{ij}}. \quad (7.122)$$

Die Umrechnung von r'_i aus dem metrischen System in die Einheit Pixel und umgekehrt lässt sich über die Bildbreite b_{Pixel} in der Einheit Pixel und die Sensorbreite s_{mm} in der metrischen Einheit Millimeter realisieren:

$$r'_{i[mm]} = r'_{i[Pixel]} \cdot \frac{s_{mm}}{b_{Pixel}}. \quad (7.123)$$

Die Darstellung der Gleichung (7.122) als Funktion in Abhängigkeit von b_{Pixel} und Δt_{ij} sowie Substitution von r'_i durch $r'_{i[Pixel]} \cdot \frac{s_{mm}}{b_{Pixel}}$ ergibt

$$\omega_{GeoARS_{min}(b_{Pixel}, \Delta t_{ij})} = \frac{\arctan \frac{r'_{i[Pixel]} \cdot \frac{s_{mm}}{b_{Pixel}}}{c}}{\Delta t_{ij}}. \quad (7.124)$$

Durch die Betrachtung der nachfolgend aufgeführten Grenzwerte, wobei $b_{Pixel} \in \mathbb{R}$, $\Delta t_{ij} \in \mathbb{R}$, $fps \in \mathbb{R}$ und $\mathbb{D} = \mathbb{R} \setminus \{0\}$

$$\lim_{b_{Pixel} \rightarrow +\infty} \frac{\arctan \frac{r'_{i[Pixel]} \cdot \frac{s_{mm}}{b_{Pixel}}}{c}}{\Delta t_{ij}} = 0 \quad (7.125)$$

$$\lim_{\Delta t_{ij} \rightarrow +\infty} \frac{\arctan \frac{r'_{i[Pixel]} \cdot \frac{s_{mm}}{b_{Pixel}}}{c}}{\Delta t_{ij}} = 0 \quad (7.126)$$

$$\lim_{fps \rightarrow 0^+} \arctan \frac{r'_{i[Pixel]} \cdot \frac{s_{mm}}{b_{Pixel}}}{c} \cdot fps = 0 \quad (7.127)$$

lassen sich weitere Erkenntnisse ableiten: Es können sehr kleine Winkelgeschwindigkeiten eines GeoARS gemessen werden, wenn sich die Auflösung des Live-Bildes erhöht ((7.124) und (7.125)), eine Vergrößerung des Zeitraumes zwischen den Folgebildern realisiert wird ((7.124) und (7.126)) oder eine Absenkung der Bildwiederholrate erfolgt ((7.124) und (7.127)).

Beispiel: Für ein GeoARS mit der Bildbreite von 780 *Pixel* sowie mit $s_{[mm]} = 4.59 \text{ mm}$, $c = 3.7 \text{ mm}$ und $r'_{i[Pixel]} = 1$ ergibt sich der Minimalwinkel $\tau_{i_{min}} \approx 0.09^\circ$. Mit einer Bildwiederholrate des Systems von 18 Bildern pro Sekunde und den vorgenannten übrigen Parametern ergibt sich nach Gleichung (7.124) die zulässige Mindestgeschwindigkeit von $\approx 1.6^\circ/s$ zur Detektion der Orientierung für das „Live-Bild zu Live-Bild“-Verfahren (Folgebilder). Bei Winkelgeschwindigkeiten von unter $1.6^\circ/s$ kann eine Rotation des GeoARS für diese Beispielrealisierung nicht mehr detektiert werden.

Allgemein gilt, bei Winkelgeschwindigkeiten von kleiner als $\omega_{GeoARS_{min}}$ kann eine GeoARS-Realisierung die Orientierungs-Prozessierung mittels Bildsensor im „Live-Bild zu Live-Bild“-Verfahren nicht mehr durchführen. Lösungen wären eine dynamische Anpassung der Parameter (b_{Pixel} , fps), die Wahl eines modifizierten „Live-Bild zu Live-Bild“-Verfahrens mit Folgebildsequenzen oder das Einbeziehen weiterer Sensoren.

7.12.7.3 Orientierungsberechnung mit Schattieren

Das im Folgenden näher beschriebene Verfahren zur räumlichen Orientierungsberechnung baut im ersten Teil auf einem aus der digitalen Bildverarbeitung und Photogrammetrie gebräuchlichen Bildvergleichsverfahren auf, das als Korrelationsverfahren oder *template matching* bezeichnet wird. Dieses Verfahren wurde für den Einsatzbereich von GeoARS modifiziert. Nach [Luhmann 2010b] werden unter Korrelationsverfahren Methoden verstanden, die ein Ähnlichkeitsmaß zwischen Referenzbild und Suchbild berechnen. Das hier vorgestellte Verfahren unterscheidet sich in mehreren Punkten von den vorgenannten Verfahren. Dabei wird der Korrelationskoeffizient nicht für jeden Suchschritt berechnet, sondern ein Bildpunkt der Referenzmatrix direkt einem Bildpunkt der Suchmatrix paarweise gegenübergestellt und die Grauwerte (Wertebereich 0 bis 255) der Bildpunkte pro Kanal verglichen. Es werden die verfügbaren Kanäle (Spektralbereiche: Rot, Grün, Blau) des Bildsensors verwendet. Als Maß für die Ähnlichkeit wird ein Ähnlichkeitsschwellwert für die Grauwertdifferenz zwischen zwei zu vergleichenden Bildpunkten verwendet. Hierbei wird je ein Differenzschwellwert pro Kanal eingeführt. Aus dem Referenzbild (Resultat des *Pixel-Schattierers-R*) werden die Grauwerte durch eine Referenzmatrix entnommen. Die Referenzmatrix wird jedoch aus Performanzgründen nicht als Blockmatrix sondern in Kreuzform (+), z.B. 15 *Pixel* vertikal und 10 *Pixel* horizontal definiert, um die Menge der zu vergleichenden Bildpunkte zu reduzieren, aber immer noch die in der Natur vorkommende Heterogenität der Form und Oberfläche realer Objekte auszunutzen.

Für das Verfahren werden zwei Schattierer-Programme mit jeweils einem Vertex- und einem Pixel-Shader verwendet, vgl. Abbildung 7.37. Mit dem Schattierer-Programm-R und dem darin enthaltenem Vertex-

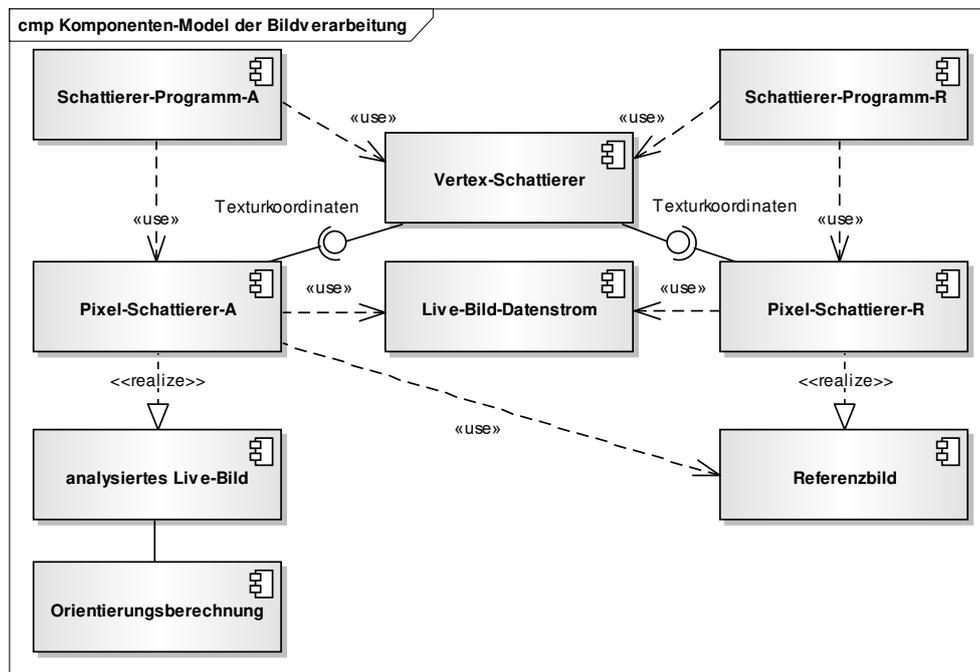


Abbildung 7.37: Software-Komponenten der Orientierungsprozessierung mittels Bildsensor

-Schattierer sowie Pixel-Schattierer-R wird ein Einzelbild aus dem Live-Bild-Datenstrom entnommen und dazu verwendet, ein Referenzbild zu erzeugen, aus dem später die Grauwerte für die Referenzmatrix entnommen werden. Quelltext 7.3 zeigt zunächst den Programmcode für den Vertex-Schattierer.

```

1 ...
2 //Vertex-Shader
3 attribute vec2 attribut2D_VertexPosition;
4 attribute vec2 attribut2D_TexturKoordinate;
5 varying vec2 vTexCoord;
6 void main() {
7     vTexCoord = attribut2D_TexturKoordinate;
8     vTexCoord = <ggf. Koordinatenveränderungen durchführen>
9     gl_Position = vec4 (attribut2D_VertexPosition.x, attribut2D_VertexPosition.y, 0.0, 1.0);
10 }
11 ...

```

Quelltext 7.3: (GLSL) Vertex-Schattierer

Hierbei besteht die Möglichkeit, geometrische Korrekturen an den Bildelementen durchzuführen, vgl. Abschnitt 7.10.1. Der Vertex-Schattierer hat hierbei die zentrale Aufgabe die zu einem Pixel (und den darin enthaltenen Grauwerten der Kanäle) gehörenden Koordinaten (*vTexCoord*) einem Pixel-Schattierer zur Verfügung zu stellen.

Der einfach aufgebaute Pixel-Schattierer-R, vgl. Quelltext 7.4 entnimmt dem Live-Bild-Datenstrom ein Einzelbild und stellt es für das Schattierer-Programm-A als Referenzbild zur Verfügung. An dieser Stelle kann auch die Echtzeit-Bild-Korrektur aus Abschnitt 7.10.1 durchgeführt werden.

```

1 ...
2 //Pixel-Schattierer für Referenz-Bild (Template-Bild)
3 uniform samplerExternalOES u_liveBild;
4 varying vec2 vTexCoord;
5 ...
6 void main(){
7     vec2 vec2D_TexturKoordinate = vTexCoord;
8     ...
9     //< ggf. Bildkorrekturen durchführen >
10    ...
11    gl_FragColor = texture2D(u_liveBild, vec2D_TexturKoordinate);
12    ...
13 }//Ende main()
14 ...

```

Quelltext 7.4: (GLSL) Pixel-Schattierer-R

Sämtliche in diesem Verfahren erzeugten Bilder müssen nicht in den physikalischen Festspeicher geschrieben werden, sondern können in Puffern des transienten Speichers vorgehalten werden. Dies bewirkt ein höchst performantes Ausführen der Berechnungs- und Visualisierungsprozesse.

Nach der Erstellung des Referenzbildes durch den Pixel-Schattierer-R wird das Schattierer-Programm-A mit dem identischen Vertex-Schattierer-Code (Quelltext 7.3) und dem Pixel-Schattierer-A ausgeführt. Die Abbildung 7.38 zeigt die internen Abläufe innerhalb des Pixel-Schattierer-A und illustriert den im Anhang F aufgeführten Quelltext F.1 des Schattierers. Hierbei wird der Schwellwert (SWG_r), das Live-Bild der Kamera ($u_liveBild$) und das Referenzbild ($u_referenzBild$) sowie die Texturkoordinaten ($vTexCoord$) an den Schattierer übergeben. Das Setzen der Pixelfaktoren ($einPixelFaktor_LBy$, $einPixelFaktor_LBx$, $einPixelFaktor_RB$) wird notwendig, um die Bildkoordinaten vom p-System in das t-System zu skalieren. Aus Performanzgründen wird der Analysebereich auf einen Bereich (z.B. 40×40 Pixel) um das Texturzentrum beschränkt sowie die Suchmatrix (Live-Bild-Matrix) und Referenzmatrix für alle Kanäle (rot, grün, blau) mit den Grauwerten gefüllt. Der Schattierer-Code wirkt immer genau auf ein Pixel – nachfolgend als Hauptpixel bezeichnet – sowie auf den Umgebungsbereich dieses Pixels (Geometrie der Suchmatrix). Entscheidend hierbei ist, dass dieser Vorgang für alle Pixel des Suchbereiches gleichzeitig (parallel) erfolgt. Hierbei wird die Referenzmatrix folglich nicht über den Suchbereich des Live-Bildes „geschoben“. Darin liegt der essentielle Geschwindigkeitsvorteil durch den Einsatz von Schattierern mit GPU-Nutzung. Weiterführend werden dann die Grauwerte der zueinander gehörenden Pixel von Referenzmatrix und Suchmatrix verglichen ($diff_r$) und die Anzahl der Pixel mit ähnlichen Grauwerten (unterhalb des Schwellwertes) ermittelt. Wenn die Grauwerte aller Pixel der beiden Matrizen im Rahmen des Schwellwertes übereinstimmen (Matrix-Identität), wird das Hauptpixel mit einer speziellen Farbcodierung versehen. Im Ergebnis entsteht im transienten Speicher ein analysiertes Live-Bild, das der Orientierungsberechnungs-Komponente zur weiteren Verfügung bereitgestellt und dort die Auswertung des Farbcodes vorgenommen wird.

Zur Ermittlung der Änderung des horizontalen Winkels (Azimut) von einem Bild zum nächsten wird berechnet, um wie viele Pixel sich das farbcodierte Hauptpixel neben dem Bildmittelpunkt befindet. Aus Gleichung (7.123) und (7.121) lässt sich mit der Bildbreite b_{Pixel} , der Sensorbreite s_{mm} und der Brennweite c zunächst r' für ein Pixel (r'_{1Pixel}), vgl. Abbildung 7.39 und weiterführend der Winkel τ für ein Pixel (τ_{1Pixel}) nach Gleichung (7.128) berechnen:

$$\tau_{1Pixel[rad]} = \arctan \frac{r'_{1Pixel[mm]}}{c_{[mm]}} \quad (7.128)$$

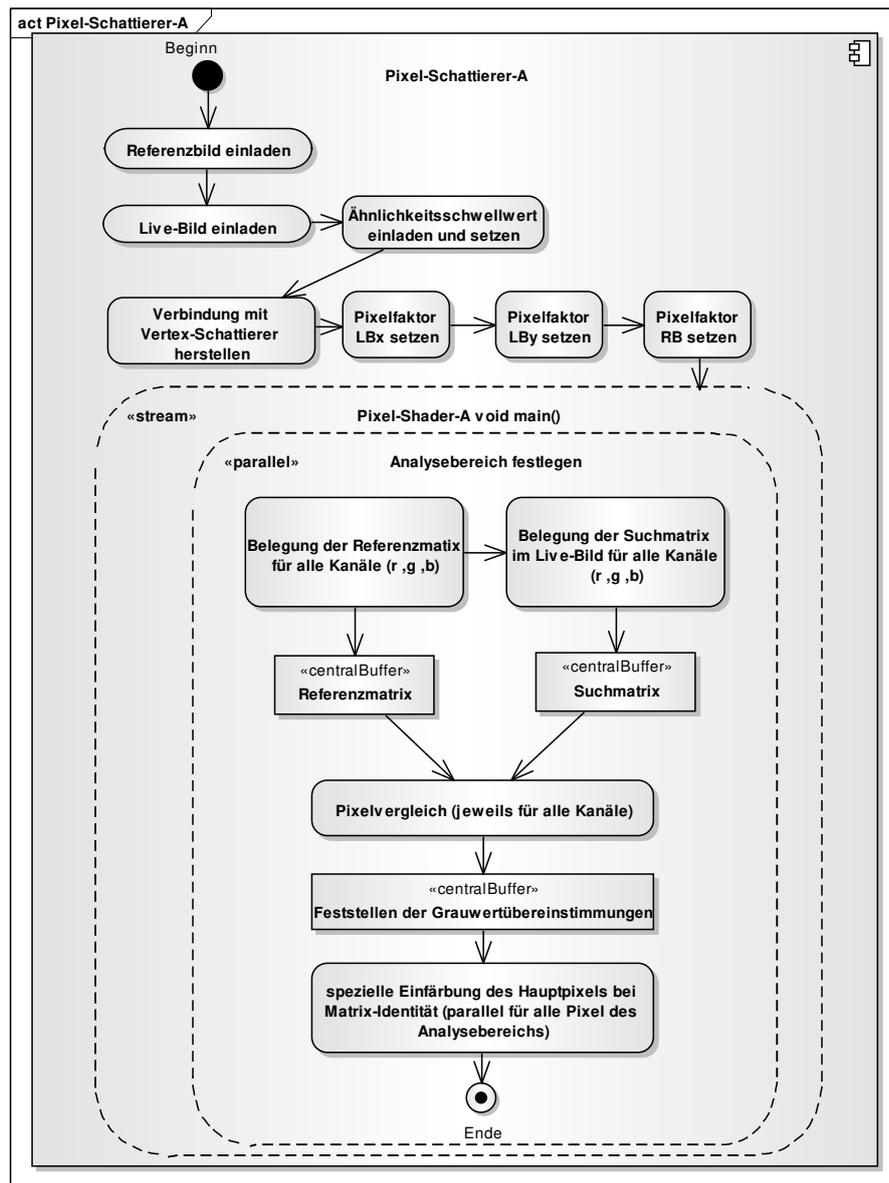


Abbildung 7.38: Interne Abläufe *Pixel-Schattierer-A*

Multipliziert man die Anzahl der Pixel (bis zur ermittelten Pixelposition des farbcodierten Hauptpixels) mit $\tau_{1 \text{ Pixel}}$, so erhält man den azimuthalen Winkel, um den sich das GeoARS von einem Bild zum nächsten weitergedreht hat. Dieser Vorgang wird für jedes neue Live-Bild (für jeden Frame) wiederholt. Durch inkrementelle Addition der berechneten einzelnen Azimutalwinkel aus den Folgebildern lässt sich der Drehwinkel kontinuierlich weiterführen.

Für langsame Drehbewegungen ist nicht jedes Folgebild auszuwerten (vgl. Abschnitt 7.12.7.2), sondern nach dem Erstellen des Referenzbildes ist eine Sequenz an Folgebildern auszulassen, bevor der Bildvergleich vorgenommen wird.

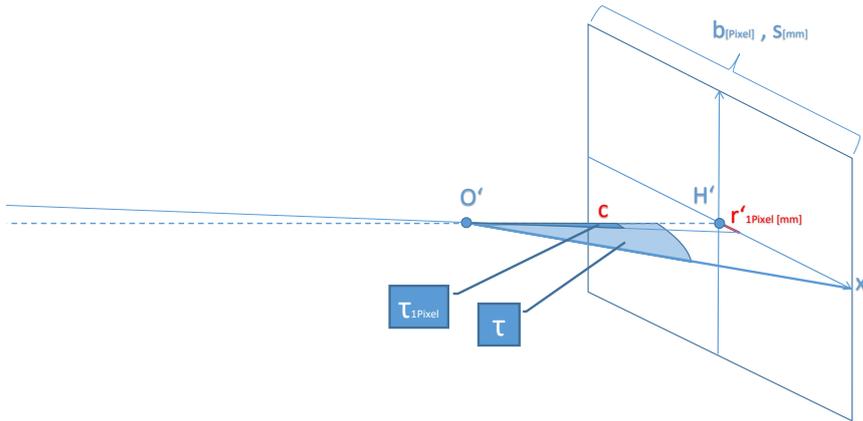


Abbildung 7.39: Idealisierte strahlenoptische Abbildung (Weiterführung der Abbildung 7.20)

7.12.8 Filterung

Im Rahmen von GeoARS werden verschiedenartige Echtzeit-Filter eingesetzt, um einerseits die Messwerte der einzelnen Sensoren zu bearbeiten oder um die Messwerte verschiedener Sensoren miteinander zu kombinieren.

7.12.8.1 Sensorfusion mittels Komplementärfilter

Für die Berechnung der Orientierungswinkel eines GeoARS können die responsiven, aber von einer Drift betroffenen Drehratensensormesswerte mit den zuverlässigen, jedoch nur in Ruhelage für die Winkelberechnung gültigen Messwerten des Beschleunigungssensors miteinander kombiniert werden. Da ein GeoARS vielfältige Aufgaben auf beschränkter Hardware parallel und in Echtzeit ausführen muss, gilt es effektive und in der Praxis lauffähige echtzeitfähige Algorithmen zu finden. Zur Lösung wird nachfolgend der Komplementärfilter in Anlehnung an Esfandyari u. a. [2011], Farrell [2008], Titterton u. Weston [2004] vorgeschlagen.

Der Komplementärfilter wird hier exemplarisch am Beispiel des Nickwinkels θ unter Verwendung eines dreiachsigen Beschleunigungssensors und eines einachsigen Drehratensensors gezeigt. Hierzu wird die Gleichung (7.52) zur Berechnung des Nickwinkels aus Messwerten f des Beschleunigungssensors θ_f

$$\theta_f = \arctan \frac{f_x}{\sqrt{(f_y)^2 + (f_z)^2}} \quad (7.129)$$

und die Gleichung (7.3) zur Nickwinkelberechnung aus Messwerten ω_x des Drehratensensors θ_ω

$$\theta_\omega = \theta_{\omega[k-1]} + (\omega_x - \omega_{x0}) \cdot \Delta t \quad (7.130)$$

herangezogen und zusätzlich ein Term zur Berücksichtigung des zero rate bias ω_{x0} (vgl. Abschnitt 7.6) ergänzt. Über die Filterkonstante β werden beide Nickwinkel komplementär zueinander addiert. Die Filterkonstante muss hierbei zwischen null und eins liegen ($0.0 < \beta < 1.0$), z.B. $\beta = 0.95$. Der fusionierte Nickwinkel errechnet sich danach zu:

$$\theta = \beta \cdot \theta_\omega + (1 - \beta) \cdot \theta_f \quad (7.131)$$

Das responsive Verhalten des Filters wird über die Zeitkonstante τ des Komplementärfilters ersichtlich. Sie berechnet sich zu:

$$\tau = \frac{\beta \cdot \Delta t}{1 - \beta}. \quad (7.132)$$

Für ein GeoARS mit einer Filterkonstanten von $\beta = 0.95$ und einer Messwertbereitstellung von 100 Messwerten pro Sekunde (100 Hz) bei einem Zeitintervall von 0.01 s ergibt sich eine Zeitkonstante von $\tau = 0.19$ s. Wenn die Bewegung des GeoARS 0.19 s überschreitet, wird die Integration der Messwerte des Drehratensensors höher gewichtet und das Rauschen des Beschleunigungssensors ausgefiltert. Findet keine Bewegung statt, so erfolgt die Kalkulation des Nickwinkels allein aus den Messwerten des Beschleunigungssensors.

7.12.8.2 Filterung von Sensormesswerten

Die einem Rauschen unterliegenden Messwerte der Sensoren (vgl. z.B. Abbildung 7.15 (S. 128)) können durch geeignete Filter geglättet werden. Hierzu kann der nachfolgende Echtzeit-Algorithmus zur Glättung von Messwerten der Sensoren eines GeoARS verwendet werden, vgl. [Borre u. Strang 2012]:

$$x_{[n]} = x_{[n-1]} + K \cdot (l_{[n]} - x_{[n-1]}) \quad (7.133)$$

wobei

- $x_{[n-1]}$: vorheriger Mittelwert
- $l_{[n]}$: aktueller Messwert des Sensors
- $x_{[n]}$: neu berechneter geglätteter Mittelwert
- K : Glättungsfaktor, Filterkoeffizient

bzw. ausmultipliziert und umgestellt wird die Wirkung der Gewichtung des Beitrages des aktuellen Sensormesswerts l_n deutlicher:

$$x_{[n]} = (1 - K) \cdot x_{[n-1]} + K \cdot l_{[n]}. \quad (7.134)$$

Somit kann mit Hilfe von K der prozentuale Beitrag (z.B. 20% $\rightarrow K = 0.2$) des aktuellen Sensormesswertes festgelegt werden. Ein graphisches Beispiel der Filterung ist in Abbildung 7.40 dargestellt, bei dem die Messwerte eines Drehratensensors mit $K = 0.2$ gefiltert werden.

7.13 Gewählter Ansatz des 3D-Registrierungsverfahrens

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die gewählten Ansätze der Darstellungs- und Datenverarbeitungs-komponente eines GeoARS sowie deren Realisierungen zunächst einzeln und voneinander unabhängig beschrieben. Der gewählte Ansatz für die Realisierung der Komponente der räumlichen Lage soll in diesem Kapitel nicht losgelöst von den vorgenannten Komponenten, sondern diesmal in Verbindung mit beiden Komponenten beschrieben werden. Hierbei werden in den nachfolgenden Ausführungen auch die Zusammenhänge der beteiligten Koordinatensysteme eines GeoARS und das chronologische Zusammenwirken beschrieben.

Abbildung 7.41 stellt hierzu den **Ablauf** des Verfahrens zur dreidimensionalen Registrierung der virtuellen Objekte mit der realen Welt dar und bildet die Struktur der nachfolgenden Erläuterungen. Ergänzend zum

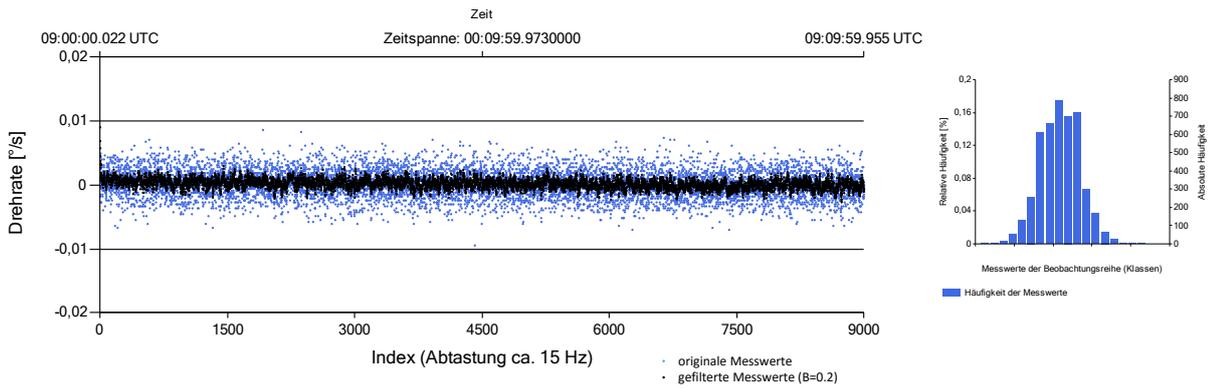


Abbildung 7.40: Drehratensensor: horizontale Achse: Messwerte gemessen in Ruhelage bei horizontaler Ausrichtung; Dauer: 10 min; gefilterte Messwerte (schwarz)

Ablauf des Registrierungsverfahrens gibt die Abbildung 7.42 eine Übersicht über die Zusammenhänge der einzelnen in Abschnitt 3.6.2 beschriebenen **Koordinatensysteme des 3D-AR-Modells**.

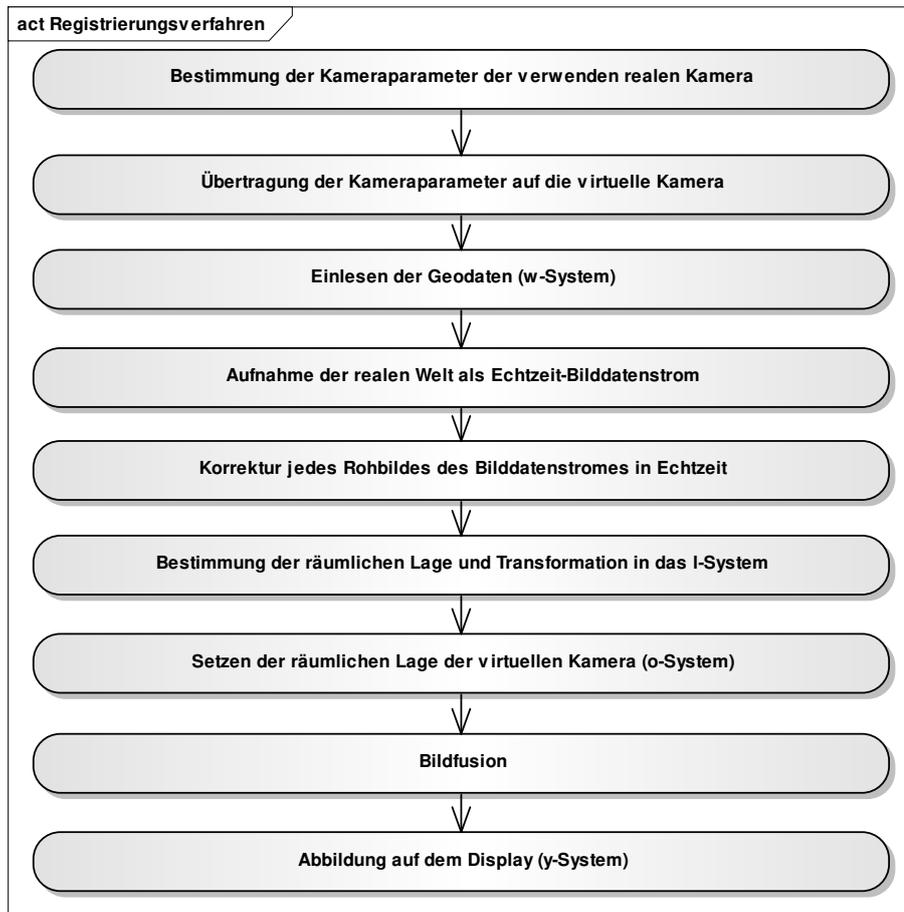


Abbildung 7.41: Ablauf des 3D-Registrierungsverfahrens eines GeoARS

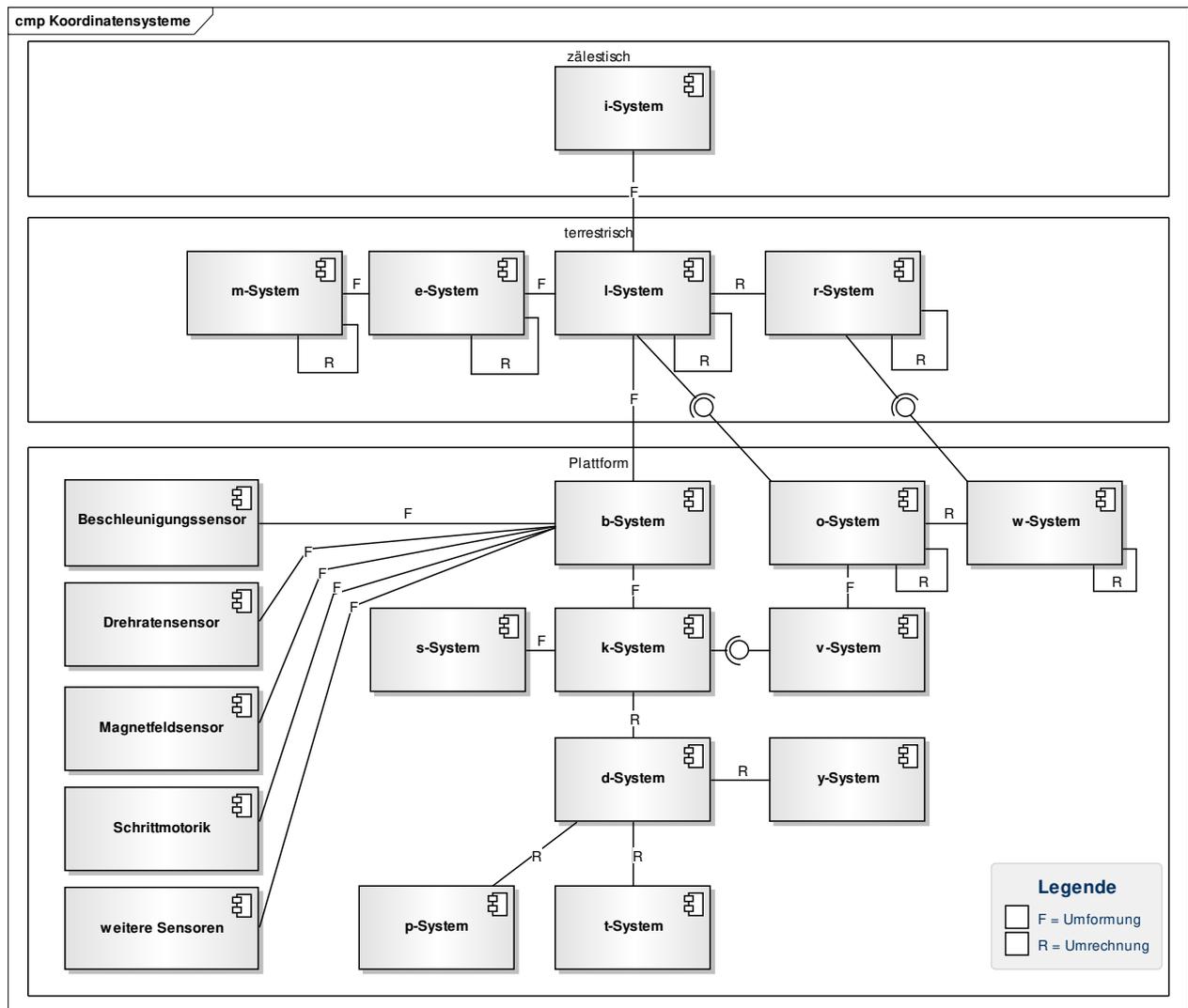


Abbildung 7.42: Modell zur Zusammenführung der beteiligten Koordinatensysteme eines GeoARS

Für die **Bestimmung der Kameraparameter der verwendeten realen Kamera** wird das Kalibrierungsverfahren aus Abschnitt 7.10.1 verwendet und die Korrekturparameter der Kamera ($A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2, x_0, y_0, c$) ermittelt. Hierbei handelt es sich um einen Vorgang, der nicht vor jedem Einsatz des GeoARS, sondern einmalig oder in Abhängigkeit der Anforderungen an System und Aufgabe in regelmäßigen Abständen wiederholt wird. Die Parameter werden im **k-System** des GeoARS vorgehalten. Über eine Schnittstelle erhält die **virtuelle Kamera** im **v-System** den ersten Teil der **Daten der inneren Orientierung** aus dem **k-System**, die Parameter zur Bildung der Projektionsmatrix, vgl. Abschnitt 7.11:

```

1 ...
2 public void onDrawFrame(GL10 gl) {
3     gl.glClear(GL10.GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL10.GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
4     gl.glMatrixMode(GL10.GL_PROJECTION); /
5     gl.glLoadIdentity();
6     float[] P = new float[] { //vgl. Kapitel "virtuelle Kamera"
7         2.0f*z1v/(x2v)-(x1v), 0.0f, (x2v+x1v)/x2v-x1v, 0.0f,
8         0.0f, (2.0f*z1v)/(y2v-y1v), (y2v+y1v)/(y2v-y1v), 0.0f,
9         0.0f, 0.0f, -(z1v+z3v)/(z3v-z1v), (-2.0f*z1v*z3v)/(z3v-z1v),

```

```

10     0.0f,          0.0f,   -1.0f,          0.0f);
11   gl.glLoadMatrixf(P, 0);
12   ...
13 }
14 ...

```

Quelltext 7.5: (OpenGL) Konfiguration des Sichtbereiches der virtuellen Kamera

Die **Geodaten** liegen im r-System, z.B. als Datei oder in einer Datenbank, vor und werden über eine Schnittstelle bzw. eine Datenbankanbindung in das w-System **eingelassen**. Die **reale Kamera** nimmt die reale Welt über den Bildsensor (s-System) als **Echtzeit-Bilddatenstrom** auf.

Der Rohbilddaten der realen Kamera werden auf eine Visualisierungsfläche aufgebracht:

```

1   ...
2   public class GeoARS extends Activity implements TextureView.SurfaceTextureListener{
3       ...
4       mTextureView.setAlpha(1.0f);
5       mTextureView.setRotation(0.0f);
6       mTextureView.setScaleY(1.2f);
7       addContentView(mTextureView, new LayoutParams (LayoutParams.MATCH_PARENT, LayoutParams.
           MATCH_PARENT));
8       ...
9   }
10  ...

```

Quelltext 7.6: (Java) Visualisierungsfläche des Live-Bildes der realen Kamera (Betriebssystem Android)

Der zweite Teil der Daten der inneren Orientierung (Lage des Bildhauptpunktes im Bildkoordinatensystem, Parameter von Bildfehlern beschreibenden Funktionen) wird an den Schattierer (vgl. Abschnitt 7.10.1) über eine Schnittstelle übergeben. Es erfolgt eine **Korrektur jedes einzelnen Bildes des Bilddatenstromes** in Echtzeit. Daran beteiligt sind das d-System, p-System und t-System:

```

1 //Pixel-Schattierer
2 uniform samplerExternalOES shaderTexturLivebild;
3 ...
4 void main() {
5     ...
6     r = sqrt (vec2D_TexturKoordinate.x*vec2D_TexturKoordinate.x+vec2D_TexturKoordinate.y*
           vec2D_TexturKoordinate.y);
7     dr = A1 * pow(r, 3.0) + A2 * pow(r, 5.0) + A3 * pow(r, 7.0);
8     dx_sym = vec2D_TexturKoordinate.x * dr / r;
9     dy_sym = vec2D_TexturKoordinate.y * dr / r;
10    dx_asym = B1*( pow(r, 2.0) + 2.0 * pow(vec2D_TexturKoordinate.x, 2.0) ) + 2.0 * B2 *
           vec2D_TexturKoordinate.x * vec2D_TexturKoordinate.y;
11    dy_asym = B2*( pow(r, 2.0) + 2.0 * pow(vec2D_TexturKoordinate.y, 2.0) ) + 2.0 * B1 * vec2D_
           TexturKoordinate.x * vec2D_TexturKoordinate.y;
12    dx_aff = C1 * vec2D_TexturKoordinate.x + C2 * vec2D_TexturKoordinate.y;
13    dy_aff = 0.0;
14    ...
15 }
16 ...

```

Quelltext 7.7: (GLSL) Echtzeit-Bild-Korrektur, Auszug aus dem Pixel-Schattierer von Quelltext 7.1

Parallel dazu wird die räumliche Lage des GeoARS mit den Methoden aus Abschnitt 7.12 im l-System bestimmt. Dadurch erhalten die mit der Kamera erfassten terrestrischen Objekte ihre Georeferenzierung:

```

1 ...
2 public void onLocationChanged(Location location) {
3     phi = location.getLatitude();
4     lambda = location.getLongitude();
5     hoehe = holeHoeheausDGM();
6     ...
7 }
8 ...
9 public void onSensorChanged(SensorEvent event) {
10    ...
11    if (event.sensor.getType() == Sensor.TYPE_GYROSCOPE) {
12    if (event.sensor.getType() == Sensor.TYPE_LINEAR_ACCELERATION) {
13    if (event.sensor.getType() == Sensor.TYPE_MAGNETIC_FIELD) {
14    nickwinkel = ...; //vgl. Kapitel 3D-Registrierung
15    rollwinkel = ...; //vgl. Kapitel 3D-Registrierung
16    gierwinkel = ...; //vgl. Kapitel 3D-Registrierung
17    ...
18 }
19 ...

```

Quelltext 7.8: (Java) Bestimmung der räumlichen Lage des GeoARS (Betriebssystem Android)

Die Überführung der Objektkoordinaten der Geodaten und der räumlichen Lage des GeoARS wird zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen über Transformationen (vgl. Anhang D) erreicht. Hierbei finden sowohl kartesische Koordinaten (x, y, z) , wie auch krummlinige Kugel- oder ellipsoidische Koordinaten (φ, λ, h) ihre Anwendung. Bei den verwendeten Koordinatentransformationen werden Umformungen und Umrechnungen angewendet [Fröhlich u. a. 2000], die im Abschnitt D.2 näher erläutert werden. In dem vorliegenden Modell bildet das l-System die zentrale Komponente. Für die **Bestimmung der räumlichen Lage** werden das e-System, m-System und das b-System in das l-System transformiert, vgl. Abschnitt 7.13.

Die einzelnen physikalischen Sensor-Systeme werden zuvor im b-System zusammengeführt und dann in das l-System transformiert. Bei Verwendung eines GNSS-Moduls werden die Lagekoordinaten im Phasenzentrum der Antenne bestimmt und anschließend in den Koordinatenursprung des b-Systems verschoben.

Ebenfalls in das b-System werden das physikalische s-System und das physikalische k-System überführt.

