

Jan Schattenberg, Hannes Harms, Thorsten Lang, Martin Becker, Simon Batzdorfer, Ulf Bestmann und Peter Hecker

# Datenaustausch in mobilen Maschinenverbänden zur echtzeitfähigen Positionierung

Die Positionierung von mobilen Maschinen, die gemeinsam eine Aufgabe erfüllen sollen, ist eine zwingende Voraussetzung, um diese zu kontrollieren sowie teil- oder vollautomatisch navigieren zu lassen. Dazu ist es notwendig, dass jeder Teilnehmer eines Verbandes zu möglichst jedem Zeitpunkt berechnen kann, wo sich die anderen Teilnehmer befinden und welchen Status diese besitzen. Zu diesem Zweck werden im vorgestellten Vorhaben die GNSS-Rohdaten aller Versuchsgeräte mittels eines mobilen Ad-hoc-Netzwerkes hochfrequent ausgetauscht. Parallel werden bei jedem Teilnehmer die Relativ- und Absolutposition aller Teilnehmer zueinander prozessiert. Dabei werden zusätzliche Sensordaten verwendet, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen.

## Schlüsselwörter

Maschinenverbund, Kommunikation, Ortung, mobile Ad-hoc-Netzwerke, GNSS, INS, Relativpositionierung

## Keywords

Machine cluster, communication, tracking, mobile ad-hoc networks, GNSS, INS, relative positioning

## Abstract

Schattenberg, Jan; Harms, Hannes; Lang, Thorsten; Becker, Martin; Batzdorfer, Simon; Bestmann, Ulf and Hecker, Peter

## Data exchange within clusters of mobile machines for real-time positioning

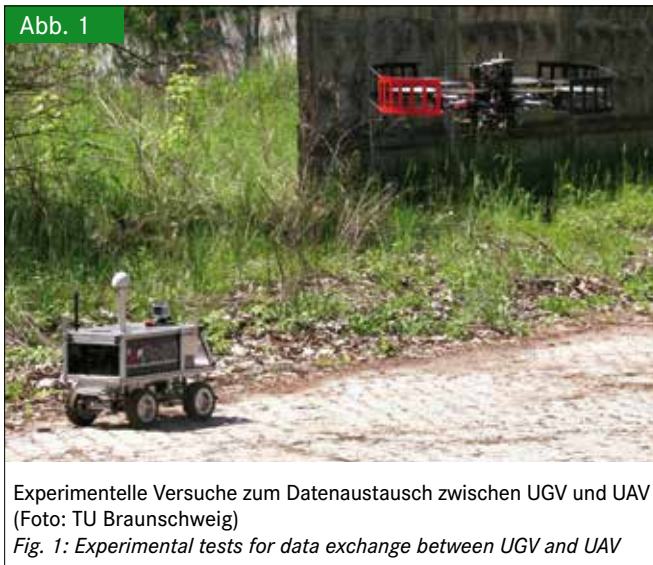
Landtechnik 68(5), 2013, pp. 359–364, 6 figures, 6 references

For controlling mobile machines which are operating on the same task, as well as for automatic or autonomous navigation of machines, positioning of them is a mandatory requirement. Therefore it is necessary that each participant of a machine group is able to compute at nearly every time, where the other participants are and how their current status is defined. To fulfill this requirement a high frequency data ex-

change of the GNSS raw data from all experimental vehicles is realized using a mobile ad hoc network. The exchanged information is used to compute the relative and absolute position of all participants for each node to each other simultaneously. Additional sensor data, like INS measurements are further used to improve the positioning accuracy.

Die zunehmende Automatisierung mobiler Maschinen, der voranschreitende Einsatz von Maschinengruppen und der Bedarf an einer präzisen relativen Positionierung der Maschinen zueinander – auch unter schlechten Empfangsbedingungen des GNSS (Globales Navigationssatellitensystem) – erfordern neue Systeme und Technologien. Diese sind vor allem notwendig, um Maschinengruppen bei verschiedenen Aufgaben präzise in einer Formation zu koordinieren. Darüber hinaus muss besonders bei schlechten Empfangsbedingungen des GNSS-Empfängers eine Bestimmung von relativen Positionen gewährleistet werden, um z. B. Kollisionen der Maschinen untereinander zu verhindern. Eine Möglichkeit die eigene Positionslösung zu verbessern, bietet die Fusion der GNSS-Positionslösung mit den Messdaten einer Inertialmesseinheit (IMU). Ein Ansatz zur Bestimmung der relativen Position der Teilnehmer untereinander ist die sogenannte kooperative Ortung, bei der die GNSS-Rohdaten der einzelnen Teilnehmer über ein mobiles Ad-hoc-Netzwerk ausgetauscht werden. Basierend auf den GNSS-Rohdaten des Maschinenverbandes ermöglicht dieser Ansatz jedem Teilnehmer sowohl die Berechnung der Position der anderen Teilnehmer als auch die Berechnung einer rela-

