

# Optimierungsansätze zur Positionierung und Registrierung geographischer Augmented-Reality-Systeme

Ulf Kreuziger<sup>1</sup>, Klaus Hehl<sup>2</sup> und Matthias Möller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Otto-Friedrich-Universität Bamberg · ulf.kreuziger@stud.uni-bamberg.de

<sup>2</sup>Beuth Hochschule für Technik Berlin

Full paper double blind review

## Zusammenfassung

Insbesondere der rasanten Verbreitung von Smartphones und Tablets ist es zu verdanken, dass die Entwicklung und Implementierung von kostengünstigen Augmented-Reality-Systemen einen enormen Schub erfährt. Augmented Reality (kurz: AR, dt. Erweiterte Realität) kann zwar alle menschlichen Sinne einbeziehen, jedoch zielt der vorliegende Beitrag ausschließlich auf visuelle AR-Systeme ab. Für die hier gegenständliche Gruppe der mobilen kostengünstigen AR-Systeme mit ausschließlicher Nutzung im Außenbereich wurden weltweit einige Systeme entwickelt, die jedoch immer noch mit Schwachstellen behaftet und noch nicht im Alltag etabliert sind. Die Visualisierungs- und Positionierungskomponenten im Niedrigpreissegment weisen aufgrund ihrer Bauteile Besonderheiten in Qualität und Zuverlässigkeit auf, mit denen es umzugehen gilt. Die Visualisierungskomponenten liefern beispielsweise verzerrte Echtzeit-Video-Bilder, außerdem stellen die geräteinternen Positionierungskomponenten für präzise Geonanwendungen im Submeterbereich nicht ausreichend genaue Koordinaten des Standortes bereit. Zu zwei ausgewählten Problemstellungen, der präzisen Kamerakalibrierung mit Echtzeit-Bildkorrektur und zum algorithmischen Umgang mit zeitabhängigen Koordinatensystemen bei der Echtzeitpositionierung mit Satellitennavigationsempfängern werden in diesem Beitrag Hinweise und Lösungen aus dem Bereich der Geodäsie und Photogrammetrie gegeben.

## 1 Abgrenzung des Themenbereiches zu bisherigen Arbeiten

AR-Systeme für den Außeneinsatz, genauer die Sensoren ihrer Orientierungskomponenten, nutzen die geodynamischen Phänomene der Erde, darunter Erdmagnet- und Schwerfeld zur Orientierung sowie globale Satellitenpositionierungsdienste zur Ermittlung des Standortes im Raum. Der Umgang mit der letztgenannten Methode liefert die so wichtigen Standort-Koordinaten in spezifischen zeitabhängigen Koordinatensystemen und unterscheidet sich dadurch von den zeitinvarianten Systemen der Geodaten. Es wird im Beitrag gezeigt, warum Unterschiede in Koordinatensystemen bei Echtzeitpositionierungen für präzise AR-Systeme im Außenbereich zu beachten sind und wie Echtzeittransformationen durchgeführt werden können. Die Orientierung eines AR-Systems im 3D-Raum, u. a. die azimutale Ausrichtung beispielsweise durch Nutzung des Erdmagnetfeldes sowie der Umgang mit Feldvariationen, ist hingegen nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Die fehlerfreie Überlagerung bzw. Kombination virtueller georeferenzierter Daten mit den Daten der Realität, die sogenannte Registrierung (AZUMA 1997, AZUMA et al. 2001), stellt für AR-Systeme eine besondere Herausforderung dar. Sie ist mit hoher Präzision und in Echtzeit vorzunehmen, um tatsächlich den Eindruck der Erweiterung der Realität, also der Objektintegration von realen und virtuellen Objekten beim Anwender zu erreichen. Der hierfür zuständige Systemteil eines AR-Systems wird als Darstellungskomponente bezeichnet (TÖNNIS 2010). Eine perfekte Registrierung der Bilddaten ist in kostengünstigen AR-Systemen nach wie vor nicht befriedigend gelöst. In der Darstellungskomponente werden die Ausgabedatensätze der Orientierungskomponente verwendet, um die virtuelle Kamera zu positionieren und auszurichten. Hier wirken sich die Fehler, beispielsweise die fehlerhafte Transformation zwischen dem Koordinatenreferenzsystem der Geodaten und dem System der Standpunktkoordinaten sowie verzeichnete Echtzeit-Video-Bilder der Kamera deutlich aus. Die Mängel in der Überlagerung der realen (Kamerabild) und der virtuellen Objekte (Geodaten) sind für den Nutzer leicht erkennbar und stören die Wahrnehmung der erweiterten Realität. Neue AR-relevante Standards, wie die Augmented Reality Markup Language (ARML, V2.0), stellen zwar den wichtigen interoperablen Datenaustausch von AR-Daten zwischen einzelnen Softwareapplikationen sicher, beinhalten jedoch absichtlich keine Algorithmen für Orientierung und Registrierung. An der letztgenannten Stelle, der Algorithmik, knüpft der vorliegende Beitrag an, mit dem Ziel aus geodätischer und photogrammetrischer Sicht zur Bewältigung der eingangs genannten Herausforderung beizutragen.