Ist die **räumliche Lage** im l-System bestimmt, so wird diese ebenfalls über eine Schnittstelle aus dem l-System **an die virtuelle Kamera** im w-System **weitergegeben** und der virtuelle Kamerastandort transformiert:

```

1 ...
2 class MyRenderer implements GLSurfaceView.Renderer, SensorEventListener {
3
4     public void onDrawFrame(GL10 gl) {
5         ...
6         gl.glMatrixMode(GL10.GL_MODELVIEW);
7         gl.glLoadIdentity();
8         GLU.gluLookAt(gl, 0.0f, 0.0f, 0.0f,
9                     -1.0f, 0.0f, 0.0f,
10                    0.0f, 1.0f, 0.0f);
11         gl.glRotatef((float)nickwinkel, 0.0f, 0.0f, 1.0f);
12         gl.glRotatef((float)rollwinkel, -1.0f, 0.0f, 0.0f);
13         gl.glRotatef((float)gierwinkel, 0.0f, 1.0f, 0.0f);

```

```

14     gl.glTranslatef((float)ost, hoehe, ((float)nord)*-1);
15 }
16 ...
17 }
18 ...

```

Quelltext 7.9: (OpenGL) Transformation des virtuellen Kamerastandortes (Betriebssystem Android)

Im photogrammetrischen Sinne entspricht das der äußeren Orientierung einer Kamera. Die räumliche Lage beider Kameras ist nun identisch, sodass abschließend im Rahmen der **Bildfusion** die Geodaten der virtuellen Welt (w-System) über die Sicht der virtuellen Kamera und die Objekte der realen Welt über die Sicht der realen Kamera gemeinsam durch zwei perspektivische Zentralprojektionen **auf die zweidimensionale Displayebene** im y-System **abgebildet** werden können. Hierzu wird die Sicht der virtuellen Kamera ebenfalls auf eine Visualisierungsfläche aufgebracht:

```

1 ...
2 public class GeoARS extends Activity implements TextureView.SurfaceTextureListener{
3 ...
4 addContentView(mTextureView, new LayoutParams (LayoutParams.MATCH_PARENT, LayoutParams.MATCH_PARENT));
5 ...
6 mRenderer = new MyRenderer(getApplicationContext());
7 mGLSurfaceView = new GLSurfaceView(this);
8 mGLSurfaceView.setEGLConfigChooser(8, 8, 8, 8, 16, 0);
9 mGLSurfaceView.setZOrderOnTop(true);
10 mGLSurfaceView.getHolder().setFormat(PixelFormat.RGBA_8888);
11 mGLSurfaceView.getHolder().setFormat(PixelFormat.TRANSLUCENT);
12 mGLSurfaceView.setRenderer(mRenderer);
13 addContentView(mGLSurfaceView, new LayoutParams (LayoutParams.MATCH_PARENT, LayoutParams.
    MATCH_PARENT));
14 ...
15 }

```

Quelltext 7.10: (Java) Visualisierungsfläche der Geodaten der virtuellen Kamera (Betriebssystem Android)

und über die Visualisierungsfläche des Live-Bildes (vgl. Quelltext 7.6) gelegt.

Im Zusammenhang mit dem gerade beschriebenen Prozess der 3D-Registrierung sind für die Konzeption eines GeoARS die nachfolgenden Anmerkungen relevant.

Die Positionierung als Bestandteil der Bestimmung der räumlichen Lage des GeoARS kann auf vielfältige Weise erfolgen (vgl. Abschnitt 7.12). Sie kann sich modular – je nach dem, welche Module für die jeweilige spezifische GeoARS-Realisierung zur Verfügung stehen – zusammensetzen; beispielsweise per GNSS-Modul, mittels bekanntem Startpunkt in Verbindung mit der Inertialnavigation oder ortsfest durch eine Stationierung über bekannte Passpunkte (z.B. Rückwärtsschnitt) erfolgen. Auch der Umgang mit der Höhe (z^l) des GeoARS im l-System lässt Variationen zu. Sie kann Null (plus Aughöhe) gesetzt werden, wenn ausschließlich in der Ebene navigiert werden soll und gleich der Gebrauchshöhe (plus Aughöhe) gesetzt werden, wenn Geländeunterschiede berücksichtigt werden sollen. Im letzteren Fall kann z^l durch Interpolation z.B. eines DGM-Gitters bestimmt werden. Das DGM-Gitter kann für Deutschland beispielsweise über die Landesvermessungsämter der Bundesländer bezogen werden und wird in verschiedenen Formaten, wie im nachfolgenden Beispiel als ASCII-Datei zur Verfügung gestellt:

```

1 ...
2 418516.0 5807653.0 39.292
3 418516.0 5807654.0 39.278

```

```
4 418516.0 5807655.0 39.261
5 ...
6 418517.0 5807653.0 39.297
7 418517.0 5807654.0 39.284
8 418517.0 5807655.0 39.265
9 ...
```

Quelltext 7.11: (ASCII) Auszug DGM-Raster/Gitter-Datei im ASCII-Format

Auch können Display und Kamera physikalisch getrennt sein, wie es für das Referenzbeispiel „GeoARS-Unfallaufnahme“ realisiert wird (vgl. Abbildung 6.1, rechter Teil).

Des Weiteren können Display und Kamera in der Praxis unterschiedliche Auflösungen und Seitenverhältnisse aufweisen. Regelungen zum Umgang damit werden mit den in Abschnitt 6.4.1 entwickelten Lösungen vorgeschlagen.

Sofern die reale Kamera nicht mittig am mobilen Endgerät bzw. mittig hinter dem Display angebracht ist und die GeoARS-Realisierung als „Fenster in die Welt“ implementiert werden soll, entsteht ein optischer Versatz gegenüber dem Projektionszentrum der virtuellen Kamera, der als Korrekturwert in der Projektionsmatrix der virtuellen Kamera zu berücksichtigen ist, vgl. Abschnitt 7.11. Über diesen Ansatz kann auch, für den seltenen Fall, dass das Abbild der realen Welt auf dem Display absichtlich gestaucht werden soll, der Korrekturfaktor am Frustum berücksichtigt werden. Im Ergebnis würde das Abbild der virtuellen Welt dann ebenfalls gestaucht dargestellt werden.

7.13.1 Realisierungsbeispiel „GeoARS-Landentwicklung“

Die Untersuchungen haben ergeben, dass realistische unverzerrte Zentralprojektionen von realer und virtueller Welt erreicht werden können, wenn die reale Kamera im Vorfeld kalibriert wird, die Auflösung und die Seitenverhältnisse von Kamera und Display aufeinander abgestimmt und die Abbildung des fusionierten Live-Bildes deformierende Bildbereiche (z.B. durch Steuerelemente) berücksichtigt werden. Sofern die reale Kamera nicht mittig am mobilen Endgerät (mittig hinter dem Display) angebracht ist und die GeoARS-Realisierungen als „Fenster in die Welt“-Realisierung implementiert werden, entsteht ein optischer Versatz der als Korrekturwert in der Projektionsmatrix der virtuellen Kamera zu berücksichtigen ist. Die Auswirkungen des Versatzes werden seitens des Nutzers bei Verwendung des originären Öffnungswinkels der realen Kamera gegenüber der Umsetzung der zentralperspektivischen Projektion mit binokularem Gesichtsfeld (vgl. Kapitel 6) und je weiter die Objekte vom Nutzer entfernt sind weniger stark wahrgenommen.

Es kann festgestellt werden, dass eine individuelle Untersuchung des jeweiligen Endgerätes (ggf. eines Gerätes einer Baureihe) und die Übernahme dieser gerätespezifischen Parameter in das GeoARS erforderlich ist.

Zur Bestimmung der räumlichen Lage des GeoARS sind in den vorhergehenden Kapiteln verschiedene Varianten mit dem Ziel erarbeitet worden, einen ‚Werkzeugkasten‘ für unterschiedlichste GeoARS-Realisierungen bereitzustellen. Die einzelnen Werkzeuge können bedarfsgerecht miteinander kombiniert werden.

Die Verhaltensweisen (Gebrauchseigenschaften) der kostengünstigen Sensoren, Hardwarebeschränkungen der mobilen Endgeräte wie auch das schwer prognostizierbare Nutzungsverhalten von pedestrisch-mobilen GeoARS erfordern für die Echtzeit-Nutzung performante Sensorfusionslösungen, die für die Endgeräte des Massenmarktes in den vorhergehenden Kapiteln erarbeitet wurden. Die Bestimmung der räumlichen Lage ist gegenüber stationärer Systeme als ungenauer einzuschätzen. Hauptursache sind das GNSS-Modul,

der Magnetfeldsensor und bei Verwendung der Methoden der Inertialnavigation die Driftverhalten von Beschleunigungs- und Drehratensensor.

Die Realisierbarkeit des GeoARS-Systemmodells (Kapitel 3) wurde anhand des „GeoARS-Landentwicklung“ in der Praxis erprobt, vgl. u.a. [DVW 2014]. Die Genauigkeit der räumlichen Lage des Systems wird bei dieser Realisierung maßgeblich durch das GNSS-Modul und den Magnetfeldsensor beeinflusst. Die erreichte Genauigkeit liegt im Bereich weniger Meter und genügt für Orientierungsaufgaben im Gelände der weitläufigen Feldflur, zur Kontrolle eigener Planungsdaten und zur Grobaufnahme eigener terrestrischer Daten mit einem höchst mobilen Endgerät. Eine höhere Genauigkeit ist jedoch wünschenswert. Diese kann zukünftig mit den selben GeoARS-Algorithmen, jedoch mit verbesserter interner Sensorik erreicht werden.

Es konnte in den Untersuchungen vereinzelt beobachtet werden, dass die Sensoren (insbesondere der Magnetfeldsensor) nicht immer Messwerte in der gesetzten Abtastrate lieferten. Es konnte jedoch noch nicht geklärt werden, ob die Ursache dieses Fehlers die verlangsamte Speicherung der Messwerte ist oder in einem nicht immer kontinuierlichen Datenfluss der Sensormesswerte liegt. Möglicherweise tritt der Fehler ohne Zwischenspeicherung (zu Untersuchungszwecken) und unter Verzicht auf die parallelen Ausführungen mehrerer (anderer) Applikationen auf dem Endgerät erst gar nicht auf. Eine Abtastrate von über 100 Hz konnte mit der verwendeten low cost Alltagshardware ebenfalls nicht realisiert werden, deren Auswirkungen jedoch lediglich auf den Prozess der Inertialnavigation begrenzt sind. Die mobilen Endgeräte führen viele Prozesse und teilweise mehrere Anwendungen gleichzeitig aus und sind für ein breites Applikationsspektrum geschaffen worden. Anwendungen der Augmented Reality reihen sich hier neben anderen Anwendungen (systemimmanent/nutzerspezifisch) auf Mobilgeräten ein, fordern jedoch die gesamte Hardware vollumfänglich und gleichzeitig – darunter Hauptprozessoren, Grafikprozessoren, Display, Drehratensensor, Beschleunigungssensor, Magnetfeldsensor und GNSS-Modul – was zu einem hohen Stromverbrauch und einer spürbaren Wärmentwicklung führt und die aktuelle Alltagshardware an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit bringt.

7.13.2 Realisierungsbeispiel „GeoARS-Unfallaufnahme“

Analog zu den Ausführungen der mobil-pedestrischen GeoARS haben die Untersuchungen zu stationären GeoARS ergeben, dass auch hier realistische unverzerrte Zentralprojektionen von realer und virtueller Welt erreicht werden können, wenn kalibrierte Kameras verwendet, die Auflösung und die Seitenverhältnisse von Kamera und Display aufeinander abgestimmt und die bilddeformierenden Bereiche (z.B. durch Steuerelemente) algorithmisch berücksichtigt werden.

Für stationäre GeoARS, bei denen die reale Kamera und das Display entkoppelt ist, ist das Display selbst nicht mehr Bestandteil der Augmentation, sie wirken trotzdem als „Fenster in die Welt“, jedoch als exozentrische Variante. Für den Fall modularer Systeme wie „GeoARS-Unfallaufnahme“ kann die reale Kamera arithmetisch in die Displaymitte gelegt werden, da keine physikalische Verbindung besteht, vgl. Abbildung 6.1. Ein optischer Versatz, wie oben bei den mobil-pedestrischen GeoARS beschrieben, entsteht somit erst gar nicht. Der Öffnungswinkel der Kamera kann durch optische Zoom-Objektive verändert werden und erfordert einen kontinuierlichen Schnittstellentransfer der Daten der inneren Orientierung von realer (k-System) zur virtuellen Kamera (v-System). Praktisch kann die Kamera in diskreten Zoomstufen kalibriert und für die Anwendung der Parameter der inneren Orientierung auf die virtuelle Kamera eine Interpolation vorgenommen werden. Die fachliche Entscheidung zur Anwendbarkeit dieser Vorgehensweise ist im Ergebnis der Kamerakalibrierung anwendungsfallspezifisch vorzunehmen.

Es kann festgestellt werden, dass eine individuelle Untersuchung des jeweiligen Kameramodules (ggf. eines Gerätes einer Baureihe) und Übernahme dieser gerätespezifischen Parameter im GeoARS erforderlich ist.

Zur Bestimmung der räumlichen Lage des stationären GeoARS werden analog zu den mobil-pedestrischen GeoARS in den vorhergehenden Kapiteln verschiedene Varianten mit dem Ziel erarbeitet, einen 'Werkzeugkasten' für unterschiedlichste GeoARS-Realisierungen bereitzustellen. Die einzelnen Werkzeuge können in Analogie zu den mobil-pedestrischen GeoARS bedarfsgerecht miteinander kombiniert werden, wobei einzelne Werkzeuge (z.B. Inertialnavigation hinsichtlich der Position) eingeschränkt anwendbar sind.

Auch für stationäre GeoARS erfordern die Verhaltensweisen der kostengünstigen Sensoren und die Hardwarebeschränkungen der mobilen Endgeräte (Tablet-PC) für die Echtzeit-Nutzung performante Sensorfusionslösungen. Es können jedoch weitere Komponenten, wie z.B. Schrittmotoren, verwendet werden. Das schwer prognostizierbare Nutzungsverhalten von pedestrisch-mobilen GeoARS entfällt durch die stationäre Anwendung und wirkt sich positiv auf die Modellierung des Systemverhaltens aus - beispielsweise entfallen Sensorfusionen zur Positionsbestimmung.

Das GeoARS-Systemmodell wurde anhand eines Prototypen „GeoARS-Unfallaufnahme“ im Forschungs- und Entwicklungsprojekt „LUNAS 3D hybrid“ (vgl. Abschnitt 1.2) implementiert.

8 GeoARS-Funktionalitäten und Interaktion

8.1 Ansätze

Nach den Ausführungen in Abschnitt 2.1 ist die Interaktionskomponente eine der vier Grundbausteine eines GeoARS und für die Kommunikation von Mensch und Computer zuständig. In der vorliegenden Arbeit wird auch die Sichtweise von Zühlke [2012] vertreten, dass die Kommunikation besonders gut verlaufen wird, wenn möglichst viele Sinneskanäle des Anwenders angesprochen werden. Hierbei ist der grundsätzliche Ansatz, dass ein fehlerfreier Informationsaustausch durch die Redundanz der angesprochenen Sinne begünstigt wird (multimodale Interaktion). Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über die avisierten Interaktionsmöglichkeiten für GeoARS nach dem Ansatz der multimodalen Interaktion. Der Ansatz besteht weiterführend darin, auf dem Massenmarkt erhältliche Gerätehardware (Alltagsgeräte) zu verwenden und mit ihnen die Interaktionskomponente der GeoARS zu entwickeln.

Tabelle 8.1: Übersicht Interaktionstechniken, Erweiterung von Tabelle 2.2

Interaktionstechnik	Untergruppe	Art	Beispiel	GeoARS
Navigation	Bewegung ^a	Erkunden oder Suchen in einer Umgebung	durch Eigenbewegung	●
		egozentrische Darstellung ^c	Geoobjekte aus Egoperspektive	●
	exozentrische Darstellung ^d	Geoobjekte aus Vogelperspektive	●	
Systemeinstellungen		Systemmodus oder -status ändern	grafische Menüs	●
			Sprache oder Gestik	○
Symbolische Eingaben		Text, Zahlen, andere Zeichen eingeben/editieren	Stift-/Fingereingabe	●
Selektion		Auswählen von Objekten	Stift-/Fingereingabe	●
Manipulation		Drehung oder Verschiebung von Objekten	Datenhandschuh	○

● ≙ prototypische Realisierung geplant | ○ ≙ prototypische Realisierung nicht geplant

^aengl. travel

^bengl. Wayfinding

^cViewpoint der Kamera und Augpunkt des Benutzers fallen zusammen; virtuelle Objekte werden im Bezugssystem des Benutzers dargestellt, vgl. [Bowman u. a. 2004], [Tönnis 2010]

^dvirtuelle Objekte werden aus einer anderen Kameraperspektive gezeigt, vgl. [Bowman u. a. 2004], [Tönnis 2010]

8.2 Problemstellungen und Herausforderungen

GeoARS stellen in der Realität wesentlich andere Anforderungen an die Interaktion als konventionelle Computeranwendungen oder Anwendungen der virtuellen Realität.

Die Interaktionskomponente steht bei GeoARS in direktem Zusammenhang mit der Darstellungskomponente (vgl. Kapitel 6), da über die kompakten berührungsempfindlichen Displays die Interaktion stattfinden

kann. Tabelle 8.2 führt die Einflussfaktoren und Auswirkungen auf die Mensch-Computer-Interaktion für GeoARS auf.

Hierbei wirken auf das Display als Interaktionskomponente die in Abschnitt 2.5 angeführten Umgebungsfaktoren. Wechselnde Lichtverhältnisse, insbesondere direkte Sonneneinstrahlung führen ggf. durch eine verminderte Lesbarkeit des Displayinhaltes zu Störungen oder Unterbrechungen in der Interaktion. Niederschlag kann je nach Art und Intensität ebenfalls nutzungseinschränkend wirken. In gleicher Weise wirken sich starker Regen oder Schneefall (Luftfeuchtigkeit/Niederschlag) auf die Kommunikation von Anwender und System aus und behindern zudem Anwendereingaben auf berührungsempfindlichen Displays. Auch sehr tiefe Temperaturen vermindern die Berührungsempfindlichkeit des Displays. Ein großes Display führt dazu, dass ein größerer Ausschnitt der realen und virtuellen Welt betrachtet werden kann. Hierbei steht auch mehr Platz für den Informationsaustausch zwischen Nutzer und Computer zur Verfügung. Zudem lassen sich Geoobjekte ggf. detaillierter darstellen, sofern es sich nicht um „Fenster in die Welt“-Applikationen handelt. Dort werden Geoobjekte stets in Realgröße dargestellt. Es ist darauf zu achten, dass je nach GeoARS-Implementierung die Handhabbarkeit für den jeweiligen Einsatzzweck gewährleistet wird und auch nicht die mögliche damit in Zusammenhang stehende Gewichtszunahme zu Benutzungseinschränkungen hinsichtlich der Interaktion führt. Für mobil-pedestrische GeoARS sind regelmäßig kleinere mobile und vor allem leichte Geräte üblich, bei denen trotz der Beschränkung in Größe und Gewicht eine dem Anwendungszweck angepasste und ausreichend komfortable Interaktion erforderlich ist.

Tabelle 8.2: Einflussfaktoren auf handgehaltene Displays hinsichtlich der Interaktion

Einflussfaktor	Auswirkung
Licht	Störung/Unterbrechung der Interaktion bei starker Sonneneinstrahlung wegen verminderter Lesbarkeit
Luftfeuchtigkeit/Niederschlag	Störung/Unterbrechung der Interaktion wegen verminderter Lesbarkeit des Displayinhaltes
Temperatur	Störung/Unterbrechung der Interaktion wegen verminderter Berührungsempfindlichkeit bei tiefen Temperaturen
Größe	kleine Geräteoberflächen bieten weniger Platz für Informationen, ggf. Bedienung je nach Eingabegerät erschwert
Auflösungsvermögen	Lesbarkeit von Inhalten, Erkennbarkeit/Darstellbarkeit von Objekten
Gewicht	Handhabbarkeit des mobilen Endgerätes (niedriges Gewicht wirkt begünstigend)

8.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Nach Reiterer u. Geyer [2013] sowie Heinecke [2012] hat sich die Mensch-Computer-Interaktion (MCI) als interdisziplinäres Forschungsgebiet entwickelt. Es beinhaltet neben der Analyse und Gestaltung auch die Bewertung von benutzergerechten interaktiven Computeranwendungen. Für diesen iterativen Entwicklungsprozess wurden verschiedene Modelle, z.B. nach DIN ISO 9241-210 (Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme) entwickelt. Beginnend mit den umfangreichen Untersuchungen beispielsweise von Foley u. a. [1984], Bowman u. a. [2004] und Felger [1995] bilden heute u.a. die Thematiken *Touch und Gestik*, *entertainment interfaces* und *sprachbasierte und multimodale Schnittstellen* kontinuierliche und nach wie vor aktuelle Forschungsschwerpunkte, vgl. [Koch 2016]. Insbesondere die Interaktion durch Berührung ist in den

letzten Jahren so weit entwickelt worden, dass sie für mobile kostengünstige Endgeräte bereits praxistauglich zur Verfügung steht und optimale Voraussetzungen für die Verwendung in GeoARS darstellt.

8.4 Gewählter Ansatz

Sowohl für mobil-pedestrische wie auch für stationäre GeoARS wurde der Ansatz gewählt, einerseits auf dem Massenmarkt erhältliche Hardwarekomponenten (Alltagsgeräte) zu verwenden sowie andererseits die Standardinteraktionsmöglichkeiten der verbreiteten Betriebssysteme zu verwenden und mit ihnen die Interaktionskomponente der GeoARS zu entwerfen. Die Arbeit hat demzufolge nicht das Ziel neue Interaktionskomponenten zu entwickeln. Der gewählte Ansatz (vgl. auch Tabelle 8.1, rechte Spalte) beinhaltet die Selektion und die symbolischen Eingaben per Finger oder Stifteingabe durch den Nutzer. Die Navigation durch das Bezugssystem der Geoobjekte erfolgt in der egozentrischen Darstellung (Egoperspektive) durch Eigenbewegung und in der exozentrischen Darstellung (Vogelperspektive) durch eine Kombination aus Eigenbewegung (Drehungen, horizontale Translation) und virtueller Bewegung (vertikale Translation bei Einnehmen der Standpunkthöhe in der Vogelperspektive). Es ist für GeoARS beabsichtigt, die Systemeinstellungen über graphische Menüs auf dem Display zu realisieren. In den nachfolgenden Abschnitten werden die für GeoARS verschiedenen Interaktionsmöglichkeiten gemeinsam mit Geo-AR-Funktionalitäten erarbeitet.

8.4.1 Interaktion: Navigation

8.4.1.1 3D-AR-Egoperspektive

Abbildung 8.1 zeigt ein mobil-pedestrisches GeoARS aus einer 3D-AR-Egoperspektive. Die Navigation erfolgt

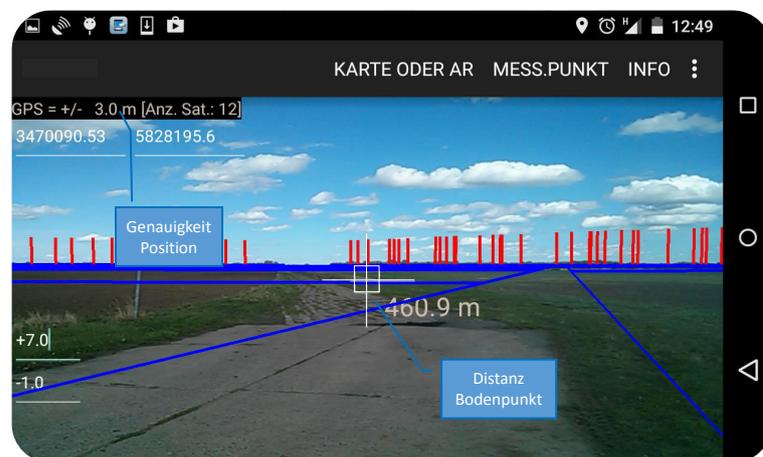


Abbildung 8.1: 3D-AR-Egoperspektive des „GeoARS-Landentwicklung“ mit Fadenkreuz

hierbei ausschließlich durch die Eigenbewegung des Anwenders. Dies betrifft sowohl die Ausrichtung des Systems (ϕ, θ, ψ) als auch die dreidimensionale Position (X, Y, Z bzw. ϕ, λ, h_{ell}). Navigiert wird hierbei im l-System, wobei die räumliche Lage des Systems über den in Abschnitt 7.13 beschriebenen Ansatz des 3D-Registrierungsverfahrens in Echtzeit bestimmt wird. Synchron zur Bewegung des Systems in der realen Welt wird die Ausrichtung der virtuellen Kamera im w-System über die Transformationen innerhalb des 3D-Registrierungsverfahrens realisiert.

Zur Unterstützung während der Navigation können GeoARS Hinweise zur aktuellen Position und Systemausrichtung an den Nutzer kommunizieren. Aufgrund fluktuierender Genauigkeiten der Sensorik sind GeoARS zudem angehalten den Nutzer stets über den aktuellen Systemzustand Auskunft zu geben. Hierbei stellen die Genauigkeit der aktuellen Position und die Zuverlässigkeit der Magnetfelddetektion relevante Informationen für den Nutzer dar und sollten durch das GeoARS kommuniziert werden.

Die Navigation im stationären GeoARS beschränkt sich lediglich auf zwei Systemrotationen (Nick- und Gierwinkel), die über eine Motorsteuerung realisiert werden. Die Aufforderung an das System eine Rotation durchzuführen, erfolgt über eine Funkverbindung durch Nutzereingabe auf dem mobilen Teil des GeoARS (Tablet), vgl. Abbildung 6.1 Abschnitt 6.4.1.

8.4.1.2 Exozentrische AR-Darstellung - Verwendung von Karten

In Abschnitt 5.5.2 wurde bereits demonstriert, dass grundsätzlich auch Rasterdaten, z.B. aus GIS in GeoARS visualisiert werden können. Das Besondere ist hierbei die Betrachtungsweise der Daten. Die Visualisierung

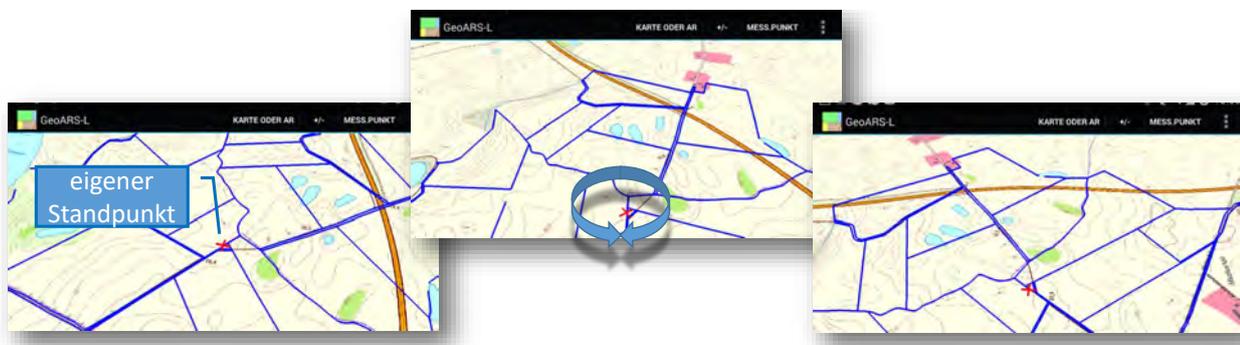


Abbildung 8.2: AR-Erkundung der Umgebung um den eigenen Standpunkt herum unter Verwendung von Karten (GIS-Ausgabeprodukte); Verändern der Perspektive erfolgt durch Drehen/Schwenken des GeoARS

des Standpunktes des Anwenders erfolgt hierbei in einer exozentrischen AR-Darstellung (Vogelperspektive), d.h. in einem Anwendungsstandpunkt in beliebiger Höhe über dem Erdboden, z.B. 2000.0 m. Der Anwendungsstandpunkt wird hierbei virtuell angehoben. Durch seine Eigenbewegung und gekoppelte Sensorik kann der Nutzer die virtuelle Position oder durch Drehen und Schwenken (ϕ , θ , ψ) die Perspektive auf die Kartenansicht verändern. Über diese besondere Datenansicht wird der Vergleich zwischen örtlicher Gegebenheit und Karte für den Nutzer erleichtert. Es findet dadurch ein thematisches Erkunden der Umgebung um den unmittelbaren eigenen Standpunkt des Anwenders herum statt. Dies dient insbesondere zur globalen Navigation und Orientierung im Gelände. GeoARS können bei Nutzung dieser Funktion als Erweiterung von GIS bzw. als **Erweiterung von mobilen GIS** verstanden werden. Für eine OpenGL-Implementierung kann dies durch Setzen der Höhe über dem Erdboden in die Variable *hoehe* des nachstehenden Quellcodes erfolgen:

```

1 ...
2 class MyRenderer implements GLSurfaceView.Renderer, SensorEventListener {
3     public void onDrawFrame(GL10 gl) {
4         ...
5         gl.glMatrixMode(GL10.GL_MODELVIEW);
6         gl.glLoadIdentity();
7         GLU.gluLookAt(gl, 0.0f, 0.0f, 0.0f,
8                     -1.0f, 0.0f, 0.0f,
9                     0.0f, 1.0f, 0.0f);
10        gl.glRotatef((float)nickwinkel, 0.0f, 0.0f, 1.0f);

```

```
11     gl.glRotatef((float)rollwinkel, -1.0f, 0.0f, 0.0f);
12     gl.glRotatef((float)gierwinkel, 0.0f, 1.0f, 0.0f);
13     gl.glTranslatef((float)ost, hoehe, ((float)nord)*-1);
14 }
15 }
16 ...
```

Quelltext 8.1: (OpenGL) Setzen der Standpunkthöhe über dem Erdboden (Betriebssystem Android)

8.4.2 Interaktion: Systemeinstellungen

Die Systemeinstellungen werden in den realisierten Prototypen „GeoARS-Landentwicklung“ und „GeoARS-Unfallaufnahme“ über graphische Menüs der Benutzeroberfläche vorgenommen. Darüber hinaus werden GeoARS über spezifische Systemdateien mit den notwendigen Parametern konfiguriert, z.B. für die Parameter der inneren Orientierung der Kamera.

8.4.3 Interaktion: Symbolische Eingaben

Die Eingabe von Informationen bei „GeoARS-Landentwicklung“ und „GeoARS-Unfallaufnahme“ erfolgt über symbolische Eingaben, d.h. von Text, Zahlen und Sonderzeichen über das Display durch Berührung (Stift/Finger). Für GeoARS mit geringer Displaygröße werden relevante Buttons oder Tastaturen lediglich bei Bedarf aktiviert (eingebledet), um eine möglichst große Fläche für die Darstellung der Augmented Reality zur Verfügung zu haben.

8.4.4 Interaktion: Selektion

8.4.4.1 Selektion eines Geoobjektes und Datenanalysefunktionen

Für die Bereitstellung von Entfernungsinformationen während der Navigation oder zur Selektion und Abfrage zu einem Geoobjekt wird eine insbesondere für mobil-pedestrische GeoARS mit kleinen Displays geeignete Selektionsmöglichkeit konzipiert. Hierbei kann mit einem Fadenkreuz, das stets in der Bildmitte des Displays dargestellt und durch Bewegen des GeoARS mitgeführt wird, auf einen Punkt der Erdoberfläche gezeigt werden, vgl. Abbildung 8.1. Über diesen virtuellen Berührungspunkt erfolgt einerseits die Berechnung der Entfernung zu diesem Punkt und andererseits wird darüber die Koordinate des Berührungspunktes berechnet. Über die so berechneten Koordinaten kann anschließend eine Objektselektion, Datenabfrage oder -analyse durchgeführt werden.

Die horizontale Distanz (d) lässt sich, nach Abbildung 8.3, näherungsweise für das unmittelbare planare Umfeld des Nutzers mit der Aughöhe (h) des in der Hand gehaltenen GeoARS und dem Nickwinkel (θ) über den Sinussatz berechnen, vgl. [Bronstein u. a. 2015]:

$$d \approx \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{\sin \beta} \cdot h. \quad (8.1)$$

Ebenso ist die Schnittpunktermittlung durch Nutzung der Daten des digitalen Geländemodelles (vgl. Abschnitt 5.5.1) realisierbar.

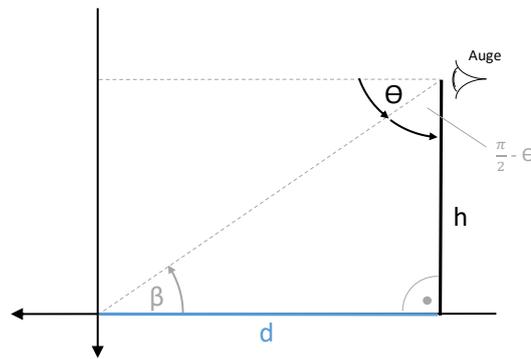


Abbildung 8.3: Berechnung planare horizontale Distanz

Die Datenabfrage kann für flächenhafte Geometrien oder geschlossene Linienpolygone, z.B. Flurstücksgeometrien, beispielsweise über einen Punkt-im-Polygon-Algorithmus erfolgen, vgl. [Franklin 2006], [Brinkhoff 2013]:

```

1 public boolean PunktInPolygon(double y, double x, double ypoints[], double xpoints[], int Anzahl) {
2     int nvert = Anzahl;
3     double verty[] = ypoints;
4     double vertx[] = xpoints;
5     double testy=y;
6     double testx=x;
7     boolean c=false;
8     int i, j;
9     for (i = 0, j = nvert-1; i < nvert; j = i++) {
10        if ( ((verty[i]>testy) != (verty[j]>testy)) &&
11            (testx < (vertx[j]-vertx[i]) * (testy-verty[i]) / (verty[j]-verty[i]) + vertx[i]) )
12            c = !c;
13        }
14    return c;
15 }

```

Quelltext 8.2: (Java) Selektion Geoobjekt mittels Display-Fadenkreuz in Verbindung mit Geo-Algorithmus

Darüber hinaus besteht in GeoARS die Möglichkeit geometrische Objekte über Berührung des Displays selektierbar zu gestalten. In der vorliegenden Arbeit wurde dies bei „GeoARS-Unfallaufnahme“ hinsichtlich der aufgemessenen Unfallobjekte realisiert, vgl. Abbildung 5.8.

8.4.4.2 Nutzung von GIS-Datenbank-Managementsystemen

Bei Verwendung von GeoDBMS (vgl. Abschnitt 4.2.6.2) für Selektionsaufgaben können die internen Analysefunktionen und räumliche Abfragen genutzt werden, z.B. für PostGIS über die interne Funktion *ST_Contains(geometry geomA, geometry geomB)*, vgl. [PSC 2016a]. Diese vordefinierten Abfragen haben den Vorteil, dass sie integraler Bestandteil der DBMS und damit gleichzeitig des GeoARS sind und nicht neu programmiert werden müssen.

8.4.4.3 Datenerfassung

Das Fadenkreuz, vgl. Abbildung 8.1, wird bei „GeoARS-Unfallaufnahme“ und „GeoARS-Landentwicklung“ ebenfalls dazu verwendet neue Geoobjekte zu erstellen. Hierbei werden an der Stelle auf die das Fadenkreuz

deutet die dreidimensionalen Koordinaten im I-System erzeugt (in „GeoARS-Unfallaufnahme“ per Laserdistanzmessung) und per Dialogabfrage die Weiterverarbeitung des so aufgemessenen Punktes vorgenommen. Hierbei erfolgt die anwendergestützte interaktive Vergabe der Objektattribute und die Abspeicherung des Punktes.

8.4.4.4 Fotos

Gleichzeitig mit der Aufnahme eines Einzelpunktes im Rahmen der Datenerfassung ist es durch das video see-through Verfahren möglich, neben den Attributen eines Geoobjektes (u.a. Koordinaten) auch ein Foto sowie die Daten des Displays zum Zeitpunkt der Aufnahme zu speichern. Dieses Vorgehen findet sowohl bei „GeoARS-Landentwicklung“ (Speicherung in Dateien), vgl. Abbildung 8.4 wie auch für „GeoARS-Unfallaufnahme“ (Speicherung in Geodatenbank) zur Beweissicherung und Reproduzierbarkeit der Punktaufnahme Anwendung.

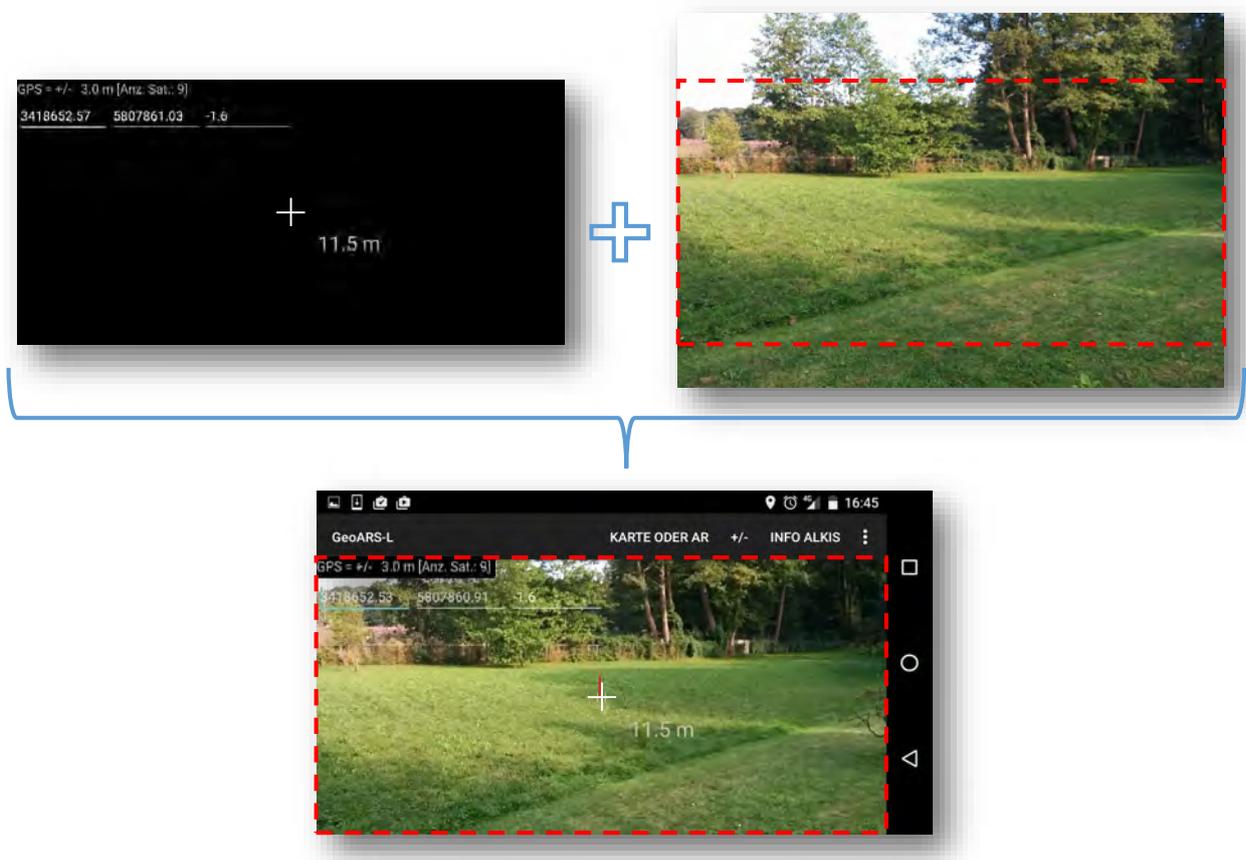


Abbildung 8.4: Getrennte Speicherung von Foto und Displayinformation zur Dokumentation, Beweissicherung und Reproduzierbarkeit einer Punktaufnahme (oben); Nutzeransicht des Displays (unten)

8.4.5 Interaktion: Manipulation

Die Manipulation von Geoobjekten wird regelmäßig nach einer Selektion ermöglicht, um Änderungen an den Attributen eines Geoobjektes vornehmen zu können. In der jeweiligen Realisierung eines GeoARS ist im Rahmen der Konzeption festzulegen, für welche Objekte und Attribute Manipulationen durch den Nutzer

zulässig sind. Manipulationen können über symbolische Eingaben oder graphische Interaktionswerkzeuge in GeoARS vorgenommen werden.