Abb. 1



Experimentelle Versuche zum Datenaustausch zwischen UGV und UAV  
(Foto: TU Braunschweig)

Fig. 1: Experimental tests for data exchange between UGV and UAV

tiven Position der Schwarmteilnehmer zueinander. Darüber hinaus kann ggf. die Bestimmung relativer Positionsinformationen bei teilweiser Abschattung einzelner Schwarmteilnehmer möglich sein, indem die zusätzlich erhaltenen Datensätze bei der Prozessierung mit dem entwickelten Schwarmpositionierungsalgorithmus einbezogen werden. **Abbildung 1** zeigt zwei der verwendeten Versuchsträger während der experimentellen Versuche. Links im Bild der selbstentwickelte UGV „comRoBS“ (unmanned ground vehicle) des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) [1], und rechts ein Quadrocopter des Typs Pelican (Hersteller: Ascending Technologies), betrieben vom Institut für Flugführung (IFF) der TU Braunschweig.

Im Rahmen des Forschungsprojekts NExt UAV (Navigation zur Exploration von tieffliegenden unmanned aerial vehicle in Katastrophenszenarien) [2] wurden Grundlagentechnologien erprobt, um ein mobiles Ad-hoc-Netzwerk in einem heterogenen Maschinenverbund zu betreiben. Des Weiteren wurden Strategien untersucht, mit denen ein verlässlicher Datenaustausch gewährleistet werden kann. Eine wesentliche Zielsetzung für die Entwicklung war es, einen vollständigen Austausch der GNSS-Rohdaten von zwei UGV und bis zu fünf Lufteinheiten (UAV) zu gewährleisten, welche sich über das gewählte Einsatzgebiet verteilen. Der Datenaustausch soll dabei mit einer Frequenz von 1 Hz erfolgen, um eine adäquate Update-Rate für die Positionsbestimmung herzustellen. In den anvisierten Szenarien und Aufgaben, wie z. B. der Erkundung eines Gebietes, werden typischerweise Formationen verwendet, bei denen der Maschinenverbund über einige hundert Meter verteilt ist. Im urbanen Umfeld ist es deshalb erforderlich, dass Nachrichten auch über mehrere Zwischenstationen übertragen werden, wenn keine direkte Verbindung oder nur eine schwache Verbindung der Maschinen zueinander besteht. Die durch die Mobilität der einzelnen Teilnehmer hervorgerufenen häufigen Topologieveränderungen sowie die variierende Menge an auszutauschenden Daten erfordern zudem, dass die Kommunikationswege mit jedem Zyklus (1 Hz) überprüft und ggf.

