

Sensorik mobiler georeferenzierender AR-Systeme – aktuelle Herausforderungen

Ulf Kreuziger

Zusammenfassung

Während Virtual Reality (VR) inzwischen in den Arbeitsalltag integriert ist, halten mobile Anwendungen der Augmented Reality (AR) nur sehr zögerlich Einzug in die Arbeitspraxis. Der Reiz, Nichtvorhandenes oder Mögliches verschmolzen mit der Realität anschaulich darzustellen und zu vermitteln, ist ungebrochen, jedoch im Bereich handelsüblicher Mobilgeräte technologisch immer noch schwierig und weiterhin Gegenstand aktueller Forschungen. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dem aktuellen Stand mobiler Georeferenzierender Augmented Reality Systeme für Geoobjekte im Einsatzbereich außerhalb von Gebäuden (GeoARS), stellt den aktuellen Leistungsstand der handelsüblichen MEMS-Sensoren dar, klärt über die aktuell mögliche metrische Genauigkeit mobiler kostengünstiger AR-Systeme im Außenbereich auf und leitet daraus die Herausforderungen für den Praxiseinsatz im Arbeitsalltag ab.

Summary

While Virtual Reality (VR) is now integrated in daily (work) life, mobile Augmented Reality (AR) applications are very slow to find their way into working practice. The attraction of presenting and communicating the non-existent or the possible in a vivid way, merged with reality, remains unbroken, but in the field of commercially available mobile devices it is still technologically difficult and the subject of current research. This article deals with the current status of mobile geo-referencing augmented reality systems for geo-objects in applications outside buildings (GeoARS), presents the current performance status of commercially available MEMS sensors, clarifies the current possible metric accuracy of mobile low-cost AR systems in outdoor applications and derives the challenges for practical use in everyday work from this.

Schlüsselwörter: Augmented Reality, Georeferenzierung, Sensorik, MEMS, Smartphone

1 Einleitung

Augmented Reality ist schon deshalb sehr vielschichtig, weil sie alle Sinne des Menschen betrifft. Aus diesem Grund muss genau differenziert werden, welche menschlichen Sinne angesprochen werden sollen und um welche Kategorie AR-System es sich handelt, bevor man über AR diskutiert. Grundsätzlich bestehen AR-Systeme immer aus Software und Hardware, die sehr genau aufeinander abgestimmt sein müssen, um eine bestmögliche Immersion zu erreichen. Zur Realisierung der AR-Anwendun-

gen ist somit ein umfangreiches interdisziplinäres Fachwissen, u.a. auf dem Gebiet der Geodäsie, Informatik und Elektrotechnik erforderlich. Augmented Reality lässt sich in verschiedene Kategorien einordnen, z.B. nach den angesprochenen menschlichen Sinnen, nach den Interaktionsmöglichkeiten, nach der verwendeten Hardware, nach den Anwendungsmöglichkeiten oder nach der Verfahrensart zur Bestimmung der räumlichen Lage; vgl. Milgram et al. (1994), Azuma (1997), Azuma et al. (2001), Tönnis (2010), Bowman et al. (2004), Mehler-Bicher und Steiger (2014), Rolland et al. (2001). Die Systemklassen der GeoARS können theoretisch alle Sinne ansprechen (praktisch überwiegen jedoch visuelle, akustische, haptische Ausprägungen) und nutzen verschiedene Sensorkombinationen zur Bestimmung ihrer räumlichen Lage im geodätischen Bezugssystem ETRS89, sodass sie sich nicht genau einer Kategorie zuordnen lassen. Hinsichtlich des internen Aufbaus lassen sich GeoARS gut in Komponentenform beschreiben. Die vier Komponenten dienen zur Interaktion, Geodatenverarbeitung, Darstellung sowie zur Bestimmung der räumlichen Lage, vgl. Kreuziger (2017). Aktuell bestehen immer noch besonders große Herausforderungen bei der Komponente zur Bestimmung der räumlichen Lage, die unmittelbar von den verwendeten sensorischen Hardwarebestandteilen abhängen. Diese werden nachfolgend beschrieben und dabei wird erklärt, wofür man welchen Sensor benötigt, welche Sensormesswerte jeweils erzeugt werden und wie der jeweilige Sensormesswert mit der geometrischen Genauigkeit in Verbindung steht, um auf diese Weise über die aktuellen Herausforderungen im Bereich der handelsüblichen kostengünstigen Mikroelektronik zu berichten. Zuvor soll jedoch mit dem folgenden Kapitel ein kurzer Bericht der bisherigen Praxiserfahrungen mit einem realisierten AR-Prototypen auf Smartphone-Basis erfolgen.

2 Auswertung erster sensorischer AR-Erfahrungen mit GeoARS

In den vergangenen Jahren konnten im Bereich der Landentwicklung und Flurneuordnung, insbesondere beim Verband für Landentwicklung und Flurneuordnung Brandenburg erste praktische Erfahrungen mit GeoARS gesammelt werden. Dabei ist es gelungen, zunächst einen Prototyp zu entwickeln, der auf handelsüblicher Massenmarkthardware, wie Smartphones und Tablets, lauffähig ist. Dies ist insofern ein Erfolg, weil so erste praktische Erfahrungen im Arbeitsalltag mit AR-Technologie ge-

macht werden konnten. Während der Entwicklungsphase wurde einerseits die Hardware ausgewählt sowie evaluiert und andererseits die notwendige Software entwickelt. In der anschließenden Pilotierungsphase wurde das GeoARS unter Praxisbedingungen erprobt und verbessert. Mit dem eigens entwickelten AR-System konnten beliebige

beide deckungsgleich überlagern. Insbesondere ist hierbei gemeint, dass die Fusion der virtuellen Daten mit dem Abbild der Realität mit hoher Präzision realisiert werden muss, da nur so eine hohe Immersion erfolgt. Bei der Analyse dieser Herausforderung konnte herausgefunden werden, dass der Maßstab hier eine wesentliche Rolle

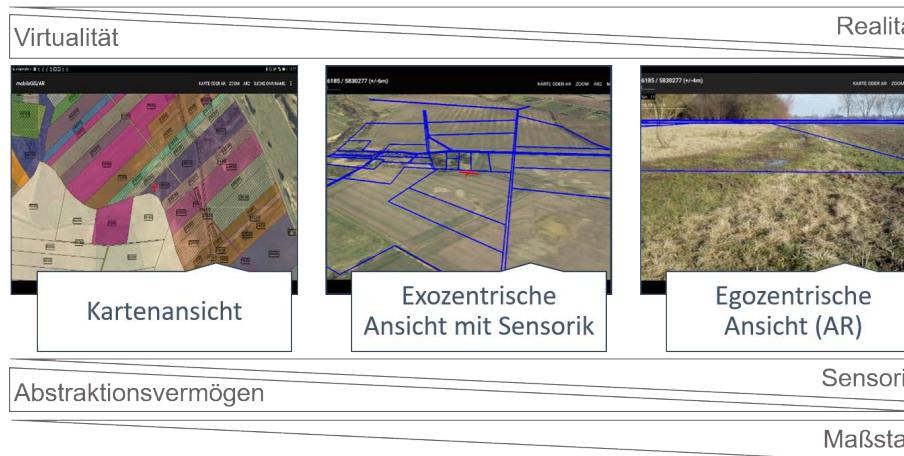


Abb. 1:
Perspektivische
AR-Ansichten

Geodaten aus GI-Systemen oder über Web-Dienste (z.B. Flurstücksgrenzen des Liegenschaftskatasters) in das GeoARS eingeladen, dreidimensional perspektivisch mit dem Kamerabild überlagert und in der Natur betrachtet werden. Eine AR-Ansicht eigener mit GIS erzeugter Geodaten wurde auf diese Weise überhaupt erst praktisch möglich.