8.4.6 Interoperabilität

8.4.6.1 Web-Map-Services und Web-Feature-Services

Für GeoARS ist es sinnvoll, Geodaten, die in vektorieller Form über einen Web Feature Service (WFS) oder in Rasterdatenform über einen Web Map Service (WMS) über das Datennetz von Datenanbietern zur Verfügung gestellt werden, zu nutzen. Somit ist ein praktikabler Zugriff auf Geodaten Dritter möglich. Hierbei steht eine Bezugsform von Geodaten zur Verfügung, mit der bei Verfügbarkeit von mobilem Datenfunk eine räumlich begrenzte Menge an Geoobjekten komfortabel in das GeoARS geladen (importiert) werden können. Zudem ist es möglich, die Daten persistent im GeoARS abzuspeichern und so unabhängig von Datenverbindungen verwenden zu können. Für Rasterdaten wird in GeoARS die nachfolgende Anfrage verwendet, die je nach WMS geringfügig anzupassen ist:

```

1 ...
2 new DownloadWMS_webatlas(this, String.valueOf(Ost), String.valueOf(nord), "00", bbox, suchradius, "BKG",
   "http://sg.geodatenzentrum.de/wms_webatlasde.light?SERVICE=WMS&VERSION=1.1.0&REQUEST=GetMap&
   Layers=webatlasde.light&STYLES=default&SRS=EPSG:25833&bbox=").execute("");
3 ...
4 final HttpGet getRequest ...;
5 ...
6 HttpResponse response = client.execute(getRequest);
7 ...
8 Bitmap doInBackground(String... Url) {
9     ...
10    downloadBitmap(String url) {}
11    ...
12 }
13 ...
14 onPostExecute(Bitmap rasterBild) {
15    datenstrom = new FileOutputStream(dateiPfad);
16    rasterBild.compress(CompressFormat.PNG, 100, datenstrom);
17    ...
18 }

```

Quelltext 8.3: (Java) Nutzung von WMS in GeoARS

Hierbei wird ein Rasterbild (Map) vom Server des Geodatendienstes angefordert (request). Die Variable *bbox* enthält die Koordinaten des Auswahlrechtecks für den bereitzustellenden Kartenausschnitt. Die Variable *suchradius* wird von der Funktion *DownloadWMS_webatlas()* verwendet, um die zu dem Rasterbild gehörige Koordinatendatei erzeugen zu können. Das Rasterbild selbst wird durch Auswertung der Antwort (response) als Hintergrundprozess des GeoARS ausgewertet und über einen Datenstrom nach Abschluss des Ladevorgangs in eine Bilddatei gegossen, vgl. Quellcode 8.3. Dieser Vorgang kann für beliebig viele Kartenausschnitte wiederholt werden. Im Ergebnis des gesamten Download-Prozesses liegt eine Bild-Datei (z.B. Portable Network Graphics (PNG)-Format) sowie eine Koordinatendatei zur Georeferenzierung des Rasterbildes im GeoARS vor.

Für Vektordaten ist die Verwendung eines Datendienstes komplexer anzusehen als für Rasterdaten, weil zusätzlich zu den räumlichen Auswahlkriterien die Objektauswahl auf bestimmte Objektarten bezogen wird

und eine Modellkenntnis der Geodaten vorausgesetzt wird. Im Ergebnis des Download-Prozesses liegt eine XML-Datei im GeoARS vor. Hierzu wird in GeoARS die nachfolgende Anfrage verwendet, die je nach WFS geringfügig anzupassen ist:

```

1 ...
2 new DownloadXML_ALKIS2016(this, String.valueOf(East), String.valueOf(North)).execute("");
3 ...
4 protected String doInBackground(String... Url) {
5     HttpGet httpget = new HttpGet("https://security.geobasis-bb.de/wss/service/WFS-ALKIS-SF/httpauth?
        REQUEST=GetFeature&VERSION=1.0.0&SERVICE=WFS&typename=AX_Flurstueck&&BBOX="+bbox_li+", "+
        bbox_un+", "+bbox_re+", "+bbox_ob);
6     ...
7     HttpResponse response = httpclient.execute(httpget);
8     ...
9     datenstrom = new BufferedReader( new InputStreamReader( response.getEntity().getContent()));
10    ...
11 }
12 protected void onPostExecute(String stringAusDoInBackground) {
13     geoDaten = new BufferedWriter(new FileWriter("/sdcard/download/xmlDatei_schreiben.xml", /* append=
        true */ false));
14 }
15 ...

```

Quelltext 8.4: (Java) Nutzung von WFS in GeoARS

8.4.7 Verwendung eigener Karten

Es wird als hilfreich angesehen, durch den Nutzer selbst hergestellte georeferenzierte Rasterbilder auf einfachste nutzerfreundliche Weise in die Anwendung laden zu können. Hierfür wird ein Rasterbild (Dateiformat z.B. PNG) und eine Koordinatendatei (Dateiformat z.B. ASCII) benötigt, die der Anwender mit einem GIS seiner Wahl selbst erzeugen kann, vgl. Abbildung 8.5. Die Koordinatendatei beinhaltet die Koordinaten zweier Eckpunkte (links-unten, rechts-oben) der Karte im r-System. Für „GeoARS-Landentwicklung“ wurde diese Funktionalität realisiert.

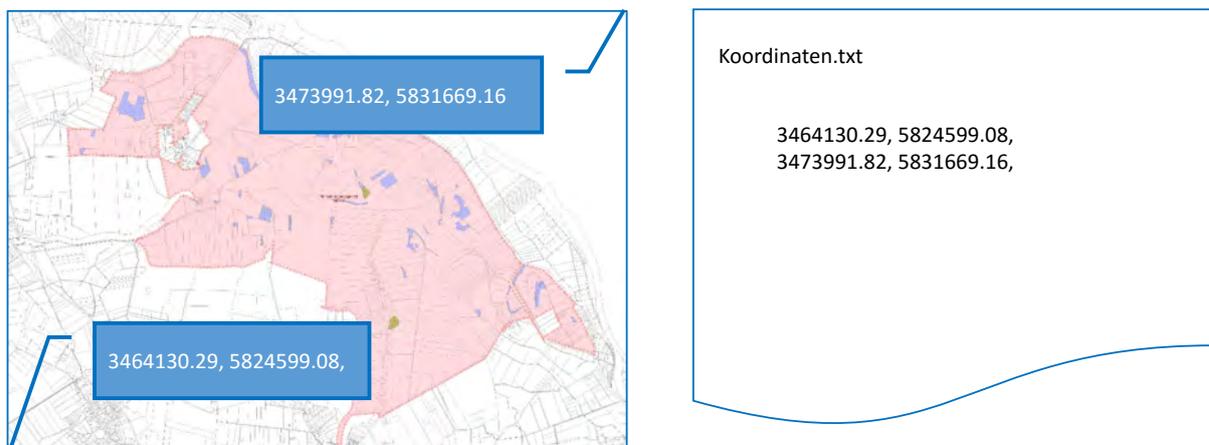


Abbildung 8.5: Einbindung individueller Karten des Nutzers in GeoARS: thematische Karte eines Flurbereinigungsverfahrens im Rasterdateiformat (links), Inhalt der Koordinatendatei zur Georeferenzierung (rechts)

9 Schlussbetrachtung und Ausblick

9.1 Schlussbetrachtung

Die Motivation dieser Arbeit lag darin, einen Beitrag zu leisten, die Augmented Reality (AR) tiefer in den (Arbeits-)Alltag zu integrieren und leichter für (Fach-)Anwendungen zugänglich zu machen sowie konzeptuelle Vorlagen zur Entwicklung zukünftiger AR-Systeme im Bereich der graphischen Geodatenverarbeitung bereitzustellen.

Hierbei wurde sich mit einer konkreten Art von AR-Systemen intensiv auseinandergesetzt. Es handelt sich um Systeme mit einem Anwendungsbereich außerhalb von Gebäuden (Außenbereich) sowie mit einem absoluten Raumbezug des AR-Systems und der verwendeten Geodaten auf der Erdoberfläche. Hierfür wurde das Akronym GeoARS (Georeferenzierende Augmented Reality System(e) für Geodaten) gewählt und ein vierkomponentiger Aufbau bestehend aus

- Darstellungskomponente
- Komponente zur Bestimmung der räumlichen Lage
- Interaktionskomponente und
- Geodatenverarbeitungskomponente

konzipiert. Die GeoARS wurden weiterführend in mobil-pedestrische und stationäre GeoARS unterteilt.

Es gibt keine wissenschaftliche Einzeldisziplin, die über das notwendige Basiswissen für die Entwicklung von GeoARS verfügt, sodass es notwendig wurde, insbesondere die wissenschaftlichen Bereiche Geodäsie, Geophysik, Photogrammetrie, Geoinformatik, Computer Vision, Elektrotechnik und Sensorik gezielt nach verwendbaren Konzepten, Modellen und Algorithmen zu untersuchen, um bereits existierendes Know-how zum Zwecke der Augmented Reality mit GeoARS zusammenzuführen, fehlende Bausteine zu entwickeln und die gesamten Zusammenhänge zu beschreiben. Um die **Eingangsfrage zu beantworten, wie sich die AR für fachliche Geodaten erschließen und im (Arbeits-)Alltag nutzen lässt**, wurde mit dieser Arbeit

- ein Systemmodell für GeoARS entworfen
- die Konzeption zur Modellierung von AR-Geoobjekten erarbeitet sowie
- Vorschläge zur Visualisierung der AR-Geoobjekte herausgearbeitet und erläutert.

Es wurde untersucht und gezeigt, wie Geodaten (Geoobjekte) – dem zentralen Darstellungsgegenstand von GeoARS – aus modernen Geodateninfrastrukturen (GDI) oder Geo-Informationssystemen (GIS) bezogen, dargestellt, interaktiv ver- sowie bearbeitet und auf diese Art in GeoARS nachhaltig weitergenutzt werden können. Im Ergebnis wurden im Rahmen der Arbeit die Modellierung, Bildung, Speicherung und berührungslose Erfassung (Aufmessung) von Geoobjekten sowie die Darstellung der Geoobjekte in exozentrischer und egozentrischer Darstellungsperspektive erarbeitet. Damit wurde die **Frage beantwortet, wie die Realität visuell um die Sicht auf virtuelle Geodaten im Rahmen der Augmented Reality erweitert werden kann und welche Formen zur Darstellung der Geoobjekte geeignet sind**.

Damit einhergehend wurde auch die **Problemstellung, wie die vielfach lediglich zweidimensional in GIS**

vorliegenden Geofachdaten in den dreidimensional operierenden GeoARS verwendet werden können, durch die Einführung einer echtzeitfähigen Dimensionserweiterung vektorieller GIS-Daten zur Verwendung in GeoARS gelöst.

Für die tatsächliche Einsetzbarkeit von GeoARS bildet die Interaktionskomponente eines GeoARS die zentrale Schnittstelle. Diesbezüglich wurden praxisrelevante Interaktionsmöglichkeiten von Anwender (Mensch) und GeoARS (Maschine) beschrieben sowie ihre Realisierungen hinsichtlich Navigation, Einstellungen, Eingaben, Selektion, Manipulation und Interoperabilität erarbeitet und erläutert.

Aufgrund des hohen Verbreitungsgrades und aus ökonomischer Sicht konzentriert sich die Arbeit auf eine spezielle Gruppe von Hardware-Komponenten. Hierbei handelt es sich um handelsübliche kostengünstigste Mobilgeräte und Module des Massenmarktes mit hohem und höchstem Verbreitungsgrad (low cost). Anhand einer Stichprobe an Endgeräten (Smartphones, Tablets) und Modulen wurde deren Eignung sowie Leistungsfähigkeit der Hardware für GeoARS untersucht.

Auf die eingangs gestellte **Frage, ob und wie die aktuell verfügbare kostengünstige Hardware für GeoARS verwendet werden kann**, wird im Ergebnis festgestellt, dass sich

- die handelsübliche kostengünstige Hardware grundsätzlich für AR-Zwecke eignet,
- das Systemmodell und die erarbeitete Konzeption für GeoARS darauf einsetzbar sind und
- keine softwarespezifischen Restriktionen erkannt werden können.

Im Ergebnis der Arbeit wird festgestellt, dass die Gerätehardware bedeutend – jedoch nicht allein – über die praktische Einsatzfähigkeit eines GeoARS entscheidet. Aus diesem Grund werden die diesbezüglichen Arbeitsergebnisse ausführlicher erläutert und die **Eingangsfrage beantwortet, wie genau Geoobjekte dargestellt werden und welche Einschränkungen erkannt wurden**. Zunächst ist offensichtlich, dass sich der Begriff „Genauigkeit“ aus der spezifischen Anforderung der jeweiligen konkreten Fachanwendung definiert und nicht pauschal in genau und ungenau eingeteilt werden kann. Weiterhin geht aus den Kapiteln der vorliegenden Arbeit hervor, dass nicht nur die Gerätehardware (insbesondere die Komponente zur Bestimmung der räumlichen Lage und die Darstellungskomponente), sondern auch die Datengrundlagen, die verwendeten Algorithmen zur Transformation von Geodaten und räumlicher Systemlage in ein gemeinsames Koordinatensystem, die variablen Umgebungsfaktoren und die Konfiguration und Kalibrierung der Systemkomponenten gemeinsam an der Bildung der Systemgenauigkeit beteiligt sind. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser komplexen Verflechtung werden nachstehend punktuell aufgeführt.

Für die in GeoARS verwendete Darstellungskomponente zur Visualisierung der Geodaten wurde das video see-through Verfahren mittels Displays gewählt und festgestellt, dass hinsichtlich der geometrischen Darstellungsgenauigkeit von Geoobjekten die verwendeten Displays für praktische Zwecke eine Auflösung von $59 \mu\text{m}$ pro Pixel nicht unterschreiten sollten, um ein genügend hoch auflösendes Abbild der realen Welt darstellen zu können.

Die Kamerakomponente eines GeoARS mit dem dazugehörigen Bildsensor liefert zunächst geometrisch verzerrte Abbilder der realen Welt, die für eine erfolgreiche 3D-Registrierung korrigiert werden müssen. Das vorgeschlagene Korrekturverfahren verhindert Überlagerungsfehler von teilweise mehreren Metern in Abhängigkeit des Abstandes von GeoARS und Realobjekt sowie in Abhängigkeit des Abstandes des Objektbildes zum Bildhauptpunkt.

Darüber hinaus sind für eine passgerechte Überlagerung von virtuellen Daten mit dem Abbild der realen Welt die geometrischen Zusammenhänge zwischen Bildsensor, Displayfläche und zur Verfügung stehender Darstellungsfläche auf dem Display zu beachten, da unterschiedliche Seitenverhältnisse und Maßstäbe zur Darstellung der Geoobjekte anderenfalls die 3D-Registrierung konterkarieren. Die detaillierte algorithmische Lösung hierzu wird im Kapitel zur Darstellungskomponente beschrieben.

Die ursprünglich zu klärende **Frage, wie genau die Mikrosensoren handelsüblicher mobiler Endgeräte und Einzelkomponenten sind und welche Einschränkungen bestehen**, mündet in einer Einschätzung zur Genauigkeit der Position und Orientierung eines GeoARS, zu der jeder Mikrosensor, wie in den Sensorkapiteln detailliert dargelegt, mit seinen physikalischen Messgrößen seinen individuellen Beitrag leistet. Zur Genauigkeit der Bestimmung der räumlichen Systemlage wird die Aussage getroffen, dass die geometrischen Genauigkeiten für mobil-pedestrische GeoARS für den Nick- und Rollwinkel bei ungefähr 0.2° liegen und maßgeblich von der Genauigkeit des verwendeten Beschleunigungssensors abhängen. Der Gierwinkel kann mit einer Genauigkeit von etwa 0.4° angenommen werden, hängt jedoch von dem eingesetzten Magnetfeldsensor, dem verwendeten Beschleunigungssensor und vom aktuellen Zustand des Erdmagnetfeldes zum Zeitpunkt des AR-Einsatzes ab. Auch für stationäre GeoARS gelten diese Aussagen, sofern sie Sensoren zur Bestimmung der räumlichen Lage nutzen. Werden Schrittmotoren eingesetzt, so lässt sich die Winkelgenauigkeit in Abhängigkeit der Motorik steigern. Für das realisierte Referenzsystem „GeoARS-Unfallaufnahme“ beträgt sie ca. 0.005° .

Die Navigation von mobil-pedestrischen GeoARS kann im Bereich weniger Meter über die globalen Satellitenpositionierungsdienste mit Navigationsempfängern oder inertielle Messeinheiten mit Drehraten- und Beschleunigungssensoren erfolgen. Für höhere Genauigkeiten, z.B. im Zentimeterbereich, können gekoppelte GeoARS mit geodätischen Satellitenempfängern eingesetzt werden. Hierfür muss jedoch der low-cost-Ansatz für die Positionierungskomponente aufgegeben werden. Für Stationierungen auf einem bekannten Standpunkt oder Stationierung über Anschlusspunkte ist eine AR-Anwendung im Zentimeterbereich realisierbar.

Durch technischen Fortschritt wird erwartet, dass die zuvor beschriebenen Genauigkeiten für GeoARS unter Beibehaltung der erarbeiteten Konzepte weiter gesteigert werden können. Darüber hinaus wird die Realisierung der erarbeiteten Echtzeit-Konzepte (z.B. Datenanschluss an Magnetfeldreferenzstationen) im Bedarfsfall zu weiteren Genauigkeitssteigerungen beitragen.

Mobile Endgeräte führen viele Prozesse und teilweise mehrere Anwendungen gleichzeitig aus und sind für ein breites Applikationsspektrum geschaffen worden. Anwendungen der Augmented Reality reihen sich hier neben anderen Anwendungen (systemimmanent/nutzerspezifisch) auf Mobilgeräten ein, fordern jedoch die gesamte Hardware vollumfänglich und gleichzeitig – darunter Hauptprozessoren, Grafikprozessoren, Display, Drehratensensor, Beschleunigungssensor, Magnetfeldsensor und GNSS-Modul. Sie bringen durch diese Fülle an Parallelnutzungen die aktuelle Alltagshardware an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit, sind jedoch trotzdem in Echtzeit lauffähig.

Es bleibt resümierend zu betonen, dass im Rahmen der Arbeit keine konzeptionellen oder softwarespezifischen Restriktionen für den praktischen Einsatz erkannt wurden. Den Einflüssen der variablen Umweltfaktoren kann mit den vorgeschlagenen Lösungen begegnet werden, jedoch bestehen für einzelne GeoARS-Realisierungen die vorstehenden hardwarespezifischen Einschränkungen.

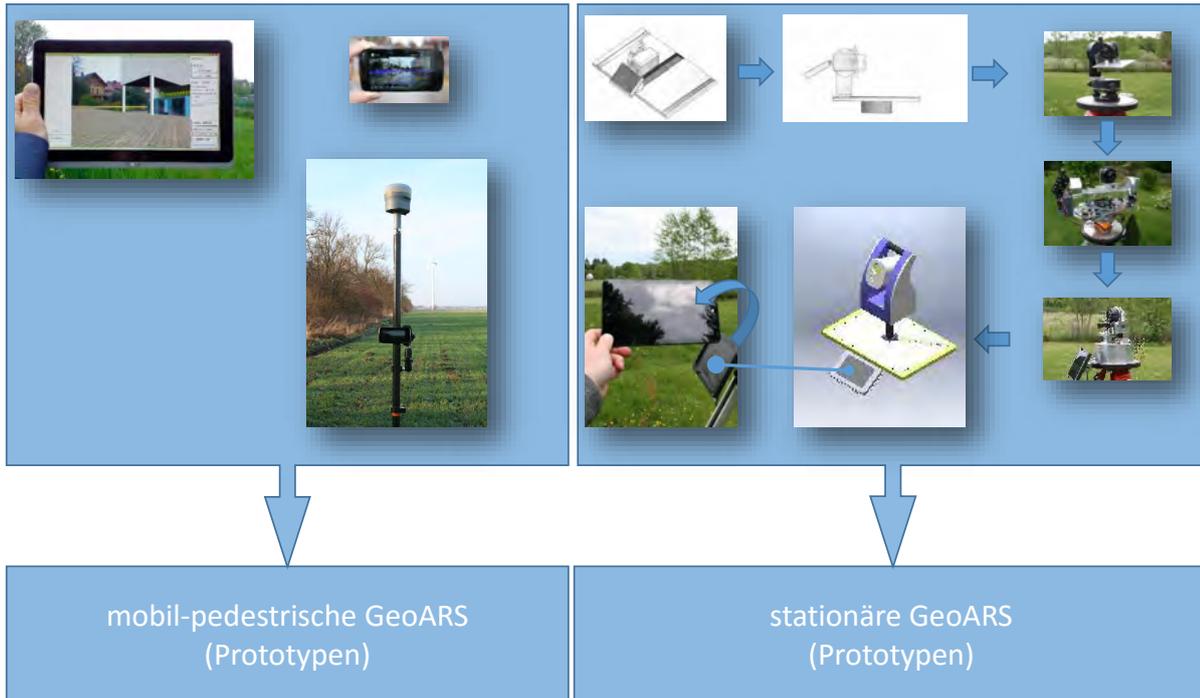


Abbildung 9.1: Prototypentwicklung von mobil-pedestrischen und stationären GeoARS

Die Überprüfung der entwickelten Lösungen erfolgte stets anhand zweier Referenzbeispiele

- „GeoARS-Landentwicklung“ und „GeoARS-Unfallaufnahme“

in Form mehrerer Prototypen (vgl. Abbildung 9.1) auf

- unterschiedlichen Plattformen, Betriebssystemen und Programmiersprachen.

Durch diese Heterogenität von Hard- und Software konnte die universelle Übertragbarkeit der Konzepte und Lösungen gezeigt und mit der vorliegende Arbeit gleichsam ein Beitrag geleistet werden, ein berufsnahes Anwendungsfeld für die aufstrebende Augmented Reality Technologie zu erschließen, vgl. [DVW 2014].

9.2 Ausblick

Die fortschreitende Technisierung unserer Gesellschaft lässt weitere Fortschritte in der Sensortechnologie und der allgemeinen Gerätehardware erwarten. Durch die kontinuierliche Übertragbarkeit der erarbeiteten Konzepte und Lösungen auf zukünftige Hardware ist eine stetig steigende Genauigkeit im gesamten 3D-Registrierungsprozess wahrscheinlich. Auch die avisierte zukünftige Realisierung von Echtzeitverfahren für Magnetfeldanwendungen wird sich positiv und genauigkeitssteigernd auf GeoARS auswirken. Hierbei sind eine Datennetzverbindung und die volle Erschlossenheit der ländlichen Räume mit mobilem Datenfunk Grundvoraussetzungen, die durch den fortschreitenden Netzausbau zukünftig als realisierbar erscheinen.

Eine Ergänzung von GeoARS um weitere Sensoren (z.B. Infrarot) oder weitere Komponenten (z.B. Stereokamerasystem) ist nicht ausgeschlossen und kann durch eine Erweiterung des GeoARS-Systemmodells realisiert

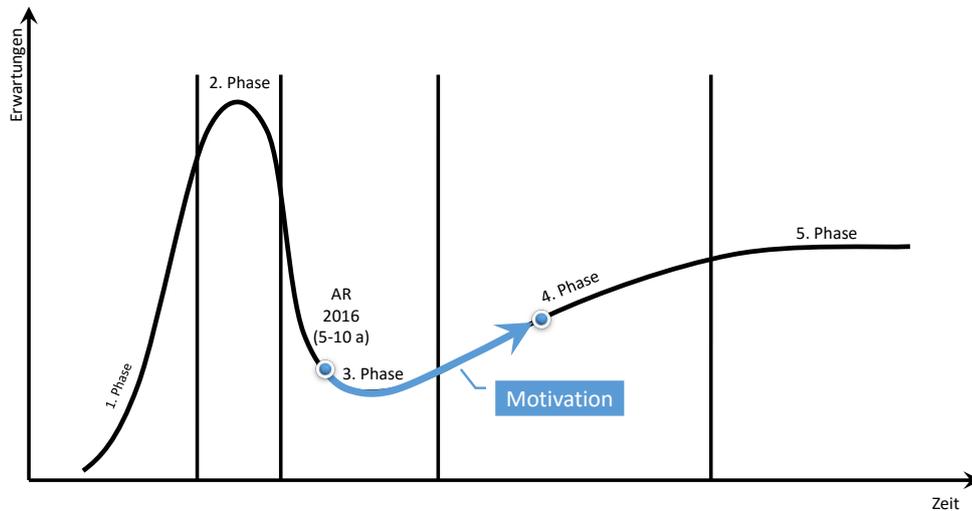


Abbildung 9.2: Ausblick: avisiertes Fortschritt der Augmented Reality im Hype Cycle, vgl. Abbildung 2.1

werden. Diese Systemfortschreibung bietet sich dann an, wenn diese Sensoren und Komponenten interner Standardbestandteil der zukünftigen auf dem Massenmarkt erhältlichen mobilen Endgeräte werden.

Des Weiteren ist eine Systemergänzung um Komponenten der Diminished Reality denkbar, um zusätzliche Anwendungsfelder, zu erschließen. Hierbei wird das Abbild der realen Welt hinsichtlich seines Informationsgehaltes verändert (vermindert). Derartige Systemergänzungen würden insbesondere die Darstellungskomponente eines GeoARS betreffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Sprach- und Gestensteuerung in GeoARS als nachrangig eingestuft und daher nicht betrachtet, sodass sich an dieser Stelle ein Systemausbau anbietet. Die bedarfsgerechte Systemerweiterung ist hier jedoch im Vorfeld hinsichtlich Aufwand und Nutzen zu prüfen. Etwaige Erweiterungen würden insbesondere die Interaktionskomponente eines GeoARS tangieren.

Als naheliegend wird zukünftig eine Verschmelzung von GeoARS und mobilen GIS oder eine Erweiterung von mobilen GIS um eine GeoARS-Komponente eingeschätzt, da so die virtuellen kleinmaßstäbigen Ansichten der mobilen GIS mit den großmaßstäbigen augmentierten Ansichten und Navigationsmöglichkeiten der GeoARS kombiniert werden können und neue Darstellungs- sowie Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Computer für die alltäglichen Aufgaben im Außenbereich der realen Welt möglich werden.

Die nahe Zukunft wird zunächst von einer intensiven anwenderbezogenen praxisnahen Weiterentwicklung von GeoARS geprägt sein. Projiziert auf den Hype Cycle aus Kapitel 2 wird weiterführend eingeschätzt, dass die im Rahmen dieser Arbeit gefundenen Erkenntnisse helfen werden, die AR durch die aktuelle Phase der Desillusion zu befördern und die Zyklusphase der Lösung bestehender Schwierigkeiten hin zur produktiven Einsetzbarkeit von AR begleitend zu unterstützen, vgl. Abbildung 9.2.

Anhang

A Ausgewählte Messgrößen und Statistik

A.1 Messwerte und Genauigkeit

In der vorliegenden Arbeit werden Ähnlichkeitsmaße in der digitalen Bildverarbeitung im Rahmen der Grauwertkorrelation berechnet, Sensormesswerte statistisch ausgewertet und Lösungen für die (ggf. überbestimmte) räumliche Lage eines GeoARS benötigt. Bei allen Aufgaben werden statistische Rechenmethoden eingesetzt. Das hier gegenständliche Kapitel wurde für notwendig erachtet, um die verwendeten Fachtermini und den Ursprung der eingesetzten Rechenmethoden für GeoARS im interdisziplinären und internationalen Umfeld der Augmented Reality klarzustellen.

Die für GeoARS benötigten statistischen Methoden entstammen den Auswertemethoden der Parameterschätzung (gleichbedeutend mit dem Begriff der Ausgleichsrechnung) nach der Methode der kleinsten Quadrate, zu der ein breites Angebot an fundierter Fachliteratur existiert. Die in den nachfolgenden Unterkapiteln beschriebenen Auswertemethoden entstammen aus Niemeier [2008], Becker u. Hehl [2012], Heck [2003], Teunissen [2009] und Luhmann [2010b].

Auswertemethoden der Parameterschätzung haben die Aufgabe aus einer Anzahl n mehrfach gemessener bzw. beobachteter Größen eine bestimmte Anzahl unbekannter Parameter u zu bestimmen, wobei die Begriffe Messwerte und Beobachtungen in dieser Arbeit synonym verwendet werden. Bei der Parameterschätzung wird davon ausgegangen, dass die unbekannt Parameter zum einen in funktionalem Zusammenhang mit den Messungen (Beobachtungen) stehen und zum anderen, dass mehr Beobachtungen vorliegen, als zur Bestimmung der unbekannt Parameter notwendig sind (Überbestimmungen). Die Methodik der Parameterschätzung sieht vor, dass aufgrund der Überbestimmung und damit Nichteindeutigkeit der Lösung eine Schätzung der Parameter vorgenommen und in Form von funktionalen und stochastischen Modellen realisiert wird. Abbildung A.1 illustriert die diesbezüglichen fundamentalen Zusammenhänge. [Heck 2003] schreibt diesbezüglich: „Eine allgemein akzeptierte Arbeitsgrundlage für die Auswertung geodätischer Beobachtungen ist die Hypothese, dass die zugehörigen Observablen *Gaußsche Normalverteilungen* besitzen.“ Hierauf bauen die Untersuchungen dieser Arbeit auf und folgen, soweit für die Zwecke der Augmented Reality notwendig, auch diesem Modellansatz. „In der Regel setzt man innerhalb der geodätischen Modellbildung voraus, dass die Gesetze der *Euklidischen Geometrie* im dreidimensionalen Raum sowie der *Newtonschen Mechanik* gelten.“, vgl. [Heck 2003]

A.1.1 Funktionales Modell

Die Modellierungen und Rechenmethoden der Parameterschätzung verwenden regelmäßig die Notationen und Rechenmethoden der linearen Algebra, sodass Vektoren und Matrizen verstärkt eingesetzt werden. Dem folgend lassen sich die einzelnen Beobachtungen l_i , z.B. die Sensormesswerte des Gyroskopes in Ruhelage, in einem Beobachtungsvektor \mathbf{l} zusammenfassen. In der Praxis sind in der Regel Größen Gegenstand von Messungen, deren wahrer Wert nicht bekannt ist. Die Zusammenhänge zwischen den wahren Werten der Unbekannten \mathbf{X} und den wahren Werten der Beobachtungen \mathbf{L} werden im funktionalen Modell beschrieben.

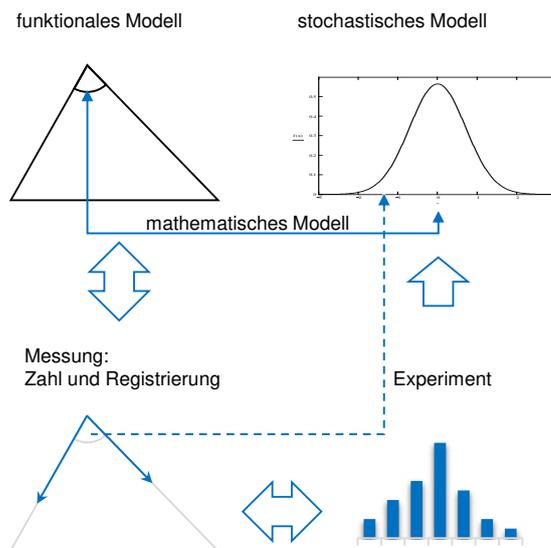


Abbildung A.1: Zusammenhänge des funktionalen und stochastischen Modells nach [Teunissen 2009]

Entweder \mathbf{X} oder \mathbf{L} oder beides liegt in der Praxis von GeoARS regelmäßig nicht vor. Man behilft sich diesbezüglich, in dem die wahren Werte der Beobachtungen \mathbf{L} durch reale Beobachtungen l_i mit kleinen Verbesserungen v_i substituiert werden bzw. in Vektorschreibweise \mathbf{l} und \mathbf{v} .

Den wahren Wert der Unbekannten \mathbf{X} ersetzt man durch einen geschätzten Wert der Unbekannten \mathbf{x} . Nicht immer besteht zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten ein linearer Zusammenhang, sodass sich das funktionale Modell zunächst in der auch für nichtlineare Zusammenhänge gültigen Form ergibt:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{f}(\mathbf{x}). \tag{A.1}$$

Wie in Becker u. Hehl [2012], Heck [2003] und Luhmann [2010b] beschrieben, kann die Funktion \mathbf{f} durch eine Taylor-Entwicklung linearisiert werden. Bekannt als Gauß-Markov-Modell ergibt sich das allgemeine funktionale Modell zu:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}. \tag{A.2}$$

Hierbei enthält die Matrix \mathbf{A} die (mit Näherungswerten für \mathbf{x} berechneten) Differenzialquotienten, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den Parametern beschreiben.

A.1.2 Stochastisches Modell

Standardabweichung und Mittelwert

Die *Standardabweichung* σ_i sowie ihr Quadrat, die *Varianz* σ_i^2 , sind ein Maß für die Genauigkeit der Beobachtungen oder der geschätzten Unbekannten. Sie sind auch ein Qualitätsmaß und spielen für die Bewertung von Messreihen dieser Arbeit eine zentrale Rolle.

Neben der Standardabweichung können zur Analyse der Qualität von Ausgleichs- oder Schätzungsergebnissen auch Abhängigkeiten zwischen den ausgeglichenen Unbekannten eruiert werden. Die Korrelationen

geben Aufschluss über die Bestimmbarkeit der Unbekannten. Darüber hinaus lassen sich auch Aussagen zur Qualität des funktionalen Modells und zur Güte der geometrischen Anordnung der Beobachtungen treffen.

Man kann die stochastischen Eigenschaften der gemessenen Beobachtungen l_i in einer symmetrischen Matrix, der Varianz-Kovarianz-Matrix \mathbf{C} beschreiben. Sie beinhaltet die Genauigkeitsinformationen des funktionalen Modells [Luhmann 2010b].

Die oben eingeführten Varianzen σ_i^2 werden dazu in die Hauptdiagonale von \mathbf{C} eingetragen. Die Standardabweichung σ_i einer Größe und die Standardabweichung σ_j einer anderen Größe hängen als Kovarianz σ_{ij} zusammen. Hierbei bildet der Korrelationskoeffizient ρ_{ij} das Maß der Abhängigkeit der beiden Größen. Ist der Koeffizient Null, so besteht keine Abhängigkeit zwischen den beiden Größen. Ist der Betrag von ρ_{ij} eins, so besteht funktionale Abhängigkeit zwischen den Größen. Eine Kovarianz wird mathematisch wie folgt beschrieben:

$$\sigma_{ij} = \rho_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j. \quad (\text{A.3})$$

$\rho_{ij} = 0.0 \rightarrow$ funktionale Unabhängigkeit

$|\rho_{ij}| = 1.0 \rightarrow$ funktionale Abhängigkeit

Damit ergibt sich die symmetrische Varianz-Kovarianz-Matrix \mathbf{C} zu:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1n} & \sigma_{2n} & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

bzw.

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \dots & \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \dots & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1n}\sigma_1\sigma_n & \rho_{2n}\sigma_2\sigma_n & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

σ_i : Standardabweichung der Beobachtung l_i mit $i = 1 \dots n$

σ_{ij} : Korrelationskoeffizient zwischen l_i und l_j wobei $i \neq j$

Für die weitere Betrachtung, u.a. hinsichtlich der Untersuchung von Sensormesswerten, ist die Einführung zwei weiterer Matrizen, der Kofaktormatrix \mathbf{Q} und der Gewichtsmatrix \mathbf{P} sowie einer Multiplikationskonstanten σ_0 (auch Proportionalitätskonstante oder mittlerer Gewichtseinheitsfehler (veraltete Bezeichnung)) erforderlich, vgl. Gleichung A.21.

Die Einführung von Gewichten ist notwendig, wenn Beobachtungen unterschiedlicher Genauigkeit mit einander kombiniert werden. Gewichte und Standardabweichungen stehen in folgendem Zusammenhang:

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}. \quad (\text{A.6})$$

Kofaktoren q_i ergeben sich aus den Reziproken der Gewichte mit:

$$q_i = \frac{1}{p_i}. \quad (\text{A.7})$$

Kofaktoren werden u.a. auch in Gleichung (A.26) für die Berechnung der Standardabweichung des arithmetischen Mittels herangezogen.

Löst man die Gleichung (A.6) nach σ_i^2 auf ergibt sich

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma_0^2}{p_i} \quad (\text{A.8})$$

bzw. mit Gleichung (A.7) für die Standardabweichung einer Beobachtung

$$\sigma_i = \frac{\sigma_0}{\sqrt{p_i}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{\frac{1}{q_i}}} = \sigma_0 \cdot \sqrt{q_i}. \quad (\text{A.9})$$

Dieser Zusammenhang wird ebenfalls später, u.a. auch in Gleichung (A.26), für die Berechnung der Standardabweichung des arithmetischen Mittels benötigt.

Über den Zusammenhang $\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1}$ oder $\mathbf{Q} = \frac{1}{\sigma_0^2} \mathbf{C}$ ergibt sich die Kofaktormatrix \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{12} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{1n} & q_{2n} & \cdots & q_{nn} \end{pmatrix}. \quad (\text{A.10})$$

Dem Gauß-Markov-Modell liegt der Gedanke der Minimumsbedingung zugrunde:

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v} \rightarrow \min! \quad (\text{A.11})$$

Hierbei ist impliziert, dass die zu schätzende Größe mit einer maximalen Wahrscheinlichkeit bestimmt wird, eine sehr große Anzahl an Messwerten vorliegt und die Messwerte einer Normalverteilung gehorchen.

Die Lösung und Berechnung der gesuchten Größe \mathbf{x} wird der obigen Literatur folgend über

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad (\text{A.12})$$

berechnet.

Nimmt man an, dass sehr viele Messwerte vorliegen, also die Stichprobe sehr groß ist, die Beobachtungen

unkorreliert sind, wird \mathbf{P} zur Diagonalmatrix:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & p_n \end{pmatrix}. \quad (\text{A.13})$$

Werden die Beobachtungen gleich genau gemessen:

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} = 1 \quad (\text{A.14})$$

wird \mathbf{P} zur Einheitsmatrix:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{E} \quad (\text{A.15})$$

dann vereinfacht sich das funktionale Modell mit $\mathbf{P} = \mathbf{E}$ zu

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{l}. \quad (\text{A.16})$$

Als einfache Anwendung lässt sich z.B. das arithmetische Mittel \bar{x} mit

$$\mathbf{A}_m = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \end{pmatrix} \text{ und } \mathbf{l} = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (\text{A.17})$$

$$\bar{x} = (\mathbf{A}_m^T \mathbf{A}_m)^{-1} \cdot \mathbf{A}_m^T \mathbf{l} \quad (\text{A.18})$$

bestimmen. In der Literatur ist hier auch folgende Notation gebräuchlich:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i, \quad (\text{A.19})$$

vgl. [Bronstein u. a. 2015].

Mit dem ermittelten \mathbf{x} können die Verbesserungen \mathbf{v} nach

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (\text{A.20})$$

berechnet werden.

Ein Ziel der Parameterschätzung war, wie zuvor gezeigt, die Bestimmung der geschätzten Unbekannten \mathbf{x} . Ein weiteres Ziel ist die nachfolgende Bestimmung der Genauigkeitsmaße oder Größenordnung der Messfehler. Genauigkeitsmaße können aus den Verbesserungen \mathbf{v} als Standardabweichung der Gewichtseinheit nach der Parameterschätzung σ_0 (auch Standardabweichung a posteriori) abgeleitet werden:

$$\sigma_0 = \pm \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u}} \quad (\text{A.21})$$

- u : Anzahl der Unbekannten
- n : Anzahl der Beobachtungen

und im Falle von nur einer Messgröße und gleichgenauen nicht korrelierten Beobachtungen mit $\mathbf{P} = \mathbf{E}$ zu

$$\sigma_0 = \pm \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n - 1}} \quad (\text{A.22})$$

bzw. als Varianz

$$\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n - 1} \quad (\text{A.23})$$

berechnet werden.

Man spricht in der Literatur bei vorliegendem Mittelwert von empirischer Varianz s_0^2 :

$$s_0^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n v_i^2 \quad (\text{A.24})$$

bzw. empirischer Standardabweichung s_0 (früher: mittleren Fehler):

$$s_0 = +\sqrt{s_0^2}. \quad (\text{A.25})$$

Unter Zuhilfenahme des Kofaktors $q = \frac{1}{n}$, vgl. Gleichung (A.7), berechnet sich die Standardabweichung des arithmetischen Mittels σ_x mit der Standardabweichung a posteriori σ_0 aus Gleichung (A.22) zu $\sigma_x = \sigma_0 \cdot \sqrt{q}$ und ausführlich

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n - 1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n}} = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n \cdot (n - 1)}} \quad (\text{A.26})$$

oder

$$\sigma_x = \sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{n}} = \sigma_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}. \quad (\text{A.27})$$

Unempfindlicher gegenüber Ausreißern und damit als robuster anzusehender Wert ist der in der Mitte liegende Wert einer aufsteigend sortierten Beobachtungsreihe, der *Median* m :

$$l_1 < l_2 < l_3 < \dots < m < \dots < l_{n-3} < l_{n-2} < l_{n-1} < l_n \quad (\text{A.28})$$

Median und Mittelwert (arithmetisches Mittel) können daher vergleichend gegenübergestellt werden, um eine Beobachtungsreihe zu bewerten. Liegen beide Werte weit auseinander, kann dies als Indiz auf Unstimmigkeiten und Ausreißer gewertet werden. In dieser Arbeit ist dies in Bezug auf die Untersuchung der Sensoren und ihrer Messwerte von Relevanz.

