

<b>Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger</b> Satellitengeodäsie Mathematische Geodäsie Ausgleichsrechnung Softwareentwicklung Vermessungskunde	<b>HOCHSCHULE KARLSRUHE - TECHNIK UND WIRTSCHAFT (HSKA)</b> <b>INSTITUT FÜR ANGEWANDTE FORSCHUNG (IAF)</b>  Moltkestrasse 30, D-76133 Karlsruhe. Tel.: 0721 925 2598 Fax.: 0721 925 2597 Email: <a href="mailto:reiner.jaeger@hs-karlsruhe.de">reiner.jaeger@hs-karlsruhe.de</a>
---	---

Karlsruhe, 24-November-2014

## Kurzbericht

zum

### Verbundforschungsprojekt

#### GNSS-GESTÜTZTE LOWCOST MULTISENSORSYSTEME ZUR MOBILEN PLATTFORMNAVIGATION UND OBJEKTGEOREFERENZIEUNG

- gefördert durch das  
Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg -

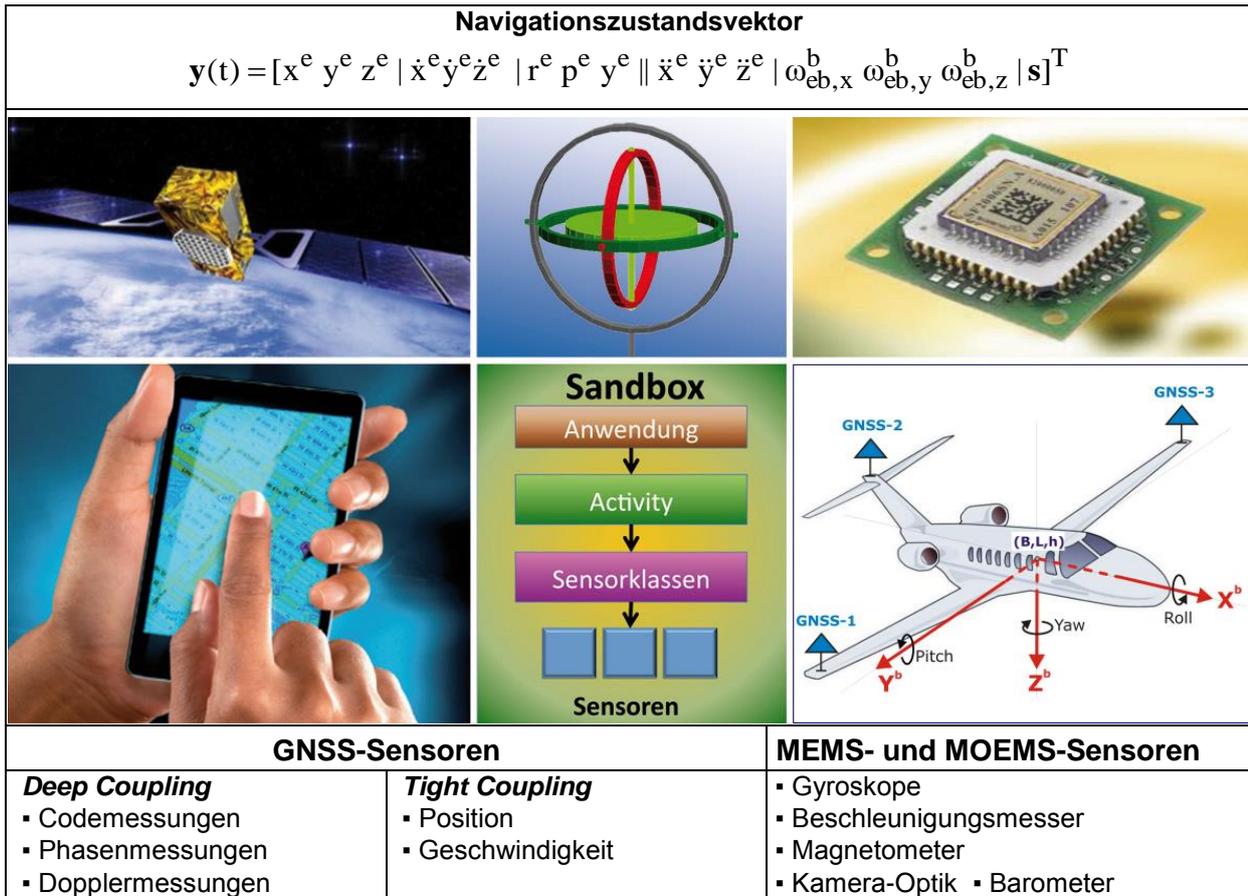
### 1. Konsortium, Aufgabenverteilung und Ziele des Vorhabens