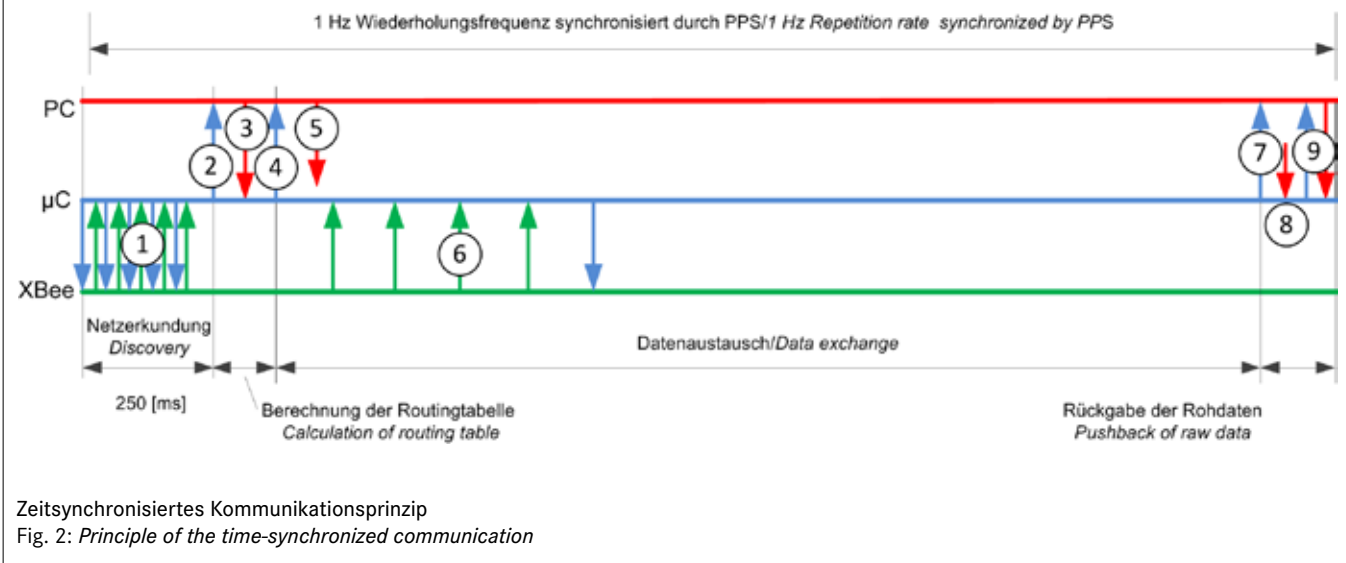
angepasst werden. Um das Gesamtsystem durch den Ausfall einzelner Teilnehmer nicht einzuschränken, wird explizit kein zentraler Koordinator eingesetzt.

Aus den skizzierten Szenarien ergeben sich technische Randbedingungen sowohl für die eingesetzte Hardware als auch für die verwendeten Algorithmen. Um der anfallenden Datenmenge und der notwendigen Reichweite gerecht zu werden, wurden Funkmodule gewählt, die im ISM-Band bei 2,45 GHz arbeiten. Diese sind sehr preiswert und frei verwendbar und erreichen eine maximale Bruttoübertragungsrate von 250 kBit/s [3]. Die Algorithmen zum Datenaustausch setzen direkt auf der Bitübertragungsschicht des Funkstandards IEEE 802.15.4 auf. Die handelsüblichen Funkmodule sind auf ein selbst entwickeltes Trägerboard gesockelt und somit leicht austauschbar. Dieses verfügt über einen ATMEGA128-Mikrocontroller zum Zwischenspeichern der Rohdaten und zur Ansteuerung des Kommunikationsmoduls. Aufgrund der direkten Anbindung zur Funkhardware können die zeitkritischen Aufgaben ohne den störenden Einfluss anderer Prozesse – quasi echtzeitnah – durchgeführt werden. Der Datenaustausch mit dem auf einem Intel Atom Prozessor mit 1,6 GHz basierenden Hauptprozessor-Board erfolgt wie auch die Spannungsversorgung über eine USB-Verbindung. Ebenfalls an das Hauptprozessor-Board angeschlossen sind sowohl ein u-blox-GNSS-Receiver vom Typ LEA-6T, der die GNSS-Rohdaten bereitstellt, als auch eine vom Institut für Flugführung (IFF) selbstentwickelte IMU in Form eines Quaders mit einer Kantenlänge von 32 mm und einem für die Verwendung in kleinen Flugeinheiten geeigneten Gewicht von 40 g [5]. Die auf dem Hauptprozessor-Board verwendete Software zur Prozessierung der Einzel- und Schwarmpositionslösung sowie zur Datenfusion und Datenaufbereitung ist in der Programmiersprache C++ unter Linux umgesetzt. Wesentliche Kriterien bei der Auswahl der Rechnerarchitektur für die UAV vom Typ Pelican waren die geringe Baugröße (Pico ITX, 100 x 72 mm) und der geringe Energieverbrauch des Systems.

### Schwarmpositionierung

Aufgrund des anvisierten Katastrophenszenarios, das im Rahmen NExt UAV betrachtet werden sollte, wurde bei der Entwicklung der GNSS-basierten Positionierungstechnologien davon ausgegangen, dass keine bodenseitige Infrastruktur – wie z. B. GNSS-Referenzstationsnetzwerke – verfügbar ist. Somit stehen generell nur satellitenbasierte Positionierungsverfahren für einzelne Maschinen zur Verfügung, die auf GNSS-Codemessungen basieren. Als nicht lokale und bodeninfrastrukturabhängige Quelle für Korrekturinformationen steht z. B. SBAS (Satellite Based Augmentation System) zur Verfügung [4]. Zur GNSS-basierten Berechnung der absoluten und relativen Positionen der am Schwarm beteiligten UAV und UGV wurde ein Ansatz entwickelt, der alle zu einem Zeitpunkt bekannten GNSS-Pseudo-range-Messungen, die auf dem permanenten Datenaustausch zwischen den Schwarmteilnehmern beruhen, in die Berechnung der relativen und absoluten Positionen einbezieht. Das grundlegende Prinzip basiert auf dem Ansatz der Doppel-