Ausreißer

Unter Ausreißer werden hier grob aus der Beobachtungsreihe abweichende Messwerte verstanden. Für einige Testreihen dieser Arbeit wurden arithmetische Mittelwerte berechnet und die einzelnen Messwerte (oft viele Hunderttausend, beispielhafter Auszug vgl. Tabelle A.1 statistisch analysiert. Eine Beobachtung wird hier, Niemeier [2008] folgend, als falsch angesehen, wenn die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer extrem vom Mittelwert abweichenden Messung sehr gering ist. Für die durchgeführten Testreihen werden Beobachtungen als falsch bzw. überprüfenswert klassifiziert, wenn die Messwerte mehr als die zweifache (f2-Ausreißer) oder dreifache (f3-Ausreißer) Standardabweichung s_0 annehmen.

$$2 \cdot s_0 > x - l_i \vee 3 \cdot s_0 > x - l_i \quad (\text{A.29})$$

Häufigkeitsdiagramme

Um die hohe Anzahl an Messwerten übersichtlich darstellen und interpretieren zu können, wurden zu allen Testreihen bedarfsorientiert Histogramme erzeugt, vgl. Abbildung A.2. Bei derart umfangreichen Stichproben wurde es als angebracht erachtet, den Wertebereich der Zufallsvariablen in Bereiche einzuteilen. Für die Messwerte wurden hierzu Klassen gebildet und jeder einzelne Messwert einer Klasse zugeordnet. Die Bildung einer überschaubaren Klassenanzahl wurde in Abhängigkeit der Auflösung des jeweiligen Sensors durch Rundung der Messwerte auf eine spezifische Stelle nach dem Komma vorgenommen.

Tabelle A.1: Beispiel: Messwerte l_i eines Beschleunigungssensors, Auszug einer Beobachtungsreihe

x [m/s^2]	y [m/s^2]	z [m/s^2]
⋮	⋮	⋮
-0.1887054443359375	-0.1502227783203125	9.435150146484375
-0.1803741455078125	-0.1621246337890625	9.444671630859375
-0.1958465576171875	-0.1680755615234375	9.442291259765625
-0.1887054443359375	-0.1811676025390625	9.447052001953125
-0.1887054443359375	-0.1585540771484375	9.444671630859375
-0.1815643310546875	-0.1621246337890625	9.458953857421875
-0.1863250732421875	-0.1514129638671875	9.454193115234375
-0.1851348876953125	-0.1561737060546875	9.449432373046875
⋮	⋮	⋮

Mit den Bedingungen $0 \leq z_k \leq n$ und $\sum_{k=1}^l z_k = n$ lässt sich die, in jeder Klasse k , enthaltene Anzahl an Messwerten z_k als absolute Häufigkeit berechnen. Durch Division durch n ergeben sich die in den Histogrammen dieser Arbeit verwendeten, relativen Häufigkeiten $r_k = \frac{z_k}{n}$ im Bereich von $0 \leq r_k \leq 1$ und der Summe der relativen Häufigkeiten der Messreihe von eins $\sum_{k=1}^l r_k = 1$. Weiterführende Aussagen sind in Niemeier [2008], Luhmann [2010b] und Heck [2003] dokumentiert.

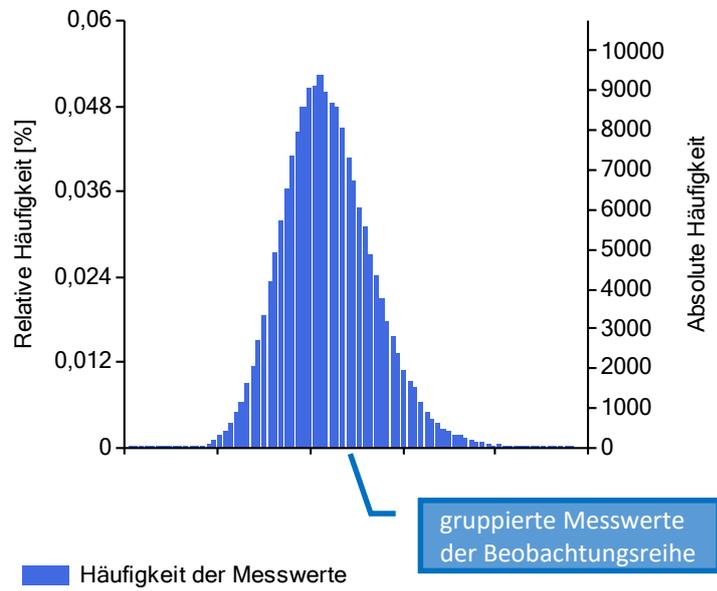


Abbildung A.2: Beispiel eines Histogramms der Messwerte eines Beschleunigungssensors

B Ausgewählte Untersuchungen der Sensorik

Die in den verschiedenen Kapiteln dieser Arbeit angeführten Untersuchungen zur Sensorik werden nachfolgend ausführlicher beschrieben.

B.1 Ausgewählte Untersuchungen Drehratensensor

B.1.1 Drehratensensor: Normalnutzung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung

Ziel der Untersuchung

Es ist beabsichtigt auftretende Winkelgeschwindigkeiten bei Normalnutzung von mobil-pedestrischen GeoARS zu ermitteln.

Versuchsbeschreibung

In einem Zeitraum von etwa einer Minute wird unter Nutzung eines mobil-pedestrischen GeoARS eine etwa 40 m lange Teststrecke mit visueller Erkundung der Umgebung abgelaufen und dabei die Winkelgeschwindigkeiten aufgezeichnet. Dabei erfolgt nicht immer eine visuelle Rückkopplung mit dem AR-System, da sich der Nutzer auch auf den teilweise unebenen Untergrund im Gelände konzentrieren muss.

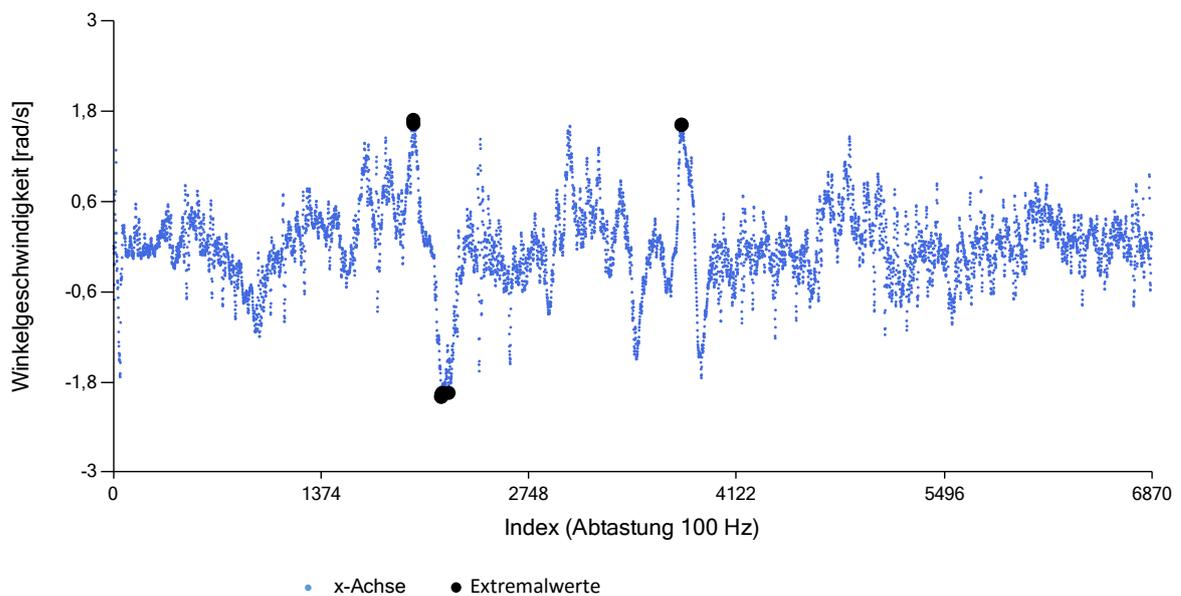


Abbildung B.1: Drehratensensor (MPU-6500): x-Achse; ca. 1 min.; Einsatz eines mobil-pedestrischen GeoARS unter realen Bedingungen

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.1:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+1.68 \text{ rad/s}$ und -2.0 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.54 \text{ rad/s}$.

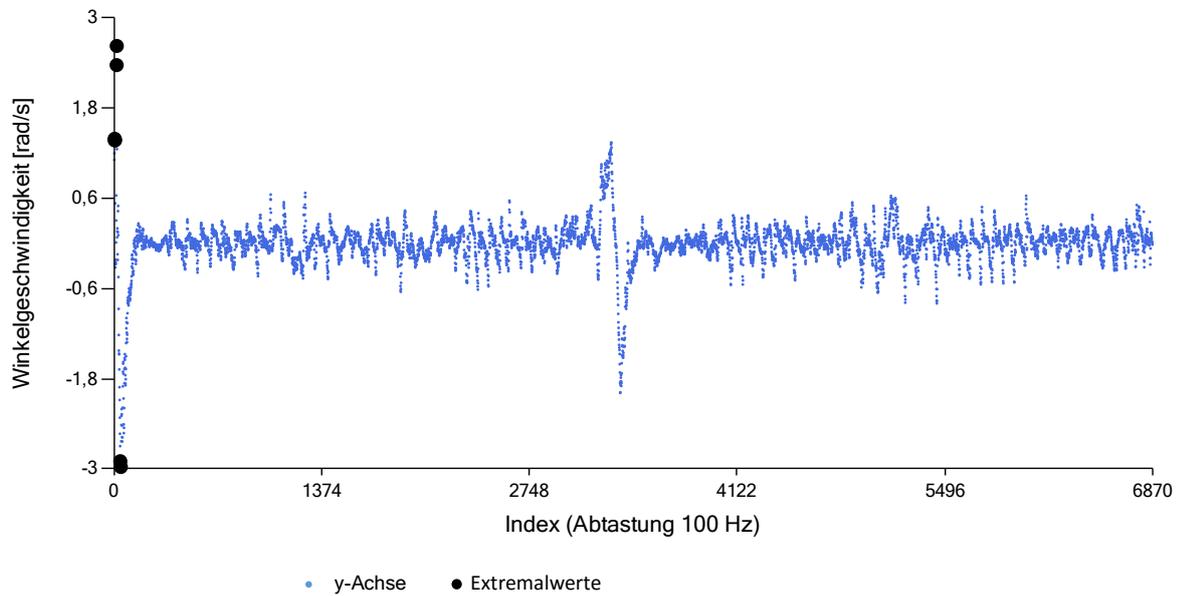


Abbildung B.2: Drehratensensor (MPU-6500): y -Achse; ca. 1 min.; Einsatz eines mobil-pedestrischen GeoARS unter realen Bedingungen

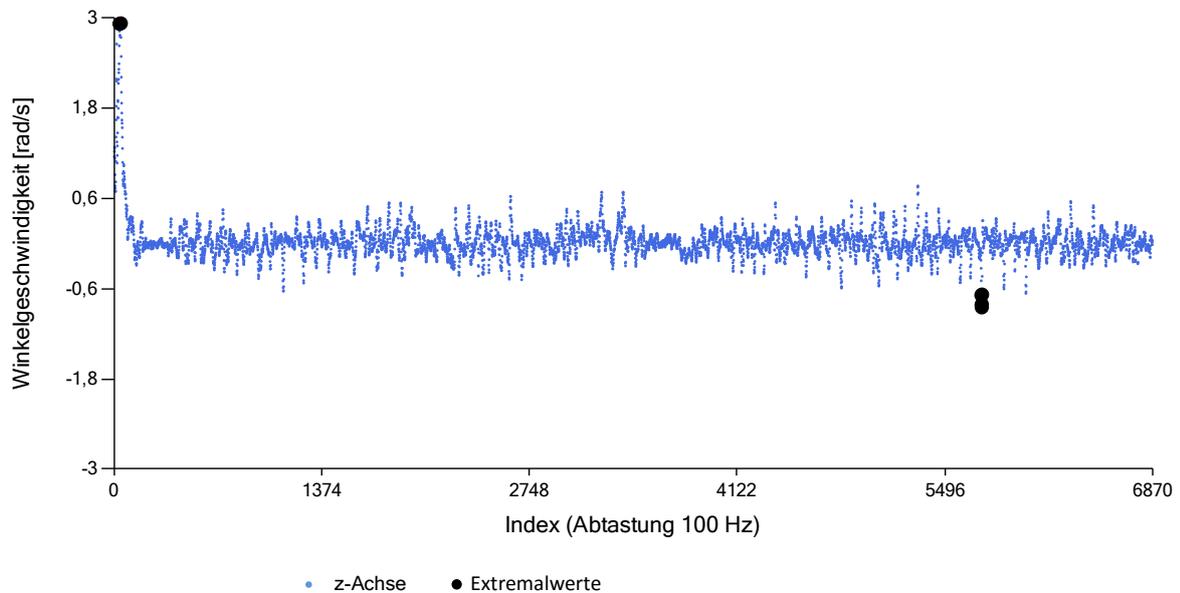


Abbildung B.3: Drehratensensor (MPU-6500): z -Achse; ca. 1 min.; Einsatz eines mobil-pedestrischen GeoARS unter realen Bedingungen

y-Achse, vgl. Abbildung B.2:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+2.62 \text{ rad/s}$ und -3.01 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.31 \text{ rad/s}$.

z-Achse, vgl. Abbildung B.3:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+3.15 \text{ rad/s}$ und -0.85 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.25 \text{ rad/s}$.

Ergebnisbeschreibung

Die Abbildungen zeigen die Winkelgeschwindigkeiten, die bei einer Normalnutzung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung eines mobil-pedestrischen GeoARS auftreten. Der Ausschlag am Anfang aller drei Diagramme zeigt das Einschalten des Systems und bildet die maximalen Absolutbeträge der Messreihe. Das Diagramm der Abbildung B.1 bildet deutlich die Gier-Bewegung des Benutzers während der Exploration ab. In Abbildung B.2 ist eine markante Nick-Bewegung des AR-Systems, zuerst durch eine Ankipfung nach oben und anschließend nach unten, ersichtlich. Es ist auch erkennbar, dass keine signifikanten Roll-Rotationen während eines normalen AR-Erkundungsvorganges auftreten, vgl. Abbildung B.3. Die Schwenkbewegungen weisen Winkelgeschwindigkeiten von maximal $\approx \pm 3.15 \text{ rad/s}$ mit einer Standardabweichung der Beobachtung von maximal $\approx \pm 0.5 \text{ rad/s}$ auf. Bleiben die Messwerte des Einschaltvorganges unberücksichtigt, so reduzieren sich die Maxima auf $\approx \pm 2.0 \text{ rad/s}$ für diese Nutzungsweise.

B.1.2 Drehratensensor: Alternierende Normalnutzungs- und Nichtnutzungsphase

Ziel der Untersuchung

Es ist beabsichtigt auftretende Winkelgeschwindigkeiten bei einer von der Normalnutzung (eines mobil-pedestrischen GeoARS) abweichenden Bewegung des Benutzers zu ermitteln.

Versuchsbeschreibung

Bei dem Versuch soll die typische Bewegung des Benutzers aufgezeichnet werden, die er ausführt, wenn er das mobil-pedestrische GeoARS von einer Nutzungs- in eine konkrete temporäre Nichtnutzungsphase überführt. Die Nutzungshaltung zeichnet sich dadurch aus, dass das AR-System mit einer Hand führend im Leseabstand vor das Gesichtsfeld gehalten wird. Die Haltung der Nichtnutzungsphase ist durch eine für den Nutzer entspannte Haltung gekennzeichnet. Hierbei zeigt der Arm senkrecht nach unten, wobei sich das System noch in der Hand des Nutzers befindet. Im Versuch wird das System drei mal hintereinander von einer Nutzungs- in die Nichtnutzungsphase überführt.

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.4:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+2.81 \text{ rad/s}$ und -4.01 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.82 \text{ rad/s}$.

y-Achse, vgl. Abbildung B.5:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+6.75 \text{ rad/s}$ und -7.32 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 1.75 \text{ rad/s}$.

z-Achse, vgl. Abbildung B.6:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+5.89 \text{ rad/s}$ und -8.80 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 1.67 \text{ rad/s}$.

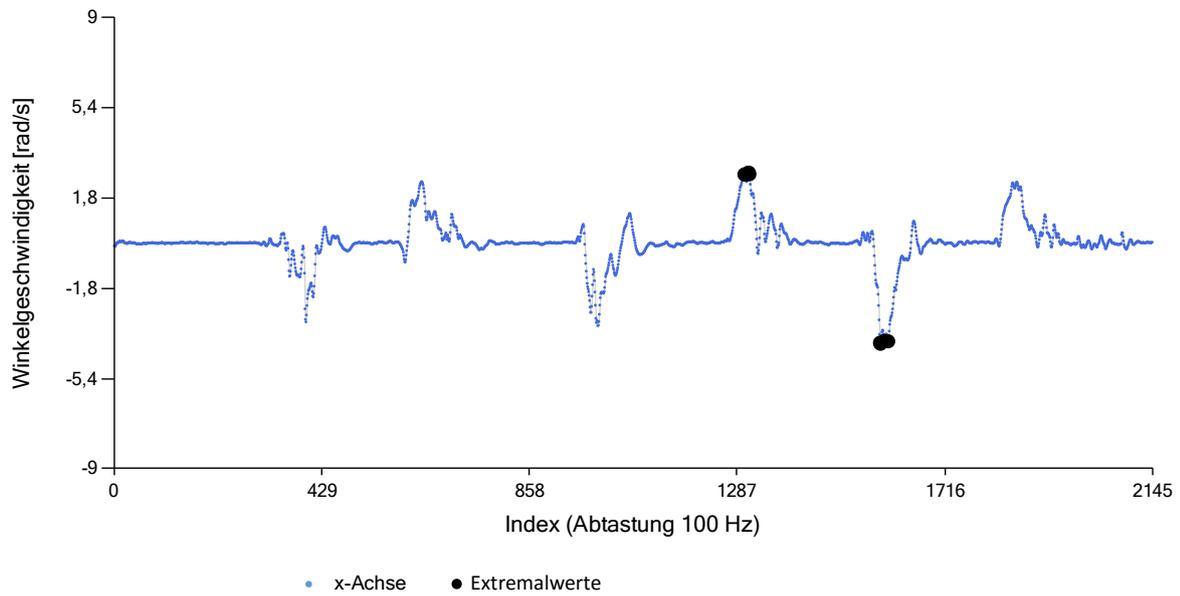


Abbildung B.4: Drehratensensor (MPU-6500): x-Achse; Überführung mobil-pedestrisches GeoARS von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung

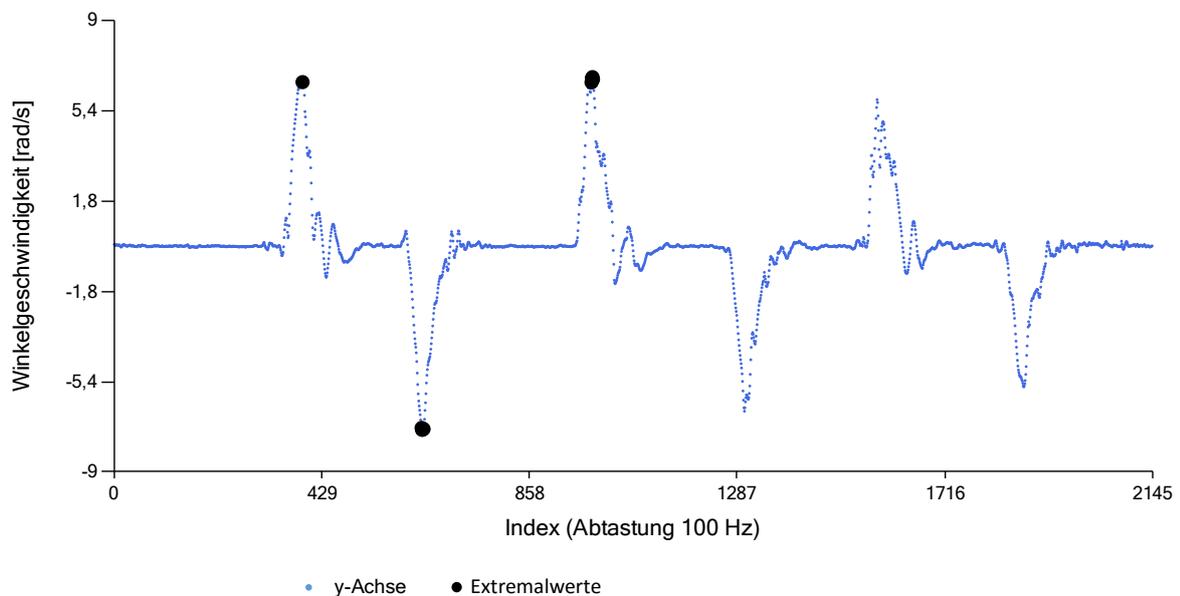


Abbildung B.5: Drehratensensor (MPU-6500): y-Achse; Überführung mobil-pedestrisches GeoARS von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung

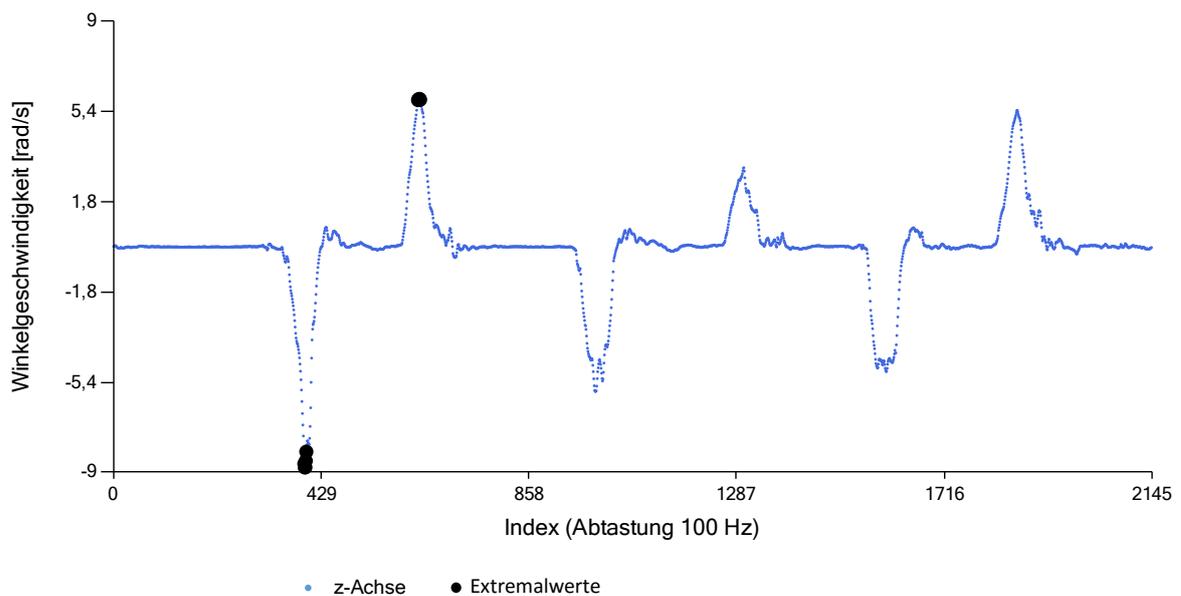


Abbildung B.6: Drehratensensor (MPU-6500): z-Achse; Überführung mobil-pedestrisches GeoARS von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung

Ergebnisbeschreibung

Beim Herunternehmen eines in der Hand gehaltenen mobil-pedestrischen GeoARS treten höhere Winkelgeschwindigkeiten mit maximal ca. $\pm 8.8 \text{ rad/s}$ mit einer Standardabweichung von maximal $\approx \pm 1.8 \text{ rad/s}$ auf, als während der explorativen Normalnutzung aus Untersuchung B.1.1.

B.1.3 Drehratensensor: Normalnutzung mit visueller Rückkopplung

Ziel der Untersuchung

Es ist beabsichtigt eine zügige Anwenderbewegung während der Nutzung eines mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger kontinuierlicher visueller Rückkopplung durchzuführen und dabei zu beobachten, welche Winkelgeschwindigkeiten hierbei auftreten.

Versuchsbeschreibung

Bei dieser Untersuchung hält der Nutzer das mobil-pedestrische GeoARS mindestens in einer Hand führend im Leseabstand vor dem Gesichtsfeld. Es erfolgt eine Drehung von 360° um die eigene Achse des Nutzers im Uhrzeigersinn. Anschließend geht der Nutzer etwa 3 m geradeaus, bleibt dann stehen und schwenkt das System aus der Waagerechten heraus zunächst nach unten und danach nach oben und anschließend wieder in die Waagerechte vor das Gesichtsfeld zurück.

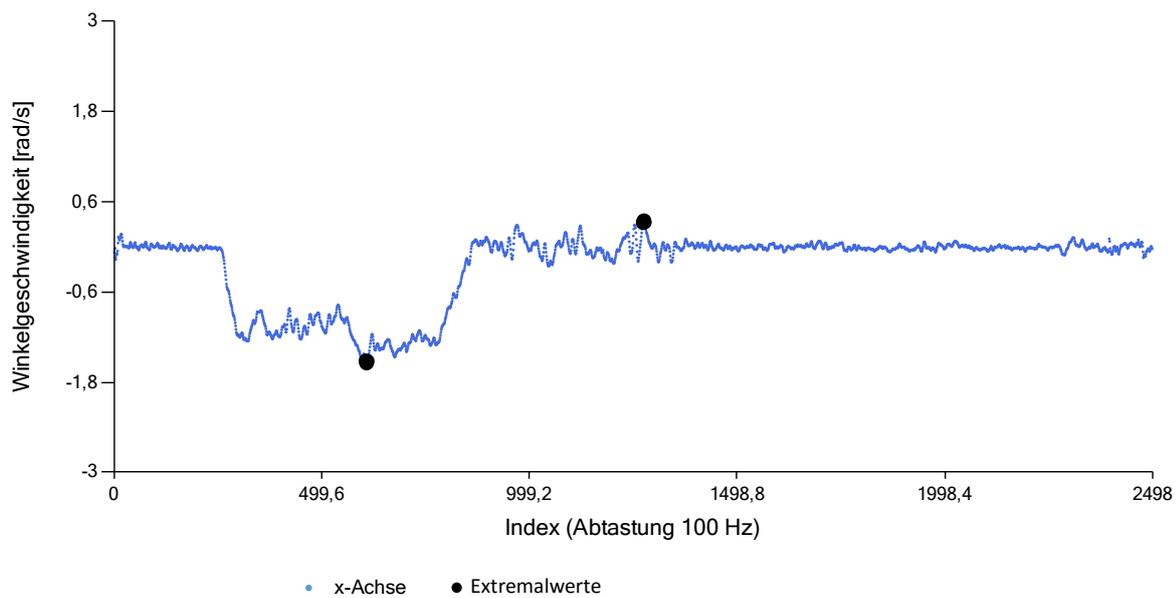


Abbildung B.7: Drehratensensor (MPU-6500): x-Achse; zügige Drehung und Schwenkung mobil-pedestrisches GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer

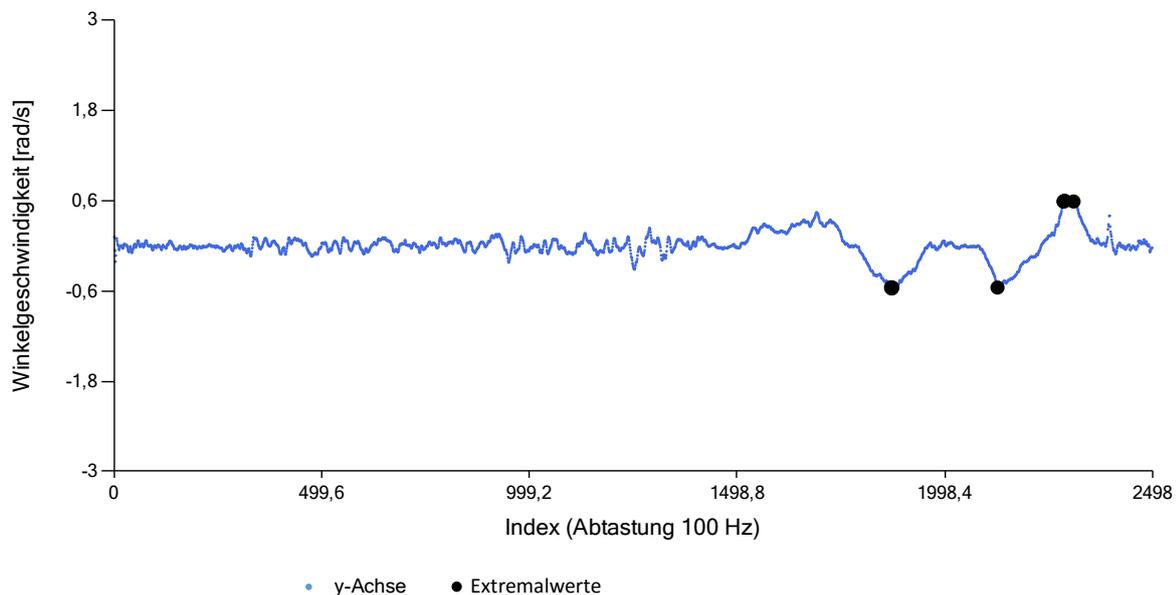


Abbildung B.8: Drehratensensor (MPU-6500): y-Achse; zügige Drehung und Schwenkung mobil-pedestrisches GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.7: Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen von $+0.35 \text{ rad/s}$ und -1.55 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung bei $\pm 0.488 \text{ rad/s}$.

y-Achse, vgl. Abbildung B.8: Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+0.60 \text{ rad/s}$ und -0.57 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.18 \text{ rad/s}$.

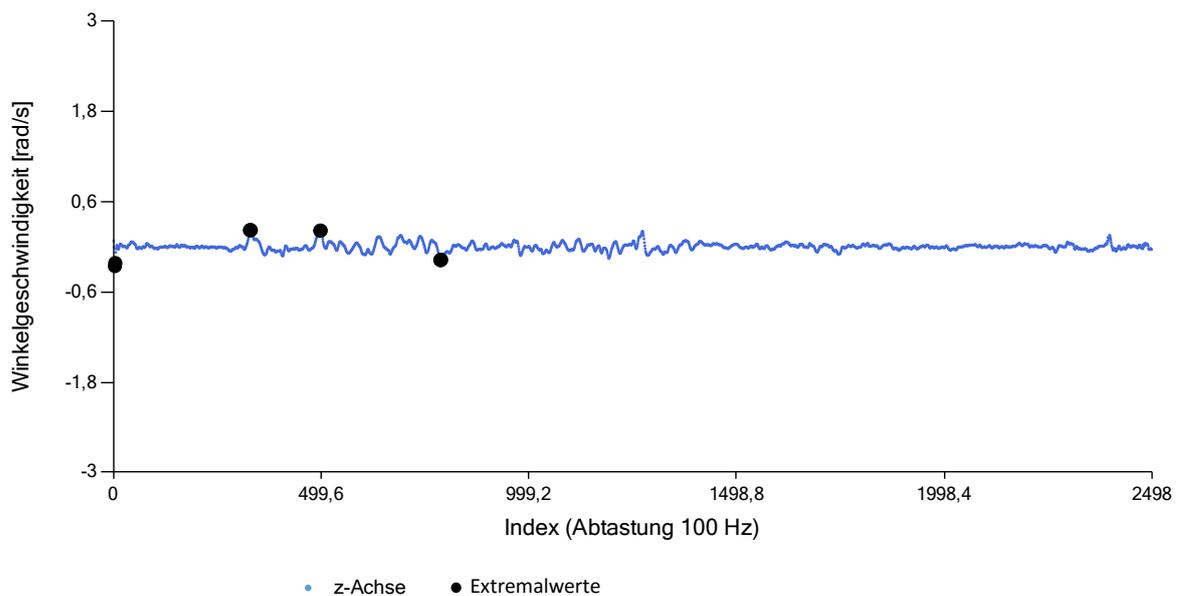


Abbildung B.9: Drehratensensor (MPU-6500): z-Achse; zügige Drehung und Schwenkung mobil-pedestrisches GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer

z-Achse, vgl. Abbildung B.9: Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+0.22 \text{ rad/s}$ und -0.25 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.05 \text{ rad/s}$.

Ergebnisbeschreibung

Beim zügigen horizontalen Drehen bzw. Schwenken um die eigene vertikale Achse des Nutzers eines in der Hand gehaltenen mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger kontinuierlicher visueller Rückkopplung treten Beträge der Winkelgeschwindigkeit von maximal $\approx 1.6 \text{ rad/s}$ auf und beim zügigen vertikalen Drehen bzw. Schwenken von maximal $\approx 0.6 \text{ rad/s}$ auf. Es sind maximale Winkelgeschwindigkeiten der Rollbewegung von $\approx 0.25 \text{ rad/s}$ zu beobachten.

B.1.4 Drehratensensor: Horizontale Drehgeschwindigkeit stationäres GeoARS

Ziel der Untersuchung

Es soll beobachtet werden, welche Winkelgeschwindigkeiten bei motorisch betriebenen stationären GeoARS auftreten.

Versuchsbeschreibung

Es wird das Verhalten der Winkelgeschwindigkeit eines stationären GeoARS bei horizontaler Drehung untersucht. Die Drehgeschwindigkeit der Motoren wurde hierzu auf einen festen Wert eingestellt, der nach dem aktuellen Entwicklungsstand des Prototypen ein Rutschen der Kupplung verhindert und eine verschleißfreie Beanspruchung des Kunststoffgetriebes ermöglicht. Der Drehratensensor BNO055 (vgl. Tabelle 7.4) ist dabei exakt in der vertikalen Achse verbaut worden.

In festen Schrittweiten von jeweils 10° wird das GeoARS horizontal um 90° durch den Schrittmotor im Uhrzeigersinn gedreht. Hierbei erfolgt nach jeder 10° -Drehung eine Ruhephase von etwa einer Minute. Die Rückdrehung erfolgt ebenfalls in 10° -Schritten, jedoch ohne die Minutenpause zwischen den Schritten. Der Start jeder Einzeldrehung wurde manuell per Softwareknopfdruck ausgelöst.

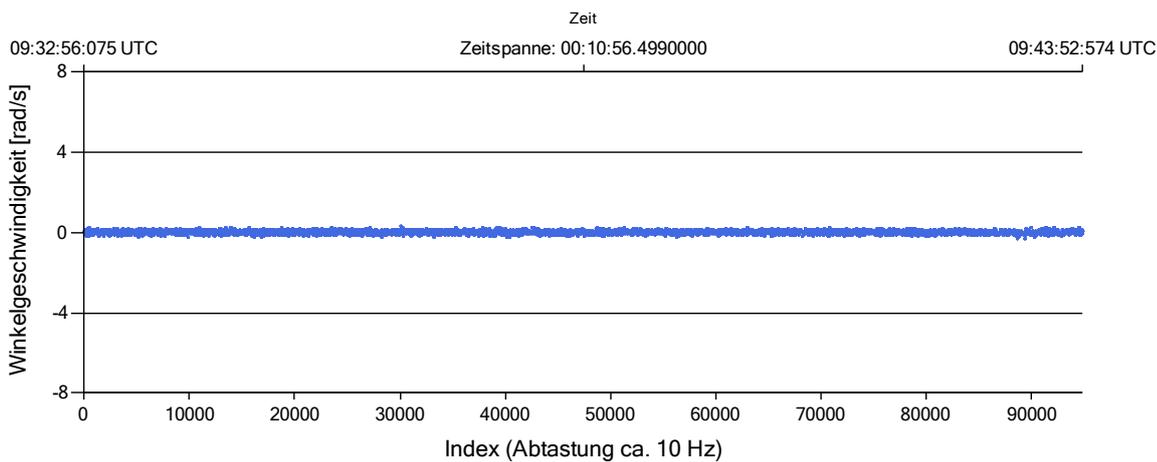


Abbildung B.10: Drehratensensor (MPU-6500): x-Achse; Drehung eines stationären GeoARS in 10° -Schritten und in kurzen Intervallen im Gegenuhrzeigersinn zurück

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.10:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+0.31 \text{ rad/s}$ und -0.31 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.08 \text{ rad/s}$.

y-Achse, vgl. Abbildung B.11:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+0.44 \text{ rad/s}$ und -0.44 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.12 \text{ rad/s}$.

z-Achse, vgl. Abbildung B.12:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+6.88 \text{ rad/s}$ und -6.31 rad/s bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 1.2 \text{ rad/s}$.

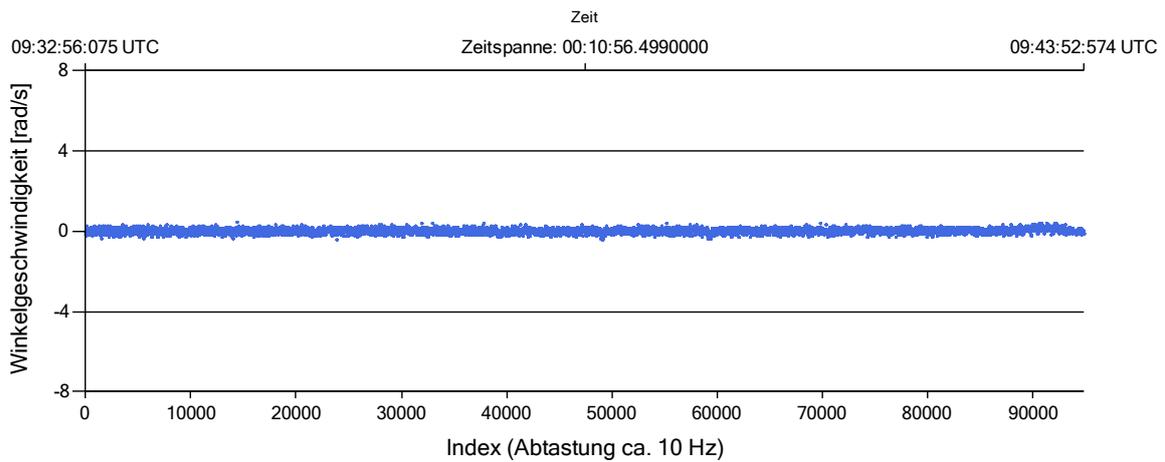


Abbildung B.11: Drehratensensor (MPU-6500): y-Achse; Drehung eines stationären GeoARS in 10° -Schritten und in kurzen Intervallen im Gegenuhrzeigersinn zurück

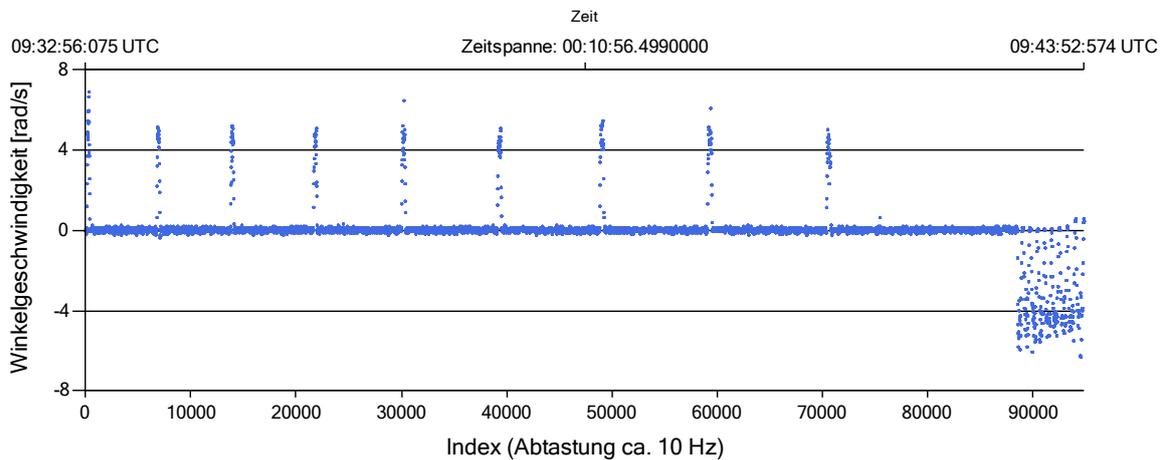


Abbildung B.12: Drehratensensor (MPU-6500): z-Achse; Drehung eines stationären GeoARS in 10° -Schritten und in kurzen Intervallen im Gegenuhrzeigersinn zurück

Ergebnisbeschreibung

Während der Horizontalrotation sind keine signifikanten Ausschläge in den Messwerten der horizontalen x- und y-Achse zu verzeichnen. Es wird deutlich, dass die z-Achse als sensitive Achse für die horizontale Drehung des GeoARS gilt. Deutlich sind die kurzen Zeiten der Systemdrehungen in Abbildung B.12 sichtbar. Hierbei treten Maxima für die Beträge der Winkelgeschwindigkeiten während der Drehungen von $\approx \pm 6.9 \text{ rad/s}$ auf.

B.2 Ausgewählte Untersuchungen Beschleunigungssensor

B.2.1 Beschleunigungssensor: Normalnutzung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung

Ziel der Untersuchung

Es ist beabsichtigt auftretende Beschleunigungen bei Normalnutzung von mobil-pedestrischen GeoARS zu ermitteln.

Versuchsbeschreibung

In einem Zeitraum von etwa einer Minute wird eine Strecke von etwa 40 m mit visueller Erkundung der Umgebung unter Nutzung eines mobil-pedestrischen GeoARS abgelaufen. Dabei erfolgt nicht immer eine visuelle Rückkopplung mit dem AR-System, da sich der Nutzer auch auf den teilweise unebenen Untergrund im Gelände konzentrieren muss.