Zunächst war dies eine sehr außergewöhnliche Erfahrung für geodätische Anwender, die Augmented Reality so erleben zu dürfen – Geodaten, die sonst lediglich auf dem Computerbildschirm oder auf Karten betrachtet werden konnten, werden so begehbar und im Felde erlebbar. Dies ist an sich schon ein guter Fortschritt. Ein weiterer Fortschritt ist die Möglichkeit, das Nutzerverhalten im Umgang mit einem GeoARS erforschen zu können. Faszinierend ist die gewonnene Erkenntnis aus der Analyse des Nutzerverhaltens. Es wurde deutlich, dass eine reine AR-Anwendung in der Egozentrischen Ansicht (vgl. Abb. 1 rechts) nicht oder nur sehr eingeschränkt im Umgang mit Geodaten aus GI-Systemen eingesetzt werden kann. Die Nutzer benötigten zur Orientierung weitere Ansichten der Geofachdaten, die Exozentrische Datenansicht und die Kartenansicht in der Draufsicht (vgl. Abb. 1 Mitte und links) mit der Möglichkeit, die Karte zu verschieben und das Kartenbild zu vergrößern oder zu verkleinern (Zoom-Funktion). Bereits hier deutete sich die später bestätigte Erkenntnis an, das GeoARS besonders sinnvoll als Ergänzung oder in Kombination eines mobilen GIS eingesetzt werden können.

Das Ziel der visuellen Augmented Reality eines GeoARS ist es, den Überlagerungsprozess von virtuellen Geoobjekten mit den realen Geoobjekten möglichst gut durchzuführen. Aber was bedeutet »möglichst gut« für die Implementierung eines GeoARS? Sofern es ein digitales Abbild eines realen Geoobjektes gibt, sollten sich

spielt. Während in der Exozentrischen Darstellung (z.B. im Maßstab 1:500) auftretende Ungenauigkeiten nur unwesentlich spürbar waren, wurde die Erfahrung gemacht, dass sich diese in der Egozentrischen Darstellung (vgl. Abb. 1 rechts) – d.h. im Maßstab 1:1 – gravierend auswirken. Um den Grund dafür herauszufinden, wurde die eingesetzte Hardware des GeoARS genauer untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

3 Freiheitsgrade eines mobilen GeoARS

Mobile GeoARS werden regelmäßig in der Hand gehalten und frei im Raum bewegt. Sie besitzen durch die drei möglichen Rotationen und die drei möglichen Translationen sechs voneinander unabhängige räumliche Bewegungsmöglichkeiten, d.h. sechs Freiheitsgrade. Aufgabe der Komponente zur Bestimmung der räumlichen Lage eines GeoARS ist es nun, genau diese räumliche Lage in Form einer absoluten Georeferenzierung zu bestimmen. Diese globale Georeferenzierung ist das wahrscheinlich wichtigste Alleinstellungsmerkmal von GeoARS. Unter dem Begriff räumliche Lage wird in diesem Kontext die Kombination von Position und Orientierung im dreidimensionalen Raum verstanden. Synonym dazu wird, aus dem Anwendungsfeld der Robotik stammend, auch der Begriff Pose nach DIN EN ISO 8373 verwendet. Im Kapitel »Geometrie und Kinematik« dieser DIN-Norm ist der Begriff Pose als »Kombination von Position und Orientierung im Raum« beschrieben, die sich allerdings nicht direkt auf geodätische Bezugssysteme bezieht. Erst nach Lösung dieser dreidimensionalen Lagebestimmung können die virtuellen Geodaten erfolgreich mit der Realität in Verbindung gesetzt werden.

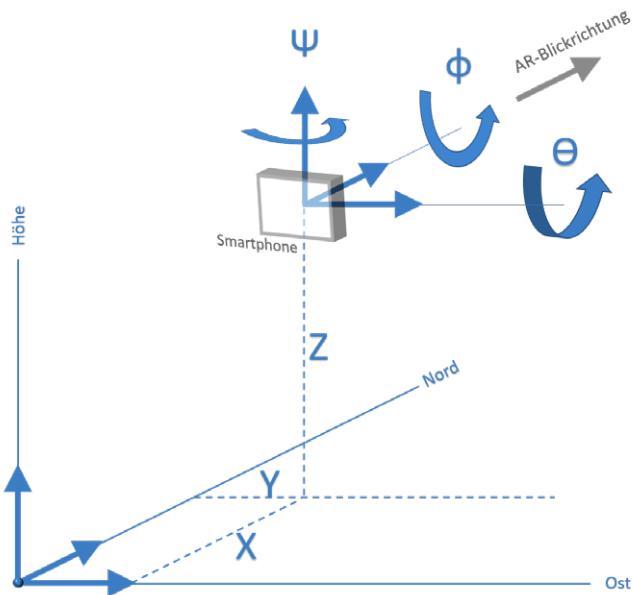


Abb. 2: Bestimmungsgrößen der räumlichen Lage eines GeoARS

Über die Sensorik wird das Ziel verfolgt, die räumlichen Bewegungen in einem globalen geodätischen Bezugssystem zu detektieren und die sechs Bestimmungsgrößen aus den Sensormesswerten abzuleiten. Die ersten drei Bestimmungsgrößen (Orientierung) werden für GeoARS in Anlehnung an die DIN ISO 8855 (Straßenfahrzeuge) und ISO 1151-1/DIN 9300 (Luft- und Raumfahrt) wie folgt definiert, jeweils in der Einheit Grad [°] (vgl. Abb. 2):

- Gier-Winkel ψ (Psi, engl. yaw angle) als horizontaler Rotationswinkel um die vertikale Achse
- Nick-Winkel Θ (Theta, engl. pitch angle) als vertikaler Rotationswinkel um die Querachse
- Roll-Winkel Φ (Phi, engl. roll angle) als vertikaler Rotationswinkel um die Längsachse

Die drei übrigen Bestimmungsgrößen (Position) sind die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten des GeoARS-Zentrums im erdfesten Topozentrischen Bezugssystem, jeweils in der Einheit Meter [m]:

- geographischer Nord-Wert X
- geographischer Ost-Wert Y
- Höhe Z entlang der Rotationsellipsoidnormalen

Tab. 1: Sensoren und ihr Beitrag im GeoARS

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

● = beteiligt | ○ = nicht beteiligt | ● = teilweise/optional beteiligt

4 Sensorik mobiler Georeferenzierender AR-Systeme

Die Bestimmung der räumlichen Systemlage eines AR-Systems in einem globalen geodätischen Bezugssystem kann praktisch auf sehr vielfältige Weise erfolgen. Eine Möglichkeit ist hierbei durch die Verwendung kostengünstiger Massenmarkthardware, z.B. durch handelsübliche Smartphones, gegeben. In nahezu jedem aktuellen Smartphone sind die nachfolgenden Sensoren, teilweise in Modulform, verbaut:

- Drehratensensor
- Beschleunigungssensor
- Magnetfeldsensor
- GNSS-Sensor
- Bildsensor
- Temperatursensor

Jeder Sensor kann hierbei zur Bestimmung mindestens einer der gesuchten Größen (ψ , Θ , Φ , X, Y, Z) beitragen. Eine Übersicht des jeweiligen Sensorbeitrags fasst Tab. 1 zusammen.