Das im Rahmen der Förderung des Clusters SatNav&MIT seitens des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg getragene Verbundforschungsprojekt „GNSS-gestützte LowCost-Multisensorsysteme zur mobilen Plattformnavigation und Objektgeoreferenzierung“ wurde durch das Institut für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Karlsruhe (HSKA) als zentrale Forschungsstelle von 2011-2013 geleitet. Industriepartner waren sieben große, mittelständische und kleinere Unternehmen aus Baden-Württemberg. Die FuE-Aufgabe des berichtenden Instituts IAF/HSKA war die Entwicklung allgemeiner mathematischer Modellbildungen als Grundlage für die Ableitung spezifischer Algorithmen und Software zur Behandlung verteilter GNSS/MEMS/MOEMS Sensoren und Plattformen zur nahtlosen Out- und Indoornavigation von Fahrzeugen, Personen und Gütern, siehe Abb.1. Die Entwicklung spezifischer Multisensor-navigations-Algorithmen und -Software erfolgte durch am IAF/HSKA im Dialog mit dem Industriekonsortium und der weiteren Forschungsstelle, der HTWG Konstanz entlang den der Förderung gegenständlichen und auf den genehmigten Förderantrag aufbauenden Meilensteinplänen von IAF/HSKA und HTWG Konstanz. Die HTWG Konstanz war als weitere Forschungsstelle mit einer geförderten Mitarbeiterstelle federführend mit dem Projekt des Bootsroboters „CaRoLimE“ befasst, und dabei zuständig für die Entwicklung von Antrieb, Steuerung sowie den autonomen Betrieb dieses FuE-Objekts. Das zugehörige Industriekonsortium der HTWG war für die weiteren Komponenten zuständig (<http://www.htwg-konstanz.de/31-05-12-03-06-12-Interna.5780.0.html>).

An der zentralen Forschungsstelle IAF der Hochschule Karlsruhe (HsKa) wurde unter der Projektleitung des Berichtenden eine neue Generation mathematischer Modelle, Algorithmen, Software und Systeme entwickelt, welcher unter der Bezeichnung NAVKA (Navigationsalgorithmen Karlsruhe) subsumiert ([www.navka.de](http://www.navka.de)). Smartphones und Tablets sind hierbei als optionale Komponente bzw. Navigationsplattform der neuen Generation miniaturisierter (MEMS/MOEMS), selbstkalibrierender und designoptimierbarer Navigations- und Georeferenzierungsplattformen integriert. Zugleich sind Smartphones, neben anderen Navigationssensoren bzw. -Boxen, „die“ Navigations- und IKT-Komponente zur multimodalen Mobilität der modernen Gesellschaft. Das Leistungsspektrum der IAF/HSKA Modell-, Algorithmen- und Softwareentwicklungen umfasst den Einsatz von Navigationsboxen für Out- und Indoor-Systementwicklungen des Industriekonsortiums, die in Verbindung mit Low-Cost-Sensoren im Hardwarebereich u.a. mit neuen Technologien auch auf den Massenmarkt zielen.

Die Anwendungen der im Rahmen der Verbundforschung liegen in Robotik, Maschinensteuerung, bemannte/unbemannte Fahrzeugnavigation zu Boden/Wasser/Luft, Logistik, Out-/indoor Personennavigation sowie dem Aufgabenfeld präzise Objektgeoreferenzierung (mobile Koordinatenerfassung, Mobile GIS, Objekterkennung, Virtual-Reality, etc.). Die Aufgaben und Ziele der zentralen Forschungsstelle IAF/HSKA bestanden in 2011-2013 darin - aufbauend auf einem vollkommen neuen und sehr weitreichenden allgemeinen Konzept zur tiefen und eng gekoppelten Integration der Daten verteilter GNSS/MEMS, sowie weiterer Sensordaten (Kamera-Pixelkoordinaten, RFID, etc.) - Algorithmen- und Softwareentwicklungen für das Konsortium und die jeweils angestrebten Produkte zu betreiben. Die Forschungen und Entwicklungen der mathematischen Modelle des IAF/HSKA wurden antragsgemäß bzw. konzeptionell a-priori so angelegt, dass hierauf - angefangen vom o.g. Bootsroboter der HTWG Konstanz und des beteiligten Industrie-

konsortiums - auch alle weiteren seitens des IAF/HSKA durch Algorithmen und Softwareentwicklungen begleiteten konkreten Produkte- und Technologieentwicklungen des Firmenkonsortiums basieren konnten.