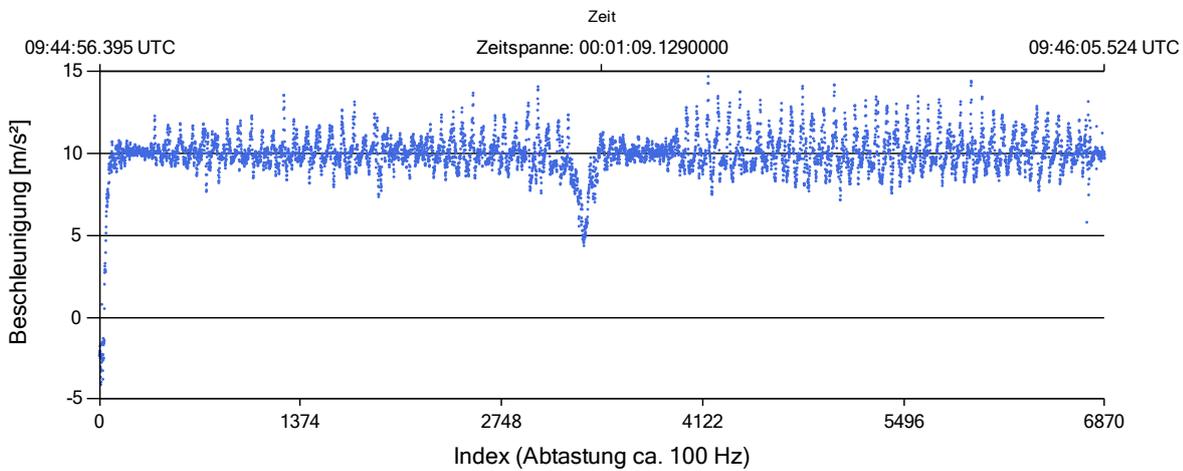


Abbildung B.13: Beschleunigungssensor (MPU-6500): x-Achse; ca. 1 min.; Einsatz eines mobil-pedestrischen GeoARS unter realen Bedingungen

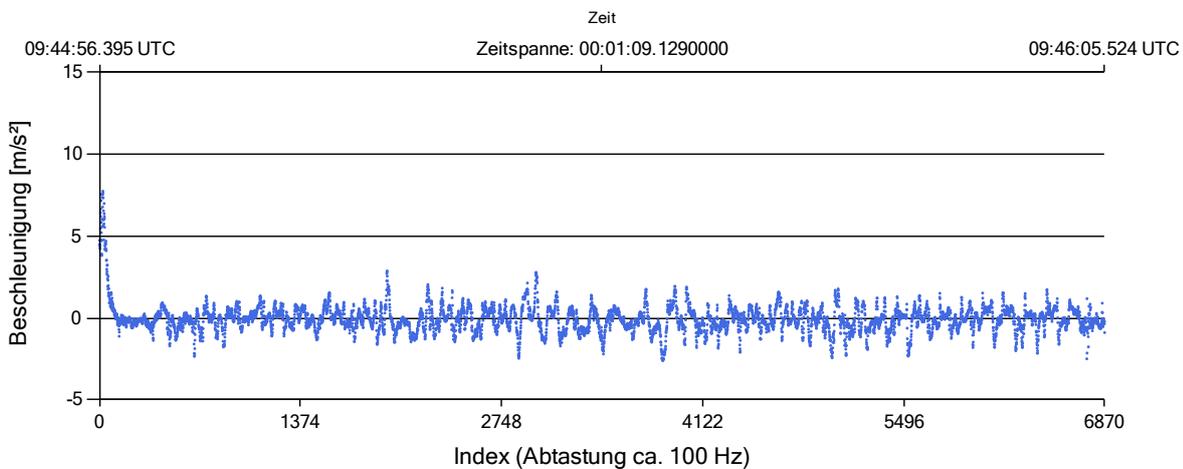


Abbildung B.14: Beschleunigungssensor (MPU-6500): y-Achse; ca. 1 min.; Einsatz eines mobil-pedestrischen GeoARS unter realen Bedingungen

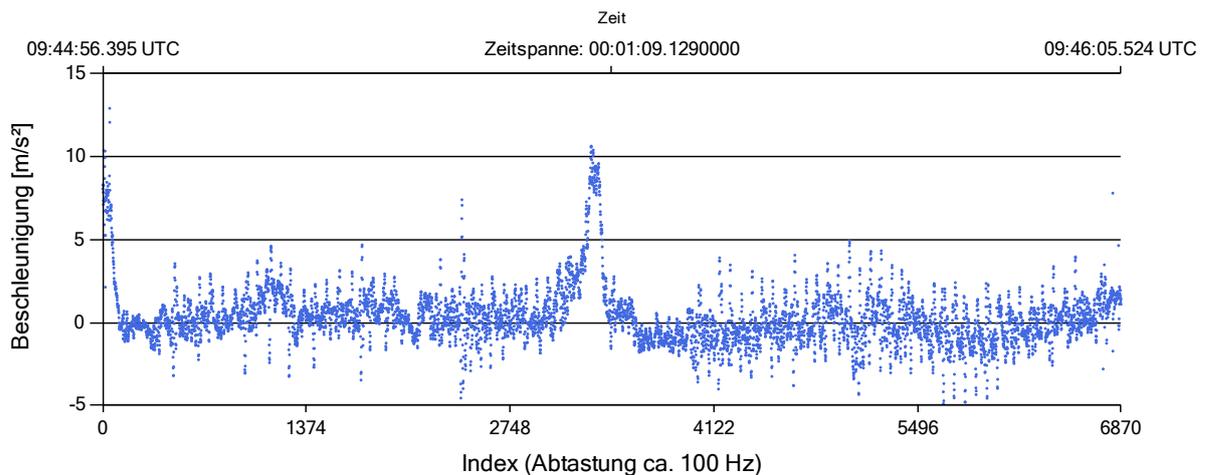


Abbildung B.15: Beschleunigungssensor (MPU-6500): z-Achse; ca. 1 min.; Einsatz eines mobil-pedestrischen GeoARS unter realen Bedingungen

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.13:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+14.67 \text{ m/s}^2$ und -4.11 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 1.4 \text{ m/s}^2$.

y-Achse, vgl. Abbildung B.14:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+7.73 \text{ m/s}^2$ und -2.60 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.9 \text{ m/s}^2$.

z-Achse, vgl. Abbildung B.15:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+12.88 \text{ m/s}^2$ und -5.12 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 1.8 \text{ m/s}^2$.

Ergebnisbeschreibung

Die Abbildung B.13 bis B.15 zeigen die Beschleunigungen, die bei einer Normalnutzung mit nicht-kontinuierlicher visueller Rückkopplung eines mobil-pedestrischen GeoARS auftreten. Der Ausschlag am Anfang aller drei Diagramme zeigt das Einschalten des AR-Systems.

In den Diagrammen der Abbildungen B.13 und B.15 ist eine markante Nick-Bewegung des AR-Systems, zuerst durch eine Ankipfung nach oben und anschließend nach unten, ersichtlich.

Es sind in allen Diagrammen Beschleunigungen sichtbar, die durch die menschliche Gehbewegung hervorgerufen werden: in Abbildung B.13 vertikale Beschleunigungen, sowie anteilig Roll- und Nick-Bewegungen; in Abbildung B.14 Roll-Bewegungen (Verkantungen); in Abbildung B.15 Nick-Bewegungen.

Die Schwenk- und Gehbewegungen bei diesem Explorationsvorgang in der Referenzumgebung weisen insgesamt Beschleunigungen von maximal $+14.67 \text{ m/s}^2$ und -5.12 m/s^2 auf, die zunächst nicht nach inertialem und gravitativem Anteil unterschieden wurden.

B.2.2 Beschleunigungssensor: Normalnutzung mit visueller Rückkopplung

Ziel der Untersuchung

Es soll eine zügige Anwenderbewegung bei der Nutzung eines mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger kontinuierlicher visueller Rückkopplung durchgeführt werden und dabei beobachtet werden, welche Beschleunigungen hierbei auftreten.

Versuchsbeschreibung

Bei diesem exemplarischen Versuch hält der Nutzer das mobil-pedestrische GeoARS in mindestens einer Hand führend im Leseabstand vor dem Gesichtsfeld. Es erfolgt eine Drehung von 360° um die eigene Achse des Nutzers im Uhrzeigersinn. Anschließend geht der Nutzer etwa 3 m geradeaus, bleibt dann stehen und schwenkt das System aus der Waagerechten heraus zunächst nach unten und danach nach oben und anschließend wieder in die Waagerechte vor das Gesichtsfeld zurück.

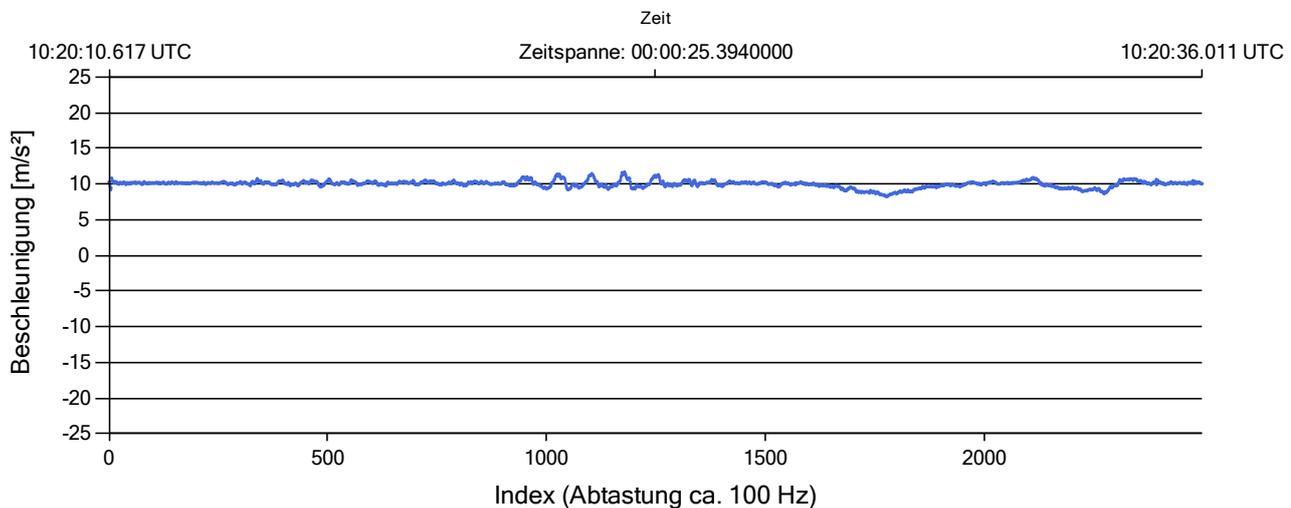


Abbildung B.16: Beschleunigungssensor (MPU-6500): x-Achse; zügige Drehung und Schwenkung eines mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.16:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $\approx +11.71\text{ m/s}^2$ und $\approx +8.3\text{ m/s}^2$ bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.5\text{ m/s}^2$.

y-Achse, vgl. Abbildung B.17:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+0.81\text{ m/s}^2$ und -1.39 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 0.27\text{ m/s}^2$.

z-Achse, vgl. Abbildung B.18:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+5.80\text{ m/s}^2$ und -4.22 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 1.7\text{ m/s}^2$.

Ergebnisbeschreibung

Beim zügigen horizontalen Drehen bzw. Schwenken um die eigene vertikale Achse des Nutzers eines in der Hand und vor dem Gesicht gehaltenen mobil-pedestrischen GeoARS bei gleichzeitiger kontinuierlicher visueller Rückkopplung treten Beschleunigungsbeträge von maximal ca. 12 m/s^2 bzw. ca. 1.2 g auf. Beim

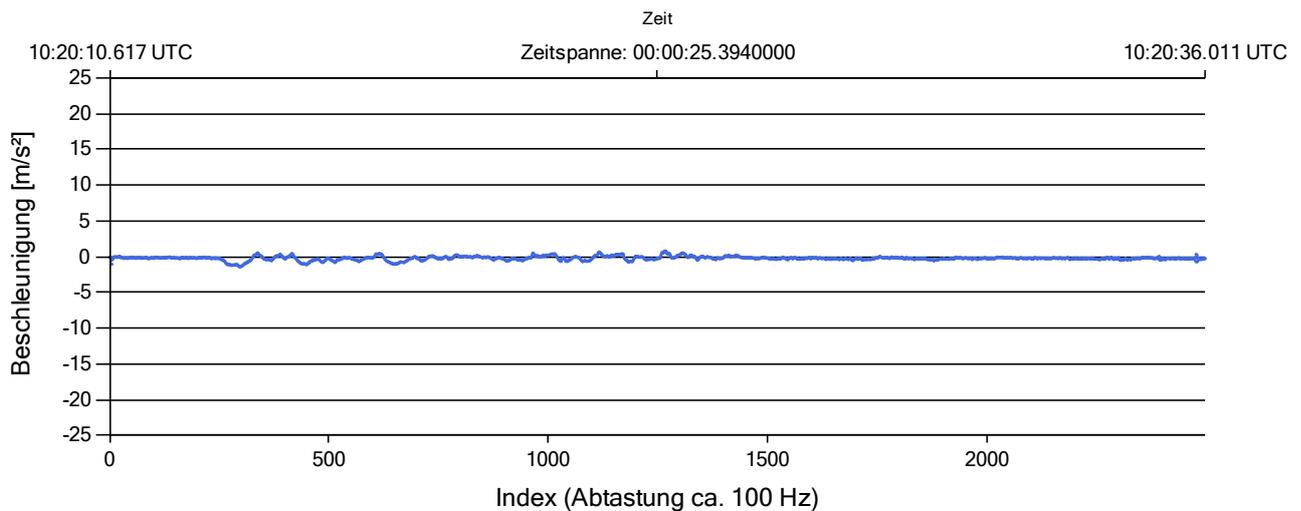


Abbildung B.17: Beschleunigungssensor (MPU-6500): y-Achse; zügige Drehung und Schwenkung eines mobil-pedestrisches GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer

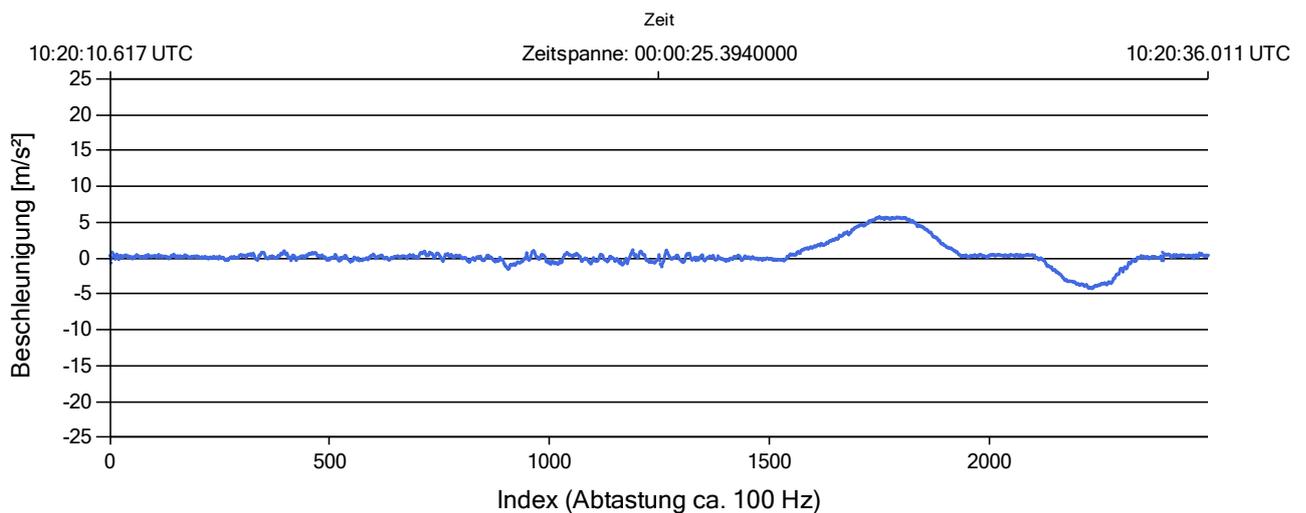


Abbildung B.18: Beschleunigungssensor (MPU-6500): z-Achse; zügige Drehung und Schwenkung eines mobil-pedestrisches GeoARS bei gleichzeitiger visueller Rückkopplung durch den Nutzer

zügigen vertikalen Drehen/Schwenken (Nick-Bewegung) treten Beschleunigungen von ca. 5.80 m/s^2 bzw. ca. 0.6 g auf. Es tritt eine maximale Beschleunigung der Roll-Bewegungen von ca. von 1.39 m/s^2 bzw. ca. 0.1 g auf. Für Nick- und Roll-Bewegungen sind die horizontalen Achsen (y-Achse und z-Achse) empfindlicher als die vertikale Achse (x-Achse).

B.2.3 Beschleunigungssensor: Alternierende Normalnutzungs- und Nichtnutzungsphase

Ziel der Untersuchung

Es ist beabsichtigt auftretende Beschleunigungen bei einer von der Normalnutzung von mobil-pedestrischen GeoARS abweichenden Bewegung des Benutzers zu ermitteln.

Versuchsbeschreibung

Bei dem Versuch soll die typische Bewegung des Benutzers aufgezeichnet werden, die er ausführt, wenn er das mobil-pedestrische GeoARS von einer Nutzungs- in eine konkrete temporäre Nichtnutzungsphase überführt. Die Nutzungshaltung zeichnet sich dadurch aus, dass das AR-System mit einer Hand führend im Leseabstand vor das Gesichtsfeld gehalten wird. Die Haltung der Nichtnutzungsphase ist durch eine für den Nutzer entspannte Haltung gekennzeichnet. Hierbei zeigt der Arm senkrecht nach unten, wobei sich das System noch in der Hand des Nutzers befindet. Im Versuch wird das System drei mal hintereinander von einer Nutzungs- in die Nichtnutzungsphase überführt.

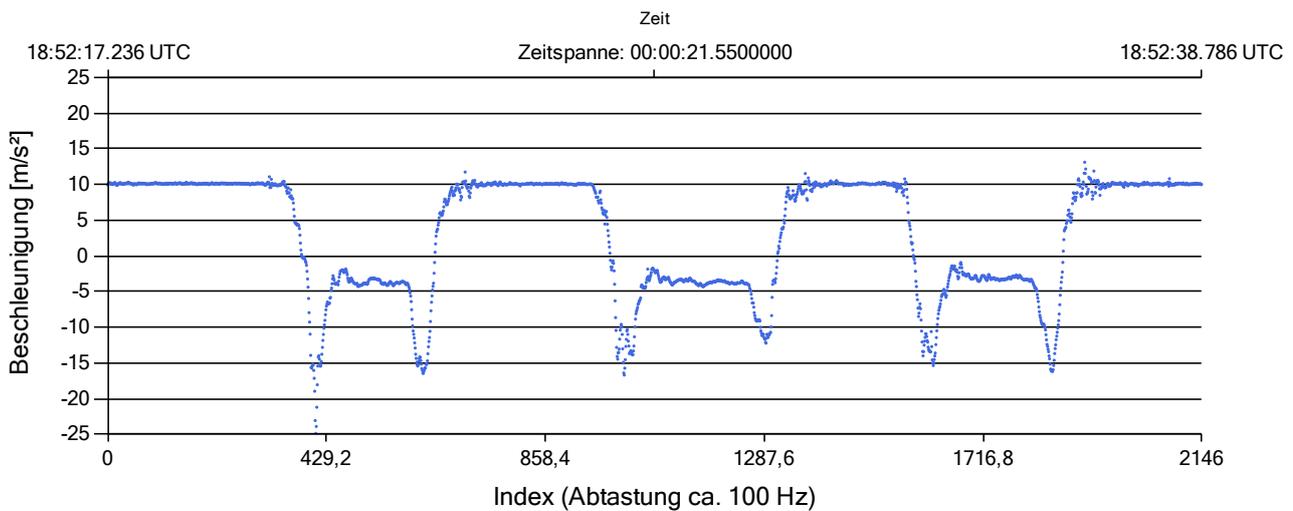


Abbildung B.19: Beschleunigungssensor (MPU-6500): x-Achse; Überführung mobil-pedestrisches GeoARS von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung

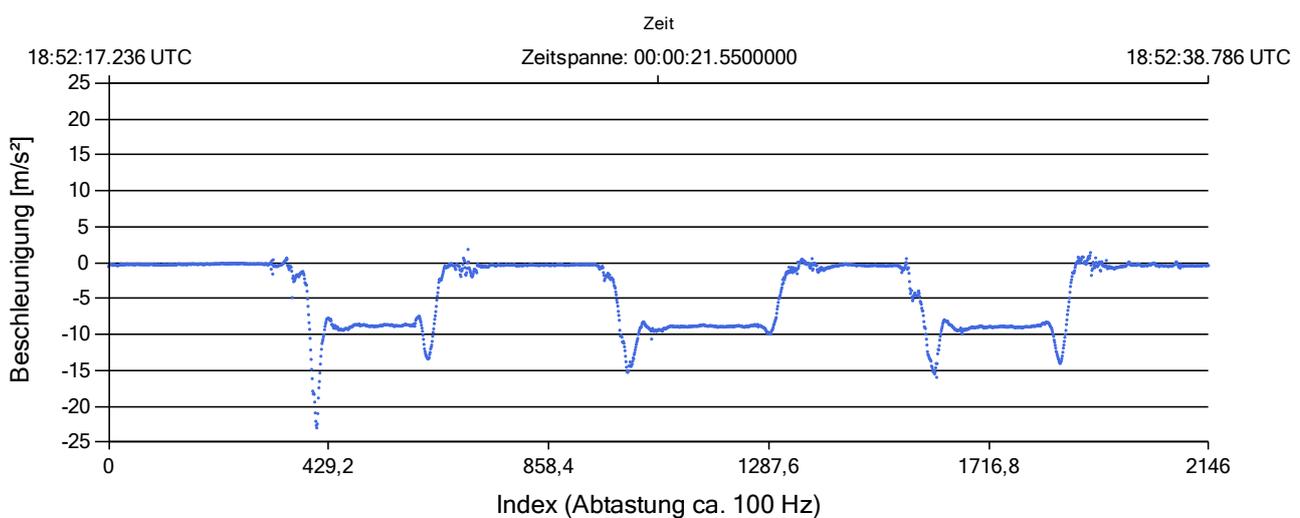


Abbildung B.20: Beschleunigungssensor (MPU-6500): y-Achse; Überführung mobil-pedestrisches GeoARS von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung

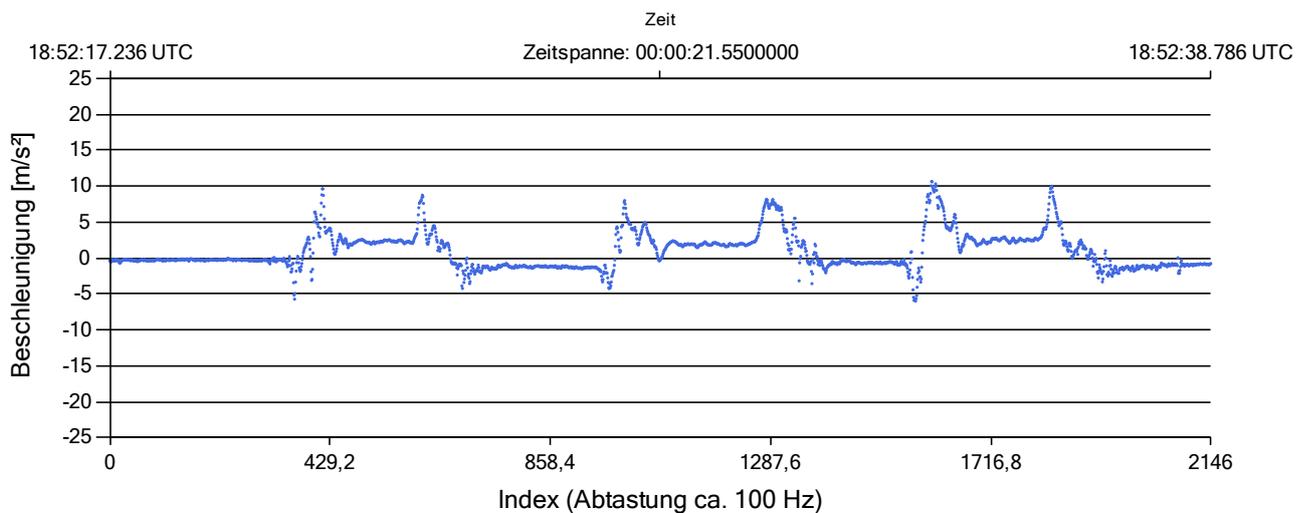


Abbildung B.21: Beschleunigungssensor (MPU-6500): z-Achse; Überführung mobil-pedestrisches GeoARS von einer Nutzungs- in eine temporäre Nichtnutzungsphase; dreimalige Wiederholung

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.19:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+13.12 \text{ m/s}^2$ und -24.85 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 8.1 \text{ m/s}^2$.

y-Achse, vgl. Abbildung B.20:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+1.86 \text{ m/s}^2$ und -22.97 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 4.6 \text{ m/s}^2$.

z-Achse, vgl. Abbildung B.21:

Die größten Messwert-Absolutbeträge liegen bei $+10.66 \text{ m/s}^2$ und -5.97 m/s^2 bei einer Standardabweichung einer Beobachtung von $\pm 2.5 \text{ m/s}^2$.

Ergebnisbeschreibung

Beim Herunternehmen eines in der Hand gehaltenen mobil-pedestrischen GeoARS treten höhere Beschleunigungen mit einem Betrag von maximal $\approx 25 \text{ m/s}^2$ bzw. ca. $\approx 2.5 \text{ g}$ auf, als während der explorativen Normalnutzung aus Versuch B.2.1.

B.2.4 Beschleunigungssensor: Beobachtung der Beschleunigung in Ruhelage

Ziel der Untersuchung

Es wird die Standardabweichung der gemessenen Beschleunigungen von GeoARS in absoluter Ruhelage untersucht.

Versuchsbeschreibung

Hierzu wird ein im GeoARS integrierter Beschleunigungssensor (MPU-6515 (vgl. Tabelle 7.6, S. 111)) für einen zweistündigen Zeitraum in einer ungestörten Referenzumgebung im Außenbereich genähert horizontal in Ruheposition gelagert und zuvor einer Temperaturanpassung von etwa einer Stunde unterzogen. Die vertikale Achse ist in diesem Versuch die z-Achse.

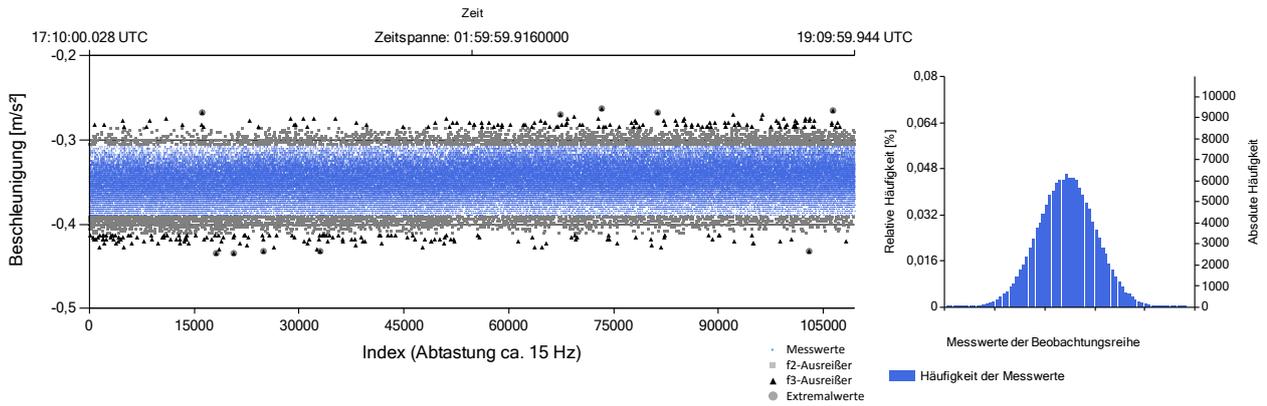


Abbildung B.22: Beschleunigungssensor (MPU-6515): x-Achse; Sensor in Ruhelage im ungestörten Außenbereich

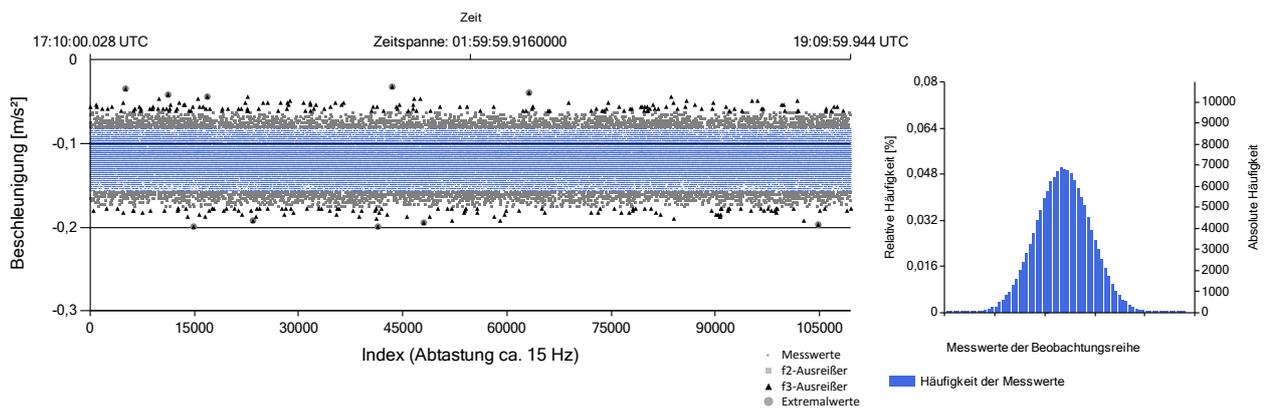


Abbildung B.23: Beschleunigungssensor (MPU-6515): y-Achse; Sensor in Ruhelage im ungestörten Außenbereich

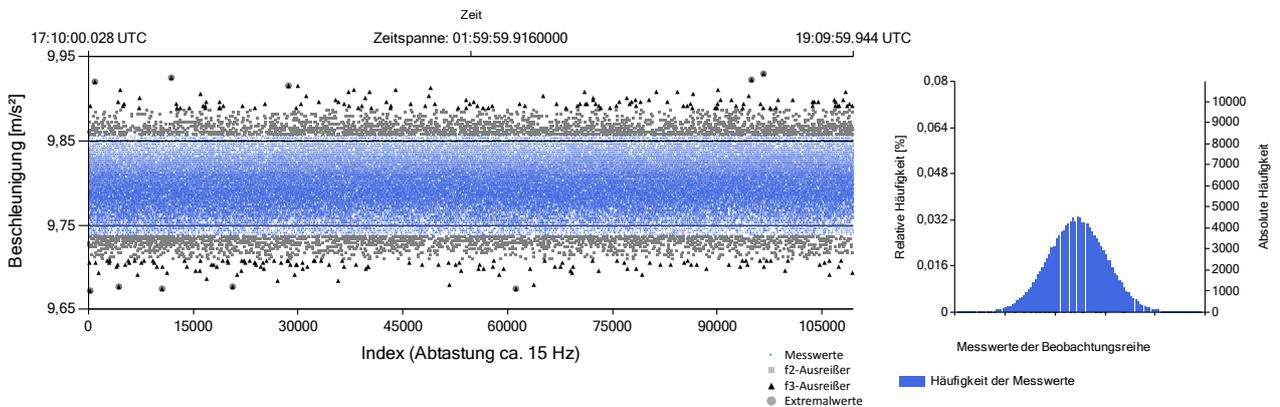


Abbildung B.24: Beschleunigungssensor (MPU-6515): z-Achse; Sensor in Ruhelage im ungestörten Außenbereich

Messwerte/Ergebnisse

x-Achse, vgl. Abbildung B.22:

Der Mittelwert der Messreihe beträgt -0.349 m/s^2 (Median: -0.348 m/s^2). Die größten Messwert-Absolutbeträge ober- und unterhalb des Mittelwertes liegen bei -0.263 m/s^2 und -0.434 m/s^2 . Die Standardabweichung einer Beobachtung beträgt $\pm 0.021 \text{ m/s}^2$ und die des ausgeglichenen Mittelwertes $\pm 0.0001 \text{ m/s}^2$. Etwa 4.4% der Messwerte sind f2-Ausreißer sowie 0.3% f3-Ausreißer.

y-Achse, vgl. Abbildung B.23:

Der Mittelwert der Messreihe beträgt -0.119 m/s^2 (Median: $-0,118 \text{ m/s}^2$). Die größten Messwert-Absolutbeträge ober- und unterhalb des Mittelwertes liegen bei -0.033 m/s^2 und -0.199 m/s^2 . Die Standardabweichung einer Beobachtung beträgt $\pm 0.019 \text{ m/s}^2$ und die des ausgeglichenen Mittelwertes 0.0001 m/s^2 . Etwa 4.2% der Messwerte sind f2-Ausreißer sowie 0.2% f3-Ausreißer.

z-Achse, vgl. Abbildung B.24:

Der Mittelwert der Messreihe beträgt 9.798 m/s^2 (Median: 9.798 m/s^2). Die größten Messwert-Absolutbeträge ober- und unterhalb des Mittelwertes liegen bei 9.929 m/s^2 und 9.672 m/s^2 . Die Standardabweichung einer Beobachtung beträgt $\pm 0.0295 \text{ m/s}^2$ und die des ausgeglichenen Mittelwertes $\pm 0.0001 \text{ m/s}^2$. Etwa 4.2% der Messwerte sind f2-Ausreißer sowie 0.2% f3-Ausreißer.

Ergebnisbeschreibung

Die Standardabweichung einer Beobachtung beträgt für alle Achsen durchschnittlich etwa 0.023 m/s^2 , wobei etwa 4.3% der Messwerte f2-Ausreißer und 0.2% der Messwerte f3-Ausreißer sind.

B.3 Magnetfeldsensor: ausgewählte Untersuchungen

B.3.1 Magnetfeldsensor: Beobachtung des Gierwinkels in Ruhelage

Ziel der Untersuchung

Es wird die Standardabweichung des in Echtzeit berechneten Gierwinkels ψ_i eines GeoARS in absoluter Ruhelage untersucht.

Versuchsbeschreibung

Hierzu wird ein GeoARS mit integriertem Magnetfeldsensor (AK8963 (vgl. Tabelle 7.10, S. 127) für einen mehrstündigen Zeitraum in einer magnetisch ungestörten Referenzumgebung im Außenbereich genähert horizontal ($\theta \approx -2^\circ$; $\phi \approx 1^\circ$) in Ruheposition gelagert und einer Temperaturanpassung unterzogen.

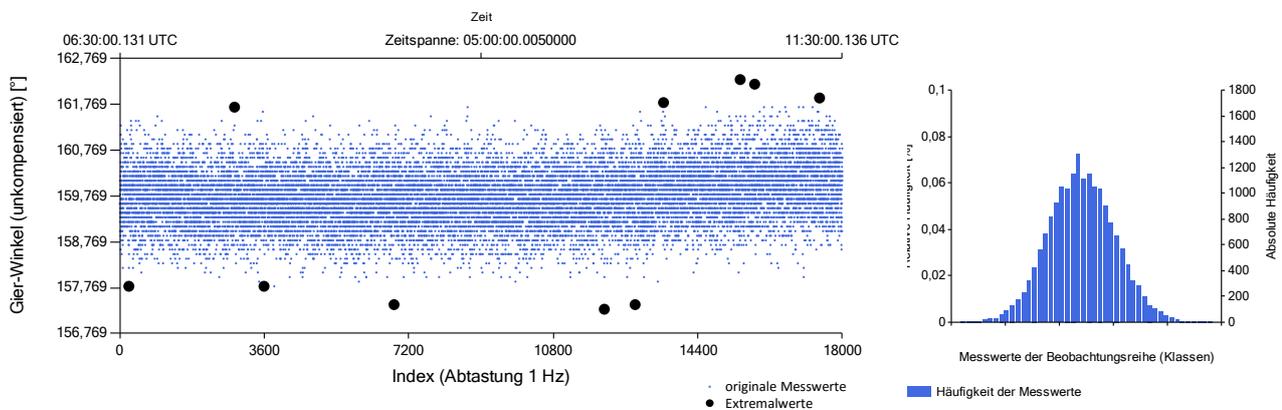


Abbildung B.25: Magnetfeldsensor (AK8963): Untersuchung des Gierwinkels ψ eines GeoARS in absoluter Ruhelage im ungestörten Außenbereich

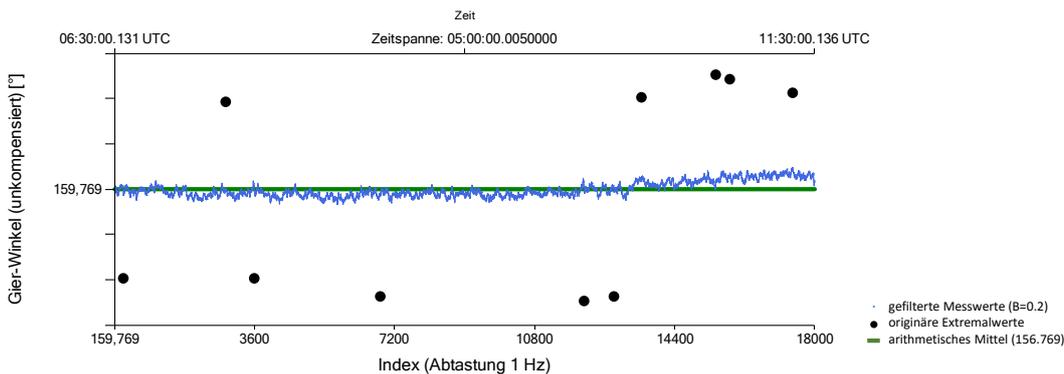


Abbildung B.26: Magnetfeldsensor (AK8963): gefilterte Werte aus Abbildung B.25

Messwerte/Ergebnisse

Die Berechnung der ψ_i wird über die Formeln aus Abschnitt 7.8.2 ohne Neigungskorrektur vorgenommen. Die Abbildung B.25 stellt den in Echtzeit errechneten Gierwinkel dar. Die größten Absolutbeträge ober- und unterhalb des Mittelwertes liegen bei 162.3° und 157.3° . Insgesamt weisen 4.4% der Beobachtungen einen Wert größer dem Zweifachen der Standardabweichung der Beobachtung $s_0 = \pm 0.6$ und kleiner oder gleich

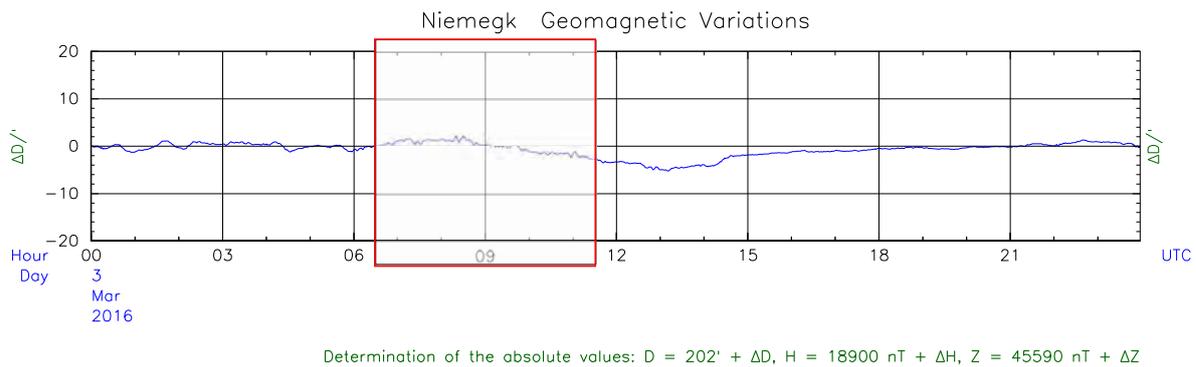


Abbildung B.27: Geomagnetische Variation der Deklination der Referenzstation Niemegek am 03.03.2016, vgl. [GFZ 2016a]

dem Dreifachen ($> 2 \cdot s_0, \leq 3 \cdot s_0$) auf. Etwa 0.3% liegen außerhalb des Dreifachen der Standardabweichung der Beobachtung ($> 3 \cdot s_0$).

Ergebnisbeschreibung

Ergänzend zu den originären Beobachtungen der Abbildung B.25 stellt die Abbildung B.26 die durch einen Glättungsfilter behandelten Werte dar. Nachdem die Beträge in der ersten Hälfte des Diagramms B.26 geringfügig absinken, steigen sie insbesondere im letzten Drittel stärker an. Die Wertänderung in diesem letzten Drittel kommt einer Ablenkung von ψ nach Westen gleich. Die Ablenkung von ψ , zuerst leicht nach Osten und dann nach Westen, wird auch durch die geomagnetische Referenzstation Niemegek des GFZ Potsdam für diesen Zeitraum belegt. Sie beträgt am Ende des Beobachtungszeitraumes, wie in Abbildung B.27 ersichtlich, etwa $-5'$ ($\approx 0.1^\circ$). Die Variation der Deklination lässt sich mit dem verwendeten Magnetfeldsensor detektieren.