Abb. 2



differenzbildung zwischen einzelnen Messungen, wie sie auch bei Verwendung von GNSS-Referenzstationsmessungen eingesetzt werden. Bei der hier beschriebenen Applikation besteht jedoch die Herausforderung, dass die Anzahl der beteiligten Empfänger größer ist als bei Anwendungen mit Referenzstationen (i. d. R. ein Nutzer und eine Referenzstation). Des Weiteren sind die Positionen aller beteiligten Empfänger zeitvariant und nicht hochgenau, wie beim Einsatz einer Referenzstation, bekannt. Eine Herleitung und detaillierte Beschreibung des Algorithmus findet sich z. B. in [5].

**Kommunikationsprinzip**

Im Verlauf des Projektes wurden verschiedene Herangehensweisen für den Datenaustausch untersucht. Unter der Prämisse, keinen Koordinator zu verwenden, bieten sich für die Kommunikation grundsätzlich zwei Verfahren an. Ein möglicher Ansatz beruht auf der Wahl zufälliger Sendezeiten mit einer individuellen Überprüfung des Übertragungsmediums auf freie Kapazität. Demgegenüber wird bei einem zeitsynchronisierten Verfahren den Sendern ein vordefiniertes Zeitfenster (Zeitslot) zugewiesen, zu denen eine Kommunikation zugelassen ist [6].

Die erste Methode konnte in Versuchen erfolgreich für kleine Netzgrößen eingesetzt werden. Bei größeren Netzen stieg die Zahl an zusätzlich erforderlichen Nachrichten aufgrund von Datenkollisionen jedoch überproportional an. Deshalb wurde dieser Ansatz verworfen und ein zeitslot-basierter Ansatz präferiert, bei dem die Kommunikation zwischen den einzelnen Teilnehmern in einer geeigneten Weise abgestimmt bzw. synchronisiert wird. Hierfür wird im Projekt das zweite frei konfigurierbare Trigger-Signal des GNSS-Receiver benutzt, welches bei einem Takt von 1 Hertz dem PPS-Signal (Pulse Per Second) entspricht. Über dieses lassen sich die Uhren der Schwarmteilnehmer synchronisieren, sodass eine Kommunikation anhand fester Zeitbereiche erfolgt. Die notwendige Zuordnung der Zeit-

bereiche zur jeweiligen Maschine erfolgt über eine eindeutige Zuordnung der hardwareseitigen Seriennummer zu einer einmalig vergebenen Netzwerk-ID.

Das Routing erfolgt anhand eines proaktiven Verfahrens, das aus zwei Hauptphasen und mehreren Zwischenphasen besteht (**Abbildung 2**). Am Anfang eines Zyklus erfolgt eine Netzerkundung (1), bei der die Topologie des Netzes ermittelt wird. Die Netzerkundungsnachrichten enthalten – neben den ermittelten Informationen über die Netztopologie in Form einer Adjazenzmatrix (**Abbildung 3**) – auch Informationen über die Menge der GNSS-Rohdaten, die jeder Teilnehmer in der anschließenden Phase publizieren will. Darüber hinaus wird im Zuge der Netzerkundung die Qualität der einzelnen Verbindungen mittels der Empfangsstärke bewertet und basierend auf einem Schwellenwert zwischen stabilen und instabilen Verbindungen differenziert (grün: stabile Verbindungen, rot: instabile Verbindungen). Dieses erhöht die Qualität des Datenaustauschs vor allem in Szenarien, in denen die Maschinen im Grenzbereich stabiler Verbindungen zueinander operieren. **Abbildung 3** zeigt die so