## **2 Orientierungskomponente: das korrekte Koordinatensystem**

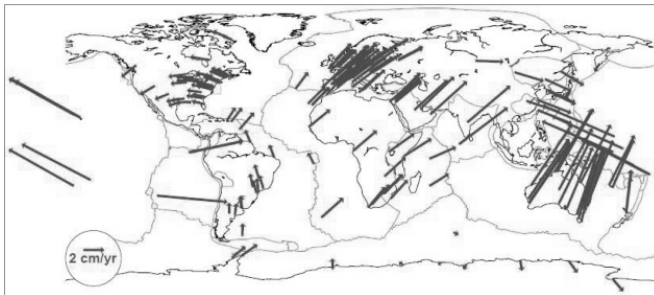
### **2.1 Standortbestimmung in ländlich geprägten Räumen**

Die Aufgabe der Orientierungskomponente ist es, die Position und Ausrichtung des AR-Systems im Raum zu bestimmen (TÖNNIS 2010). Viele visuelle AR-Systeme verwenden das „video see-through“ Prinzip, bei der das Kamerabild als Echtzeit-Bilddatenstrom auf dem Bildschirm des Endgerätes angezeigt und gleichzeitig mittels Echtzeit-Bildanalyse die Kameraorientierung ermittelt wird. Auf bekannte Vertreter dieses Verfahrens, beispielsweise die markerbasierte Orientierung oder das Verfahren unter Zuhilfenahme natürlicher Objekte mit geeigneten Landmarken, kann aus praktischen Gesichtspunkten bei AR-Systemen in ländlich geprägten Räumen regelmäßig jedoch nicht zurückgegriffen und folglich Echtzeit-Bildanalysen zur Positionsbestimmung weitestgehend nicht eingesetzt werden. Ländliche Gebiete zeichnen sich allerdings durch einen i. d. R. wenig gestörten Zugriff auf die geophysikalischen Messgrößen aus. Die Messung des Erdmagnetfeldes kann hier effektiv genutzt werden und auch die Positionierung über Satellitensysteme ist durch die freie Sicht zum Himmel, abgesehen von bewaldeten Gebieten, möglich. Folglich sind diese Gebiete prädestiniert für die Orientierungsverfahren der direkten Feldabtastung und Laufzeitmessung mittels globaler Positionierungsverfahren. Eine grundlegende Klassifizierung von Orientierungstechnologien wurde bereits 2001 durch ROLLAND et al. 2001 vorgenommen.

## 2.2 Standpunktkoordinaten und der Einfluss der Zeit

Mit mobilen kostengünstigen Geräten, z. B. Smartphones und den darin verbauten einfachen Satellitenempfängern, sogenannte Navigationsempfänger, können präzise Positionierungen im Zentimeterbereich nur schwer erreicht werden. 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 (HOFMANN-WELLENHOF et al. 2013). Die Genauigkeit lässt sich allerdings deutlich steigern, wenn regionale und satellitengestützte, differenzielle bzw. kinematische Echtzeitverfahren einbezogen werden. In praktischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die in mobilen AR-Systemen verbauten Niedrigpreisempfänger unter Einbeziehung regionaler Ergänzungssysteme in der Lage sind, Genauigkeiten von 1-3 m in Echtzeit zu gewährleisten (KREUZIGER & HEHL 2012). Für diese sowie für AR-Systeme mit Submeter-Genauigkeit sind die nachfolgenden Ausführungen wichtig und für praktische AR-Anwendungen algorithmisch zu beachten. Hierdurch wird eine Steigerung der absoluten Position von aktuell ca. 60 cm bewirkt.