Von den vorgenannten sechs Mikrosensoren werden in diesem Fachbeitrag die Erkenntnisse zu den Drehraten-, Beschleunigungs-, Magnetfeld- und Bildsensoren in Bezug auf ihre Aufgabe in GeoARS zusammengefasst und Aussagen zu den erreichbaren geometrischen Genauigkeiten in AR-Anwendungen beschrieben. Die grundsätzlichen Aussagen sowie Messwertdiagramme entstammen aus Kreuziger (2017) und wurden auf den aktuellen Stand der Technik, Forschung und Entwicklung abgeglichen.

4.1 Drehratensensoren

Drehratensensoren können zur Glättung von Winkelmesswerten des Beschleunigungssensors, als Detektor für außergewöhnliche Ereignisse, u.a. Erschütterungen, oder für sehr kurze Zeiträume zur Berechnung der räumlichen Lage (ψ , Θ , Φ) in Form der Inertialnavigation eingesetzt werden. Grundsätzlich wird mit Drehratensensoren (engl. gyroscope) die Winkelgeschwindigkeit ω in der Einheit Radian pro Sekunde (rad/s) oder Dezimalgrad pro Sekunde (°/s) gemessen. In Smartphones verwendete Drehratensensoren sind vom Typus der MEMS-Vibrationskreisel und besitzen drei orthogonal zueinander angeordnete sensible Achsen. MEMS steht dabei als Abkürzung für Microelectromechanical Systems, also Systeme aus sehr kleinen, elektrischen und mechanischen Bauteilen. Die Gehäuse der MEMS sind regelmäßig nur wenige Millimeter groß (ca. 1–3 mm), wobei eine weiter

MEMS-Vibrationskreisel und besitzen drei orthogonal zueinander angeordnete sensible Achsen. MEMS steht dabei als Abkürzung für Microelectromechanical Systems, also Systeme aus sehr kleinen, elektrischen und mechanischen Bauteilen. Die Gehäuse der MEMS sind regelmäßig nur wenige Millimeter groß (ca. 1–3 mm), wobei eine weiter

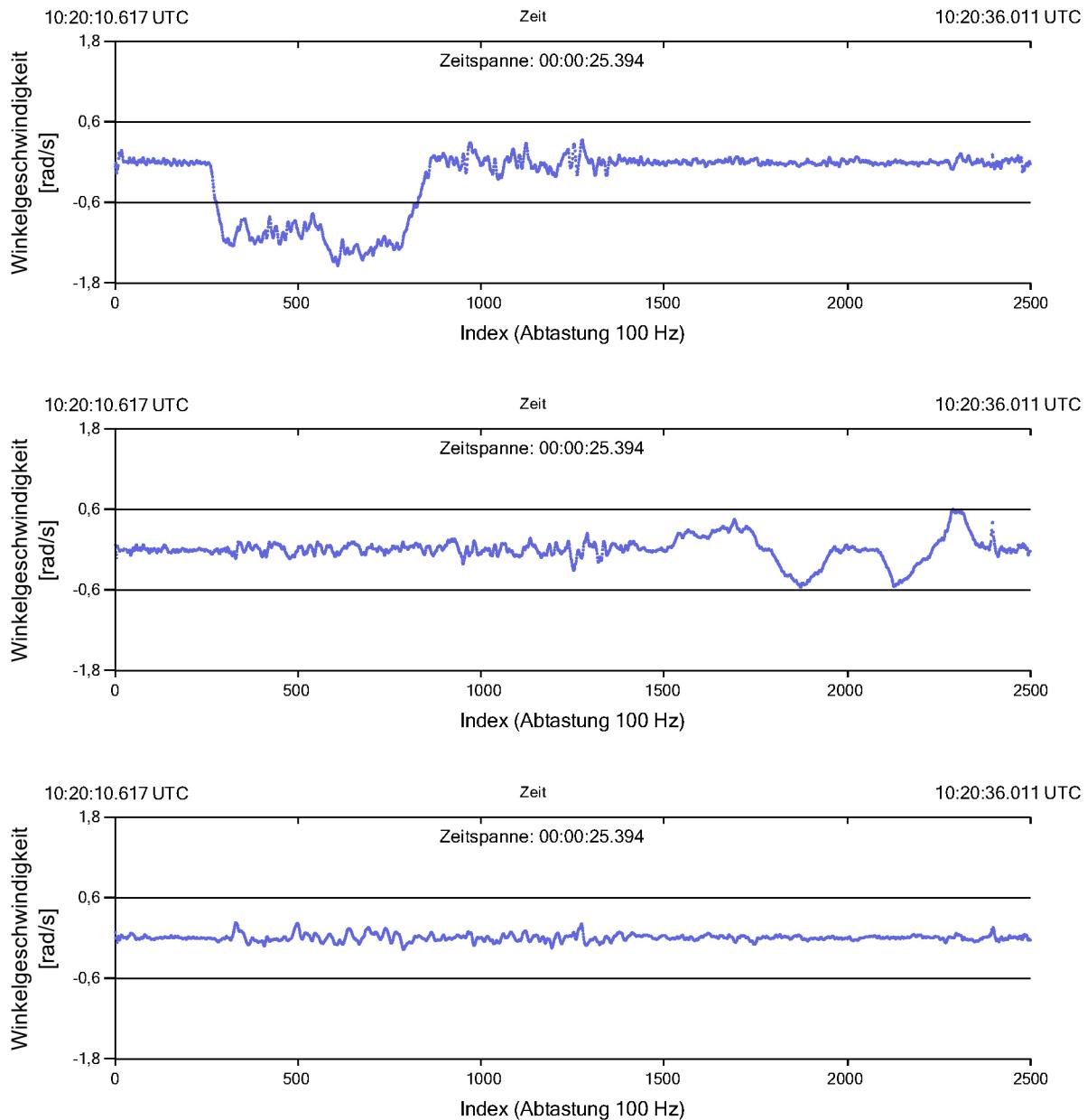


Abb. 3: Messwerte Drehratensor Sensor Smartphone: AR-Normalnutzungsbedingungen
(oben: x-Achse, Mitte: y-Achse, unten: z-Achse)

fortschreitende Miniaturisierung zu beobachten ist. Es wird hier einen Messbereich bis maximal $\pm 2000 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ bei einer Auflösung von ca. $0,06 \text{ }^{\circ}/\text{s}/\text{LSB}$ (für Messbereich $\pm 2000 \text{ }^{\circ}/\text{s}$) abgedeckt. MEMS-Kreisel unterliegen einer starken Temperaturabhängigkeit, weswegen entsprechende Messwertkorrekturen vorzunehmen sind, die jedoch teilweise herstellerseitig mittels Mikroprozessor erfolgen; aber eben nur teilweise. Welche Winkelgeschwindigkeiten in der AR-Praxis tatsächlich auftreten, geht aus den Sensormesswerten der Abb. 3 hervor.

Die Abbildung zeigt die aufgezeichneten Winkelgeschwindigkeiten, die bei einer explorativen Normalnutzung mit kontinuierlicher visueller Rückkopplung eines mobil-pedestrischen AR-Systems (Smartphone), das heißt während der Erkundung der unmittelbaren Umgebung, auftreten. Bei diesem exemplarischen Versuch hält der

Nutzer das Smartphone 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. Bei dieser normalen Nutzungsweise treten Winkelgeschwindigkeiten von ca. $90 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ für die Gier-Bewegung auf. Das zügige vertikale Drehen, Schwenken und Neigen ruft Winkelgeschwindigkeiten der Nick-Bewegung von ca. $35 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ hervor. Hinsichtlich der Roll-Bewegung treten maximale Winkelgeschwindigkeiten von ca. $15 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ auf. Beim Herunternehmen eines Smartphones aus dem Gesichtsfeld treten jedoch deutlich höhere Winkelgeschwindigkeiten mit ca. $500 \text{ }^{\circ}/\text{s}$ auf.