Restfehler der Sensorik und tatsächliche Winkeländerungen durch Variationen des Erdmagnetfeldes ergeben die resultierende Standardabweichung der Beobachtung mit $s_0 \approx 0.6^\circ$.

B.3.2 Magnetfeldsensor: Beobachtung diskreter Horizontalwinkeländerungen

Ziel der Untersuchung

Es wird das Verhalten des Gierwinkels ψ eines GeoARS für diskrete Richtungsänderungen untersucht. Hierbei ist von Interesse, ob anhand der geomagnetischen Detektion definierte Horizontalwinkeländerungen durch den Magnetfeldsensor aufgelöst werden können.

Versuchsbeschreibung

Der im GeoARS integrierte Magnetfeldsensor AK8963 (vgl. Tabelle 7.10, 127) befindet sich in einer magnetisch ungestörten Referenzumgebung im Außenbereich. Das GeoARS ist in einem Abstand von ca. 50 cm an einer mit Schrittmotor ausgerüsteten Trägerplattform fest verbunden. Das System ist annähernd nach Süden ausgerichtet. In Schrittweiten von jeweils 10° wird das GeoARS um 180° horizontal im Uhrzeigersinn in Richtung Westen und anschließend in identischer Schrittweite zurück gedreht. Nach der jeweiligen 10° -Drehung verbleibt das System für 60 Sekunden in Ruhelage.

Messwerte/Ergebnisse

Abbildung B.28 stellt die in Echtzeit berechneten Werte des Gierwinkels und das dazugehörige Histogramm dar.

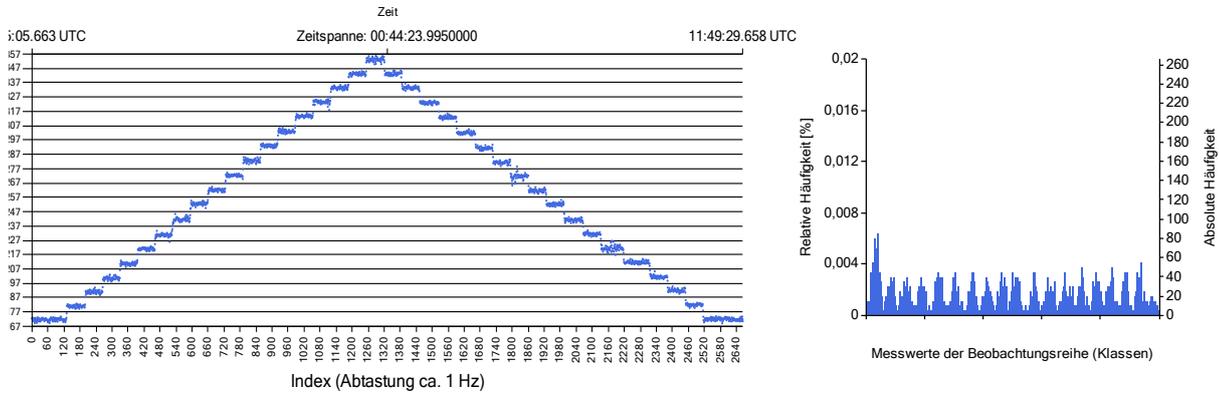


Abbildung B.28: Magnetfeldsensor (AK8963): Beobachtung von Horizontalwinkeländerungen mit diskreten Schrittweiten von 10°

Ergebnisbeschreibung

Die Schrittweiten von 10° sind deutlich zu erkennen. In der Mitte der Graphik ist die horizontale Drehung des Sensors um 180° abgeschlossen und die Rückdrehung wird begonnen. Im Ergebnis beträgt die durchschnittliche Abweichung der Gierwinkel-Mittelwerte von ihrem Soll etwa $\pm 0.4^\circ$.

In diesem Genauigkeitsbereich ermöglicht diese Konfiguration die Bereitstellung von Gierwinkeln zur Orientierung des Gesamtsystems zur 3D-Registrierung von virtuellen und realen Objekten bzw. zur Realisierung der Erfassung von Geobjekten.

B.4 GNSS-Modul: ausgewählte Untersuchungen

B.4.1 GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage

Ziel der Untersuchung

Es ist beabsichtigt die Genauigkeit der Position eines GeoARS über das integrierte GNSS-Modul zu ermitteln.

Versuchsbeschreibung

Hierzu wird das im GeoARS verbaute GNSS-Modul (WTR1605L) in absoluter Ruhelage im zugangsgeschützten Außenbereich auf einem bekannten terrestrischen Referenzpunkt stationiert. Das Smartphone wurde in den sogenannten Flugzeugmodus geschaltet, sodass keinerlei Datenfunkverbindungen (z.B. für Korrekturdaten) aufgebaut werden können. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgt über einen ungefähren Zeitraum von 16 Stunden (bei Tage) mit einer Frequenz von 1 Hz.

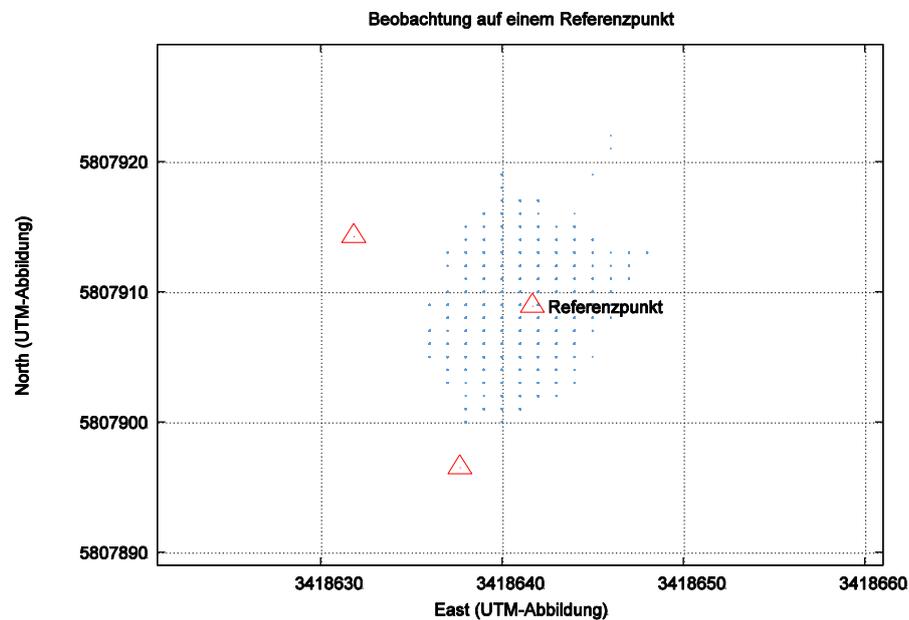


Abbildung B.29: GNSS-Modul: Beobachtung in Ruhelage; Ost- und Nord-Werte

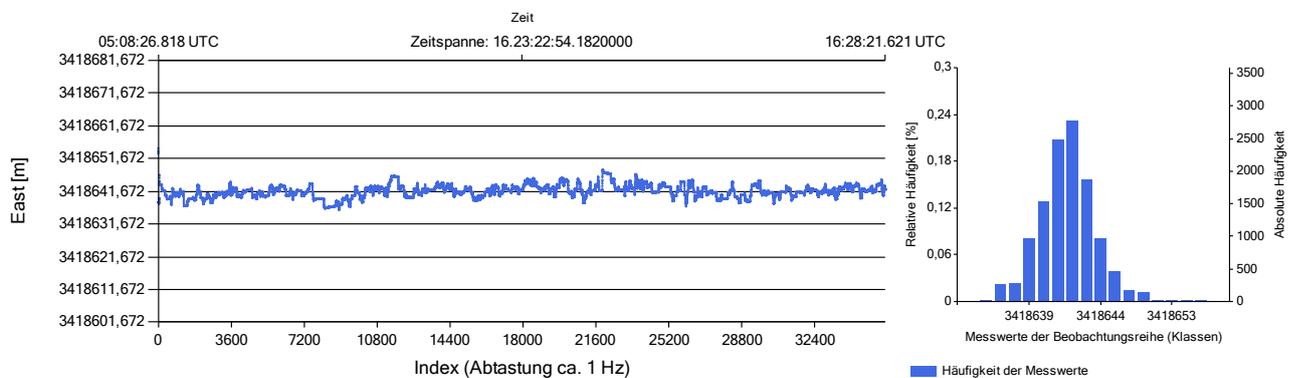


Abbildung B.30: GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage; Ost-Werte

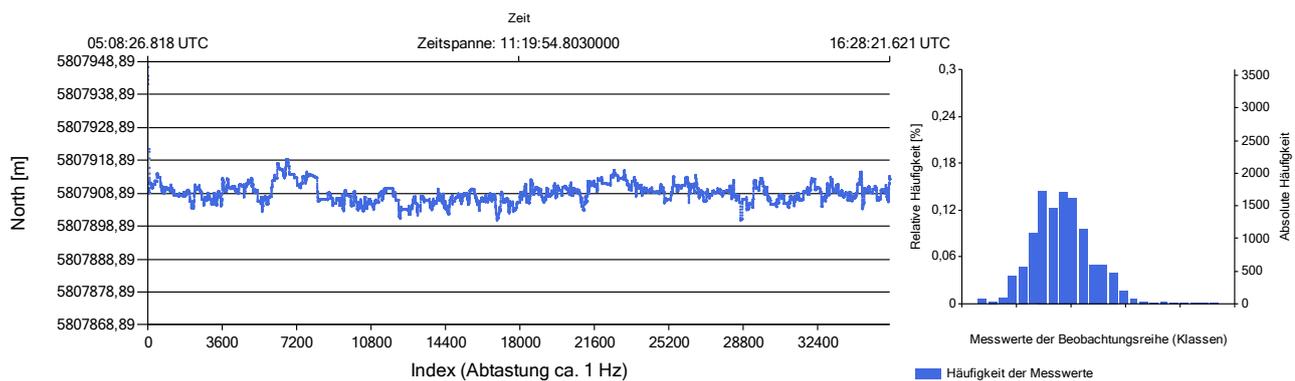


Abbildung B.31: GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage; Nord-Werte

Messwerte/Ergebnisse

Ost: Der Mittelwert des Ost-Wertes (l-System) beträgt 3418641.670 m (Median 3418641.66 m) mit einer Standardabweichung des ausgeglichenen Mittelwertes von $\pm 0.010\text{ m}$. Es sind 5.50% f2-Ausreißer und 0.13% f3-Ausreißer feststellbar. Die Standardabweichung einer Beobachtung des Ost-Wertes beträgt $\pm 1.89\text{ m}$.

Nord: Der Mittelwert des Nord-Wertes (l-System) beträgt 5807908.951 m (Median 5807908.85 m) mit einer Standardabweichung des ausgeglichenen Mittelwertes von $\pm 0.015\text{ m}$. Es sind 2.88% f2-Ausreißer und 0.51% f3-Ausreißer feststellbar. Die Standardabweichung einer Beobachtung beträgt $\pm 2.88\text{ m}$.

Auswertung der Häufigkeiten:

Anzahl in Kategorie <1m: 3725 (10,38 %)

Anzahl in Kategorie 1-3m: 17386 (48,43 %)

Anzahl in Kategorie 3-5m: 9768 (27,21 %)

Anzahl in Kategorie 5-10m: 4910 (13,68 %)

Anzahl in Kategorie >10m: 110 (0,30 %)

Ergebnisbeschreibung

Es wird deutlich, dass die Positionierung starken Schwankungen unterliegt. Die Häufigkeitsanalyse ergibt, dass ca. 86% der bereitgestellten Koordinaten eine Positionierung im Genauigkeitsbereich von $< 5.0\text{ m}$ ermöglichen. Etwas 10% der Messwerte erlauben eine Positionierung von unter einem Meter. Die Standardabweichung des arithmetischen Mittels für den Ost-Wert beträgt $\sigma_{x_{Ost}} \approx \pm 0.010$ und für den Nord-Wert $\sigma_{x_{Nord}} \approx \pm 0.015$. Die Standardabweichung einer Beobachtung liegt für Ost- und Nordwert bei $s_{0_{Ost}} \approx 1.89\text{ m}$ bzw. $s_{0_{Nord}} \approx 2.88\text{ m}$.

C Erdmagnetfeldmodelle

C.1 Globale Modelle

Das Magnetfeld der Erde lässt sich in Magnetfeldmodellen beschreiben. Beispiele hierfür sind das IGRF oder das WMM. Die von Carl Friedrich Gauss entwickelte Kugelfunktionsanalyse liefert nach wie vor eine Methode das globale Erdmagnetfeld zu beschreiben. Es ist möglich interne und externe Magnetfeldanteile grob zu trennen. Aufgrund der hohen Anzahl verschiedener Quellen ist eine genaue Trennung der verschiedenen Anteile jedoch weiterhin nicht möglich, vgl. [GFZ 2016c]. Derzeit liegt das IGRF in der 12. Generation und das WMM2015 jeweils mit einem Gültigkeitszeitraum von 2015 bis 2020 vor. Nach Thébault u. a. [2015], Manda u. Macmillan [2000] und Chulliat u. a. [2015] wird das Erdmagnetfeld \mathbf{B} und seine jährliche Änderungsrate (Säkularvariation) durch den nachfolgenden mathematischen Zusammenhang beschrieben:

Das Vektorfeld \mathbf{B}

$$\mathbf{B}(\varphi', \lambda, r, t) = -\nabla V = -\left(\frac{\partial V}{\partial X'}, \frac{\partial V}{\partial Y'}, \frac{\partial V}{\partial Z'}\right) \quad (\text{C.1})$$

mit den sphärischen Koordinaten φ' (geozentrische Breite) und λ (Länge) dem Abstand vom Geozentrum r und der Zeit t ist das Gradientenfeld der (skalaren) Funktion V . Die Funktion nimmt für das WMM die Form:

$$V(\varphi', \lambda, r, t) = a \sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) P_n^m \sin \varphi' \quad (\text{C.2})$$

an.

Die Umrechnung der ellipsoidischen Breite in die geozentrische Breite φ' erfolgt beispielsweise nach Heck [2003], über die Abplattung f des genutzten Referenzellipsoids (z.B. WGS84: $f = 1/298.257223563$):

$$\tan \varphi' = (1 - f)^2 \tan \varphi, \quad (\text{C.3})$$

wobei in Heck [2003] die geozentrische Breite mit γ bezeichnet wird.

Weiterhin ist a der geomagnetische Radius ($a = 6371200.0 \text{ m}$), P_n^m sind die quasi-normalisierten zugeordneten Legendre-Polynome mit Grad n und Ordnung m . Die Gauß-Koeffizienten g_n^m und h_n^m sind Funktionen der Zeit und tragen die Einheit Nanotesla [nT]. Der maximale Grad der Entwicklung ist N und liegt für die aktuelle Realisierung des WMM2015 bei $N = 12$ und für das IGRF der 12. Generation bei $N = 13$. Somit besitzt das Gradientenfeld \mathbf{B} das skalare Potential V und das Erdmagnetfeld wird nicht nur als Dipolfeld, sondern als Multipolfeld behandelt. Nach der Zurückführung auf ein Gradientenfeld wird entsprechend der Kugelflächenfunktionen entwickelt. Mit den veröffentlichten Kugelfunktionskoeffizienten der jeweiligen Realisierung kann der Funktionswert an einer beliebigen Stelle auf der Kugel, z.B. durch das GeoARS, berechnet werden.

Mit

$$g_n^m(t) = g_n^m(T_0) + \dot{g}_n^m(T_0) \cdot (t - T_0), \quad \dot{g} = \frac{dg}{dt} \quad (\text{C.4})$$

$$h_n^m(t) = h_n^m(T_0) + \dot{h}_n^m(T_0) \cdot (t - T_0), \quad \dot{h} = \frac{dh}{dt} \quad (\text{C.5})$$

und den gegebenen Hauptfeld-Koeffizienten $g_n^m(T_0)$, $h_n^m(T_0)$ und ihren zeitlichen Änderungen $\dot{g}_n^m(T_0)$ sowie $\dot{h}_n^m(T_0)$ des jeweiligen Modells

$$\dot{g} = \frac{dg}{dt} \quad (\text{C.6})$$

$$\dot{h} = \frac{dh}{dt} \quad (\text{C.7})$$

können die Gauß-Koeffizienten mit der Referenzepoche $T_0 = 2015.0$ und dem aktuellen Zeitpunkt t , z.B. des aktuellen GeoARS-Einsatzes, sowie die Polynome über

$$P_n^m(\sin \varphi') = \sqrt{2 \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} \cdot P_{nm}(\sin \varphi') \quad \text{wenn } m > 0 \quad (\text{C.8})$$

$$P_n^m(\sin \varphi') = P_{nm}(\sin \varphi') \quad \text{wenn } m = 0 \quad (\text{C.9})$$

berechnet werden. In der Geodäsie ist häufig die Schreibweise P_{nm} mit $P_{n,m}(\sin \varphi') = (-1)^m P_n^m(\sin \varphi')$ gebräuchlich, vgl. [Chulliat u. a. 2015] und weiterführende Literatur: [Hofmann-Wellenhof u. Moritz 2005], [Langel 1987], [Heiskanen u. Moritz 1967], [Abramowitz u. Stegun 1972], [Gradshteyn u. Ryzhik 1994].

Die Magnetfeld-Komponenten X' , Y' und Z' in geozentrischen Koordinaten berechnen sich über die Funktionale:

$$X' = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi'} = -\sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) \frac{dP_n^m \sin \varphi'}{d\varphi'} \quad (\text{C.10})$$

$$Y' = -\frac{1}{r \cos \varphi'} \frac{\partial V}{\partial \lambda} = \frac{1}{\cos \varphi'} \sum_{n=1}^N \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (g_n^m(t) \sin m\lambda - h_n^m(t) \cos m\lambda) P_n^m \sin \varphi' \quad (\text{C.11})$$

$$Z' = \frac{\partial V}{\partial r} = -\sum_{n=1}^N (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) P_n^m \sin \varphi', \quad (\text{C.12})$$

vgl. ISO 16695, [Davis 2004], [Wertz 2012].

Die Umformung der geozentrischen kartesischen Magnetfeldkomponenten in den ellipsoidischen Rahmen erfolgt über:

$$X = X' \cos(\varphi' - \varphi) - Z' \sin(\varphi' - \varphi) \quad (\text{C.13})$$

$$Y = Y' \quad (\text{C.14})$$

$$Z = X' \sin(\varphi' - \varphi) + Z' \cos(\varphi' - \varphi) \quad (\text{C.15})$$

Die Deklination ergibt sich sodann nach:

$$D = \arctan \frac{Y}{X}. \quad (\text{C.16})$$

Die weiteren geomagnetischen Komponenten Inklination I , die Horizontalintensität H und die Totalintensität F lassen sich über:

$$I = \arctan \frac{Z}{H} \quad (\text{C.17})$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (\text{C.18})$$

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (\text{C.19})$$

bestimmen, vgl. ISO 16695, Kono [2010].

C.2 Zusammenhang Gebietsgröße und Deklinationsänderung

Die Untersuchungen anhand der internationalen Deklinationsrechner haben ergeben, dass innerhalb eines Gebietes von einer Bogenminute ($\Delta\varphi = \Delta\lambda = 1'$) für die Region der Bundesrepublik Deutschland die Deklination unterhalb einer Bogenminute in der Ebene liegt. Nachfolgend wird die dazu passende metrische Gebietsgröße auf der Erdoberfläche berechnet indem die Geometrie des Rotationsellipsoids herangezogen und die Strecke auf dieser Fläche in Nord-Süd- sowie Ost-West-Richtung berechnet wird.

Nord-Süd-Richtung:

Mit der großen Halbachse a (Äquatorhalbmesser) und dem Quadrat der ersten numerischen Exzentrizität $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ berechnet sich der Meridianbogen in Abhängigkeit der ellipsoidischen Breite zu

$$G(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} d\varphi, \quad (\text{C.20})$$

vgl. [Heck 2003].

Für das GRS80-Ellipsoid ergibt sich beispielsweise für Zentraldeutschland ($\varphi = 51^\circ$, $\lambda = 10^\circ$) und für einen Winkel $\Delta\varphi = 1'$ entlang des Meridians ein Bogenstück B_{N-S} mit

$$B_{N-S}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} d\varphi \quad (\text{C.21})$$

eine Bogenlänge von $B_{N-S}(51^\circ, 51^\circ 01') = 1.85 \text{ km}$.

Ost-West-Richtung:

Nach Heck [2003] errechnet sich der Parallelkreishalbmesser p des Rotationsellipsoids in Abhängigkeit von φ zu

$$p(\varphi) = \frac{a \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}}. \quad (\text{C.22})$$

Entlang des Parallelkreises ergibt sich für Zentraldeutschland für einen Winkel $\Delta\lambda = 1'$ und in Abhängigkeit der ellipsoidischen Breite ein Bogenstück B_{O-W} in Ost-West-Richtung nach:

$$B_{O-W}(\varphi, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{a \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} d\lambda \quad (\text{C.23})$$

mit der Bogenlänge $B_{O-W}(51^\circ, 10^\circ, 10^\circ 01') = 1.17 \text{ km}$.

D Rotationen, Translationen, Transformationen

Die Koordinaten der Geoobjekte sowie die Position als Teil der räumlichen Lage eines GeoARS können abstrakt als Punkte eines dreidimensionalen euklidischen Punktraumes aufgefasst werden. Die geometrischen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Punkten werden durch die in Abschnitt 3.6.2 eingeführten Koordinatensysteme realisiert, wobei geradlinige rechtwinklige (kartesische) Koordinatensysteme aber auch krummlinige Systeme verwendet werden, vgl. [Heck 2003] und [Heuser 1992].

D.1 Rotationen

Um Drehungen eines GeoARS zu beschreiben und damit die Ausrichtung des GeoARS bzw. die Blickrichtung der virtuellen Kamera zu definieren bzw. nachzuführen, werden bei GeoARS Beschreibungen über Euler-Winkel und teilweise Quaternionen (3D-Visualisierung/Computergraphik) eingesetzt.

D.1.1 Euler-Winkel

Beschreibungen von Drehungen im Raum mittels Euler-Winkeln weisen eine sehr anschauliche Form auf und werden regelmäßig zur Lösung fachlicher Aufgaben in der Geodäsie, Photogrammetrie und Navigation verwendet.

Dreidimensionale Drehungen im Raum können analytisch durch drei aufeinanderfolgende Elementardrehungen realisiert werden. Hierbei werden GeoARS mit separaten Drehwinkeln (Euler-Winkel) um die jeweilige Koordinatenachse gedreht. Die Reihenfolge der Drehungen ist nicht beliebig. Die Konzeption von GeoARS wurde an die Konvention der Normungen DIN EN ISO 9300 (Luftfahrt), DIN EN ISO 70000 (Automobilbau) und DIN EN ISO 8855 (Schifffahrt) angelehnt. Für die x-, y- und z-Achse ergeben sich folgende elementare Drehmatrizen, vgl. [Heck 2003] und [Farrell 2008]:

$$\mathbf{R}_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (\text{D.1})$$

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{D.2})$$

$$\mathbf{R}_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{D.3})$$

Durch aufeinanderfolgende Multiplikation der Elementardrehungen nach der Konvention

$$\mathbf{R}_{xyz}(\phi, \theta, \psi) = \mathbf{R}_x(\phi) \cdot \mathbf{R}_y(\theta) \cdot \mathbf{R}_z(\psi) \quad (\text{D.4})$$

erhält man:

$$\mathbf{R}_{xyz}(\phi, \theta, \psi) = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \theta \sin \phi \sin \psi & \cos \theta \sin \phi \\ \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (\text{D.5})$$

Hierdurch lässt sich beispielsweise die Rotationsmatrix \mathbf{C}_b^n realisieren, vgl. Abschnitt 7.12.3.2.

Die oben stehenden Rotationsmatrizen sind orthogonal und haben die Eigenschaft, dass ihre Transponierte \mathbf{R}^\top gleich der Inversen \mathbf{R}^{-1} ist: $\mathbf{R}^\top = \mathbf{R}^{-1}$, vgl. Heck [2003]. Mit dieser Eigenschaft lassen sich Rückdrehungen eines Systems umsetzen.

Eine vollständige Rückdrehung erhält man sodann über die Multiplikation ihrer Transponierten und Vertauschen der Reihenfolge $\mathbf{R}_z^{-1}(\psi) \cdot \mathbf{R}_y^{-1}(\theta) \cdot \mathbf{R}_x^{-1}(\phi)$. Diese Möglichkeit wird beispielsweise bei der Live-Bild-Korrektur im Abschnitt 7.10.1 verwendet.

D.1.2 Überführung von Euler-Winkeln in Quaternionen

Für das „GeoARS-Unfallaufnahme“ erfolgt die Berechnung der Rotationen der virtuellen Kamera durch Quaternionen. Das Quaternion ist eine Vierheit, d.h. eine Größe, die aus vier Komponenten besteht und wurde 1843 vom irischen Mathematiker Sir William Rowan Hamilton in die Mathematik eingeführt, vgl. [Bronstein u. Semendyayew 2008]. Gemäß der Extensible 3D Feld-Typen Referenz [Web3D Consortium 2013] werden Rotationen in X3D mit Hilfe einer Drehachse und einem Drehwinkel um diese Achse vollzogen. Die Drehachse wird durch einen normalisierten dreidimensionalen Vektor $\boldsymbol{\mu}$ beschrieben und der Drehwinkel um diese Achse im Bogenmaß angegeben [Web3D Consortium 2013]. Die gegenseitige Überführung von Euler-Winkeln in ein Quaternion \mathbf{q} wird nach Titterton u. Weston [2004], Farrell [2008] und Bell [1996] über nachfolgende Zusammenhänge realisiert:

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\mu}{2} \\ \frac{\mu_x}{\mu} \sin \frac{\mu}{2} \\ \frac{\mu_y}{\mu} \sin \frac{\mu}{2} \\ \frac{\mu_z}{\mu} \sin \frac{\mu}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{D.6})$$

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{D.7})$$

Ein Auszug aus dem Quellcode für die Realisierung des „GeoARS-Unfallaufnahme“ ist nachfolgend dargestellt:

```
1 ...
2     public Double x3d_x, x3d_y, x3d_z, x3d_a;
3
4     // 'Wertzuweisung mit Sensorwerten
5     // 'Achtung: al=be=ga=0.0 Lösung nicht def.
6     Double al, be, ga;
7     al = Alpha;
8     be = Beta;
9     ga = Gamma;
10
11    // 'Achsen um die gedreht werden soll; x = 1 =>um die x3d-X-Achse; y = 1 => um die x3d-Y-
12        Achse; z = 1 => um die x3d-Z-Achse
13    int x, y, z;
14
15    // 'Aufstellung Quaternionen für die Drehung um die x3d-X-Achse
16    x = 1;
17    y = 0;
18    z = 0;
19
20    Double[] q1 = new Double[5];
21    q1[1] = x * Math.Sin(al / 2);
22    q1[2] = y * Math.Sin(al / 2);
23    q1[3] = z * Math.Sin(al / 2);
24    q1[4] = Math.Cos(al / 2);
25
26    // 'Aufstellung Quaternionen für die Drehung um die x3d-Z-Achse
27    x = 0;
28    y = 0;
29    z = 1;
30
31    Double[] q2 = new Double[5];
32    q2[1] = x * Math.Sin(be / 2);
33    q2[2] = y * Math.Sin(be / 2);
34    q2[3] = z * Math.Sin(be / 2);
35    q2[4] = Math.Cos(be / 2);
36
37    // 'Berechnung q3 aus q2 und q1
38    Double[] q3 = new Double[5];
39    q3[1] = q2[4] * q1[1] + q2[1] * q1[3] + q2[2] * q1[3] - q2[3] * q1[2];
40    q3[2] = q2[4] * q1[2] + q2[2] * q1[4] + q2[3] * q1[1] - q2[1] * q1[3];
41    q3[3] = q2[4] * q1[3] + q2[3] * q1[4] + q2[1] * q1[2] - q2[2] * q1[1];
42    q3[4] = q2[4] * q1[4] - q2[1] * q1[1] - q2[2] * q1[2] - q2[3] * q1[3];
43
44    // 'Aufstellung Quaternionen für die Drehung um die x3d-Y-Achse
45    x = 0;
46    y = 1;
47    z = 0;
48
49    Double[] q4 = new Double[5];
50    q4[1] = x * Math.Sin(ga / 2);
51    q4[2] = y * Math.Sin(ga / 2);
52    q4[3] = z * Math.Sin(ga / 2);
53    q4[4] = Math.Cos(ga / 2);
```

```

53
54     //Berechnung q5 aus q4 und q3
55     Double[] q5 = new Double[5];
56     q5[1] = q4[4] * q3[1] + q4[1] * q3[3] + q4[2] * q3[3] - q4[3] * q3[2];
57     q5[2] = q4[4] * q3[2] + q4[2] * q3[4] + q4[3] * q3[1] - q4[1] * q3[3];
58     q5[3] = q4[4] * q3[3] + q4[3] * q3[4] + q4[1] * q3[2] - q4[2] * q3[1];
59     q5[4] = q4[4] * q3[4] - q4[1] * q3[1] - q4[2] * q3[2] - q4[3] * q3[3];
60
61
62     //Berechnung der Einheitsvektoren und des Drehwinkels um den Vektor
63     Double mag_mue, x_mue, y_mue, z_mue;
64     mag_mue = Math.Acos(q5[4]) * 2;
65     x_mue = q5[1] / Math.Sin(mag_mue / 2);
66     y_mue = q5[2] / Math.Sin(mag_mue / 2);
67     z_mue = q5[3] / Math.Sin(mag_mue / 2);
68
69     x3d_a = mag_mue;
70     x3d_x = x_mue;
71     x3d_y = y_mue;
72     x3d_z = z_mue;
73
74     ...

```

Quelltext D.1: (C#) Überführung von Euler-Winkel in Quaternion

D.2 Transformationen

Bei Koordinatentransformationen wird zwischen Umformungen und Umrechnungen unterschieden, wobei **Umrechnungen** die Koordinatentransformationen mittels direkter algebraischer Beziehungen vollziehen und keine Stützpunkte benötigen, während **Umformungen** auf das Vorhandensein von Stützpunkten basieren und damit die Überführung von Koordinaten durch einen Bezugssystemwechsel gemeint ist, vgl. [Fröhlich u. a. 2000].

Beide Arten von Koordinatentransformationen werden bei GeoARS benötigt, Umrechnungen z.B. bei der Überführung von ellipsoidischen in kartesische Koordinaten (vgl. Abschnitt 3.6.2.2) und Umformungen u.a. im Rahmen der 14-Parametertransformation (vgl. Abschnitt 7.12.6).

Für Umformungen wird bei GeoARS die räumliche Ähnlichkeitstransformation verwendet, um die Koordinaten eines Punktes vom Ausgangsbezugssystem mit dem Index A in das Ziel-Bezugssystem mit dem Index B zu transformieren, vgl. [Heck 2003]:

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + m \cdot (\mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_1) \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} \quad (\text{D.8})$$

Hierbei bedeuten

- X_A, Y_A, Z_A : Koordinaten des Punktes im Ausgangssystem
- X_B, Y_B, Z_B : Koordinaten des Punktes im Zielsystem

- $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$: Translationen
- $\mathbf{R}_3, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_1$: Rotationen, vgl. Abschnitt D.1.1
- m : Maßstabsfaktor

} Transformationsparameter

Die Umrechnung ellipsoidischer Koordinaten (φ, λ, h) in kartesische Koordinaten (X, Y, Z) erfolgt über:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \varphi \sin \lambda \\ \left(\frac{N}{1+e'^2} + h\right) \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (\text{D.9})$$

vgl. [Heck 2003].

Bei der Umrechnung von kartesischen Koordinaten (X, Y, Z) in ellipsoidische Koordinaten (φ, λ, h) berechnet sich die ellipsoidische Länge λ zunächst nach Heck [2003] und Fröhlich u. a. [2000] über:

$$\lambda = \arcsin \frac{X}{p}. \quad (\text{D.10})$$

- p : Hilfsgröße $p = \sqrt{X^2 + Y^2}$

Die Bestimmung der ellipsoidischen Breite φ des Punktes erhält man über eine iterative Verfahrensweise, vgl. [Heck 2003] und Fröhlich u. a. [2000] mit den Hilfsgrößen:

- c : Polkrümmungsradius des Referenzellipsoids $c = \frac{a^2}{b}$
- a, b : große und kleine Halbachse des Referenzellipsoids
- e' : zweite numerische Exzentrizität $e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$
- N : Querkrümmungsradius
- $\varphi_{[0]}$: Startwert für ellipsoidische Breite $\varphi_{[0]} = \arctan \left(\frac{Z(1+e'^2)}{p} \right)$

nach folgendem Iterationsschema mit dem Laufindex i :

$$N_{[i]} = \frac{c}{\sqrt{1 + e'^2 \cos^2 \varphi_{[i-1]}}} \quad (\text{D.11})$$

$$h_{[i]} = \frac{p}{\cos \varphi_{[i-1]}} - N_{[i]} \quad (\text{D.12})$$

$$\varphi_{[i]} = \arctan \left(\frac{z(1+e'^2)}{p} \left(1 + e'^2 \cdot \frac{h_{[i]}}{N_{[i]} + h_{[i]}} \right)^{-1} \right) \quad (\text{D.13})$$

Für die Berechnungen und Visualisierungen in GeoARS wird weiterführend eine Verebnung der ellipsoidischen Koordinaten in ebene UTM-Koordinaten notwendig, vgl. Abschnitt 3.6.2.3 (r-System) und 3.6.2.4 (w-System).

Hierzu werden die u.a. in Becker u. Hehl [2012], Heck [2003], Schödlbauer [1981], Schödlbauer [1982], Fröhlich u. a. [2000], AdV [2012] publizierten Formeln angewendet und zunächst der Nordwert x berechnet:

$$\begin{aligned}
x &= G(\varphi) \\
&+ \frac{t}{2} N \cdot \cos^2 \varphi \Delta \lambda^2 \\
&+ \frac{t}{24} N \cdot \cos^4 \varphi \cdot (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) \cdot \Delta \lambda^4 \\
&+ \frac{t}{720} N \cdot \cos^6 \varphi \cdot (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330\eta^2 - 330t^2\eta^2) \cdot \Delta \lambda^6 \\
&+ \frac{t}{40320} N \cdot \cos^8 \varphi \cdot (1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6) \cdot \Delta \lambda^8.
\end{aligned} \tag{D.14}$$

Dabei wird die Meridianbogenlänge $G(\varphi)$ benötigt und nach:

$$\begin{aligned}
G(\varphi) &= c \left(1 - e'^2 \frac{3}{4} + e'^4 \frac{45}{64} - e'^6 \frac{175}{256} + e'^8 \frac{11025}{16384} - e'^{10} \frac{43659}{65536} \right) \cdot \varphi \\
&+ c \left(-e'^2 \frac{3}{8} + e'^4 \frac{15}{32} - e'^6 \frac{525}{1024} + e'^8 \frac{2205}{4096} - e'^{10} \frac{72765}{131072} \right) \cdot \sin 2\varphi \\
&+ c \left(e'^4 \frac{15}{256} - e'^6 \frac{105}{1024} + e'^8 \frac{2205}{16384} - e'^{10} \frac{10395}{65536} \right) \cdot \sin 4\varphi \\
&+ c \left(-e'^6 \frac{35}{3072} + e'^8 \frac{315}{12288} - e'^{10} \frac{31185}{786432} \right) \cdot \sin 6\varphi \\
&+ c \left(e'^8 \frac{315}{131072} - e'^{10} \frac{3465}{524288} \right) \cdot \sin 8\varphi \\
&+ c \left(-e'^{10} \frac{693}{1310720} \right) \cdot \sin 10\varphi
\end{aligned} \tag{D.15}$$

berechnet. Für die rekursive Form der Meridianbogenberechnung wird auf Hehl [2005] in Verbindung mit Klotz [1993], Klotz [1991] verwiesen.

Der ellipsoidische Längenunterschied $\Delta\lambda$, der Hauptmeridian λ_0 , die Nummer der UTM-Zone NR und die Hilfsgröße t berechnen sich nach Schödlbauer [1982] und Fröhlich u. a. [2000] mit:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \tag{D.16}$$

$$\lambda_0 = (\text{NR} - 31) \cdot 6^\circ + 3^\circ \tag{D.17}$$

$$\text{NR} = 31 + \frac{\lambda^\circ}{6^\circ} \tag{D.18}$$

$$t = \tan(\varphi). \tag{D.19}$$

Es ist zu beachten, dass das Ergebnis der Berechnung von NR auf die nächste Ganzzahl abzurunden ist. Mit den vorgenannten Größen errechnet sich der vom Meridianbogen unabhängige Rechtswert y zu:

$$\begin{aligned}
y &= N \cdot \cos \varphi \\
&+ \frac{1}{6} N \cdot \cos^3 \varphi \cdot (1 - t^2 + \eta^1) \cdot \Delta \lambda^3 \\
&+ \frac{1}{120} N \cdot \cos^5 \varphi \cdot (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2) \cdot \Delta \lambda^5 \\
&+ \frac{1}{5040} N \cdot \cos^7 \varphi \cdot (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) \cdot \Delta \lambda^7.
\end{aligned} \tag{D.20}$$

Abschließend ergeben sich die UTM-Koordinaten *Ost* (*East*) und *Nord* (*North*) mit dem Maßstabsfaktor $m = 0.9996$ zu:

$$\begin{aligned} Ost &= m \cdot y + 500000 + NR \cdot 10^6 \\ Nord &= m \cdot x. \end{aligned} \tag{D.21}$$

E Übersicht einbezogener/untersuchter Komponenten

Tabelle E.1: Übersicht über die einbezogenen Softwarekomponenten

Komponente	Hersteller (Produktbezeichnung)
Entwicklungsumgebung	Microsoft (Visual Studio 2013)
Entwicklungsumgebung	Eclipse Foundation (Eclipse)
Entwicklungsumgebung	Google (Android Studio)
3D-Viewer	Bitmanagement (BS Contact)
3D-Viewer	Open Handset Alliance (Android OpenGL-Eigenentwicklung)
OCX-Steuerelement	Bitmanagement (BSContact Control)
Datenbankmanagementsystem	Refractions Research (PostGIS) in Verbindung mit PostgreSQL
Datenmodellierung	SparxSystems (Enterprise Architect)

Tabelle E.2: Übersicht über die einbezogenen/untersuchten Module und Einzelkomponenten

Komponente/Modul	Hersteller (Produktbezeichnung)
Modulreihe .NET Micro Framework / .NET Gadgeteer:	
Trägerplattform	GHI Electronics (FEZ Spider)
Trägerplattform	GHI Electronics (FEZ Raptor)
Beschleunigung	Freescale (MMA7455L)
Kompass	Honeywell (HMC5883L)
Barometer	Hope Microelectronics (HP03M)
Kreisel	InvenSense (ITG-3200)
Modulreihe Tinkerforge:	
Beschleunigung/Kompass/Kreisel	STMicroelectronics (LSM303), InvenSense (ITG-3200)
Beschleunigung/Kompass/Kreisel	Bosch (BNO055)
Schrittmotorsteuerung	Texas Instruments (DRV8811)
weitere:	
Kamera	Sony (DSC-QX10)
Kamera	Sony (DSC-QX100)
Laser-Entfernungsmesser	Milesee (L2)
GNSS	u-blox (NEO-6)

Tabelle E.3: Übersicht über die einbezogenen/untersuchten Kompaktgeräte und Displays

Komponente	Hersteller (Produktbezeichnung)	Smartphone	Tablet
Mobilgerät	Acer (Iconia W700P)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Mobilgerät	Lenovo (ThinkPad8)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Mobilgerät	Samsung (GT-I9300)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mobilgerät	Samsung (GT-I9250)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mobilgerät	LG (Nexus 4)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mobilgerät	LG (Nexus 5)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mobilgerät	Sony (Experia ST23)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mobilgerät	Motorola (Moto G)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

≙ ja | ≙ nein

Tabelle E.4: Übersicht über die einbezogenen zusätzlichen Komponenten

Komponente	Hersteller (Produktbezeichnung)	Hardware	Software	intern	extern
GNSS	Trimble (SPS351 Kit, 5800II, R8)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
GNSS	Trimble (R10)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
RTK-Software	Trimble (TerraSync)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

≙ ja | ≙ nein

F Ergänzende Quelltexte

F.1 Pixel-Schattierer-A

```

1  ...
2  //Pixel-Schattierer
3  ...
4  uniform samplerExternalOES u_liveBild; //wird aus der GeoARS-Applikation übergeben
5  uniform sampler2D u_referenzBild; //wird aus der GeoARS-Applikation übergeben
6  uniform float u_SWG_r; //wird aus der GeoARS-Applikation übergeben
7  varying vec2 vTexCoord;
8  ...
9  float dimensionBildkante_LBy = 585.0;
10 float einPixelFaktor_LBy = 1.0/dimensionBildkante_LBy;
11 float dimensionBildkante_LBx = 780.0;
12 float einPixelFaktor_LBx = 1.0/dimensionBildkante_LBx;
13 float dimensionBildkante_RB = 41.0;
14 float einPixelFaktor_RB = 1.0/dimensionBildkante_RB;
15 ...
16 void main() {
17 vec2 vec2D_TexturKoordinate = vTexCoord;
18 vec2 position = vTexCoord;
19 ...
20 //Pixel mit dem Grauwert des liveBildes vorbelegen (alle Kanäle)
21 gl_FragColor = texture2D(u_liveBild, vec2D_TexturKoordinate);
22 ...
23 //Analysebereich auf 40x40 Pixel beschränken
24 float dimensionAnalyseViereck = 20.0;
25 if( position.x >= ((dimensionBildkante_LBx/2.0 -dimensionAnalyseViereck) * einPixelFaktor_LBx) &&
    position.x <= ((dimensionBildkante_LBx/2.0 +dimensionAnalyseViereck) * einPixelFaktor_LBx) ){
26 if( position.y >= ((dimensionBildkante_LBy/2.0 -dimensionAnalyseViereck) * einPixelFaktor_LBy) &&
    position.y <= ((dimensionBildkante_LBy/2.0 +dimensionAnalyseViereck) * einPixelFaktor_LBy) )
    {
27 ...
28 float referenzMatrix_r[25];
29 float suchMatrix_r[25];
30 int lfdNr = 0;
31 //zunächst für den roten Kanal
32 for (int i=-7; i<8; i++){
33 float _i = float(i);
34 for (int j=-0; j<1; j++){
35 float _j = float(j);
36 referenzMatrix_r[lfdNr] = texture2D(u_referenzBild, vec2( (0.5+_j*einPixelFaktor_RB), (0.5+_i
    *einPixelFaktor_RB) ) ).r;"+
37 suchMatrix_r[lfdNr] = texture2D(u_liveBild, vec2(position.x+(_j*einPixelFaktor_LBx), position
    .y+(_i*einPixelFaktor_LBy)) ).r;"+
38 lfdNr = lfdNr + 1;
39 }
40 }
41
42 for (int i=-0; i<1; i++){
43 float _i = float(i);
44 for (int j=-5; j<5; j++){
45 float _j = float(j);
46 referenzMatrix_r[lfdNr] = texture2D(u_referenzBild, vec2( (0.5+_j*einPixelFaktor_RB), (0.5+

```

```

        _i*einPixelFaktor_RB) ) ).r;"+
47     suchMatrix_r[lfdNr] = texture2D(u_liveBild, vec2(position.x+(_j*einPixelFaktor_LBx),
        position.y+(_i*einPixelFaktor_LBy) ) ).r;"+
48     lfdNr = lfdNr + 1;
49     }
50 }
51 //Für die beiden anderen Kanäle analog dazu verfahren
52 ...
53 //Beginn anzahlAehnlicheGrauwerte_r ermitteln: roter Kanal
54 float SWG_r = u_SWG_r;
55 int ja = 0;
56 float diff_[25];
57 for (int i=0; i<25; i++){
58     diff_r[i] = abs(suchMatrix_r[i] - referenzMatrix_r[i]);
59     if(diff_[i] < SWG_r){
60         anzahlAehnlicheGrauwerte_r = anzahlAehnlicheGrauwerte_r + 1;
61     }
62 }
63 //Ende anzahlAehnlicheGrauwerte_r ermitteln: roter Kanal
64 //Für die beiden anderen Kanäle analog dazu verfahren
65 ...
66 //Farbcodierung des Hauptpixels im liveBild:
67 if( anzahlAehnlicheGrauwerte_r == 25 && anzahlAehnlicheGrauwerte_g == 25 &&
        anzahlAehnlicheGrauwerte_b == 25 ){
68     gl_FragColor = vec4(1.0, 0.0, 1.0, 0.0);
69     if( position.x >= (dimensionBildkante_LBx/2.0)*einPixelFaktor_LBx && position.x < (
        dimensionBildkante_LBx/2.0+1.0)*einPixelFaktor_LBx ){
70         if( position.y >= (dimensionBildkante_LBy/2.0)*einPixelFaktor_LBy && position.y < (
        dimensionBildkante_LBy/2.0+1.0)*einPixelFaktor_LBy ){
71             gl_FragColor = vec4(1.0, 1.0, 0.0, 0.0);
72         }
73     }
74 }
75
76 } //end if position.x Analysebereich
77 } //end if position.y Analysebereich
78 } //end main() Pixel-Schattierer
79 ...