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 2011, vgl. Abb. 1), 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.



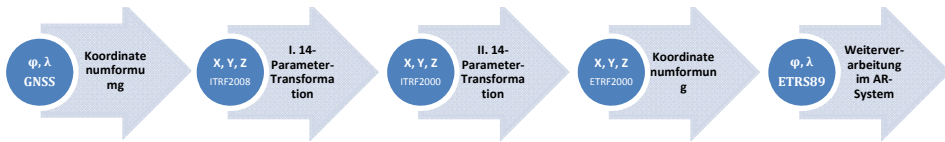
**Abb. 1:** Verschiebungen der Referenzstationen im globalen, erdfesten Referenzrahmen, hier ITRF (Quelle ALTAMIMI 2011)

Für Geodaten möchte man jedoch regelmäßig konstante, zeitlich unabhängige Koordinaten vorhalten, um nicht ständig die Koordinaten der Geoobjekte 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 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 (BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2014). Die Richtlinie schreibt für das Bezugssystem der Lage das System ETRS89 vor (BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE 2010).

### 2.3 Lösungsvorschlag: zweifache zeitabhängige Ähnlichkeitstransformation

Wie oben erläutert nehmen die praktischen Zusammenhänge zwischen den Koordinaten europäischer Geodaten im System ETRS89 und den in Echtzeit ermittelten GNSS-Koordinaten (Standort-Koordinaten) für die Nutzung in präzisen mobilen AR-Systemen einen besonderen Stellenwert ein. Die beschriebene systembedingte kontinuierliche Abweichung zwischen dem jeweiligen GNSS und ETRS89 sind bei Einzelpunktbestimmungen in Echtzeit zu berücksichtigen. In Anlehnung an das vorherige Kapitel beziehen sich die folgenden Aussagen auf das Navstar GPS der USA, als weitverbreitetster Vertreter der GNSS (EUROPEAN GNSS AGENCY 2013) mit dem dazugehörigen System WGS84.

Für Koordinatenberechnungen im WGS84 können aufgrund der Übereinstimmung auf Zentimeterlevel mit dem Internationalen terrestrischen Referenzsystem ITRS (WONG et al. 2012, LABORATOIRE DE RECHERCHE EN GÉODÉSIE 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. Mithilfe weiterer veröffentlichter zeitabhängiger und für Europa gültiger Parameterdatensätze des INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (2008) und BOUCHER & 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 & 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 Abbildung 2 entnommen werden.



**Abb. 2:** Berechnungsablauf für die Überführung von Standpunkt-Koordinaten aus GNSS-Echtzeitmessungen in das europäische System der Geodaten ETRS89

Hierbei werden die durch den Satellitenempfänger berechneten Standortkoordinaten ( $\varphi$  = ellipsoidische Breite,  $\lambda$  = 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. Die ersten sieben Transformationsparameter eines jeden Parameterdatensatzes werden aus den drei Verschiebungen entlang der X-, Y- und Z-Achse ( $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ), einem Maßstabsfaktor ( $D$ ) sowie den drei Drehwinkeln um die Koordinatenachsen ( $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ ) gebildet. Darüber hinaus gehören zu den vorgenannten sieben Parametern jeweils die Werte der jährlichen Änderungen der Parameter ( $\dot{T}1$ ,  $\dot{T}2$ ,  $\dot{T}3$ ,  $\dot{D}$ ,  $\dot{R}1$ ,  $\dot{R}2$ ,  $\dot{R}3$ ).

Über die nachfolgende Transformationsgleichung wird die Systemtransformation durchgeführt, wobei das Ausgangsbezugssystem mit dem Index A und das Ziel-Bezugssystem mit dem Index B bezeichnet wird.