Ein starkes Schütteln des Gerätes würde sogar Winkelgeschwindigkeiten von $\pm 2000^\circ/\text{s}$ überschreiten und damit außerhalb des Messbereiches des Sensors liegen. Befindet sich ein GeoARS in absoluter Ruhelage, so betragen die Sensormesswerte theoretisch Null. Das regelmäßig vorhandene Sensorrauschen führt allerdings in der Praxis doch zu Messwertausgaben des Sensors. Es ist festzustellen, dass die Messbereiche der in Smartphones verbauten Drehratensensoren zwar die Praxiserfordernisse abdecken, jedoch der größtmögliche Messbereich am Sensor eingestellt werden muss, was gleichzeitig eine geringere Abtastgenauigkeit bedeutet. In weiteren Experimenten wurde festgestellt, dass eine klassische Inertialnavigation, d. h. die Integration der Drehraten (und Beschleunigungen) zur Bestimmung der räumlichen Bewegung, nur für sehr kurze Zeiträume möglich ist, sodass diese Sensorart für präzise Inertialnavigation noch nicht verwendet werden kann. Hier muss der technische Sensorfortschritt abgewartet werden. Für die übrigen vorgenannten Aufgaben sind Drehratensensoren jedoch in einem GeoARS verwendbar und sogar unerlässlich.

4.2 Beschleunigungssensoren

Beschleunigungssensoren werden für die Berechnung des Nick- und Rollwinkels (Θ, Φ) eingesetzt, sind an der Bestimmung des Gierwinkels in Verbindung mit dem Magnetfeldsensor beteiligt (sie können ihn allerdings selbst nicht messen), dienen als Detektor für außergewöhnliche Ereignisse oder können für sehr kurze Zeiträume zur Navigation und Positionierung verwendet werden. Beschleunigungssensoren (engl. accelerometer) sind Sensoren, die die auf eine Probemasse wirkende Trägheitskraft in Form einer Beschleunigung messen. Ihre Messwerte werden hier in der Einheit Meter pro Quadratsekunde (m/s^2) ausgegeben. In Smartphones werden dreiachsiges MEMS-Beschleunigungssensoren, die das Auslenkungsprinzip mit einer kapazitiven Wandlungsform verwenden, verbaut. In den Spezifikationen werden technische Parameter regelmäßig auch als Vielfaches des Betrages der Schwerkraft angegeben. Üblicherweise liegen die konfigurierbaren Messbereiche von $\pm 2 \text{ g}$ bis $\pm 16 \text{ g}$ bei einer Auflösung von $0,307 \text{ m/s}^2/\text{LSB}$ bis $0,0006 \text{ m/s}^2/\text{LSB}$ (für den Messbereich $\pm 2 \text{ g}$) vor. Auch sie unterliegen einer starken Temperaturabhängigkeit, weswegen wiederum entsprechende Messwertkorrekturen vorzunehmen sind. Erneut soll durch ein Experiment aus der Anwenderpraxis gezeigt werden, welche Beschleunigungen bei einer explorativen Normalnutzung eines AR-Systems (Smartphone) auftreten, das mit einer kontinuierlichen visuellen Rückkopplung benutzt wird. Der durchgeführte Versuch entspricht im Ablauf exakt dem oben beschriebenen Versuch zu den Winkelgeschwindigkeiten der Drehratensensoren, das heißt einer 360° -Drehung um die Nutzerachse, Geradeausgehen, Stehenbleiben, Schwenk nach unten und nach

oben. Während dieser normalen, explorativen Nutzung eines GeoARS treten Beschleunigungen von maximal ca. 12 m/s^2 beziehungsweise ca. $1,2 \text{ g}$ auf (vgl. Abb. 4).

Ein zügiges vertikales Schwenken (Nick-Bewegung) bewirkt verhältnismäßig kleine Beschleunigungen von ca. $5,8 \text{ m/s}^2$ (ca. $0,6 \text{ g}$). Beschleunigungen durch seitliches Kippen (Roll-Bewegungen) treten hier mit maximal ca. $1,4 \text{ m/s}^2$ (ca. $0,1 \text{ g}$) auf. Es ist zudem festzustellen, dass für Nick- und Roll-Bewegungen die horizontalen Achsen (y -Achse und z -Achse) empfindlicher sind, als es die vertikale Achse (x -Achse) ist. Während eine harmonische Nutzerbewegung gerade einmal kleine relative Beschleunigungswerte von $0,5 \text{ g}$ hervorruft, so bewirkt ein starkes Schütteln Beschleunigungen von etwa 4 g . Befindet sich ein GeoARS in absoluter Ruhelage, so betragen die Sensormesswerte nicht Null, sondern sensieren das lokale Erdschwerefeld und geben die Schwerkraftbeschleunigung als Messwerte aus. Wie schon bei den Drehratensensoren ist auch hier festzustellen, dass die Messbereiche der in Smartphones verbauten Beschleunigungssensoren die Praxiserfordernisse abdecken. Es darf jedoch am Sensor keinesfalls der kleinste (und damit sensibelste) Messbereich am Sensor eingestellt werden, sondern ein weitaus größerer Messbereich, was im Umkehrschluss eine geringere Abtastgenauigkeit bedeutet, da man auch unvorhergesehene Ereignisse im Rahmen der Systemintegrität detektieren muss. Eingesetzt werden Beschleunigungssensoren in GeoARS in erster Linie dazu, das Erdschwerefeld abzutasten und über die Schwerkraft die Geräteneigung, d. h. den Nickwinkel und den Rollwinkel, zu bestimmen. Zwar weisen die verbauten MEMS-Sensoren ein starkes Rauschen (Standardabweichung ca. $\pm 0,023 \text{ m/s}^2 \approx 0,0023 \text{ g}$) auf, trotzdem genügen die praktisch erreichbaren Genauigkeiten der aktuellen Beschleunigungssensoren, um Geobjekte mit einer Genauigkeit des Neigungswinkels von ca. $\pm 0,2^\circ$ zu überlagern. Dies entspricht einer Lageabweichung von ca. $0,2 \text{ m}$ bei einer Entfernung von 100 m . Beschleunigungssensoren zeigen sich ebenfalls gegenüber störenden Umgebungsfaktoren unempfindlich, mit Ausnahme der Temperatur. Diese Eigenschaft ist als sehr positiv zu bewerten, da alle übrigen Sensoren (außer Drehratensensoren) gerade diese wichtige Eigenschaft nicht aufweisen.