```

Quelltext F.1: (GLSL) Pixel-Schattierer-A

G Stichprobe Befragung Fachanwender der Geoinformation

Am 11. März 2015 veranstaltete die kommunale Arbeitsgemeinschaft zur technikerunterstützten Informationsverarbeitung (TUIV-AG) den jährlich stattfindenden GIS-Arbeitskreis. Der Arbeitskreis richtet sich an GIS-Koordinatoren und Technikverantwortliche speziell aus den „raumbezogenen“ Fachämtern der Kommunen Brandenburgs. 71 GIS-Koordinatoren und technisch verantwortliche Fachanwender aus 55 unterschiedlichen Institutionen nahmen in Frankfurt/O. teil, vgl. Tabelle G.1. Parallel zu dem gehaltenen Vortrag zum Thema Augmented Reality wurde ein Fragebogen verteilt. 45 Personen beantworteten u.a. auch die elementare Frage, ob dem Befragten bzw. der Befragten vor dem Referat der Begriff „Augmented Reality“ bekannt war. Etwa 64 % ist der Begriff noch nicht geläufig gewesen. Bei einem GIS-Workshop des Verbands Deutscher Vermes-

Tabelle G.1: Stichprobe Begriffsbekanntheit „Augmented Reality“ (11.03.2015)

War den Teilnehmern vor der Veranstaltung der Begriff „Augmented Reality“ bekannt?	%
ja	36
nein	64
Teilnehmerkreis	%
Landkreis	16
Stadt	38
Gemeinde	20
sonstige Landesbehörde	7
anonym/will nicht erkannt werden	15

sungsingenieure e.V. (Berufsverband für Geodäsie und Geoinformatik) mit dem Thema „Geographisches Informationssystem - Von Google Maps bis Holodeck von Raumschiff Enterprise - Release 2.0“ in Berlin am 9. März 2016 wurde ein weiteres Referat zur „Augmented Reality“ gehalten und die Befragung von oben wiederholt. Am Workshop nahmen 34 Personen teil, von den ca. die Hälfte den Fragebogen beantwortet hat. Die einleitende Frage, ob den Teilnehmern vor dem Referat der Begriff „Augmented Reality“ bekannt war wurde von etwa 60 % der Befragten mit „ja“ beantwortet.

Tabelle G.2: Stichprobe Begriffsbekanntheit „Augmented Reality“ (09.03.2016)

War den Teilnehmern vor der Veranstaltung der Begriff „Augmented Reality“ bekannt?	%
ja	60
nein	40
Teilnehmerkreis	%
Vermessungsbüro	41
Versorgungsunternehmen	23
Stadt	12
anonym/will nicht erkannt werden	6

Literaturverzeichnis

- [Abramowitz u. Stegun 1972] ABRAMOWITZ, M. ; STEGUN, I.A.: *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1972
- [AdV 2009] ADV: *Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok) Hauptdokument Version 6.0.1*. Verfügbar unter:
<http://www.adv-online.de/AAA-Modell/Dokumente-der-GeoInfoDok/binarywriterservlet?imgUid=8f830072-8de8-9221-d5ad-8f138a438ad1&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>. 2009, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
- [AdV 2012] ADV: *Bundeseinheitliche Transformation für ATKIS (BeTA2007)*. 2012. Verfügbar unter:
http://crs.bkg.bund.de/crseu/crs/desctrans/BeTA/de_dhdn2etrs_beta.php, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
- [AdV 2014] ADV: *Das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)*. 2014. Verfügbar unter:
<http://www.adv-online.de/Geodaetische-Grundlagen/ETRS89/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
- [AdV 2015a] ADV: *AFIS-ALKIS-ATKIS-Modell*. 2015. Verfügbar unter: <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/ALKIS/broker.jsp?uMen=0a170f15-8e71-3c01-e1f3-351ec0023010>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
- [AdV 2015b] ADV: *Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok) Hauptdokument Version 7.0.2*. Verfügbar unter:
<http://www.adv-online.de/AAA-Modell/Dokumente-der-GeoInfoDok/binarywriterservlet?imgUid=85860f61-34ab-4a41-52cf-b581072e13d6&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>. 2015, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)
- [Aggarwal u. a. 2010] AGGARWAL, Priyanka ; SYED, Zainab ; NOURELDIN, Aboelmagd ; EL-SHEIMY, Nasar: *MEMS-Based Integrated Navigation*. Boston London: Artech House, 2010
- [Altamimi u. a. 2011] ALTAMIMI, Zuheir ; MÉTIVIER, Laurent ; COLLILIEUX, Xavier ; INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN), Institut de Physique du Globe de Paris (. (Hrsg.): *ITRF2008 plate motion model*. 2011. Verfügbar unter:
http://acc.igs.org/trf/itrf2008-plate-motion_egullposter.pdf, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Forschungsbericht
- [Andrae u. a. 2009] ANDRAE, Christine ; FITZKE, Jens ; ZIPF, Alexander: *OpenGIS essentials: Spatial Schema*. Heidelberg: Wichmann, 2009
- [Andrae u. a. 2013] ANDRAE, Christine ; FITZKE, Jens ; ZIPF, Alexander: *OpenGIS essentials: Simple Features*. Berlin: Wichmann, 2013
-

- [Apple Inc. 2016] APPLE INC.: *Metal for Developers*. Verfügbar unter: <https://developer.apple.com/metal/>. 2016, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Arena Com 2016] ARENA COM (Hrsg.): *Phone finder*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.gsmarena.com/search.php3>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [ArgeLandentwicklung 2014] ARGELANDENTWICKLUNG: *EA-WEB Modell*. 2014. Verfügbar unter: http://tzmz.service24.rlp.de/lefisdaten/webmodell_1505/index.htm, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Landentwicklung (ArgeLandentwicklung)
- [ArgeLandentwicklung 2016a] ARGELANDENTWICKLUNG: *Dokumente Landentwicklungsfachinformationssystem LEFIS*. 2016. Verfügbar unter: <http://tzmz.service24.rlp.de/pls/apex/f?p=105:6:0::NO>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Landentwicklung (ArgeLandentwicklung)
- [ArgeLandentwicklung 2016b] ARGELANDENTWICKLUNG: *Landentwicklungsfachinformationssystem LEFIS*. 2016. Verfügbar unter: <https://www.landentwicklung.de/informationssysteme-und-geodaten/lefis/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Nachhaltige Landentwicklung (ArgeLandentwicklung)
- [Azuma 1997] AZUMA, Ronald: A Survey of Augmented Reality. In: *Presence* 6 (1997), Nr. 4, S. 355–385
- [Azuma u. a. 2001] AZUMA, Ronald ; BAILLOT, Yohan ; BEHRINGER, Reinhold ; FEINER, Steven ; JULIER, Simon ; MACINTYRE, Blair: Recent Advances in Augmented Reality. In: *IEEE ComputerGraphics* 21 (2001), Nr. 6, S. 34–47
- [Bäcker u. a. 2014] BÄCKER, Sascha ; KREUZIGER, Ulf ; WAGNER, Anja ; WIENAND, Tobias: Implementierung von LEFIS im Land Brandenburg. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 139 (2014), Nr. 5, S. 292–301
- [Bähler u. Stark 2012] BÄHLER, Lukas ; STARK, Hans-Jörg: Augmented Reality auf Smartphones in der Bauplanung. In: *Angewandte Geoinformatik* (2012), S. 250–259
- [Balzert 2011] BALZERT, Heide: *Lehrbuch der Objektmodellierung*. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011
- [Bauer 2011] BAUER, Manfred: *Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. Wichmann, 2011
- [Becker u. Hehl 2012] BECKER, Matthias ; HEHL, Klaus: *Geodäsie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2012
- [Bell 1996] BELL, Gavin: *Convert axis/angle to quaternion form*. 1996. Verfügbar unter: http://archive-org.com/org/c/crispen.org/2013-03-28_1737860_15/Quaternion_Operator/, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Bernstein 2014] BERNSTEIN, Herbert: *Messelektronik und Sensoren*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [Bill 2016] BILL, Ralf: *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. 6. Auflage. Berlin: Wichmann, 2016
-

- [Bill u. Zehner 2001] BILL, Ralf ; ZEHNER, Marco: *Lexikon der Geoinformatik*. Heidelberg: Herbert Wichmann, 2001
- [Bimber u. Raskar 2005] BIMBER, Oliver ; RASKAR, Ramesh: *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. Wellesley: A K Peters, 2005
- [BKG 2016a] BKG: *Description of CRS - ETRS89-XYZ*. 2016. Verfügbar unter: http://crs.bkg.bund.de/crseu/crs/eu-description.php?crs_id=Y0VUU1M4OS1YWVo=, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- [BKG 2016b] BKG: *Grenzen aufheben mit INSPIRE - Nutzung von Geodaten in ganz Europa*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.geoportal.de/DE/GDI-DE/INSPIRE/inspire.html?lang=de>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- [BKG 2016c] BKG: *Koordinatenreferenzsysteme - Coordinate Reference Systems*. 2016. Verfügbar unter: http://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/Steckbrief_Koordinatensysteme.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- [BKG 2016d] BKG: *WebAtlasDE*. 2016. Verfügbar unter: http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=4&gdz_anz_zeile=4&gdz_user_id=0#dok, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- [Born u. a. 2004] BORN, Marc ; HOLZ, Eckhardt ; KATH, Olaf: *Softwareentwicklung mit UML 2*. München: Addison-Wesley, 2004
- [Borre u. Strang 2012] BORRE, Kai ; STRANG, Gilbert: *Algorithms for Global Positioning*. Wellesley, Massachusetts, USA: Wellesley-Cambridge Press, 2012
- [Borrmann u. a. 2015] BORRMANN, André ; KÖNIG, Markus ; KOCH, Christian ; BEETZ, Jakob: *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [Boucher u. Altamimi 1992] BOUCHER, Claude ; ALTAMIMI, Zuheir: The EUREF Terrestrial Reference System and its First Realizations. In: *Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung* (1992), Nr. 52, S. 205–213
- [Boucher u. Altamimi 2011] BOUCHER, Claude ; ALTAMIMI, Zuheir: Specification for reference frame fixing in the analysis of a EuREF GPS campaign. 2011. Verfügbar unter: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-v8.pdf>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. 2011. – Memo. – Version 8: 18-0-5-2011
- [Bowman u. a. 2004] BOWMAN, Doug ; KRUIJFF, Ernst ; LAVIOLA, Joseph ; POUPYREV, Ivan: *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Redwood City, CA, USA: Addison Wesley, 2004
- [Breidenbach 2002] BREIDENBACH, Raphael: *Umweltschutz in der betrieblichen Praxis: Erfolgsfaktoren zukunftsorientierten Umweltengagements Ökologie - Gesellschaft - Ökonomie*. 2. Auflage. Gabler Verlag, 2002
- [Brinkhoff 2013] BRINKHOFF, Thomas: *Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis: Einführung in objektrelationale Geodatenbanken unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial*. Berlin: Wichmann, 2013
-

- [Brinkhoff 2014] BRINKHOFF, Thomas: Ein leichtgewichtiger, standardorientierter Zugriffsmechanismus auf Geometrieobjekte in Geodatenbanksystemen. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.* (2014), Nr. 23, S. 1–9. – 34. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), 62. Deutscher Kartographentag der Deutschen Gesellschaft für Kartographie (DGfK), Geoinformatik 2014 der Gesellschaft für Geoinformation (GfGI) und Geoinformation in Norddeutschland (GiN)
- [Bronstein u. Semendiyayew 2008] BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDYAYEW, Konstantin A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 7. Auflage. Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 2008
- [Bronstein u. a. 2015] BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDYAYEW, Konstantin A. ; MUSIOL, Gerhard ; MÜHLIG, Heiner: *Handbook of Mathematics*. 6. Auflage. Berlin: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 2015
- [Broschart u. Zeile 2014] BROSCHEART, Daniel ; ZEILE, Peter: Augmented Reality in Architektur und Stadtplanung - Techniken und Einsatzfelder. In: *Angewandte Geoinformatik* (2014), S. 638–646
- [Brutzman 2016] BRUTZMAN, Don: *Applications, Players and Plugins for X3D / VRML Viewing*. Verfügbar unter: <http://www.web3d.org/x3d/content/examples/X3dResources.html>. 2016, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Brutzman u. Daly 2007] BRUTZMAN, Don ; DALY, Leonard: *X3D Extensible 3d Graphics for Web Authors*. San Francisco: Elsevier, 2007
- [Bundock 2012] BUNDOCK, Mike: *Augview*. 2012. Verfügbar unter: <http://www.augview.net/English/company.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Campbell u. a. 2004] CAMPBELL, James ; GÖRRES, Barbara ; SIEMES, Matthias ; WIRSCH, Jans ; BECKER, Matthias: Zur Genauigkeit der GPS-Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren. In: *AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 1 (2004), S. 2–11
- [Caruso 2000] CARUSO, Michael: Applications of magnetic sensors for low cost compass systems. In: *Proceedings of IEEE Positioning, Location and Navigation Symposium (PLANS)* (2000), S. 177–184
- [Caudell u. Mizell 1992] CAUDELL, Thomas ; MIZELL, David: Augmented Reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: *Proceedings of 25th International Conference on Systems Science* (1992), S. 659–669
- [Chulliat u. a. 2015] CHULLIAT, A. ; MACMILLAN, S. ; ALKEN, P. ; BEGGAN, C. ; NAIR, M. ; HAMILTON, B. ; WOODS, A. ; RIDLEY, V. ; MAUS, S. ; THOMSON, A.: The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020 Technical Report. In: *National Geophysical Data Center, NOAA* (2015). Verfügbar unter: http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2015/WMM2015_Report.pdf, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – DOI: 10.7289/V5TB14V7
- [Custer 2011] CUSTER, Adrian: *GeoAPI 3.0 Implementation Standard*. 2011. Verfügbar unter: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=39397, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Open Geospatial Consortium (OGC)
- [Dähne 2008] DÄHNE, Patrick: *Entwurf eines Rahmensystems für mobile Augmented-Reality-Anwendungen*, Universität Darmstadt, Dissertation, 2008
-

- [Davis 2004] DAVIS, Jeremy: *Mathematical Modeling of Earths Magnetic Field*. 2004. Verfügbar unter: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.459.2794&rep=rep1&type=pdf>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Virginia Tech Report
- [Davis 2015] DAVIS, Martin: *JTS Topology Suite*. 2015. Verfügbar unter: <http://tsusiatssoftware.net/jts/main.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Vivid Solutions
- [Dörner u. a. 2014] DÖRNER, Ralf ; BROLL, Wolfgang ; GRIMM, Paul ; JUNG, Bernhard: *Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Berlin Heidelberg: Springer, 2014
- [DVW 2014] DVW: *DVW GIS Best Practic Award 2014: Entwicklung einer Augmented Reality für Geodaten*. 2014. Verfügbar unter: <http://www.dvw.de/aktuelles/17603/mit-deich-app-und-geodaten-freiwillige-hilfe-organisieren>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Pressemitteilung
- [El-Sheimy u. Niu 2007] EL-SHEIMY, Naser ; NIU, Xiaoji: The Promise of MEMS to the Navigation Community. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57 (2007), Nr. 1, S. 140–149
- [Esfandyari u. a. 2011] ESFANDYARI, Jay ; DE NUCCIO, De N. ; XU, Gang: Solutions for MEMS sensor fusion. In: *Solid State Technology* 54 (2011), Nr. 7, S. 18–21
- [Eysel 2001] EYSEL, Ulf: Sehsystem. In: KLINKE, Rainer (Hrsg.) ; SILBERNAGL, Stefan (Hrsg.): *Lehrbuch der Physiologie*. 15. Auflage. Stuttgart: Thieme, 2001, S. 177–203
- [Farrell 2008] FARRELL, Jay: *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors*. New York: McGraw-Hill, 2008
- [Feiner u. a. 1993] FEINER, Steven ; MACINTYRE, Blair ; HAUPT, Marcus ; SOLOMON, Eliot: Windows on the World: 2D Windows for 3D Augmented Reality. In: *Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (1993), S. 145–155
- [Felger 1995] FELGER, Wolfgang: *Innovative Interaktionstechniken in der Visualisierung*. Berlin Heidelberg: Springer, 1995
- [Fenn u. Linden 2005] FENN, Jackie ; LINDEN, Alexander: *Gartner's Hype Cycle Special Report for 2005*. 2005. Verfügbar unter: <https://www.gartner.com/doc/484424/gartners-hype-cycle-special-report#1169528434>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Fenn u. Raskino 2008] FENN, Jackie ; RASKINO, Mark: *Mastering the Hype Cycle: How to Choose the Right Innovation at the Right Time*. Boston, Massachusetts: Harvard Business Review Press, 2008
- [Fettke 2009] FETTKE, Peter: Ansätze der Informationsmodellierung und ihre betriebswirtschaftliche Bedeutung: Eine Untersuchung der Modellierungspraxis in Deutschland. In: *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 61 (2009), S. 550–580. – Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (zfbf)
- [Flury u. a. 2006] FLURY, Jakob ; RUMMEL, Reiner ; REIGBER, Christoph ; ROTHACHER, Markus ; BOEDECKER, Gerd ; SCHREIBER, Ulrich: *Observation of the Earth System from Space*. Berlin Heidelberg: Springer, 2006
- [Foley u. a. 2010] FOLEY, James ; DAM, Andries van ; FEINER, Steven ; HUGHES, John: *Computer Graphics - Principles and Practice*. Boston: Addison-Wesley, 2010
-

- [Foley u. a. 1984] FOLEY, James ; WALLACE, Victor ; CHAN, Pak: The human factors of computer graphics interaction techniques. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 4 (1984), Nr. 11, S. 13–48
- [Forni u. van der Meulen 2016] FORNI, Amy A. ; MEULEN, Rob van d.: *Hype Cycle for Emerging Technologies, 2016*. Stamford, USA: Gartner Corporate Marketing, 2016
- [Foust u. Puig 2013] FOUST, Ken ; PUIG, Carlos ; SEMICONDUCTOR, Freescale (Hrsg.): *Standardized Sensor Performance Parameter Definitions*. 2013. Verfügbar unter: <http://www.memsindustrygroup.org/?page=SPD>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – IEEE P2700 Standard for Sensor Performance Parameter Definitions: MEMS Industry Group (MIG)/ National Institute of Standards and Technology (NIST)
- [Franklin 2006] FRANKLIN, Randolph: *PNPOLY - Point Inclusion in Polygon Test*. 2006. Verfügbar unter: https://www.ecse.rpi.edu/Homepages/wrf/Research/Short_Notes/pnpoly.html, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Frevert u. a. 2003] FREVERT, Volker ; NUCKELT, André ; STÖCKER, Dirk: Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen. In: *Schriftenreihe des Geodätischen Instituts der Technischen Universität Dresden* 3 (2003), S. 353–359
- [Friedrich u. a. 2013] FRIEDRICH, Marcel ; GREGAT, Robert ; SCHOMAKER, Ronny: Die Marienkirche in Wismar als Geo-3D-Augmented Reality. In: *Angewandte Geoinformatik* (2013), S. 240–245
- [Friedrich 2004] FRIEDRICH, Wolfgang (Hrsg.): *ARVIKA: Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service*. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2004
- [Fröhlich u. a. 2000] FRÖHLICH, H. ; TENHAEF, M. ; KÖRNER, H.: *Geodätische Koordinatentransformationen : Ein Leitfaden*. Essen, 2000
- [Gerber 2009] GERBER, Wolfgang: *Die Verkehrsunfallskizze*. Unveröffentlicht, 2009. – Hochschule der Sächsischen Polizei
- [GFZ 2015] GFZ (Hrsg.): *Weltweite Verteilung der Deklination für das Jahr 2015 nach dem IGRF*. 2015. Verfügbar unter: http://www.gfz-potsdam.de/typo3temp/pics/IGRF12_D_290a22cad5.jpg, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- [GFZ 2016a] GFZ (Hrsg.): *Daten und Berichte aus Niemegk und Wingst: Aktuelle Variationen des Erdmagnetfeldes*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdmagnetfeld/daten-produkte-dienste/daten-und-berichte/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- [GFZ 2016b] GFZ (Hrsg.): *Differenz der Erdmagnetischen Variationen in Wingst und Niemegk der letzten 24 Stunden*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdmagnetfeld/daten-produkte-dienste/daten-und-berichte/differenzen-ngk-wng/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- [GFZ 2016c] GFZ (Hrsg.): *Erdmagnetfeld*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdmagnetfeld/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
-

- [GFZ 2016d] GFZ (Hrsg.): *Externe Felder*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.gfz-potsdam.de/de/sektion/erdmagnetfeld/themen/quellen-des-erdmagnetfelds/externes-feld/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- [GFZ 2016e] GFZ (Hrsg.): *Geomagnetischer Kp-Index*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdmagnetfeld/daten-produkte-dienste/kp-index/erklaerung/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- [GFZ 2016f] GFZ (Hrsg.): *IGRF-Deklinationsrechner*. 2016. Verfügbar unter: <http://www-app3.gfz-potsdam.de/Declinationcalc/declinationcalc.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), IGRF-Deklinationsrechner: IGRF 12. Generation, 1900 - 2020: Internationales geomagnetisches Referenzfeld
- [GFZ 2016g] GFZ (Hrsg.): *Quasi-Echtzeit Kp-Index*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.gfz-potsdam.de/sektion/erdmagnetfeld/daten-produkte-dienste/kp-index/quasi-echtzeit/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)
- [Glück 2005] GLÜCK, M.: *MEMS in der Mikrosystemtechnik: Aufbau, Wirkprinzipien, Herstellung und Praxiseinsatz mikroelektromechanischer Schaltungen und Sensorsysteme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2005
- [GMA 2002] GMA (Hrsg.): *Richtlinie VDI/VDE 2634 Blatt 1:2002-05 Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung*. 2002. – VDI/VDV-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)
- [Google 2016a] GOOGLE (Hrsg.): *Location*. 2016. Verfügbar unter: <http://developer.android.com/reference/android/location/Location.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Google 2016b] GOOGLE (Hrsg.): *Project Tango: Depth Perception*. 2016. Verfügbar unter: https://developers.google.com/project-tango/overview/depth-perception#how_it_works, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Gradshteyn u. Ryzhik 1994] GRADSHTEYN, Israil S. ; RYZHIK, Jossif M. ; JEFFREY, Alan (Hrsg.): *Table of integrals, series and products*. 5. Auflage. San Diego: Academic Press, 1994
- [Grewal u. Andrews 2010] GREWAL, Mohinder ; ANDREWS, Angus: How Good Is Your Gyro? In: *IEEE Control Systems Magazine* 30 (2010), Nr. 1, S. 12–86
- [Grewal u. a. 2007] GREWAL, Mohinder ; WEILL, Lawrence ; ANDREWS, Angus: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2007
- [Gröger u. Kolbe 2005] GRÖGER, Gerhard ; KOLBE, Thomas: Normen und Standards für 3D-Geodaten. In: COORS, Volker (Hrsg.) ; ALEXANDER, Zipf (Hrsg.): *3D-Geoinformationssysteme*. Heidelberg: Wichmann, 2005
- [Görres 2010] GÖRRES, Barbara: Vom globalen Bezugssystem bis zur Umsetzung für die Praxis. In: SCHNEIDER, A. (Hrsg.) ; SCHWIEGER, V. (Hrsg.): *GNSS2010 - Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert* Bd. 63. Augsburg: Wißner-Verlag, 2010, S. 39–57
- [Görres u. a. 2012] GÖRRES, Barbara ; MAYER, Michael ; NOTHNAGEL, Axel ; HECK, Bernhard: *Bezugssysteme für GNSS*. 2012. Verfügbar unter: http://www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2012/05_DVW-Merkblatt_Bezugssysteme-fuer-GNSS_0.pdf, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. (DVW)

- [GSA 2015] GSA (Hrsg.): *GNSS Market Report issue 4*. 2015. Verfügbar unter:
<http://www.gsa.europa.eu/market/market-report>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. –
EUROPEAN GNSS AGENCY (GSA)
- [Hake u. Grünreich 1995] HAKE, Günter ; GRÜNREICH, Dietmar: *Kartographie*. Berlin: Walter de Gruyter, 1995
- [Harten 2015] HARTEN, Ulrich: *Physik für Mediziner*. Berlin Heidelberg: Springer, 2015
- [Heck 2003] HECK, Bernhard: *Rechenverfahren und Auswertemodell der Landesvermessung - Klassische und moderne Methoden*. Heidelberg: Herbert Wichmann, 2003
- [Heckmann u. a. 2015] HECKMANN, Bernhard ; BERG, Gerhard ; JAHN, Cord-Hinrich ; KLAUSER, Berthold ;
LIEBSCH, Gunter ; LIEBSCHER, Ria: Der bundeseinheitliche geodätische Raumbezug - integriert und
qualitätsgesichert. In: *zfo - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 140 (2015), Nr. 3, S.
180–184
- [Hehl 2005] HEHL, Klaus: C++ and Java code for recursion formulas in mathematical geodesy. In: *GPS
Solutions The Journal of Global Navigation Satellite Systems* 9 (2005), Nr. 1, S. 51–58
- [Hehl u. Martin 2012] HEHL, Klaus ; MARTIN, Jens: Kombinierte Strapdown IMU/GPS Systeme und ihre
Anwendung. In: DOMNICK, Immelyn (Hrsg.) ; HEIMANN, Stefan (Hrsg.): *Planen, Messen und Konstruieren*.
In: *FGeoBau, Bd. 3*. Berlin: Shaker Verlag GmbH, 2012, S. 1–10
- [Heinecke 2012] HEINECKE, Andreas: *Mensch-Computer-Interaktion: Basiswissen für Entwickler und Gestalter*.
Berlin Heidelberg: Springer, 2012
- [Heinze 1996] HEINZE, Ottmar: *Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystems zur Online-Verarbeitung in
der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems*, Technische Hochschule Darmstadt,
Dissertation, 1996
- [Heiskanen u. Moritz 1967] HEISKANEN, Weikko ; MORITZ, Helmut: *Physical geodesy*. San Francisco: W.H.
Freeman and Company, 1967
- [Hering u. Schönfelder 2012] HERING, Ekbert ; SCHÖNFELDER, Gert: *Sensoren in Wissenschaft und Technik*.
Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012
- [Hering 1999] HERING, Robert: *Unfallskizze*. Verfügbar unter:
<http://www.robert-hering.privat.t-online.de/Unfallskizze.html>. 1999, letzter Zugriff
am: 2016-10-14
- [Herrmann 2016] HERRMANN, Eric: *Display-Technologien: LCD, AMOLED, Retina, Always on*. Apr. 2016.
Verfügbar unter:
<https://www.androidpit.de/lcd-amoled-retina-und-co-das-sind-die-unterschiede?>,
letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Aktualisierung des Artikels 07/2014
- [Hesse u. Schnell 2014] HESSE, Stefan ; SCHNELL, Gerhard: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. 6.
Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [Hester u. Harrison 2009] HESTER, Roy ; HARRISON, Ronald: *Electronic waste management*. Bd. 27. Cambridge,
UK: Royal Society of Chemistry, 2009. – Issues in environmental science and technology
- [Heuser 1992] HEUSER, Harro: *Funktionsanalyse*. Stuttgart: B.G. Teubner, 1992
-

- [Hoff u. Azuma 2000] HOFF, Bruce ; AZUMA, Ronald: Autocalibration of an Electronic Compass in an Outdoor Augmented Reality System. In: *Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality* (2000), S. 159–164
- [Hoffmann-Wellenhof 2013] HOFFMANN-WELLENHOF, Bernhard: Kommt Galileo zu spät? In: *zfo - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 138 (2013), Nr. 4, S. 241–248
- [Hofmann-Wellenhof u. a. 2008] HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard ; LICHTENEGGER, Herbert ; WASLE, Elmar: *GNSS - Global Navigation Satellite Systems*. Wien NewYork: Springer, 2008
- [Hofmann-Wellenhof u. Moritz 2005] HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard ; MORITZ, Helmut: *Physical Geodesy*. Wien: Springer, 2005
- [Höhl u. Broschart 2015] HÖHL, Wolfgang ; BROSCHE, Daniel: Augmented Reality in Architektur und Stadplanung. In: *gis.science* 1 (2015), S. 20–29
- [Honeywell 1998] HONEYWELL: *Hall effect sensing and application*. 1998. Verfügbar unter: <http://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Application note
- [Hou 2004] HOU, Haiying: *Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance*. 2004. Verfügbar unter: <http://www.geomatics.ucalgary.ca/links/GradTheses.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – University of Calgary, Department of Geomatics Engineering
- [IAG 2011] IAG: *European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89)*. 2011. Verfügbar unter: <http://etrs89.ensg.ign.fr/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – IAG Subcommision for the European Reference Frame (EUREF)
- [IGN 2008] IGN: *Transformation parameters from ITRF2008 to past ITRFs*. 2008. Verfügbar unter: http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Institut Géographique National (IGN France)
- [IGN 2016] IGN: *Transformation parameters from ITRF2014 to past ITRFs*. 2016. Verfügbar unter: http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Institut Géographique National (IGN France)
- [IGN / LAREG 2013] IGN / LAREG (Hrsg.): *Transformation parameters: ITRS and WGS84*. 2013. Verfügbar unter: http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [IGN / LAREG 2016] IGN / LAREG (Hrsg.): *ITRF solutions*. 2016. Verfügbar unter: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [INSPIRE TWG CRS 2014] INSPIRE TWG CRS: *INSPIRE Data Specification on Coordinate Reference Systems - Technical Guidelines*. 2014. Verfügbar unter: <http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/2>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Version 3.2 vom 17.04.2014, INSPIRE Thematic Working Group Coordinate Reference Systems and Geographical Grid Systems (INSPIRE TWG CRS)
- [Izkara u. a. 2009] IZKARA, José ; PEREZ, Juan ; BASOGAIN, Xabier ; BORRO, Diego: Mobile Augmented Reality, an Advanced Tool for the Construction Sector. In: *Proceedings of the 24th international Conference on IT in Construction, CIB W78* (2009), S. 453–460
- [Janle u. Schulz 2003] JANLE, Peter ; SCHULZ, Günter: Raum- und Zeitstruktur des Erdmagnetfeldes - ein Überblick. In: *promet* 1/2 (2003), Nr. 30, S. 76–85
-

- [Jekeli 2001] JEKELI, Christopher: *Inertial Navigation Systems*. New York: Walter de Gruyter, 2001
- [Jelkmann u. Sinowatz 1996] JELKMANN, Wolfgang ; SINOWATZ, Fred: *Physiologie*. Deutscher Ärzte-Verlag, 1996
- [Kahmen 2005] KAHMEN, Heribert: *Vermessungskunde*. 20., überarbeitete Aufl. Berlin: Walter de Gruyter, 2005
- [Kamke u. Walcher 2013] KAMKE, Detlef ; WALCHER, Wilhelm: *Physik für Mediziner*. Vieweg+Teubner Verlag, 2013
- [Khronos Group 2016a] KHRONOS GROUP: *OpenGL API Documentation Overview*. 2016. Verfügbar unter: <https://www.opengl.org/documentation/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Silicon Graphics International Corp. (SGI) / Khronos Group
- [Khronos Group 2016b] KHRONOS GROUP: *OpenGL Platform and OS Implementations*. 2016. Verfügbar unter: <https://www.opengl.org/documentation/implementations/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Silicon Graphics International Corp. (SGI) / Khronos Group
- [Khronos Group 2016c] KHRONOS GROUP: *Vulkan*. 2016. Verfügbar unter: <https://www.khronos.org/vulkan/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Kloss 2010] KLOSS, Jörg H.: *X3D : Programmierung interaktiver 3D-Anwendungen für das Internet*. München: Addison-Wesley, 2010
- [Klotz 1991] KLOTZ, Jürgen: *Eine analytische Lösung kanonischer Gleichungen der geodätischen Linie zur Transformation ellipsoidischer Flächenkoordinaten*. München: Beck, 1991
- [Klotz 1993] KLOTZ, Jürgen: Eine analytische Lösung der Gauß-Krüger Abbildung. In: *zfv - Zeitschrift für Vermessungswesen* 118 (1993), Nr. 3, S. 106–116
- [Kluge 2012] KLUGE, Mario: *Konzeption und prototypische Implementierung eines smartphonebasierten Fußgängernavigationssystems*, Universität Potsdam, Dissertation, 2012
- [Knickmeyer 2003] KNICKMEYER, Elfriede T.: *Einführung in die Navigation für GeoinformatikerInnen und VermesserInnen*. New York: Fachhochschule Neubrandenburg - University of Applied Sciences, 2003
- [Knodel u. Kull 1981] KNODEL, Hans ; KULL, Ulrich: *Ökologie und Umweltschutz*. Metzler, 1981 (Studienreihe Biologie)
- [Knödel u. a. 2005] KNÖDEL, Klaus ; KRUMMEL, Heinrich ; LANGE, Gerhard: *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*. Bd. 3. 2. Auflage. Springer, 2005
- [Koch 2016] KOCH, Michael: *Themenschwerpunkte der Mensch und Computer 2016*. 2016. Verfügbar unter: <http://muc2016.mensch-und-computer.de/cfp/mensch-computer-interaktion/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Kohlrausch 2012] KOHLRAUSCH, Friedrich ; KOSE, Volkmar (Hrsg.) ; WAGNER, Siegfried (Hrsg.): *Praktische Physik: Zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik*. Bd. 2. 24. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [Kono 2010] KONO, Masaru: *Geomagnetism: Treatise on Geophysics*. Elsevier Science, 2010
- [Kooima 2008] KOOIMA, Robert (Hrsg.): *Generalized Perspective Projection*. 2008. Verfügbar unter: <http://csc.lsu.edu/~kooima/articles.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Louisiana State University
-

- [Korte u. Thébault 2007] KORTE, Monika ; THÉBAULT, E.: Geomagnetic repeat station crustal biases and vectorial anomaly maps for Germany. In: *Geophysical Journal International* 170 (2007), Nr. 1, S. 81–92
- [Kraus 2004] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie*. Bd. 2. 7. Auflage. Berlin New York: Walter de Gruyter, 2004
- [Kreuziger 2014] KREUZIGER, Ulf: Augmented Reality - Eine neue Sicht auf Geodaten. In: *FORUM - Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure* 40 (2014), Nr. 3, S. 34–41
- [Kreuziger 2015] KREUZIGER, Ulf: *Visuelles Outdoor-AR-System für die polizeiliche Unfallaufnahme*. Berlin, 2015. – Fachbeitrag. – Deutscher Kongress für Geographie 2015
- [Kreuziger u. Hehl 2012] KREUZIGER, Ulf ; HEHL, Klaus: Entwicklung einer AR-Applikation für die Planung und Bodenordnung. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 137 (2012), Nr. 1, S. 37–46
- [Kreuziger u. a. 2015] KREUZIGER, Ulf ; HEHL, Klaus ; MÖLLER, Matthias: Optimierungsansätze zur Positionierung und Registrierung geographischer Augmented-Reality-Systeme. In: *AGIT - Journal für Angewandte Geoinformatik* (2015), Nr. 1, S. 486–495
- [Langel 1987] LANGEL, Robert ; JACOBS, John A. (Hrsg.): *The main field*. Bd. 1. London: Academic Press, 1987
- [Langlotz 2014] LANGLOTZ, Melanie: Augmented Reality made in New Zealand. In: *gis.Business* 5-6 (2014), S. 42–43
- [Lechner 2015] LECHNER, Martin (Hrsg.): *ARML 2.0 specification*. 2015. Verfügbar unter: https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=62131, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – OGC Augmented Reality Markup Language 2.0 (ARML 2.0) Encoding Standard
- [LGB 2016] LGB: *Digitale Topographische Karte 1 : 10 000*. 2016. Verfügbar unter: https://www.geobasis-bb.de/geodaten/dtk_10.html, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB)
- [Litfin 2004] LITFIN, G.: *Technische Optik in der Praxis*. Berlin: Springer, 2004
- [Lowes 2010] LOWES, Frank ; V-MOD (Hrsg.): *The International Geomagnetic Reference Field: A 'Health' Warning*. 2010. Verfügbar unter: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrfhw.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – International Geomagnetic Reference Field Working Group (V-MOD)
- [Luhmann 2010a] LUHMANN, Thomas: *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. München: Beck, 2010
- [Luhmann 2010b] LUHMANN, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie*. Heidelberg: Herbert Wichmann, 2010
- [Lutter u. Böhm 2016] LUTTER, Timm (Hrsg.) ; BÖHM, Klaus (Hrsg.): *Zukunft der Consumer Electronics - 2015. 2016*. – Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (Bitkom e.V.)
- [Mandea u. Macmillan 2000] MANDEA, Mioara ; MACMILLAN, Susan: International Geomagnetic Reference Field - the eighth generation. In: *Earth, Planets and Space* 52 (2000), S. 1119–1124
- [Mansfeld 2013] MANSFELD, Werner: *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2013
-