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T1 + \dot{T}1 \cdot (t - t_0) \\ T2 + \dot{T}2 \cdot (t - t_0) \\ T3 + \dot{T}3 \cdot (t - t_0) \end{pmatrix} + (1.0 + D + \dot{D} \cdot (t - t_0)) \cdot \begin{pmatrix} 1 & -R3 + \dot{R}3 \cdot (t - t_0) & R2 + \dot{R}2 \cdot (t - t_0) \\ R3 + \dot{R}3 \cdot (t - t_0) & 1 & -R1 + \dot{R}1 \cdot (t - t_0) \\ -R2 + \dot{R}2 \cdot (t - t_0) & R1 + \dot{R}1 \cdot (t - t_0) & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix}$$

In der ersten 14-Parametertransformation gilt es, unter Verwendung der veröffentlichten Parameter des INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (2008) den Systemübergang aus dem ITRS mit der aktuell gültigen Realisierung ITRF2008 zum Zeitpunkt  $t$  = „Zeitpunkt der aktuellen Messung“ und  $t_0 = 2000.0$ , in das ITRF2000 zu berechnen und mit der zweiten 14-Parametertransformation für den Zeitpunkt  $t$  = „Zeitpunkt der aktuellen Messung“ und  $t_0 = 2000.0$  in das System ETRS89 zu überführen. Die für diesen zweiten Transformationsschritt zu verwendenden Parameter können der Veröffentlichung von BOUCHER & ALTAMIMI (2011) entnommen werden. Im letzten Schritt der Echtzeitprozessierung erfolgt die Koordinatenumformung in die ellipsoidische Standortkoordinaten  $\varphi_{\text{ETRS89}}$  und  $\lambda_{\text{ETRS89}}$  im gültigen Referenzsystem europäischer Geodaten.

### 3 Darstellungs-Komponente: Präzise Echtzeit-Bild-Korrektur

#### 3.1 Analytische Ansätze der Photogrammetrie zur Einzelbildkorrektur

Wie eingangs beschrieben, kann bei mobilen visuellen AR-Systemen die video see-through Methode eingesetzt und dabei das Echtzeit-Video-Bild der nach außen gerichteten Kamera auf dem Bildschirm der mobilen Endgeräte in einer Zentralperspektive visualisiert werden.

In der Augmented Reality werden die Kamerabilder mit hoher Bildfolge (ca. 30 Bilder pro Sekunde) als Echtzeit-Bild-Datenstrom (teilweise als Live-View oder Preview bezeichnet) wiedergegeben. Aufgrund von Objektiv- und Einbaufehlern der Kamerakomponenten treten jedoch in der Praxis Mängel bei der Registrierung auf, die es effizient zu korrigieren gilt. Für präzise visuelle AR-Systeme werden sowohl an die Ermittlung der Fehler als auch an die Korrektur der Fehler besonders hohe Ansprüche gestellt. In der Photogrammetrie existieren hierzu bereits bewährte analytische Ansätze, die über mehrere Jahrzehnte entwickelt und verfeinert wurden. Nach LUHMANN (2010) kann man die Kamera als räumliches System ansehen, das sich aus der Bildfläche (Sensorfläche) und dem davor eingebauten Objektiv mit Projektionszentrum zusammensetzt und mit dem mathematischen Modell der Zentralperspektive beschrieben werden kann. Mit den Parametern der inneren Orientierung wird die Lage des Projektionszentrums innerhalb des Bildkoordinatensystems der Kamera und den Abweichungen von dem Modell der Zentralperspektive beschrieben (LUHMANN 2010, KRAUS 2004). Der Begriff der Parameter der inneren Orientierung ist vergleichbar mit dem Begriff der intrinsischen Parameter (intrinsic parameters) aus dem Bereich der Computer Vision (LUHMANN 2010).