**Abb. 1:** Navigationenzustandsvektor, GNSS-/MEMS-/MOEMS-Daten, verteilte Sensoren und Anwendungen  
 Die durchgeführten Systementwicklungen und die Entwicklungspotentiale des IAF/HSKA sowie die Projektwürdigungen und Folgeentwicklungen werden in den Kapiteln 3 und 4 aufgezeigt.  
 Die weitreichenden Eigenschaften und weltweiten Alleinstellungsmerkmale der mathematischen Modellbildung und deren sich damit verbindenden nachhaltigen Potentiale der NAVKA FuE im B.W. Verbundforschungsprojekt, und auch darüber hinaus, werden in ihren Einzelkomponenten in Kapitel 2 vorgestellt.

## 2. Mathematische Modellbildung und Alleinstellungsmerkmale der NAVKA-Algorithmen

Die weitreichenden und nachhaltigen Potenziale der NAVKA FuE basieren in ihrer ersten Komponente auf

- Allgemeine mathematische Modelle zur Vorhersage  $\mathbf{y}(t)_{t-\Delta t}$  des 15-parametrischen Navigationenzustandsvektors  $\mathbf{y}(t)$  (Abb. 1)

Die Vorhersage  $\mathbf{y}(t)_{t-\Delta t}$  von  $\mathbf{y}(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  erfolgt dabei schrittweise mittels der aus der vorausgehenden Vorhersage und der Sensordaten-Komponente zum Zeitpunkt  $t - \Delta t$  erfolgten Zustandsschätzung  $\mathbf{y}(t - \Delta t)$ . Die 3D-Komponenten in  $\mathbf{y}(t)$  (1) umfassen jeweils im erdfesten System (e), die Position, die Geschwindigkeit, die Orientierung (Roll- (r), Pitch- (p) und Yaw-Winkel (y) und die Beschleunigung des zu navigierenden Objekts bzw. Bodys (b). Es folgen die Rotationsraten und die Sensorkalibrierungsparameter  $\mathbf{s}$ . Was die betreffenden Gleichungen zur Zustandsvorhersage  $\mathbf{y}(t)_{t-\Delta t}$  im NAVKA-Konzept anbelangt, so wird die Publikationen unter [www.navka.de](http://www.navka.de) verwiesen. Die Zustandsschätzung selbst erfolgt im NAVKA-Konzept i.A. nicht im Modell einer klassischen Kalman-Filterung, sondern es kommen hier allgemeine i.d.R. auch robuste M-Schätzungen zum Einsatz.

Das zweite NAVKA Alleinstellungsmerkmal betrifft das mathematische Modell der Behandlung der Sensordaten (Abb. 1) sowie in Verbindung damit das Sensor-/Plattformdesign. Letzteres ist durch das den o.g. Verbundforschungsprojekten gegenständliche und im Kontext neu begründete

- Multisensor-Multiplattform-Design

gekennzeichnet. Dabei sind die GNSS- und die MEMS- bzw. MOEMS-Einzelsensoren zweifach indiziert. Unter dem Index  $i$  wird der Sensortyp und unter  $j$  die Plattformzugehörigkeit des Sensors  $s_{ij}$  verwaltet. Der

Index  $i$  verwaltet zudem die Position und –Orientierung von  $s_{ij}$  auf der  $j$ -ten Plattform. Der Index  $j$  verwaltet die Verortung der Plattform  $p_j$  im Koordinatensystem („Body-System“ (b)) des zu navigierenden Objekts. Dieses algorithmische Design („NAVKA Leverarm-Konzept“) ermöglicht eine allgemeine, redundante, selbstkalibrierende und optimale Schätzung von  $\mathbf{y}(t)$  aus einer beliebigen Anzahl auf dem zu navigierenden Body (b) verteilter GNSS- und MEMS Plattformen bzw. -Sensoren. Algorithmisch sind dabei insgesamt 11 Parameter zur Verortung von Sensoren  $s_{ij}$  und Plattformen  $p_j$  auf dem Body (b) mitzuführen. Dies sind erstens die 3 Parameter des Translationsvektors der  $j$ -ten Plattform  $p_j$  im Body-Frame (b), zweitens die 3 Parameter der Rotationsmatrix der  $j$ -ten Plattform  $p_j$  gegenüber dem Body-Frame (b), drittens die 3 Translationsparameter des  $i$ -ten Sensors  $s_{ij}$  im Koordinatensystem der  $j$ -ten Plattform  $p_j$  und viertens die 2 Parameter zur Sensororientierung auf  $p_j$ . Der z. B. im Fall der Fahrzeugnavigation auftretende Sonderfall „Plattform  $p_j$  gleich Body (b)“ (sief Flugzeug, Abb. 1) ist konzeptionell mit enthalten.