Abb. 3

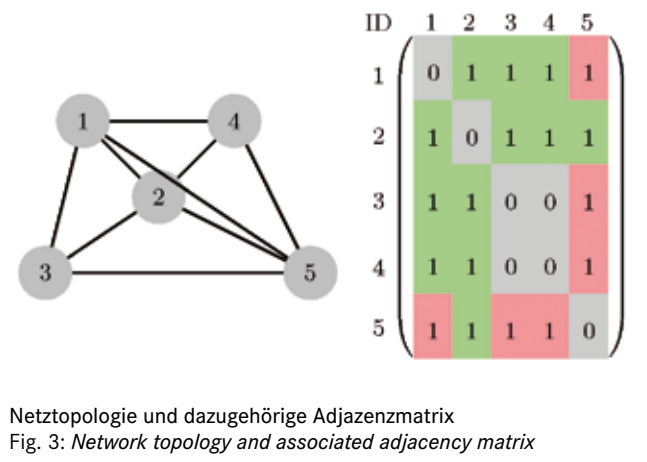
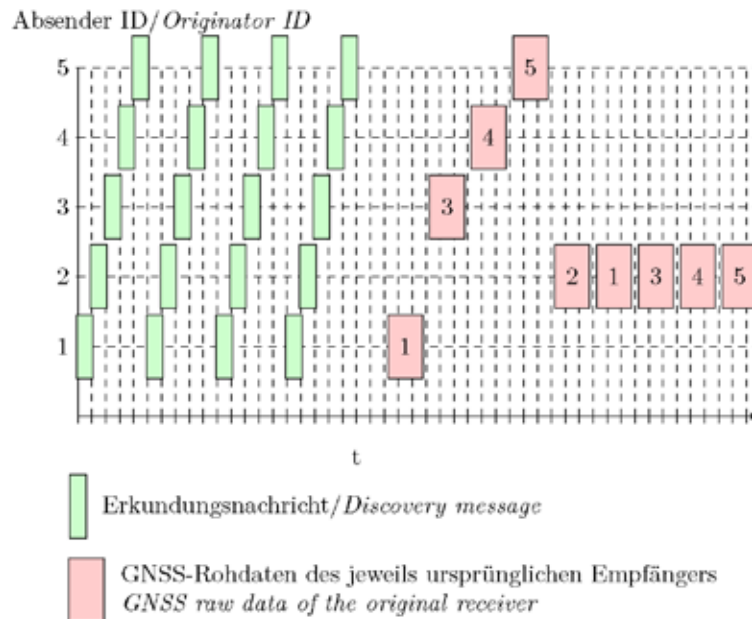


Abb. 4



Beispiel für Nachrichten während eines Zyklus  
Fig. 4: Example of messages during a cycle

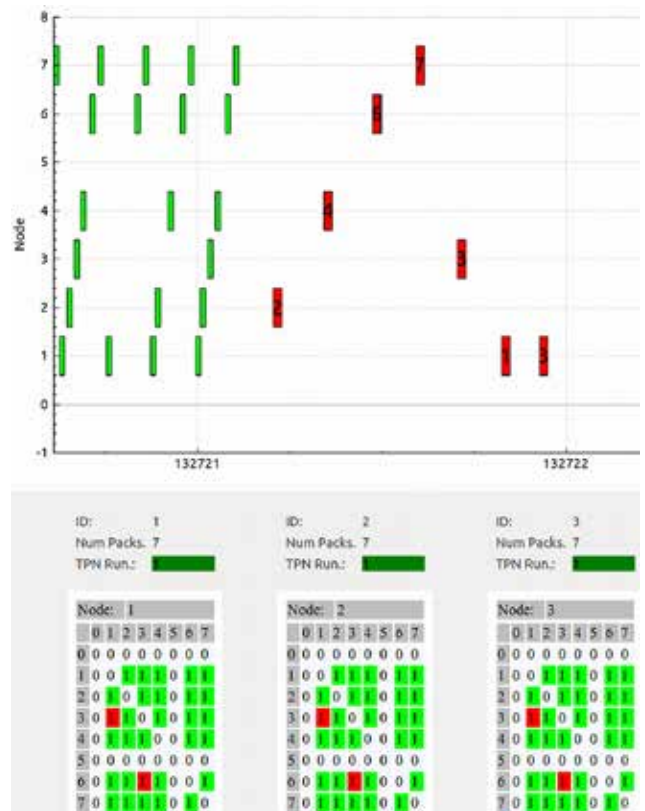
ermittelten Daten in Form einer Adjazenzmatrix für das skizzierte Beispielnetzwerk. Alle gewonnenen Informationen werden anschließend an den PC übermittelt (2), um aufbauend auf diesen Daten einen optimalen Zeitplan für den Datenaustausch zu berechnen. Das Ergebnis wird anschließend zurück an den Mikrocontroller zur Verarbeitung übermittelt (3).