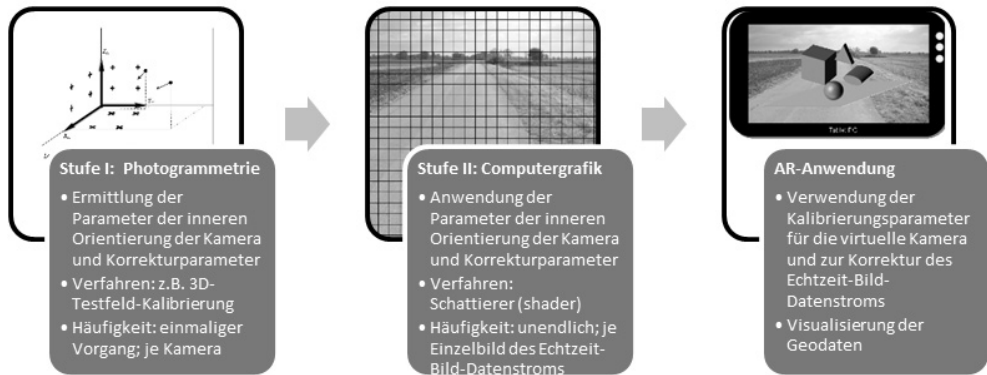
Der vorgenannte photogrammetrische Ansatz wurde in der bisherigen Praxis im Zusammenhang mit nachprozessierten Einzelauswertungen verwendet, sodass Bildaufnahme- und -auswertung zeitlich auseinanderliegen. Wie beschrieben verwendet auch die video see-through Methode einzelne Bilder, wenn auch in einer hohen Bildfolge. Dies lässt darauf schließen, dass auch die bestehenden analytischen Ansätze der Photogrammetrie auf den AR-Kontext übertragen werden könnten. Diese Vermutung wurde durch eigene praktische Versuche bestätigt und soll in den folgenden Absätzen näher beschrieben werden.

### 3.2 Anforderungen und Methodik der Echtzeit-Bild-Korrektur

Zur Entwicklung präziser AR-Systeme werden die nachfolgenden Anforderungen an den Korrektur-Prozess von Echtzeit-Bildern gestellt:

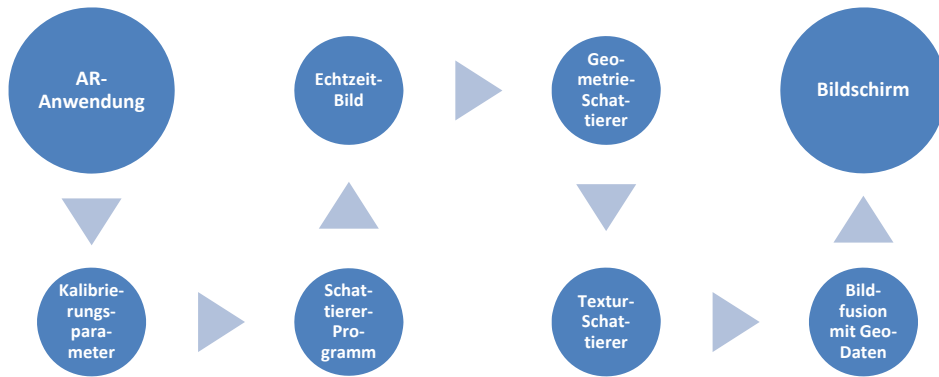
- Verwendung präziser Kalibrierungsverfahren zur genauen Ermittlung der Daten der inneren Orientierung der Kamera und der Korrekturparameter,
- Anwendung mathematisch reproduzierbarer Modelle zur Fehlerkorrektur,
- hohe Präzision der Verfahren,
- echtzeitfähige Bildkorrekturen des Bild-Datenstroms,
- Ausnutzung performanter Hardwareressourcen, z. B. Grafikprozessor, um aufwendige grafische Rechenprozesse auszulagern und so den Hauptprozessor zu entlasten,
- Gewährleistung einer in sich geschlossenen Implementierungslösung für AR-Anwendungen mit einem hohen Grad an Nutzerfreundlichkeit.

Der hier vorgestellte Ansatz sieht eine zweistufige Methodik vor (vgl. Abb. 3). In der ersten Stufe werden die Daten der inneren Orientierung und die Korrekturparameter des Echtzeitbilds über ein präzises photogrammetrisches Verfahren, beispielsweise über die 3D-Testfeldkalibrierung (LUHMANN 2010) oder geeignete Prüfkörper (VDI/VDV-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK 2002) ermittelt.