Als dritte Komponente und Alleinstellungsmerkmal des NAVKA-Konzepts tritt die algorithmische Behandlung der verteilten Sensorinformationen in Form der

- Tiefen Kopplung („Deep Coupling“) der Rohdaten der GNSS- (Code-, Phasen- und Dopplermessungen) und der MEMS/MOEMS-Sensoren (Beschleunigungsmesser, Gyroskope, Magnetometer, Barometer sowie Kameraoptik (Kamerakoordinaten, optischer Fluss))

hinzu (Abb. 1). Dabei parametrisieren alle GNSS- und MEMS/MOEMS-Sensorrohdaten direkt den Navigationszustandsvektor  $\mathbf{y}(t)$ . Die zweitstufige enge Kopplung („Tight Coupling“) ist nur für GNSS-Positions- und Geschwindigkeitsinformation zugelassen. Die weiteren NAVKA Alleinstellungsmerkmale beziehen sich auf die nachfolgenden Eigenschaften zur Zustandsschätzung  $\mathbf{y}(t)$  (1) aus Vorhersage- und Sensormessungs-Komponente. Dabei sind externe Positions- und Geschwindigkeitsinformation liefernde Komponenten im NAVKA-Konzept dennoch über die o.g. enge Kopplung („Tight-Coupling“) integrierbar gehalten. Insgesamt sind folgende weitere Charakteristika der mathematischen Modellbildung und Algorithmen des NAVKA-Konzeptes hervorzuheben:

- „Tight“ und „Deep Coupling“ weiterer Zusatzsensoren (z. B. Odometer, WLAN-Positionen)
- Integration von Zusatzinformation zum geometrischen und physikalischen Bewegungsprofil
- Einbeziehung von Ungleichungen zum Zustandsraum  $\mathbf{y}(t)$
- Einbeziehung von Sensorkalibrierungsparametern  $\mathbf{s}$  und -Algorithmen
- Robuste Schätzung des Zustandsvektors  $\mathbf{y}(t)$  und der stochastischen Modellkomponenten.

### 3. Algorithmen- und Systementwicklungen des IAF/HSKA



**Abb. 2:** NAVKA-Entwicklungen. Links, oben: Sensorbox „Robinette“ mit NAVKA-Algorithmen. Links, unten: Mobiles Tablet- Georeferenzierungssystem. Rechts: Indoornavigationssystem mit Smartphone-Client und Visualisierungs-Server für Rettungsdienste (S.A.R.) und Personentracking

In fortlaufender Zustandsschätzung modellieren die NAVKA-Algorithmen im o. g. Profil den allgemeinen Navigationszustandsvektor  $\mathbf{y}(t)$  (1) mittels der Sensordaten der auf dem Objekt (Body (b)) verorteten multi-sensorischen Navigationsplattformen oder Einzelsensoren (Abb. 1). Die entsprechenden Softwareentwicklungen erfolgten in der auch für Mikrocontroller geeigneten Programmiersprache C und zudem dergestalt, dass sie den Anwendern aus der Industrie in Form geschützter Betriebssystem-unabhängiger Bibliotheken (Libraries) zur Verfügung gestellt werden können. In Kooperation mit den Verbundforschungspartnern wurden in 2011-2013 die Navigationsplattform Robinette (Abb. 2, oben, links; [www.robinette.de](http://www.robinette.de) ) entwickelt, Institut für Angewandte Forschung (IAF) – Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft (HSKA)

die mit den NAVKA-Algorithmen als Firmware betrieben wird. Sie ist zugleich Referenz und Muster für die Weiterentwicklung und Herstellung frei designbarer redundanter GNSS/MEMS/MOEMS-Plattformen (<https://www.youtube.com/watch?v=yumhJ6pt52o>; <https://www.youtube.com/watch?v=Zc9jg1y08ew>).