Mit der Bestätigung des Erhalts dieser Daten (4) werden die zur Verfügung stehenden Rohdaten für die nächste Erkundungs- und Austauschphase in den Zwischenspeicher transferiert (5). Nach einer fest definierten Zeit, relativ zu dem eingesetzten Triggersignal, beginnt die Datenaustauschphase (6), die auf einem berechneten Ablaufplan basiert und die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität optimal ausnutzt. **Abbildung 4** zeigt den Empfang von vier Rohdatenpaketen anderer Teilnehmer, bevor die eigenen Daten (aus Sicht von Knoten 2) übermittelt werden. Nach der Datenaustauschphase werden alle gesammelten Rohdaten vom Mikrocontroller an den PC übermittelt (7) und die Rohdaten für den nächsten Zyklus abgerufen. Optional werden weitere Daten, z. B. SBAS-Rohdaten vom PC abgerufen (8) und der Empfang bestätigt (9), bevor der Zyklus von Neuem mit der Erkundung der Netztopologie beginnt. Da die Informationen über die auszutauschende Menge an Rohdaten schon für die Netzerkundung vorliegen müssen, ergibt sich somit ein zeitlicher Versatz von einem Takt, was in diesem Fall einer Sekunde entspricht. Dies wird bei der Verarbeitung der Daten zur Positionslösung über entsprechende Filter (z. B. Kalman-Filter) berücksichtigt.

**Versuchsbeschreibung**

Die Erprobung des Systems erfolgte sowohl in freiem Gelände als auch in einer urbanen Umgebung. Dabei wurden unter-

Abb. 5



Ausschnitt aus der Netzwerkanalyse eines laufenden Versuchs  
Fig. 5: Extract from the network analysis of a running experiment

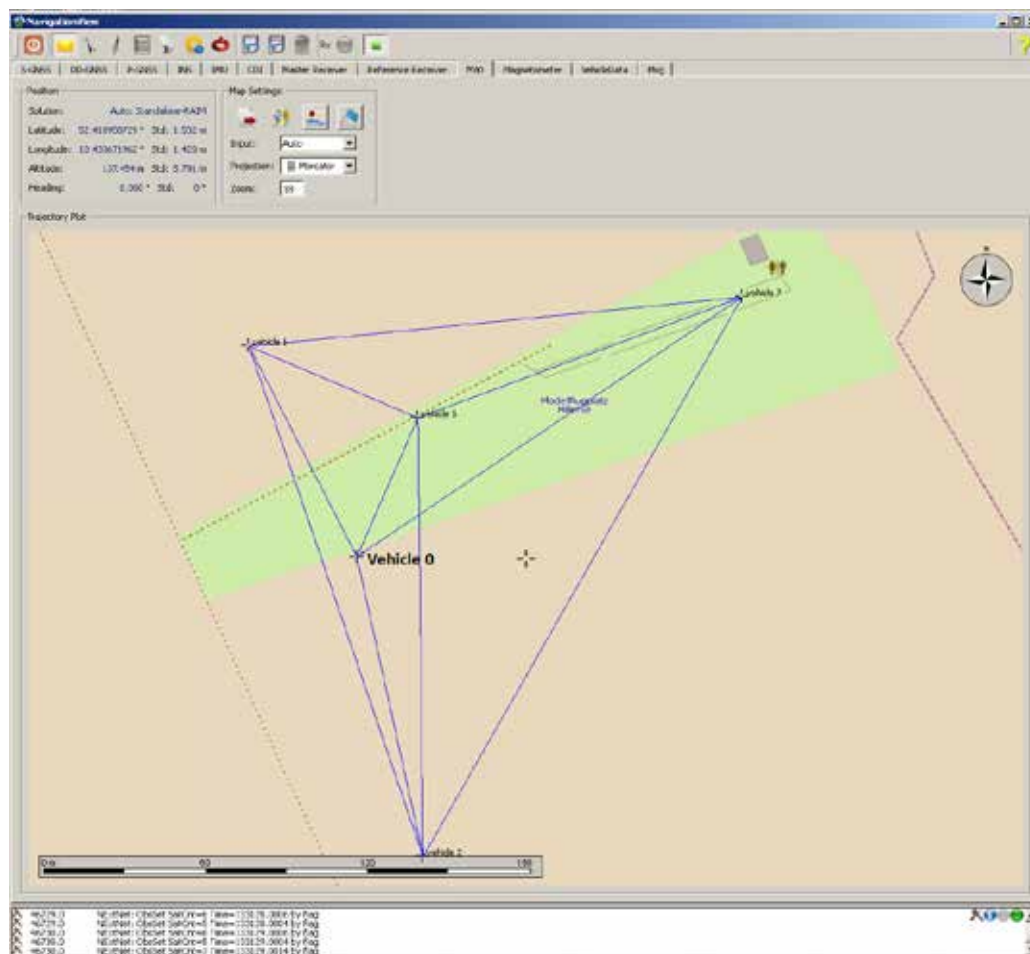
schiedliche Szenarien analysiert, wie etwa eine linienförmige Anordnung der Maschinen oder auch eine gleichmäßige Verteilung über dem gewählten Einsatzgebiet.