- [Mehler-Bicher u. Steiger 2014] MEHLER-BICHER, Anett ; STEIGER, Lothar: *Augmented Reality: Theorie und Praxis*. 2. Auflage. München: De Gruyter, 2014
- [Meier 2013] MEIER, Florian: *Farbverbindlich? Aktuelle Displaytechnologien und Color Management auf Smartphones*. 2013. Verfügbar unter: <http://www.beyond-print.de/2013/10/29/aktuelle-displaytechnologien-und-color-management-auf-mobilen-endgeraeten/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Meyer 2010] MEYER, Thomas H.: *Introduction to Geometrical and Physical Geodesy: Foundations of Geomatics*. Redlands, USA: ESRI Press, 2010
- [Michalowsky 2006] MICHALOWSKY, L.: *Magnettechnik: Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2006
- [Microsoft 2016] MICROSOFT: *DirectX Graphics and Gaming*. Verfügbar unter: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ee663274\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ee663274(v=vs.85).aspx). 2016, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Milgram u. Kishino 1994] MILGRAM, Paul ; KISHINO, Fumio: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. In: *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems* E77-D No.12 (1994), S. 1321–1329
- [Milgram u. a. 1994] MILGRAM, Paul ; TAKEMURA, Haruo ; UTSUMI, Akira ; KISHINO, Fumio: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: *SPIE* 2351 (1994), S. 282–292
- [Mohr 2016] MOHR, Oliver: *Digitaler Zugang für ländliche Gebiete*. 2016. Verfügbar unter: https://www.digitale-agenda.de/Webs/DA/DE/Handlungsfelder/1_DigitaleInfrastrukturen/1-2_DigitalerZugang/digitaler-zugang_node.html, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Presse- und Informationsamt der Bundesregierung
- [Moritz 1980] MORITZ, Helmut: Geodetic Reference System 1980. In: *Bulletin Géodésique* 54 (1980), Nr. 3, S. 395–405
- [Moritz 2000] MORITZ, Helmut: Geodetic Reference System 1980. In: *Journal of Geodesy* 74 (2000), Nr. 1, S. 128–133
- [Müller 2014] MÜLLER, A.: Augmented Reality - mehr sehen, mehr wissen. In: *gis.Business* 5-6 (2014), S. 38–41
- [Niemeier 2008] NIEMEIER, Wolfgang: *Ausgleichsrechnung: statistische Auswertemethoden*. Berlin New York: Walter de Gruyter, 2008
- [Nischwitz u. a. 2007] NISCHWITZ, Alfred ; FISCHER, Max ; HABERÄCKER, Peter: *Computergrafik und Bildverarbeitung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg, 2007
- [Niu u. a. 2006] NIU, Xiaoji ; GOODALL, Chris ; NASSAR, Sameh ; EL-SHEIMY, Naser: An Efficient Method for Evaluating the Performance of MEMS IMUs. In: *IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium*. Coronado, CA, 2006
- [NOAA 2016a] NOAA (Hrsg.): *Magnetic Declination Estimated Value*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Magnetic Field Calculators, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
-

- [NOAA 2016b] NOAA (Hrsg.): *NOAA Geomagnetic Activity Observation and Forecast (3-Day Forecast)*. 2016. Verfügbar unter: ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/forecasts/three_day/, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
- [Obe u. Hsu 2015] OBE, Regina ; Hsu, Leo: *PostGIS in Action*. Stamford: Manning, 2015
- [OGC 2013] OGC (Hrsg.): *ARML 2.0 SWG*. 2013. Verfügbar unter: <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/arml2.0swg>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Open Geospatial Consortium (OGC)
- [OGC 2016] OGC (Hrsg.): *GeoAPI FAQ*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.geoapi.org/faq.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Open Geospatial Consortium (OGC)
- [OMG 2016a] OMG (Hrsg.): *OMG Unified Modeling Language TM (OMG UML), Superstructure Version 2.4.1*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/Superstructure/PDF>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Object Management Group (OMG)
- [OMG 2016b] OMG (Hrsg.): *Unified Modeling Language*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.omg.org/spec/UML/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Versions/ ISO Releases, Object Management Group (OMG)
- [Ozyagcilar 2013] OZYAGCILAR, Talat ; SEMICONDUCTOR, Freescale (Hrsg.): *Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors*. 2013. Verfügbar unter: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – AN4248 Application note; Rev. 4.0, 11/2015
- [PGDG 2016] PGDG (Hrsg.): *PostgreSQL 9.0.23 Documentation Chapter 32. Large Objects*. 2016. Verfügbar unter: <https://www.postgresql.org/docs/9.0/static/lo-funcs.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – The PostgreSQL Global Development Group (PGDG)
- [PhoneMore 2016] PHONEMORE (Hrsg.): *Phone finder*. 2016. Verfügbar unter: <http://www.phonemore.com/search/?device=2>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [PSC 2016a] PSC (Hrsg.): *7.7. Spatial Relationships and Measurements*. 2016. Verfügbar unter: http://postgis.net/docs/manual-1.4/ST_Contains.html, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – PostGIS Project Steering Committee (PSC)
- [PSC 2016b] PSC (Hrsg.): *About PostGIS*. 2016. Verfügbar unter: www.postgis.net, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – PostGIS Project Steering Committee (PSC)
- [PSC 2016c] PSC (Hrsg.): *Chapter 4. Using PostGIS: Data Management and Queries: 4.1.2. PostGIS EWKB, EWKT and Canonical Forms*. 2016. Verfügbar unter: http://postgis.net/docs/using_postgis_dbmanagement.html, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – PostGIS Project Steering Committee (PSC)
- [PSC 2016d] PSC (Hrsg.): *Chapter 8. PostGIS Reference: ST_GeomFromText: 8.4. Geometry Constructors*. 2016. Verfügbar unter: http://postgis.net/docs/ST_GeomFromText.html, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – PostGIS Project Steering Committee (PSC)
-

- [Reiterer u. Geyer 2013] REITERER, Harald ; GEYER, Florian: Mensch-Computer-Interaktion. In: KUHLEN, Rainer (Hrsg.) ; SEMAR, Wolfgang (Hrsg.) ; STRAUCH, Dietmar (Hrsg.): *Grundlagen der praktischen Information und Dokumentation: Handbuch zur Einführung in die Informationswissenschaft und -praxis*. 6. Aufl. De Gruyter, 2013, S. 431–440
- [Resnik u. Bill 2009] RESNIK, Boris ; BILL, Ralf: *Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich*. 3., neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Heidelberg: Wichmann, 2009
- [Richter u. Teichert 2009] RICHTER, Christiane ; TEICHERT, Bernd: *Einführung in die Digitale Bildverarbeitung*. Dresden: Diskurs Verlag, 2009
- [Rolland u. a. 2001] ROLLAND, Jannick P. ; BAILLOT, Yohan ; GOON, Alexei A.: A Survey of Tracking Technologies for Virtual Environments. In: BARFIELD, Woodrow (Hrsg.) ; CAUDELL, Thomas (Hrsg.): *Fundamentals of wearable computers and augmented reality*. Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates, 2001, S. 67–112
- [Rothacher u. Schmid 2002] ROTHACHER, Markus ; SCHMID, Ralf: GPS-Antennenkalibrierung aus nationaler und internationaler Sicht. In: *Vorträge zum 4. SAPOS-Symposium*. Hannover: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, 2002
- [Rülke u. Liebsch 2013] RÜLKE, Axel ; LIEBSCH, Gunter ; BKG (Hrsg.): *Höhenreferenzrahmen in Europa und Deutschland - praktische Aspekte und aktuelle Entwicklungen*. 2013. Verfügbar unter: ftp://ivs.bkg.bund.de/outdata/ruelke/ruelke_et_al_dgfi_hoehensysteme.pdf, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
- [Samsung 2015] SAMSUNG (Hrsg.): *IP67-Zertifizierung*. 2015. Verfügbar unter: <http://www.samsung.com/de/entdecken/mehr-wissen/4-fragen-rund-um-die-ip67-zertifizierung/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Samsung 2016] SAMSUNG (Hrsg.): *Future Display*. 2016. Verfügbar unter: https://www.samsungdisplay.com/eng/product/display_future.jsp, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Schall u. Schmalstieg 2010] SCHALL, Gerhard ; SCHMALSTIEG, Dieter: Vidente - 3D Visualisation of Underground Infrastrukture using Handheld Augmented Reality. In: *Geohydroinformatics - Integrating GIS and Water Engineering* (2010), S. 207–219
- [Schall u. a. 2013] SCHALL, Gerhard ; ZOLLMANN, Stefanie ; REITMAYR, Gerhard: Smart Vidente: advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 17 (2013), Nr. 7, S. 1533–1549. – Forschungsprojekt
- [Scheffler 1994] SCHEFFLER, Joachim: *Unfallskizze*. 1994. Verfügbar unter: <http://home.bawue.de/~matthead/jo/joachim.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Schenk u. Rigoll 2010] SCHENK, Joachim ; RIGOLL, Gerhard: *Mensch-Maschine-Kommunikation: Grundlagen von sprach- und bildbasierten Benutzerschnittstellen*. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Schmidt 2009] SCHMIDT, Doris: *Fehleranalyse und Datenfusion von Satellitennavigations- und Fahr-dynamik-sensorsignalen*, Technischen Universität Darmstadt, Dissertation, 2009
-

- [Schödlbauer 1981] SCHÖDLBAUER, Albert: *Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung: Teil 1*. Karlsruhe: Herbert Wichmann, 1981
- [Schödlbauer 1982] SCHÖDLBAUER, Albert: *Rechenformeln und Rechenbeispiele zur Landesvermessung: Teil 2*. Karlsruhe: Herbert Wichmann, 1982
- [Seeber 1993] SEEBER, Günther: *Satellite Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter, 1993
- [Sellers u. a. 2015] SELLERS, Graham ; WRIGHT, Richard ; HAEMEL, Nicholas: *OpenGL Superbible: Comprehensive Tutorial and Reference*. Pearson Education, 2015
- [Shreiner u. Khronos 2009] SHREINER, Dave ; KHRONOS: *OpenGL Programming Guide: Seventh Edition: The Official Guide to Learning OpenGL, Versions 3.0 and 3.1*. New York: Addison-Wesley, 2009. – Khronos OpenGL ARB Working Group (Khronos)
- [Shreiner u. a. 2013] SHREINER, Dave ; SELLERS, Graham ; KESSENICH, John ; LICEA-KANE, Bill: *OpenGL Programming Guide Eighth Edition: The Official Guide to Learning OpenGL, Version 4.3*. New York: Addison-Wesley, 2013
- [Statista 2016] STATISTA (Hrsg.): *Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2016*. 2016. Verfügbar unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonenuutzer-in-deutschland-seit-2010/>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Steinpichler 2009] STEINPICHLER, Dietmar ; SPARXSYSTEMS SOFTWARE GMBH (Hrsg.): *Projektentwicklung mit UML und Enterprise Architect*. 8., Aufl. Wien: SparxSystems, 2009
- [STMicroelectronics 2014] STMICROELECTRONICS (Hrsg.): *Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer*. 2014. Verfügbar unter: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4248.pdf, letzter Zugriff am: 2016-10-14. – AN4509, DocID026445 Rev 1
- [Taschenmacher u. Eifinger 2014] TASCHENMACHER, Richard ; EIFINGER, Wolfgang: *Verkehrsunfallaufnahme*. Verlag Deutsche Polizeiliteratur GmbH, 2014
- [Tegtmeier 2006] TEGTMEIER, André: *Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2006
- [Teunissen 2009] TEUNISSEN, Peter: *Adjustment Theory: An Introduction*. Delft, Niederlande: VSSD TU Delft, 2009
- [Thébault u. a. 2015] THÉBAULT, Erwan ; FINLAY, Christopher ; BEGGAN, Ciarán ; ALKEN, Patrick ; AUBERT, Julian ; BARROIS, Olivier ; BERTRAND, Francois ; BONDAR, Tatiana ; BONESS, Axel ; BROCCO, Laura ; CANET, Elisabeth ; CHAMBODUT, Aude ; CHULLIAT, Arnaud ; COÏSSON, Pierdavide ; CIVET, Francois ; DU, Aimin ; FOURNIER, Alexandre ; FRATTER, Isabelle ; GILLET, Nicolas ; HAMILTON, Brian ; HAMOUDI, Mohamed ; HULOT, Gauthier ; JAGER, Thomas ; KORTE, Monika ; KUANG, Weijia ; LALANNE, Xavier ; LANGLAIS, Benoit ; LÉGER, Jean-Michel ; LESUR, Vincent ; LOWES, Frank ; MACMILLAN, Susan ; MANDEA, Mioara ; MANOJ, Chandrasekharan ; MAUS, Stefan ; OLSEN, Nils ; PETROV, Valeriy ; RIDLEY, Victoria ; ROTHER, Martin ; SABAKA, Terence ; SATURNINO, Diana ; SCHACHTSCHNEIDER, Reyko ; SIROL, Olivier ; TANGBORN, Andrew ; THOMSON, Alan ; TØFFNER-CLAUSEN, Lars ; VIGNERON, Pierre ; WARDINSKI, Ingo ; ZVEREVA, Tatiana: International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. In: *Earth, Planets and Space* 67:79 (2015), S. 1–19
-

- [Titterton u. Weston 2004] TITTERTON, David ; WESTON, John: *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2. Auflage. London UK, Reston, USA: Institution of Engineering and Technology, 2004
- [Tönnis 2008] TÖNNIS, Marcus: *Towards Automotive Augmented Reality*, Technische Universität München, Dissertation, 2008
- [Tönnis 2010] TÖNNIS, Markus: *Augmented Reality: Einblicke in die Erweiterte Realität*. Heidelberg: Springer, 2010
- [Torge 2001] TORGE, Wolfgang: *Geodesy*. 3. Auflage. Berlin New York: Walter de Gruyter, 2001
- [Torge 2003] TORGE, Wolfgang: *Geodäsie*. Berlin New York: Walter de Gruyter, 2003
- [Torge u. Müller 2012] TORGE, Wolfgang ; MÜLLER, Jürgen: *Geodesy*. Berlin Boston: Walter de Gruyter, 2012
- [Townsend u. a. 2014] TOWNSEND, Colin ; BEGON, Michael ; HARPER, John: *Ökologie*. 2. Auflage. Heidelberg: Springer, 2014
- [Trautwein u. a. 2014] TRAUTWEIN, Alfred ; KREIBIG, Uwe ; HÜTTERMANN, Jürgen: *Physik für Mediziner, Biologen, Pharmazeuten*. Walter de Gruyter, 2014
- [Ulmer 2004] ULMER, Hans-Volkhart: *Peripheres Blick- und Gesichtsfeld (Nr. 20) - Versuchsplan*. 2004. Verfügbar unter:
http://www.uni-mainz.de/FB/Sport/physio/pdf/files/SkriptTeil4_SS04_S90-145.pdf,
letzter Zugriff am: 2016-10-14. – Johannes Gutenberg-Universität Mainz
- [VectorNav 2016] VECTORNAV: *Inertial Measurement Units and Inertial Navigation*. Verfügbar unter:
<http://www.vectornav.com/support/library/imu-and-ins>. 2016, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Voigt 2013] VOIGT, Christian: *Astrogeodätische Lotabweichungen zur Validierung von Schwerefeldmodellen*, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2013
- [Wanninger u. Fettke 2008] WANNINGER, Lambert ; FETTKE, Martin: GNSS-Antennenwechsel auf den SAPOS-Referenzstationen in Rheinland-Pfalz. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 133 (2008), Nr. 6, S. 375–380
- [Web3D Consortium 2013] WEB3D CONSORTIUM (Hrsg.): *Extensible 3D (X3D)*. 2013. Verfügbar unter:
<http://www.web3d.org/documents/specifications/19775-1/V3.3/index.html>, letzter Zugriff am: 2016-10-14
- [Wertz 2012] WERTZ, James (Hrsg.): *Spacecraft Attitude Determination and Control*. Dordrecht, Niederlande: Springer, 2012
- [Wild-Pfeiffer 2015] WILD-PFEIFFER, Franziska: *Das Potential von MEMS-Inertialsensoren zur Anwendung in der Geodäsie und Navigation*. München: Wellesley-Cambridge Press, 2015
- [Wild-Pfeiffer u. Schäfer 2011] WILD-PFEIFFER, Franziska ; SCHÄFER, Bernhardt: MEMS-Sensoren, auch für die Geodäsie. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 136 (2011), Nr. 1, S. 31–39
- [Witte u. Sparla 2011] WITTE, Bertold ; SPARLA, Peter: *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. 7., überarbeitete und erweiterte Aufl. Berlin: Wichmann, 2011
-

- [Woernle 2011] WOERNLE, Christoph: *Mehrkörpersysteme - Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper*. Heidelberg: Springer, 2011
- [Wong u. a. 2012] WONG, Robert ; ROLLINS, Craig ; MINTER, Clifton: Recent Updates to the WGS 84 Reference Frame. In: *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*. Nashville, Tennessee: Nashville Convention Center, 2012, S. 1164–1172
- [Woodward u. a. 2010] WOODWARD, C. ; HAKKARAINEN, M. ; KORKALO, O. ; AITTALA, M. ; RAINIO, K. ; KAHKONEN, K.: Mixed Reality for mobile construction site visualization and communication. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR2010)* (2010), S. 1–10
- [Woodward u. Hakkarainen 2011] WOODWARD, Charles ; HAKKARAINEN, Mika: Mobile Mixed Reality System for Architectural and Construction Site Visualization. In: NEE, Andrew Yeh C. (Hrsg.): *Augmented Reality -Some Emerging Application Areas*, 2011
- [Zogg 2011] ZOGG, Jean-Marie: GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten. 2011. – ublox AG, Benutzerhandbuch
- [Zühlke 2012] ZÜHLKE, Detlef: *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Useware-Engineering für technische Systeme*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012
-

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung der Augmented Reality im Hype Cycle	16
2.2	Vision: mobil-pedestrisches und stationäres GeoARS	22
3.1	Einflussfaktoren auf die Modellierung eines GeoARS	23
3.2	Anforderungen als Grundlage der GeoARS-Systemmodellierung	28
3.3	Komponenten eines GeoARS	29
3.4	Virtuelle Geoobjekte und reale Geoobjekte	30
3.5	Digitales Geländemodell als virtuelle Erdoberfläche in GeoARS	31
3.6	3D-AR-Modell und Auswahl beteiligter Koordinatensysteme	31
3.7	Zälestisches Referenzsystem (i-System)	32
3.8	Erdfestes System (e-System)	34
3.9	Regionales erdfestes System (r-System)	35
3.10	Virtuelles regionales erdfestes System (w-System)	37
3.11	Topozentrisches System (l-System, n-System)	38
3.12	Topozentrisches System des Erdmagnetfeldes (m-System)	39
3.13	Körperfestes System (b-System)	40
3.14	Sensor-Systeme	40
3.15	Kamerafestes Koordinatensystem – reale Kamera (k-System)	41
3.16	Virtuelles topozentrisches System (o-System)	42
3.17	Kamerafestes Koordinatensystem - virtuelle Kamera (v-System)	43
3.18	Bildsensor-Koordinatensystem (s-System)	43
3.19	Bildkoordinatensystem (d-System)	44
3.20	Pixelkoordinatensystem (p-System)	45
3.21	Texturkoordinatensystem (t-System)	46
3.22	Displaykoordinatensystem (y-System)	46
4.1	Objektorientierte AR-Geoobjektmodellierung und Softwareentwicklung von GeoARS	47
4.2	Objektgeneralisierung und -relation nach ISO 19107 und ISO 19111	50
4.3	UML-Klassendiagramm PunktObjektVR	52
4.4	UML-Klassendiagramm PunktObjektVR und X3D	53
4.5	UML-Klassendiagramm LinienObjektVR	54
4.6	UML-Klassendiagramm LinienObjektVR und X3D	55

4.7	UML-Klassendiagramm FlaechenObjektVR	56
4.8	UML-Klassendiagramm FlaechenObjektVR und X3D	57
4.9	Ansätze zur Objektbildung in GeoARS	58
4.10	Ansätze zur Objektspeicherung in GeoARS	60
4.11	„GeoARS-Unfallaufnahme“: Auszug Anwendungsfälle/Signaturenübersicht	61
4.12	„GeoARS-Unfallaufnahme“: Auszug Prototyp-Anwendungsoberfläche	62
4.15	UML Übersichtsdiagramm zum Datenmodell LEFIS	65
4.16	UML-Klassendiagramm „Angaben zum Flurstück“	67
4.17	UML-Klassendiagramm „Angaben zum Flurstück“, Erweiterung	68
5.1	Ansatz zur Überführung von GIS-Datentypen in AR-Geodatentypen	72
5.2	Übertragbarer Visualisierungsansatz von AR-Geodaten in GeoARS mit X3D	73
5.3	Übertragbarer Visualisierungsansatz von Geodaten in GeoARS mit OpenGL	75
5.4	Verschneidung von 2D-Geodaten mit einem DGM	77
5.5	Dimensionserweiterung von 2D auf 3D in 3D-Egoperspektive	77
5.6	Verwendung von Karten (GIS-Ausgabeprodukte) in GeoARS	78
5.7	Visualisierung 3D-Bestandsdaten in 3D-Egoperspektive	79
5.8	Visualisierung Geoobjekte in „GeoARS-Unfallaufnahme“	82
6.1	Video see-through Verfahren	85
6.2	Komponenten der Bildfusion	86
6.3	Video see-through Verfahren mobil-pedestrisches GeoARS	86
6.4	Anpassung Seitenverhältnisse Kamerabild/Display	87
6.5	Fenster in die Welt: verschiedene Öffnungswinkel	88
6.6	Video see-through Verfahren stationäres GeoARS	92
7.1	Nick-, Roll- und Gierwinkel im b-System	94
7.2	Messwerte der vertikalen Achse des in Ruhelage befindlichen Drehratensensors MPU-6500	103
7.3	Drehratensensor: Beobachtungszeitraum 24 Stunden	104
7.4	Drehratensensor: Einsatz unter realen Bedingungen	105
7.5	Drehratensensor: Nutzungs-/ temporäre Nichtnutzungsphase	107
7.6	Drehratensensor: zügige Drehung und Schwenkung	108
7.7	Drehratensensor: Drehung eines stationären GeoARS in 10°-Schritten	109
7.8	Beschleunigungssensor: Beobachtungszeitraum 24 Stunden	112
7.9	Beschleunigungssensor: Einsatz unter realen Bedingungen	113

7.10 Beschleunigungssensor: zügige Drehung und Schwenkung	114
7.11 Beschleunigungssensor: Nutzungs- / temporäre Nichtnutzungsphase	116
7.12 Beschleunigungssensor: in Ruhelage	117
7.13 Magnetfeldsensor: horizontale Drehung	126
7.14 Magnetfeldsensor: Verlauf der Horizontalintensität	127
7.15 Magnetfeldsensor: Gierwinkeländerung während der Temperaturanpassung	128
7.16 Magnetfeldsensor: Messwerte während der Temperaturanpassung	128
7.17 Deklination IGRF12	129
7.18 GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage	134
7.19 GeoARS mit geodätischem GNSS-Empfänger	135
7.20 Kameramodul: Idealisierte strahlenoptische Abbildung	139
7.21 Kameramodul: Verzeichnungskurve	141
7.22 Echtzeitkorrektur des Live-Bildes mit Schattierern	142
7.23 Transformation zwischen Textur- und Bildkoordinatensystem	142
7.24 Koordinatensystem der virtuellen Kamera und Sichtvolumen	145
7.25 Schwerebeschleunigung und spezifische Kraft	146
7.26 Richtungswinkel im dreidimensionalen Vektorraum	147
7.27 Lotabweichung	151
7.28 Drehratensensor: horizontale Ruhelage	157
7.29 Drehratensensor: resultierende Winkeländerung	158
7.30 Beschleunigungssensor: horizontale Ruhelage	159
7.31 Beschleunigungssensor: resultierende Positionsänderung	159
7.32 Beschleunigungssensor: vorwärtsschreitende Anwenderbewegung	160
7.33 Vereinfachte Inertialnavigation	161
7.34 Beschleunigungssensor: Geschwindigkeit und Position	161
7.35 Verschiebungen der ITRF-Referenzstationen	163
7.36 Berechnungsablauf zweifache 14-Parametertransformation	163
7.37 Software-Komponenten der Orientierungsprozessierung mittels Bildsensor	171
7.38 Interne Abläufe Pixel-Schattierer-A	173
7.39 Idealisierte strahlenoptische Abbildung, Weiterführung	174
7.40 Drehratensensor: horizontale Ruhelage (Filterung)	176
7.41 Ablauf des 3D-Registrierungsverfahrens eines GeoARS	176

7.42	Modell zur Zusammenführung der beteiligten Koordinatensysteme eines GeoARS	177
8.1	3D-AR-Egoperspektive des „GeoARS-Landentwicklung“ mit Fadenkreuz	187
8.2	AR-Erkundung unter Verwendung von Karten	188
8.3	Berechnung planare horizontale Distanz	190
8.4	Speicherung Foto und Displayinformationen	191
8.5	Verwendung individueller Karten des Nutzers	193
9.1	Prototypentwicklung von mobil-pedestrischen und stationären GeoARS	198
9.2	Ausblick: avisiertes Fortschritt der Augmented Reality im Hype Cycle	199
A.1	Funktionales und stochastisches Modell	202
A.2	Histogrammbeispiel	208
B.1	Drehratensensor: Einsatz unter realen Bedingungen (x-Achse)	209
B.2	Drehratensensor: Einsatz unter realen Bedingungen (y-Achse)	210
B.3	Drehratensensor: Einsatz unter realen Bedingungen (z-Achse)	210
B.4	Drehratensensor: Nutzungs-/ temporäre Nichtnutzungsphase (x-Achse)	212
B.5	Drehratensensor: Nutzungs-/ temporäre Nichtnutzungsphase (y-Achse)	212
B.6	Drehratensensor: Nutzungs-/ temporäre Nichtnutzungsphase (z-Achse)	213
B.7	Drehratensensor: zügige Drehung und Schwenkung (x-Achse)	214
B.8	Drehratensensor: zügige Drehung und Schwenkung (y-Achse)	214
B.9	Drehratensensor: zügige Drehung und Schwenkung (z-Achse)	215
B.10	Drehratensensor: Drehung eines stationären GeoARS in 10°-Schritten (x-Achse)	216
B.11	Drehratensensor: Drehung eines stationären GeoARS in 10°-Schritten (y-Achse)	217
B.12	Drehratensensor: Drehung eines stationären GeoARS in 10°-Schritten (z-Achse)	217
B.13	Beschleunigungssensor: Einsatz unter realen Bedingungen (x-Achse)	218
B.14	Beschleunigungssensor: Einsatz unter realen Bedingungen (y-Achse)	218
B.15	Beschleunigungssensor: Einsatz unter realen Bedingungen (z-Achse)	219
B.16	Beschleunigungssensor: zügige Drehung und Schwenkung (x-Achse)	220
B.17	Beschleunigungssensor: zügige Drehung und Schwenkung (y-Achse)	221
B.18	Beschleunigungssensor: zügige Drehung und Schwenkung (z-Achse)	221
B.19	Beschleunigungssensor: Nutzungs-/ temporäre Nichtnutzungsphase (x-Achse)	222
B.20	Beschleunigungssensor: Nutzungs-/ temporäre Nichtnutzungsphase (y-Achse)	222
B.21	Beschleunigungssensor: Nutzungs-/ temporäre Nichtnutzungsphase (z-Achse)	223
B.22	Beschleunigungssensor: in Ruhelage (x-Achse)	224

B.23 Beschleunigungssensor: in Ruhelage (y-Achse)	224
B.24 Beschleunigungssensor: in Ruhelage (z-Achse)	224
B.25 Magnetfeldsensor: Untersuchung des Gierwinkels in Ruhelage	226
B.26 Magnetfeldsensor: Untersuchung des Gierwinkels in Ruhelage (Filterung)	226
B.27 Variation der Deklination (Referenzstation)	227
B.28 Magnetfeldsensor: Horizontalwinkeländerungen mit diskreten Schrittweiten	228
B.29 GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage (Ost-und Nord-Werte)	229
B.30 GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage (Ost-Werte)	229
B.31 GNSS-Modul: Beobachtung der Position in Ruhelage (Nord-Werte)	230

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht Arten der Darstellung	17
2.2	Übersicht Interaktionstechniken	17
2.3	Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage	17
2.4	Umgebungsfaktoren mit Einfluss auf GeoARS	20
3.1	Verwendete GNSS und deren Parameter	34
3.2	Rotationsellipsoid des ETRS89 (GRS80)	36
6.1	Übersicht Arten der Darstellung (Erweiterung)	83
6.2	Einflussfaktoren auf handgehaltene Displays	84
6.3	Übersicht einbezogene Displays	89
7.1	Arbeitsbereiche stationärer und mobil-pedestrischer GeoARS	95
7.2	Umgebungsfaktoren mit Einfluss auf die Sensorik	99
7.3	GeoARS-Sensoren und Funktion bei 3D-Registrierung	100
7.4	Parameter der einbezogenen Drehratensensoren	102
7.5	Winkelgeschwindigkeiten in GeoARS	106
7.6	Parameter der einbezogenen Beschleunigungssensoren	111
7.7	Beschleunigungen in GeoARS	120
7.8	Orts- und Zeitabhängigkeit der Erdmagnetfeldanteile	122
7.9	Parameter der einbezogenen Magnetfeldsensoren	123
7.10	Vergleich Horizontalintensitäten	127
7.11	Deklination geographische Lage Deutschlands	129
7.12	Parameter einbezogene GNSS-Module	132
7.13	Standortgenauigkeit Echtzeitpositionierung ohne und mit SBAS	133
7.14	Häufigkeiten Beobachtung der Position in Ruhelage	133
7.15	Kamera- und Bildsensor-spezifische Einflussfaktoren auf GeoARS	136
7.16	Parameter einbezogene Bildsensoren	137
7.17	Parameter der inneren Orientierung (Beispiel, Kalibrierungsergebnis)	140
7.18	Aufgaben Bildsensor und Aufgabenerweiterung	144
7.19	Transformationsparameter des ITRF2014 in zurückliegende Realisierungen	164
7.20	Transformationsparameter ITRF in ETRF	165
8.1	Übersicht Interaktionstechniken (Erweiterung)	185

8.2	Einflussfaktoren auf handgehaltene Displays hinsichtlich der Interaktion	186
A.1	Messreihenbeispiel	207
E.1	Übersicht über die einbezogenen Softwarekomponenten	241
E.2	Übersicht über die einbezogenen/untersuchten Module und Einzelkomponenten	241
E.3	Übersicht über die einbezogenen/untersuchten Kompaktgeräte und Displays	242
E.4	Übersicht über die einbezogenen zusätzlichen Komponenten	242
G.1	Stichprobe Begriffsbekanntheit „Augmented Reality“ (11.03.2015)	245
G.2	Stichprobe Begriffsbekanntheit „Augmented Reality“ (09.03.2016)	245

Quelltextverzeichnis

4.1	(NAS) Auszug Datenaustauschdatei (Geoobjekt AX_Flurstueck)	66
4.2	(Java) X3DLinienObjekt für OpenGL	67
5.1	(ASCII) Auszug DGM-Daten-Datei	76
5.2	(NAS) Auszug ALKIS-Bestandsdatendatei	76
5.3	(ASCII) Linien eines Polygons	76
5.4	(Java) X3DLinienObjekt für OpenGL	78
5.5	(X3D) X3DPunktObjekt	80
5.6	(X3D) X3DLinienObjekt	80
5.7	(X3D) X3DFlaechenObjekt	81
5.8	(X3D) Bestandsdaten realisiert als X3DLinienObjekt	81
6.1	(Java) Skalierung Live-Bild	87
6.2	(Java) Skalierung Live-Bild (Berücksichtigung binokulares Deckfeld)	88
7.1	(GLSL) Echtzeit-Bild-Korrektur (Pixel-Schattierer)	143
7.2	(Java) Numerische Integration	156
7.3	(GLSL) Vertex-Schattierer	171
7.4	(GLSL) Pixel-Schattierer-R	172
7.5	(OpenGL) Konfiguration Sichtbereich virtuelle Kamera	177
7.6	(Java) Visualisierungsfläche Live-Bild	178
7.7	(GLSL) Echtzeit-Bild-Korrektur (Auszug Pixel-Schattierer	178
7.8	(Java) Bestimmung der räumlichen Lage	179
7.9	(OpenGL) Transformation des virtuellen Kamerastandortes	179
7.10	(Java) Visualisierungsfläche Geodaten	180
7.11	(ASCII) DGM-Raster	180
8.1	(OpenGL) Setzen Standpunkthöhe	188
8.2	(Java) Selektion Geoobjekt	190
8.3	(Java) Nutzung WMS	192
8.4	(Java) Nutzung WFS	193
D.1	(C#) Überführung Euler-Winkel Quaternion	236
F.1	(GLSL) Pixel-Schattierer-A	243

Danksagung

Der Prozess meiner weitestgehend nebenberuflichen Promotion erforderte eine besondere Logistik und die Gesundheit, den Willen und das Verständnis vieler Menschen über einige Jahre. Ich bin froh, dass ich das Glück hatte, genau diese Bedingungen vorzufinden und bin darüber sehr dankbar.

Als erstes möchte ich mich bei meinem langjährigen akademischen Mentor Prof. Dr.-Ing. Klaus Hehl aufrichtig bedanken, der mich im Rahmen des zweifachen Studiums und der Promotion stets intensiv begleitet, gefördert und gefordert hat. Ihm verdanke ich mein gesamtes Wissen über die geodätischen Zusammenhänge. Auch kam durch ihn der Kontakt zu Prof. Dr. rer. nat. habil. Matthias Möller zustande. Bei Prof. Möller bedanke ich mich als erstes für die Bereitschaft zur Betreuung meiner Arbeit. Darüber hinaus habe ich durch ihn viele neue Impulse auf dem Gebiet der Geographie und Geoinformation und neue Sichtweisen im Rahmen zahlreicher Kolloquien erhalten, wofür ich ihm sehr dankbar bin. Für die Bereitschaft als weiteres Mitglied der Prüfungskommission mitzuwirken, danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill – ich fühle mich geehrt, auch durch ihn geprüft zu werden.

Durch meinen Beruf im Bereich der Landentwicklung und Flurbereinigung eröffnete sich – durch die dort notwendige Verknüpfung von virtuellen Daten (durch den komplexen Planungsprozess entstehende Geodaten) und der realen Welt (Anzeige und Abstimmung der Planungsergebnisse in der Örtlichkeit) – der Arbeitsbereich für das Promotionsvorhaben. Nach dem Leitbild meines Arbeitgebers ist in der heutigen Wissensgesellschaft das lebenslange Lernen und die Qualifikation der Mitarbeiter durch Eigeninitiative erforderlich. Diesem Grundsatz folgend wurde ich stets in Form von Datenmaterial, Technik und flexiblen Arbeitszeiten durch meinen Arbeitgeber unterstützt. Diese Bedingungen sind bei Weitem nicht selbstverständlich. Hierfür bedanke ich mich ausdrücklich bei Herrn Markus Klaer, Herrn Dr. Rainer Dietrich, Herrn Dr. Rolf-Denis Kupsch, Frau Elke Spahn, Frau Dr. Anja Wagner, Herrn Uwe Kielgas sowie insbesondere auch bei Herrn Sascha Bäcker vom Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg.

Im zweijährigen Forschungsprojekt 'LUNAS 3D hybrid' habe ich eine freundliche, kreative, kommunikative und lösungsorientierte Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Herrn Dirk Bormann und Herrn Torsten Genz kennengelernt. Bei beiden Herren bedanke ich mich für das Zustandekommen des Projektes und die hervorragende Zusammenarbeit. Für die bereitgestellten Räumlichkeiten während des Projektzeitraumes sowie die freundliche Aufnahme am Institut für Geoforschung geo3 der Beuth Hochschule für Technik Berlin bedanke ich mich beim gesamten Kollegium des Institutes und insbesondere bei Herrn Martin Vigerske für die technische Unterstützung.

Die Arbeit ist meiner Frau Kathrin Kreuziger, meinen Kindern Heidi und William Kreuziger, meinen Eltern Gudrun und Klaus Kreuziger sowie meiner Schwiegermutter Hannelore Krenz gewidmet. Bei allen möchte ich mich für die von ihnen geliehene Zeit bedanken, die ich in materialisierter Form mit dieser gebundenen Arbeit an sie zurückgeben möchte. Alle haben mich über die vielen Jahre in den täglichen Aufgaben des Familienlebens, immer wenn es notwendig wurde, entlastet und mir durch ihre Kraft die notwendigen Zeiträume geschaffen, um das Promotionsvorhaben durchzuführen.

Verzeichnis der verwendeten Akronyme

AAA	ATKIS [®] -ALKIS [®] -AFIS [®]	65
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der BRD.....	65
A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler.....	125
API	Application Programming Interface.....	34
AR	Augmented Reality.....	11
ArgeLandentwicklung	Nachhaltige Landentwicklung.....	65
ARML	Augmented Reality Markup Language.....	49
ASCII	American Standard Code for Information Interchange.....	76
BIM	Building Information Modeling.....	48
C/A	Coarse/Acquisition.....	132
CityGML	City Geography Markup Language.....	48
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.....	136
DBMS	Datenbankmanagementsystem.....	58
DGM	Digitales Geländemodell.....	30
DGNSS	Differential GNSS.....	132
DHHN2016	Deutsches Haupthöhennetz 2016.....	36
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.....	21
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service.....	132
EKP	Ereignisgesteuerte Prozesskette.....	48
EPS	Echtzeit-Positionierungs-Service.....	133
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy.....	51
ERM	Entity-Relationship Model.....	48
ETRF89	European Terrestrial Reference Frame 1989.....	34
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989.....	34
EUREF	Reference Frame for Europe.....	35
EWKB	Extended Well-Known Binary.....	64
EWKT	Extended Well-Known Text.....	64
GCG2016	German Combined Quasigeoid.....	36
GDI	Geodateninfrastruktur.....	11
GDI-DE	Geodateninfrastruktur Deutschland.....	26
GeoARS	Georeferenzierende Augmented Reality System(e) für Geodaten.....	3
GIS	Geo-Informationssystem, Geographisches Informationssystem.....	11
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema.....	33
GLSL	OpenGL Shading Language.....	143
GML	Geography Markup Language.....	49
GNSS	Global Navigation Satellite System.....	25
GPS	Navigational Satellite Timing and Ranging - Global Positioning System.....	33
GRS80	Geodetic Reference System 1980.....	35
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service.....	132
HMD	Head-Mounted Display.....	24
IAG	International Association of Geodesy.....	35
IGRF	International Geomagnetic Reference Field.....	128
INS	Inertial Navigation System.....	160
INSPIRE	INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe.....	24
IPS-LCD	I-Plane Switching - Liquid Crystal Display.....	83
ISO	International Organization for Standardization.....	21
ITRF	International Terrestrial Reference Frame.....	33
ITRF89	International Terrestrial Reference Frame 1989.....	34
ITRS	International Terrestrial Reference System.....	34
LCD	Liquid Crystal Display.....	83
LEFIS	Landentwicklungsfachinformationssystem	
LGPL	GNU Lesser General Public License.....	58
LSB	Least Significant Bit.....	100
MCI	Mensch-Computer-Interaktion.....	186
MEMS	Microelectromechanical Systems.....	97
NAS	Normbasierte Austauschschnittstelle.....	49

OGC	Open Geospatial Consortium	21
OLED	Organic Light-Emitting Diode	83
OMG	Object Management Group	48
OOA	Objektorientierte Analyse	47
OOD	Objektorientiertes Design	47
OOP	Objektorientierte Programmierung	47
OpenGL	Open Graphics Library	42
PNG	Portable Network Graphics	192
REO	Raumbezogenes Elementarobjekt	65
RMS	Root Mean Square	101
RW	Random Walk	101
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung	132
SBAS	Satellite Based Augmentation System	132
SDK	Software Development Kit	34
SLR	Satellite Laser Ranging	34
UML	Unified Modeling Language	48
URI	Uniform Resource Identifier	49
UTM	Universal Transverse Mercator	36
VLBI	Very Long Baseline Interferometry	34
VR	Vitual Reality	71
WFS	Web Feature Service	192
WGS84	World Geodetic System 1984	33
WLAN	Wireless Local Area Network	64
WMM	World Magnetic Model	128
WMS	Web Map Service	192
XML	Extensible Markup Language	49
X3D	Extensible 3D	50

(Die Seitenzahl gibt die erstmalige Verwendung des Akronyms an.)