Entwickelt wurde auch das Produkt „KALEO Georeferencer“. Auf der Grundlage der NAVKA-Algorithmen realisiert die in einem Tablet verbaute GNSS/MEMS-Sensorik bei letzterem in Kombination mit einem Low-Cost Entfernungsmesser ein allgemeines Objektgeoreferenzierungssystem (Abb. 2, unten, links), welches als innovative mobile GIS-Anwendung ein direktes „3D polares Anhängen“ für Objektaufnahmen und -Identifikationen realisiert. Gemeinsam mit einem weiteren Verbundpartner erfolgten Algorithmen- und Systementwicklungen zur autarken Navigation von Personen in Gebäuden ohne Navigationsinfrastruktur oder bei Wegfall bestehender Navigationsinfrastrukturen (z.B. Stromausfall im Katastrophenfall). Die NAVKA Indoornavigationslösung zielt auf den Einsatz im Polizei-, Feuerwehr- und Rettungswesen (S.A.R.) ab (Abb. 2, rechts). Hierbei werden die Rohdaten einer am Schuh getragenen MEMS-Sensoreinheit auf das Smartphone/Tablet PC der zu navigierenden Person als Rechen-, Visualisierungs- und Kommunikationsinstanz übertragen. Im mathematischen Modell der autarken NAVKA Indoornavigationslösung werden Ruhezustände („Zero-Velocity, Zero-Rotationrate“) erkannt und algorithmisch auf dem mitgeführten Smartphone/Tablet modelliert.

#### 4. Internationale Prämierung, Folgeprojekte und Entwicklungspotentiale

Verschiedene kooperative Entwicklungen werden auch nach Projektende derzeit mit den B.W. Verbundkonsortiumspartnern fortgeführt. Die erfolgten Algorithmen-, Software- und Systementwicklungen sowie die nachhaltige Entwicklungspotentiale erhielten im Oktober 2014 (Verleihung beim Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, Berlin) mit der Einreichung „NAVKA - A New Generation of Low-Cost Multisensor Navigation Technologies based on GNSS /MEMS/MOEMS“ den ersten Preis der European



**Abb. 3:** e-Volocopter VC200 mit 18 elektrisch betriebenen Propellern und redundant verteilten GNSS-/MEMS/MOEMS Navigationssensoren und NAVKA Flight-Control

Satellite Navigation Competition (ESNC) 2014 als Landessieger Baden-Württemberg, siehe [www.esnc.info/index.php?anzeige=bawue14.html](http://www.esnc.info/index.php?anzeige=bawue14.html).

Unter den 434 weltweiten Einreichungen erreichte das B.W. Projekt die Bronze-Platzierung.

Als erstes Folgeprojekt ging bereits in 2012 das aus von sechs Partnern aus Hochschulen und Industrie wahrgenommene ZIM-Projekt „e-Volocopter“ ([www.navka.de/images/files/volo\\_de.pdf](http://www.navka.de/images/files/volo_de.pdf)) hervor. Das IAF/HSKA ist hierbei zuständig für die zentrale Komponente der Flug-Navigation und -Steuerung („Flight-Control“).

Im NAVKA-Projekt werden darüber hinaus seit 2013 „Flight-Control“ für skalierbare UAV entwickelt, inklusive eigener Hardwareplatinen und –Boxen für allgemeine Navigationsaufgaben.

Die ersten Projekte zur multimodalen Navigation von Zügen und Personen in der Zusammenarbeit mit der Deutschen Bahn sind in 2014 angelaufen. Die weiteren Entwicklungen, in welche auch 3

Doktorarbeiten eingebunden sind, sind mit Algorithmen- und Softwareentwicklungen zur autarken und zur LOD4-Gebäudemodell-basierten nahtlosen Out- und Indoornavigation für Personen, Fahrzeuge und Güter befasst (Massenmarkt-Plattform Smartphone sowie weitere innovative Plattformdesigns- und Anwendungen, z.B. mit Blick auf „Smart Cities“ und demographischen Wandel). Darüber hinaus sind in B.W. Projekte im Bereich der Fahrzeugnavigation in Planung. Zusammenarbeiten mit verschiedenen Forschungsinstituten sowie der breiten Industrie sind im Aufblühen begriffen, und werden in B.W. auch seitens der IHK Reutlingen koordinierend und mit Netzwerkveranstaltungen unterstützt. Der eingeladene Beitritt von NAVKA in ein internationales ESA-Projekt zum Thema „Future Cities“ wurde aktuell wahrgenommen.

#### Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger, NAVKA-Projektleitung - Institut für Angewandte. Forschung (IAF), Hochschule Karlsruhe -Technik und Wirtschaft, Moltkestrasse 30, D-76133 Karlsruhe. Tel.: ++ 49 721 925-2598 /-2620; Mobil.: ++ 49 152 533 103 28; Fax.: ++ 49 721 925-2597. E-Mailadresse: [reiner.jaeger@hs-karlsruhe.de](mailto:reiner.jaeger@hs-karlsruhe.de) ; URL: [www.navka.de](http://www.navka.de)