4.3 Magnetfeldsensoren

Magnetfeldsensoren dienen der Berechnung des Gierwinkels (ψ), insbesondere der absoluten Orientierung des topozentrischen Koordinatensystems sowie als Detektor für außergewöhnliche Ereignisse. Wie die nachfolgenden Ausführungen noch zeigen werden, ist die Bestimmung des korrekten Gierwinkels aus den Sensormesswerten weitaus schwieriger als die Bestimmung der Neigungswinkel aus den Beschleunigungsmesswerten. In aktuellen Smartphones verbaute dreiachsiges Magnetfeldsensoren nutzen den Hall-Effekt. Ihre Messwerte werden in der

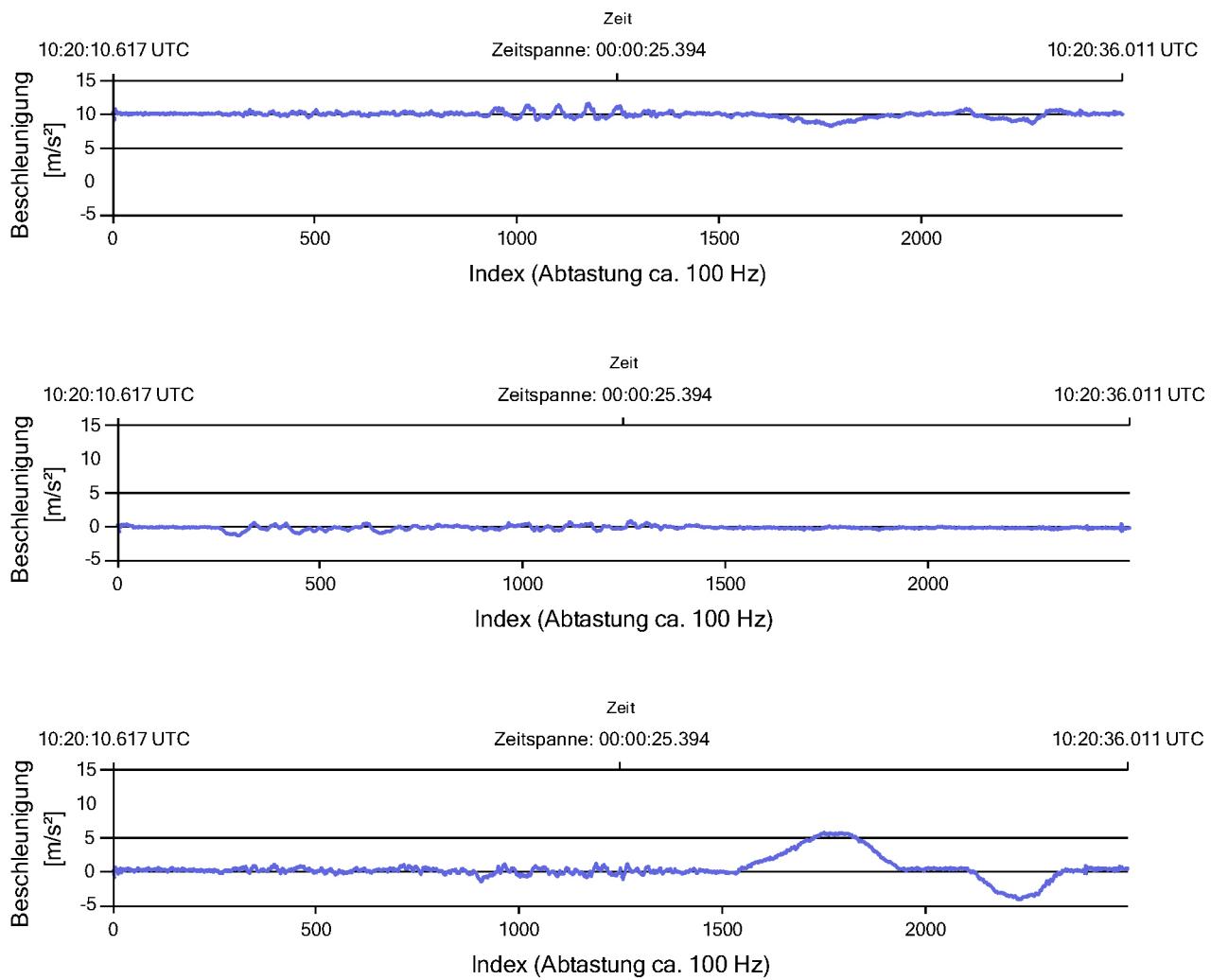


Abb. 4: Messwerte Beschleunigungssensor Smartphone: AR-Normalnutzungsbedingungen
(oben: x-Achse, Mitte: y-Achse, unten: z-Achse)

Einheit Mikrotesla ($\mu\text{T} = 10^{-6} \text{ T}$) formuliert, wohingegen in geowissenschaftlichen Disziplinen die Messwerte von Magnetfeldsensoren in der Regel im Nanoteslabereich, d. h. drei Zehnerpotenzen genauer, angegeben werden. Der Messbereich handelsüblicher kostengünstiger Sensoren liegt zwischen $\pm 1200 \mu\text{T}$ bis $\pm 4912 \mu\text{T}$ bei einer Auflösung von $0,06 \mu\text{T}/\text{LSB}$ und $0,3 \mu\text{T}/\text{LSB}$. Auch sie kennzeichnet eine starke Temperaturabhängigkeit. Ein einstellbarer Messbereich von $\pm 100 \mu\text{T}$ wäre für GeoARS wegen der höheren Empfindlichkeit deutlich geeigneter, denn die Totalintensität des Erdmagnetfeldes befindet sich gerade in diesem Bereich. Weiterhin sind bei einer horizontalen Lage eines GeoARS für die Berechnung des Gierwinkels in erster Linie die beiden horizontalen Achsen des Magnetfeldsensors beteiligt. Dies sind für das Praxisbeispiel der Abb. 5 die y- und z-Achse.

Die Abbildung zeigt eine Folge von Magnetfeld-Messwerten 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 Feld-

stärke der einen horizontalen Achse (hier: z-Achse) bleibt genähert konstant bei etwa $-14 \mu\text{T}$, während die Feldstärke an der zweiten horizontalen Achse (hier: y-Achse) ab dem Messwert 90 von genähert $0 \mu\text{T}$ auf etwa $8 \mu\text{T}$ zunimmt. Diese Beobachtung überrascht zunächst, hätte man doch vermuten können, dass sich das horizontale Erdmagnetfeld bei diesem Versuch in beiden Horizontalachsen des Sensors wiederspiegelt. Ein Delta des Intensitätsmesswertes der y-Achse (Δy) bewirkt somit direkt ein Delta des resultierenden Gierwinkels. In der Praxis befinden sich mobile GeoARS jedoch selten in einer absoluten horizontalen Position. Das führt dazu, dass bei Neigungen des Systems der horizontale Erdmagnetfeldanteil auch auf die vertikale Achse abgebildet wird und somit die dritte Sensorachse in die Gierwinkelberechnung einzogen werden muss. Neben der reinen Messgenauigkeit des Sensors ist eine Vielzahl verschiedenartiger Variablen im Umgang bei der Detektion des Erdmagnetfeldes zu beachten. So weist das Erdmagnetfeld kritische nicht konstante Eigenschaften auf, z. B. zeitliche Variationen und Anomalien. Tageszeitliche Variationen liegen im Bereich weniger Bogenminuten ($< \pm 6'$) und wirken sich bereits