**Abb. 3:** Echtzeit-Bild-Korrektur in präzisen AR-Systemen durch Kombination von Verfahren aus der Photogrammetrie und Computergrafik

Bildfehler entstehen u. a. durch radial-symmetrische Verzeichnungen des Objektivs, chromatische und sphärische Aberration, Astigmatismus und Bildfeldwölbung, wie auch durch Dezentrierung von Linsen, Sensorschiefen oder unebene Bildflächen, die sich in Form asymmetrischer Abbildungsfehler äußern (LUHMANN 2010). In der zweiten Stufe werden die ermittelten und für das kalibrierte Kamerasystem gültigen Parameter direkt im Kontext der AR durch einen direkten Zugriff auf die Grafikpipeline (engl. rendering-pipeline) unter Anwendung von Schattierer-Programmen (shader) verwendet, um das Kamerabild in Echtzeit zentralperspektivisch zu korrigieren und auf dem Bildschirm darzustellen. 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. Dies ermöglicht es, neben den vielfältigen Verzeichnungsfehlern, auch Bildkorrekturen, die von Einbaufehlern des Bildsensors (z. B. Verkantung, Verdrehung) oder Unregelmäßigkeiten der Sensorfläche verursacht werden, in Echtzeit, praktisch etwa 30 Bilder pro Sekunde, zu korrigieren. Die Echtzeitfähigkeit ist dadurch gegeben, dass die Shader-Programme auf dafür geschaffenen Grafikprozessoren der mobilen Endgeräte ausgeführt werden. Sie werden in einer spezifischen Programmiersprache, z. B. High Level Shading Language (HLSL), OpenGL Shading Language (GLSL), C for Graphics (Cg), geschrieben. Die aufgeführten Sprachen sind einander sehr ähnlich (NISCHWITZ et al. 2011), sodass man verallgemeinern kann, dass die Schattierer-Programme mit geringem Aufwand Betriebssystem-übergreifend und damit plattformunabhängig verwendet werden können. Das Schema zur Verwendung und Einbindung der Shader-Programme in die AR-Anwendung ist in Abb. 4 dargestellt. Die aus der Testfeldkalibrierung gewonnenen präzisen Kalibrierungsparameter werden hierbei über Korrekturformeln in den Schattierer-Programmcode eingebunden.



**Abb. 4:** Einsatz von Schattierer-Methoden zur Echtzeit-Bild-Korrektur in präzisen AR-Systemen

Als Korrekturformeln sind diejenigen Formeln zu verwenden, die durch das jeweilige Kalibrierungsverfahren bzw. durch die jeweilige Kalibrierungssoftware vorgegeben werden. Für die in LUHMANN 2010 und GODDING 2002 vorgeschlagene Kalibrierung ergeben sich unter Anwendung der ermittelten Korrekturparameter ( $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2$ ) die korrigierten Bildkoordinaten  $x_B, y_B$  durch Korrektur der Bildkoordinaten  $x^0, y^0$  nach den nachfolgenden Formeln (LUHMANN 2010, GODDING 2002):

$$\begin{aligned}x_B &= x^0 - (dx_{rad}(A_1, A_2, A_3) + dx_{tan}(B_1, B_2) + dx_{aff}(C_1, C_2)) \\y_B &= y^0 - (dy_{rad}(A_1, A_2, A_3)) + dy_{tan}(B_1, B_2) + dy_{aff}\end{aligned}$$

Da sich die Korrekturformeln auf das Bildkoordinatensystem beziehen, Schattierer jedoch im Texturkoordinatensystem prozessieren, ist hier innerhalb des Schattierer-Programms über einen Zwischenschritt eine Koordinatentransformation durchzuführen. Beide Koordinatensysteme sind kartesische zweidimensionale Systeme wobei das Texturkoordinatensystem den Ursprung in der linken oberen Ecke der Textur hat, die y-Achse nach unten und die x-Achse nach rechts zeigt und einen Wertebereich der Texturkoordinaten zwischen 0 bis 1 aufweist. Das Bildkoordinatensystem hingegen hat seinen Ursprung in der Bildmitte, die y-Achse zeigt nach oben und die x-Achse nach rechts, jeweils mit einem Wertebereich von  $-1$  bis  $1$ .