Zur Visualisierung und Auswertung des Nachrichtenverkehrs im Netzwerk während der Versuche wird eine selbst entwickelte Software verwendet. Dazu ist ein passiver Kommunikationsteilnehmer in das System integriert, über den alle verfügbaren Nachrichten aufgenommen werden, sodass eventuelle Probleme und Störungen schon während des Versuchs analysiert werden können. **Abbildung 5** zeigt einen Ausschnitt des analysierten Nachrichtenverkehrs während eines Versuchs. Durch die Wahl einer öffentlichen und frei nutzbaren Frequenz sind Beeinträchtigungen durch andere Geräte möglich, wie etwa Fernsteuerungen aus dem Modellbaubereich, öffentliches WLAN usw. Bei schlechter Empfangsqualität können mit dem gewählten Ansatz eines zeitslot-basierten Datenaustauschs die nicht erfolgreich übermittelten Daten nicht erneut gesendet werden, da dies eine erneute Zuteilung der Zeitslots bei allen Teilnehmern erfordert. Die Zuverlässigkeit kann jedoch durch die Bevorzugung stabiler Verbindungen erhöht werden, indem

die ermittelte Empfangsstärke zwischen den Teilnehmern für den GNSS-Rohdatenaustausch wie schon beschrieben berücksichtigt wird und instabile Verbindungen möglichst nicht genutzt werden. Dieses ermöglicht es, die Kommunikation auch mit diversen Störquellen und unter schlechten Empfangsbedingungen aufrechtzuerhalten und einen Großteil der Nachrichten erfolgreich zuzustellen.

Während des Versuchs kann das Ergebnis der Schwarmpositionierung mit dem am IFF entwickelten Tool online angezeigt werden (**Abbildung 6**). Dazu wird eine Verbindung mit einem der beteiligten UAV oder UGV via WLAN hergestellt. Da bei jedem Schwarmteilnehmer sämtliche ausgetauschten Daten vorliegen und in dem oben beschriebenen kooperativen Ansatz prozessiert werden, können so auch die Positionen und Basislinien aller Schwarmteilnehmer über diese Verbindung abgefragt und in der grafischen Benutzeroberfläche angezeigt werden. Dies bietet dem Operator einen Überblick über den gesamten Schwarm und kann so zu einer Erhöhung des Situationsbewusstseins, wie etwa der räumlichen Verteilung aller Schwarmteilnehmer, für reale Anwendungen bei-

Abb. 6



Online-Darstellung der Schwarmpositionierung – Positionen und Baselines der UAV und UGV  
 Fig. 6: Online presentation of the swarm positioning – positions and the UAV and UGV baselines

tragen. In der Darstellung ist mit „Vehicle 0“ das UAV bzw. UGV bezeichnet, mit dem eine Verbindung aufgebaut ist und dessen Position inkl. Standardabweichungen zusätzlich links oben im Menüfenster angezeigt wird. Da das IFF-proprietäre Tool modular aufgebaut ist, bieten sich hier auf den in **Abbildung 6** nicht dargestellten Reitern die Möglichkeit auch andere Daten des Versuchsträgers anzuzeigen, wie z. B. Skyplots von den empfangenen GNSS-Satelliten, Messungen und prozessierte Ergebnisse der an Bord befindlichen Inertialmess-einheit usw.