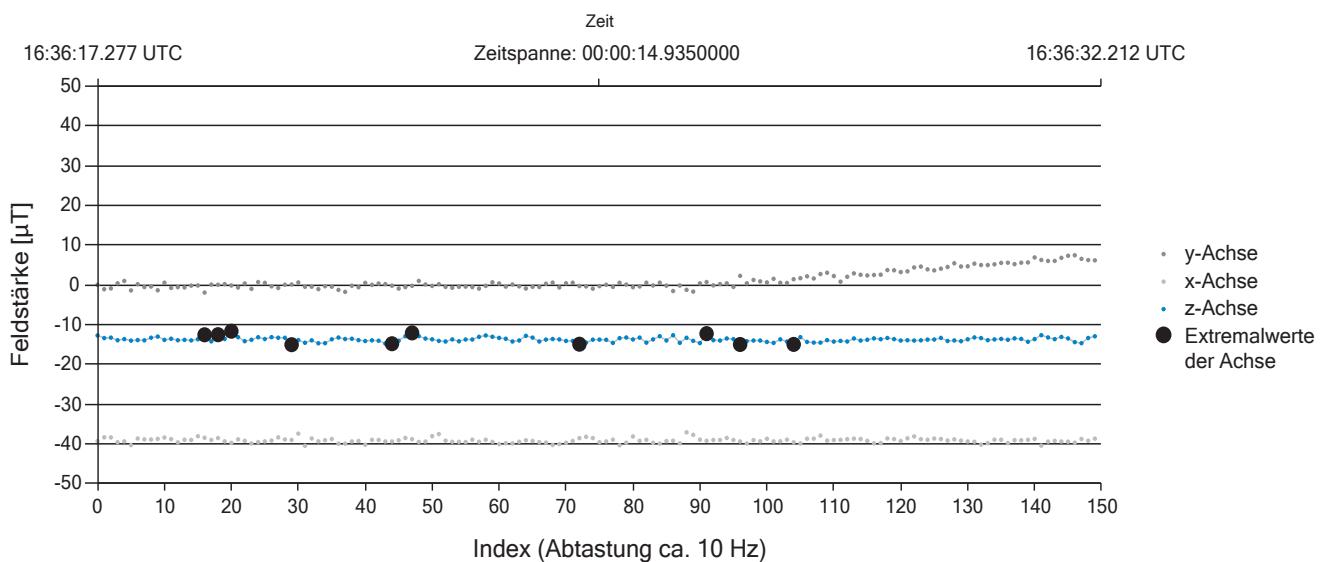


Abb. 5: Messwerte Magnetfeldsensor Smartphone: horizontale Drehung um 25° im Uhrzeigersinn

im Bereich von einigen Zehntel Grad ($<\pm 0,2^\circ$) im Gierwinkel aus. Diese Variationen lassen sich auch mit den in Smartphones verbauten Magnetfeldsensoren beobachten. In einem Versuch für einen mehrstündigen Zeitraum in einer magnetisch ungestörten Referenzumgebung im Außenbereich wurde ein Smartphone genähert horizontal in Ruheposition gelagert und zuvor einer Temperaturanpassung unterzogen.

Die Abb. 6 stellt den errechneten Gierwinkel dieser Beobachtungsreihe dar. Nachdem die Beträge in der ersten Hälfte des Diagramms geringfügig absinken, steigen sie insbesondere im letzten Drittel stärker an. Die Wertänderung in diesem letzten Drittel kommt einer Ablenkung nach Westen gleich. Diese tatsächliche Ablenkung des Gierwinkels, zuerst leicht nach Osten und dann nach Westen, konnte durch die geomagnetische Referenzstation

Niemegk des GFZ Potsdam für diesen Zeitraum bestätigt werden. Somit konnten tageszeitliche Erdmagnetfeldvariation mit einem Mobilgerät beobachtet werden, die am Ende des Beobachtungszeitraumes etwa $-5'$ ($\approx 0,1^\circ$) betragen und in dieser Größenordnung für AR-Anwendungen berücksichtigt werden müssen. Ungeachtet tageszeitlicher Variationen des Erdmagnetfeldes wirken in unmittelbarer Nähe des Sensors weitere Einflussfaktoren, u. a. der Hart- und Weicheiseneffekt, z. B. durch übrige Hardwarekomponenten oder nahe metallische Gegenstände. Für die Verwertbarkeit der Sensorergebnisse und zur Konzeption von mobilen GeoARS sind diese komplexen und teilweise schwer greifbaren Einflussfaktoren zu berücksichtigen und die Systemintegrität in Echtzeit zu überwachen, u. a. durch die Definition und kontinuierliche Prüfung eines Gültigkeitsbereichs (Schwellwert)

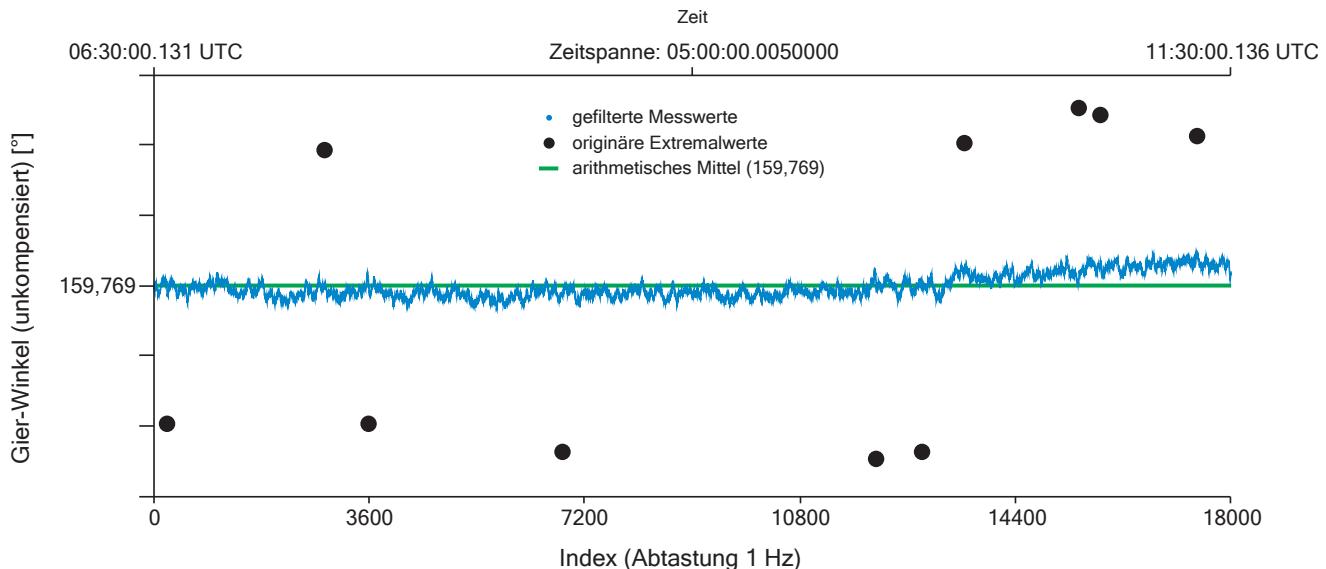


Abb. 6: Messwerte Magnetfeldsensor Smartphone: Untersuchung des Gierwinkels in absoluter Ruhelage im ungestörten Außenbereich

innerhalb der AR-Anwendung, z.B. $40 \mu\text{T} < T < 60 \mu\text{T}$ (für Deutschland). Eine weitere Notwendigkeit ist der Abgleich der aktuellen Variation des Erdmagnetfeldes durch die Einbindung eines Echtzeitdienstes mit einer präzisen Referenzstation (z.B. Niemegk oder Wingst) per Daten- netz. Die derzeit erreichbare Gierwinkel-Genauigkeit liegt bei ungefähr $\pm 0,4^\circ$. Damit ist die Bestimmung des Horizontalwinkels eines GeoARS doppelt so ungenau wie die Bestimmung des Vertikalwinkels über den Beschleunigungssensor. Für Geoobjekte in einer Entfernung von 50 m resultiert daraus eine Lagegenauigkeit in der Quer- abweichung von etwa $\pm 0,35$ m. Bestände eine hardware- seitige Einstellungsmöglichkeit auf einen besser geeig- neten Messbereich, z.B. auf $\pm 100 \mu\text{T}$, so würde sich die verbesserte Sensitivität positiv auf die erreichbare geo- metrische Genauigkeit auswirken. Diese Einstellung kann allerdings insbesondere bei Smartphones nicht getroffen werden. Als Konsequenz der aufgezeigten Einschränkun- gen aus der Sensierung des Magnetfeldes wird vorge- schlagen, das Magnetfeld zunächst für die globale Lage- rung des GeoARS im topozentrischen Koordinatensystem zu verwenden und anschließend den Gierwinkel für die fortlaufende lokale Navigation gemeinsam mit anderen Sensoren zu ermitteln, insbesondere Bildsensoren.