Die Transformation zwischen den Systemen erfolgt über Matrizenmultiplikation nach dem Konzept homogener Koordinaten (vgl. FOLEY et al. 2010). Hierbei werden die Koordinaten im Quellsystem  $X_T, Y_T$  (Index  $T$  = Texturkoordinatensystem) mithilfe der Drehmatrix  $D$ , Skalierungsmatrix  $S$ , und Translationsmatrix  $T$  in das Zielsystem  $X_B, Y_B$  (Index  $B$  = Bildkoordinatensystem) überführt:

$$\begin{pmatrix} X_B & Y_B & 1 \end{pmatrix}^T = T_{[3 \times 3]} \cdot S_{[3 \times 3]} \cdot D_{[3 \times 3]} \cdot \begin{pmatrix} X_T & Y_T & 1 \end{pmatrix}^T$$

Sind die Bildkorrekturen nach den o. g. Formeln durchgeführt, erfolgt die Rücktransformation vom Bildkoordinatensystem in das Texturkoordinatensystem mit:



$$\begin{pmatrix} X_T & Y_T & 1 \end{pmatrix}^T = D_{[3 \times 3]}^{-1} \cdot S_{[3 \times 3]}^{-1} \cdot T_{[3 \times 3]}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X_B & Y_B & 1 \end{pmatrix}^T$$

Der vorgestellte Algorithmus zur Echtzeit-Bild-Korrektur zeigt, dass analytische Verfahren der Photogrammetrie mit den Verfahren der Grafikverarbeitung präzise und effizient im Kontext der AR kombiniert werden können, ohne zusätzliche Software oder Softwarebibliotheken für die Anwendung der Echtzeit-Bild-Korrektur in der AR-Anwendung zu benötigen. Zudem ist die Lösung plattformunabhängig, setzt allerdings das Vorhandensein von Grafikprozessoren auf den mobilen Endgeräten voraus. In den bisher durchgeführten Untersuchungen zur Kalibrierung von Smartphone-Kameras wurde hinsichtlich des Fehlerausmaßes eine signifikante Geräteheterogenität festgestellt. Die Auswirkungen der Fehler äußern sich bezogen auf den AR-Kontext in Lagefehlern von bis zu einigen Metern für Geo-Objekte im Abstand von 50 m vom Benutzer des AR-Systems, sodass gerätespezifische Kamerakalibrierungen für präzise AR-Systeme unerlässlich sind.

## 4 Fazit

Mobile kostengünstige AR-Systeme für den Außenbereich sind aufgrund verschiedener Unzulänglichkeiten, von denen zwei in diesem Beitrag diskutiert wurden, bislang nur wenig im Alltag etabliert. Zwar sind die Gerätekomponenten dieser AR-Systeme kostengünstig und weitverbreitet (z. B. Smartphones oder Tablets), jedoch gilt es die offensichtlichen Defizite hinsichtlich Präzision und Zuverlässigkeit noch zu beheben. Die vorgenannten Lösungsbausteine aus Geodäsie, Photogrammetrie und Computergrafik sollten dazu beitragen, die Darstellungs- und Orientierungskomponenten für diese Art von AR-Systemen weiter zu verbessern mit dem Ziel, zukünftig präzise und harmonische Systeme zu realisieren. Die in diesem Artikel beschriebenen Algorithmen wurden im Rahmen des Promotionsvorhabens (Kreuziger) an der Universität Bamberg unter dem Arbeitstitel Augmented Reality – kostengünstige geographische AR-Systeme für den Außenbereich erarbeitet und sind Gegenstand aktueller Forschungen.