### Schlussfolgerungen

Im Rahmen realer praktischer Versuche konnte die Funktionalität des GNSS-Rohdatenaustausches, basierend auf dem oben beschriebenen Verfahren und der kooperativen Datenauswertung aller im Schwarm vorhandenen und ausgetauschten Daten demonstriert werden. Im Fokus der Untersuchungen stand neben einer echtzeitfähigen Auswertung die Funktionalität in realen Szenarien, sowohl in nahezu ungestörten Gebieten als auch in urbanen Szenarien, die zum Teil starke Einschränkungen bzgl. des GNSS Empfangs, aber im Besonderen auch der Intra-Schwarmkommunikation bieten.

Aufgrund der Komplexität des Versuchsaufbaus und der großen Anzahl unterschiedlicher Einflüsse lässt sich eine quantitative Aussage bezüglich der Kommunikation nur schwer ermitteln. Qualitativ lässt sich aber festhalten, dass der Datenaustausch auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen und bei stark wechselnden Topologien erfolgreich und reproduzierbar durchführbar ist. Gelegentlicher Datenverlust in Form von fehlenden Nachrichten tritt durch nicht vollständig vermeidbare Störungen im verwendeten freien ISM-Band auf.

Eine Erkennung fehlender Daten im Bereich der Netzerkundung wie auch beim Datenaustausch wäre grundsätzlich realisierbar und wurde testweise auch implementiert. Eine erneute Anforderung bzw. ein erneutes Versenden der Datenpakete widerspricht jedoch dem grundsätzlich verfolgten Ansatz. Durch die hohe Wiederholungsrate der Netzerkundung wie auch durch den Austausch der GNSS-Rohdaten ist es zudem zweckdienlicher, den Fokus auf die Zustellung aktueller Information als auf eine gesicherte Übertragung jedes Datensatzes zu legen.

### Literatur

- [1] Schattenberg, J.; Dopichay, T.; Lang, T. (2010): comRoBS - Flexible Forschungsplattform für den kooperativen Maschinenbetrieb. *Landtechnik* 65(3), S. 217–219
- [2] Schattenberg, J.; Lang, T.; Becker, M.; Batzdorfer, S.; Hecker, P.; Andert, F. (2011): Präzise Relativpositionierung in Maschinenschwärmen. *Landtechnik* 66(5), S. 333–336
- [3] XBee®/XBee-PRO® RF Modules, Datasheet, Version 90000982\_F 1/11/2012
- [4] Bestmann, U.; Batzdorfer, S.; Becker, M.; Scheide, T.; Hecker, P. (2012): SBAS in Urban Environment: Scenarios, Applicability and Challenges. *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, September 2012, pp. 3481–3487
- [5] Batzdorfer, S.; Bestmann, U.; Schwithal, A.; Becker, M.; Hecker, P. (2011): Exploitation of Cooperative GNSS/IMU Systems for Positioning within UxV Swarms. *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, OR, September 2011, pp. 3835–3841
- [6] Schattenberg, J.; Harms, H.; Lang, T.; Batzdorfer, S.; Becker, M.; Bestmann U. (2013): Data Exchange in Swarms of Mobile Vehicles for Positioning. *Control and Navigation Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*, April 23–25, 2013, pp. 780–792

### Autoren

**Dipl.-Ing. Jan Schattenberg** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig und Koordinator der Gruppe Assistenzsysteme und kooperativer Maschinenbetrieb sowie Leiter des Projektbüros des Instituts.  
E-Mail: j.schattenberg@tu-bs.de

**Dipl.-Ing. Hannes Harms** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig in der Gruppe Assistenzsysteme und kooperativer Maschinenbetrieb.

**Prof. Dr.-Ing. Thorsten Lang** ist Leiter der Arbeitsgruppe Assistenzsysteme am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig (Institutsleiter **Prof. Dr. Ludger Frerichs**), Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig.

**Dipl.-Ing. Martin Becker** und **Dipl.-Ing. Simon Batzdorfer** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Flugführung der TU Braunschweig und arbeiten in der Abteilung für Navigation des Instituts im Themenfeld der inertialen, satellitenbasierten und integrierten Navigation.

**Dr.-Ing. Ulf Bestmann** ist Leiter der Abteilung für Navigation des Instituts für Flugführung der TU Braunschweig.

**Prof. Dr.-Ing. Peter Hecker** ist Leiter des Instituts für Flugführung der Technischen Universität Braunschweig, Hermann-Blenk-Str. 27, 38108 Braunschweig

### Danksagung

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Projektes „Navigation zur Exploration von tieffliegenden UAV in Katastrophenszenarien“ (Next UAV). Das Verbundvorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) durch das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) gefördert (FKZ 50 NA 1002 und 50 NA 1003).