4.4 Bildsensoren

Bildsensoren sind die wohl vielseitigsten Systemsenso- ren eines GeoARS und können für verschiedenste Auf- gaben genutzt werden. Ihr Aufgabenbereich erstreckt sich – neben der Hauptaufgabe zur Erfassung des Ab- bildes der Realität für die Darstellungskomponente in video see-through Systemen (Display) – auf die Aufgaben der Detektion (Objekterkennung, Bewegungserkennung, Objektverfolgung), räumlichen Lagebestimmung (vgl. auch kamerabasiertes Tracking, z.B. in Arth et al. 2015), Orientierungsberechnung (Berechnung von horizontal- und Vertikalwinkel aus Bildfolgen), Integritäts- und Kontrollfunktion sowie Schaltfunktion. In aktuellen Smart- phones verbaute Bildsensoren verwenden hauptsächlich das Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) (dt.: sich ergänzender Metall-Oxid-Halbleiter) Verfahren. Auf weitere Bildsensorarten wird später noch eingegan- gen. CMOS-Sensoren zeichnen sich durch einen geringen Energie- bzw. Leistungsbedarf sowie Temperaturstabilität und geringe Störempfindlichkeit aus. Das Funktionsprin- zip beruht auf der Basis von Fotodioden, die in Matrix- form angeordnet sind. Durch die Zeilen- und Spalten- adressierung können die einzelnen Dioden angesprochen werden. Während des Belichtungsprozesses wird die Sperrschi- cht jeder einzelnen Fotodiode durch die ein- fallende Lichtstrahlung aufgeladen (Belichtungsprozess), die Ladung abgetastet und in Form eines Videosignals ausgelesen. Aus der orts- und wertdiskreten, in physika- lischen Größen definierten Bildfunktion, die durch eine Bildmatrix repräsentiert wird, entsteht abschließend das

digitale Bild mit der Flächeneinheit Pixel (vgl. Richter und Teichert 2009, DIN 18716-2, Hering und Schönfelder 2012, Hesse und Schnell 2014).

Nach DIN 18716-3 wird als radiometrische Auflö- sung die Fähigkeit eines Sensors bezeichnet, (geringe) Strahlungsunterschiede noch messtechnisch erfassen zu können. Sie wird folglich durch die Anzahl der (Grau-) Stufen und damit durch die Bit-Tiefe bestimmt. Smart- phone-Sensoren mit einer Bit-Tiefe von 10 bit können dabei 1024 Stufen auflösen. Neben einer möglichst ho- hen radiometrischen Auflösung ist eine hohe Bilddyna- mik für AR-Zwecke notwendig. Nach Hering und Schönfelder (2012) kann das menschliche Auge in einem Bild eine Dynamik von bis zu 140 dB verarbeiten, wohin- gen ein CMOS-Sensor bedingt durch die verwendbaren elektrischen Schaltungen lediglich bis zu etwa 70 dB ab- decken kann. Die Dynamik von Smartphone-Bildsenso- ren beträgt teilweise nur etwa 30–40 dB. Als Folge wer- den im Einsatzgebiet von GeoARS, dem Außenbereich, einige Bildteile häufig unter- oder überbelichtet und die Dynamik von Schlagschatten oder Gegenlicht (Sonne) nicht richtig wiedergegeben, mit der Konsequenz der Un- brauchbarkeit dieses Sensors für Zwecke der Navigation oder Bilddarstellung. Einfache Smartphone-Bildsenso- ren ermöglichen eine Bildwiederholrate von mindestens 30 Bildern pro Sekunde bei einer Auflösung von 1920 Pixel \times 1080 Pixel für das erforderliche Livebild – hoch- preisige Geräte leisten sogar ein Mehrfaches davon. Die Bildwiederholrate ist zum einen für eine flüssige Darstel- lung des Livebildes (für das menschliche Auge ca. 20–25 Bilder pro Sekunde (vgl. Schenk und Rigoll 2010) auf dem Display wichtig, aber mehr noch für die Berechnung der räumlichen Lage aus dem Kamerabild bei kamerabasiertem Tracking. Untersucht man aktuelle Bildsensoren hinsichtlich ihres geometrischen Auflösungsvermögens, so lässt sich zeigen, dass das geometrische Auflösungs- vermögen den Anforderungen der Praxis genügt. Bei- spielsweise ergibt sich bei einer Aufnahmeentfernung von 100 m mit einer Brennweite 3,43 mm und der Di- mension eines Pixels des Bildsensors von 1,4 μm , dass sich ein kleinstmöglich erfassbares Objekt mit der Breite von 0,04 m aufnehmen lässt. Allerdings führen Objek- tiv- und Einbaufehler der Kamerakomponenten zu gra- vierenden Bildfehlern. Hier kann gezeigt werden, dass die maximale Gesamtfehlerauswirkung an den Bildrändern in einer Entfernung von 100 m einen Lagefehler von ca. 5 m bewirkt und damit das hohe geometrische Auf- lösungsvermögen konterkarieren. Diesbezüglich wurden bereits GPU-Echtzeitkorrekturansätze für diese Bildfeh- ler über Zugriff auf die Grafikpipeline unter Anwendung von Schattierer-Programmen (engl. shader) erarbeitet, mit denen Bildfehler durch Nutzung des Grafikprozessors in Echtzeit behoben werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Bild- sensoren grundsätzlich den Anforderungen für die kor- rekte Darstellung der realen und virtuellen Geoobjekte gerecht werden. Für die Zwecke der Bestimmung der

räumlichen Lage eines AR-Systems existieren Verfahren (z.B. Arth et al. 2015) zur Detektion von Landmarken. Eine Landmarke ist gemäß DIN EN ISO 8373 ein »erkennbares künstliches oder natürliches Objekt, das zur Lokalisierung ... dient«. Allerdings funktionieren diese Verfahren nur bedingt im Außenbereich und können gerade im ländlichen Raum schwer oder gar nicht angewendet werden, da der Bildsensor für diese Aufgabe durch diverse Umgebungsfaktoren, z.B. wechselnde Lichtverhältnisse oder dynamische Realobjekte, konterkariert wird. Neben den nicht änderbaren Umgebungsfaktoren behinderte die mangelhafte Systemperformanz bislang große Fortschritte. Die Lokalisierungsalgorithmen arbeiteten häufig softwarebasiert auf der CPU. Durch feste Integration der Algorithmen in die Gerätehardware in Kombination mit einer direkten GPU-Nutzung und Integration in die Betriebssysteme sind hier bereits Fortschritte spürbar, z.B. anhand der neuen betriebssystembasierten AR-Programmierschnittstellen ARCore oder ARKit, die mit dafür geeigneten Smartphones insbesondere das Tracking

bleiben weiterhin Gegenstand der angewandten Wissenschaft und Forschung. Große Fortschritte durch diesen Sensortyp werden allerdings im Rahmen der Diminished Reality (das Abbild der realen Welt wird hinsichtlich seines Informationsgehaltes vermindert) und zur Lösung offener Probleme bei der gegenseitigen Über- und Verdeckung virtueller und realer Geoobjekte gesehen.