## Literatur

- ALTAMIMI, Z., MÉTIVIER, L., COLLILIEUX, X. (2011), ITRF2008 plate motion model. Institut Géographique National (IGN) LAREG/GRGS & Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP). [http://acc.igs.org/trf/itrf2008-plate-motion\\_egu11poster.pdf](http://acc.igs.org/trf/itrf2008-plate-motion_egu11poster.pdf).
- AZUMA, R. (1997), A Survey of Augmented Reality. *Presence*, 6 (4), 355-385.
- AZUMA, R., BAILLOT, Y., BEHRINGER, R., FEINER, S., JULIER, S. & MACINTYRE, B. (2001), Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE ComputerGraphics*, 21 (6), 34-47.
- BOUCHER, C. & ALTAMIMI, Z. (2011), Memo: Specification for reference frame fixing in the analysis of a EuREF GPS campaign. <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf> (30.01.2015).
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2010), Koordinatenreferenzsysteme – Coordinate Reference Systems. [http://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/Steckbrief\\_Koordinatensysteme.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/Steckbrief_Koordinatensysteme.pdf?__blob=publicationFile) (30.01.2015).

- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2014), Grenzen aufheben mit INSPIRE – Nutzung von Geodaten in ganz Europa. <http://www.geoportal.de/DE/GDI-DE/INSPIRE/inspire.html?lang=de> (30.01.2015).
- EUROPEAN GNSS AGENCY (2013), GNSS Market Report issue 3, 2013. <http://www.gsa.europa.eu/market/market-report> (30.01.2015).
- FOLEY, J., VAN DAM, A., FEINER, S. & HUGHES, J. (2010), *Computer Graphics – Principles and Practice*. Addison-Wesley, Boston.
- GODDING, R. (2002), *Geometrische Kalibrierung und Orientierung digitaler Bildaufnahme-systeme*. Dokumentation AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig.
- GÖRRES, B. (2010), Vom globalen Bezugssystem bis zur Umsetzung für die Praxis. In: GEODÄTISCHES INSTITUT DER TU DRESDEN (Hrsg), *GNSS2010 – Vermessung und Navigation im 21. Jahrhundert*. Schriftenreihe des DVW, 63. Augsburg, Wißner, 39-57.
- HOFMANN-WELLENHOF, B. (2013), Kommt Galileo zu spät? *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 138 (4), 241-248.
- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (2008), Transformation parameters from ITRF2008 to past ITRFs. [http://itrf.eng.ign.fr/doc\\_ITRF/Transfo-ITRF2008\\_ITRFs.txt](http://itrf.eng.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt) (30.01.2015).
- KRAUS, K. (2004), *Photogrammetrie*. Bd. 2. 7. Aufl. Walter de Gruyter, Berlin/New York.
- KREUZIGER, U. & HEHL, K. (2012), Entwicklung einer AR-Applikation für die Planung und Bodenordnung. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 137 (1).
- LABORATOIRE DE RECHERCHE EN GÉODÉSIE (2013), Transformation parameters: ITRS and WGS84. [http://itrf.eng.ign.fr/trans\\_para.php](http://itrf.eng.ign.fr/trans_para.php) (30.01.2015).
- LUHMANN, T. (2010), *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. Deutsche Geodätische Kommission, C 645. C. H. Beck, München.
- NISCHWITZ, A., FISCHER, M., HABERÄCKER, P. & SOCHER, G. (2011), *Computergrafik und Bildverarbeitung*. Band I, *Computergrafik*. 3. Auflage. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- ROLLAND, J. P., DAVIS, L. D. & BAILLOT, Y. (2001), A Survey of Tracking Technologies for Virtual Environments. In: BARFIELD, W. & CAUDELL, T. (Eds.), *Fundamentals of wearable computers and augmented reality*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ.
- TÖNNIS, M. (2010), *Augmented Reality: Einblicke in die Erweiterte Realität (Informatik im Fokus)*. Springer, Heidelberg.
- VDI/VDV-GESELLSCHAFT MESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (2002), *Richtlinie VDI/VDE 2634 Blatt 1:2002-05 Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung*. Düsseldorf.
- WONG, R. F., ROLLINS, C. M. & MINTER, C. F. (2012), Recent Updates to the WGS84 Reference Frame. In: *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*. ION Publications of Nashville Convention Center. Nashville, Tennessee: Nashville Convention Center.