5 Fazit und Ausblick

Die Forschung und Entwicklung kommt im Bereich der Augmented Reality – insbesondere bei mobilen, in der Hand gehaltenen georeferenzierenden Systemen für Geoobjekte im Einsatzbereich außerhalb von Gebäuden – langsam voran. Sichtbar wird das beispielsweise an dem sogenannten Hype-Zyklus für aufstrebende Technologien der Gartner Inc. (vgl. Abb. 7), in dem die Stagnation der Augmented Reality besonders deutlich wird.

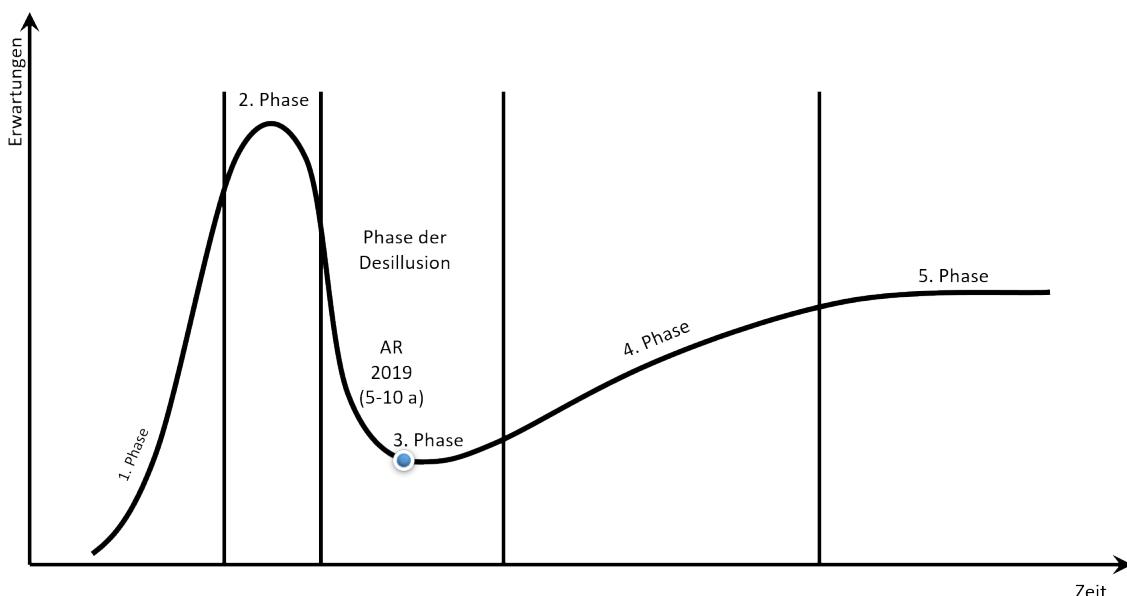


Abb. 7:
Hype-Zyklus
der Augmented
Reality verän-
dert nach Pa-
netta (2018)

nun besser ermöglichen. Ebenfalls wird in den jüngsten Smartphones bereits mehr als eine Kamera verbaut, u.a. Weit- und Superweitwinkelkameras, Telekameras oder neuerdings Kameras mit Lichtlaufzeitverfahren (engl.: Time of Flight). Letztgenannte ermitteln über einen speziellen Matrix-Bildsensor mit großflächigen Pixeln die Entfernung zu den abgebildeten Objekten über die Laufzeitmessung eines Infrarotlichtimpulses im Bereich weniger Meter. Dabei entstehen Punktwolken in einem lokalen Koordinatensystem. Seit mehreren Jahren wird intensiv mit dieser Sensorart zur Bestimmung der räumlichen Lage geforscht (vgl. Wursthorn 2014). Problematisch sind insbesondere der Verlust der Position, wenn das Kamerabild nicht fortlaufend in Echtzeit zur Verfügung steht und die auftretende Drift. Zudem können auch hier lediglich lokale Koordinaten errechnet werden und geeignete Transformationsverfahren in globale Bezugssysteme

Seit 2005 wird die Augmented Reality Entwicklung durch die Gartner Inc. beobachtet und aktuell werden kaum spürbare Fortschritte verzeichnet, sodass sich die AR seit Jahren in der dritten von fünf Zyklusphasen befindet. Aber es gibt Fortschritte. Während noch vor einigen Jahren große, kaum tragbare Apparaturen notwendig waren und an den Softwarealgorithmen experimentiert wurde, ist die zur Verfügung stehende Hardware handhabbar geworden. Einen weiteren Fortschritt stellt die feste Integration von AR-Software-Algorithmen in die Gerätehardware und Betriebssysteme nebst Bereitstellung von Programmierschnittstellen sowie die Nutzung von GPU-Technologie zur Beschleunigung von Datenberechnungen dar. Wichtig sind diese Errungenschaften, weil AR dadurch performant funktioniert. Die allgegenwärtigen Smartphones bilden taugliche mobile AR-Plattformen, sodass (nur noch) an der geometrischen Genauig-

keit der globalen räumlichen Systemlage gearbeitet wird. Parallelle Forschungsfelder dazu sind die Kombination von Augmented Reality und Diminished Reality (nicht Gegenstand dieses Beitrages) zur Steigerung der Immersion sowie der Übergang von Smartphones auf andere Displays, z.B. Datenbrillen, um die Immersion weiter zu vollenden.

Literatur

- Arth, C., Pirchheim, C., Ventura, J., Schmalstieg, D., Lepitit, V. (2015): Instant Outdoor Localization and SLAM Initialization from 2.5D Maps. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 21, Nr. 11, 1309–1318.
- Azuma, R. (1997): A Survey of Augmented Reality. In: *Presence* 6 No. 4 (1997), 355–385.
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., Macintyre, B. (2001): Recent Advances in Augmented Reality. In: *IEEE Computer Graphics* 21 No. 6 (2001), 34–47.
- Bowman, D., Kruijff, E., Laviola, J., Poupyrev, I. (2004): *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Redwood City, CA, USA: Addison Wesley.
- Hering, E., Schönfelder, G. (2012): *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Hesse, S., Schnell, G. (2014): *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kreuziger, U. (2017): *Entwicklung georeferenzierender Augmented Reality Systeme auf Mobilgeräten mit Mikrosensoren*. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.
- Mehler-Bicher, A., Steiger, L. (2014): *Augmented Reality: Theorie und Praxis*. 2. Auflage. München: De Gruyter.
- Milgram, P., Kishino, F. (1994): A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. In: *SPIE 2351* (1994), 282–292.
- Panetta, K. (2018): *Hype Cycle for Emerging Technologies*, 2018. Gartner Corporate Marketing, Stamford, USA.
- Richter, C., Teichert, B. (2009): *Einführung in die Digitale Bildverarbeitung*. Dresden: Diskurs Verlag.
- Rolland, J.P., Baillot, Y., Goon, A. (2001): 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, 67–112.
- Schenk, J., Rigoll, G. (2010): *Mensch-Maschine-Kommunikation: Grundlagen von sprach- und bildbasierten Benutzerschnittstellen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Tönnis, M. (2010): *Augmented Reality: Einblicke in die Erweiterte Realität (Informatik im Fokus)*. Heidelberg: Springer.
- Wursthorn, S. (2014): *Kamerabasierte Egomotion-Bestimmung mit natürlichen Merkmalen zur Unterstützung von Augmented-Reality-Systemen*. Karlsruhe: KIT.

Kontakt

Prof. Dr. Ulf Kreuziger
Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23, 92224 Amberg
u.kreuziger@oth-aw.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodesie.info.