



© [M] Luftbild der Bayerischen Vermessungsverwaltung, September 2012

MEHR SICHERHEIT DURCH POSITIONSBESTIMMUNG MIT SATELLITEN UND LANDMARKEN

Verkehrsunfälle in einfachen Situationen kommen dank moderner Assistenzsysteme wie ACC, ESP und elektronischem Bremsassistent zunehmend seltener vor. Um auch die Anzahl komplexerer Unfälle an Kreuzungen oder bei Verdeckung und Nichteinsehbarkeit zu reduzieren, untersuchen KIT, Sick und Universität Passau zusammen mit anderen Partnern im Forschungsprojekt Ko-PER (Kooperative Perzeption) Ansätze, die auf einer besseren Auswertung und Verknüpfung von fahrzeuglokaler Umfelderkennung, Satellitennavigation, digitaler Onboard-Karte und Landmarkenerkennung basieren.

AUTOREN



**DR.-ING. DIPL.-ING.
ROLAND KRZIKALLA**

ist Koordinator von Forschungsprojekten zu Infrastruktursensorik und Umfelderkennung in Fahrzeugen mit Laserscannern bei der Sick AG in Hamburg. Im Forschungsprojekt Ko-PER leitet er die Arbeitsgruppe Fahrzeug-Eigenlokalisierung.



DIPL.-INF. ANDREAS SCHINDLER

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter für die Gebiete der Umgebungsperzeption und landmarkenbasierten Fahrzeug-Eigenlokalisierung am Institut Forwiss der Universität Passau.



DIPL.-ING. MATTHIAS WANKLER

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter mit dem Schwerpunkt GNSS/INS-Datenfusion zur Fahrzeug-Eigenlokalisierung am Institut für Theoretische Elektrotechnik und Systemoptimierung (ITE) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



**DR. RER. NAT. DIPL.-PHYS.
REINER WERTHEIMER**

war Referent für technische Perzeption, Fahrerassistenz und präventive Sicherheit bei der BMW Group Forschung und Technik in München. Er ist Leiter des Forschungsprojekts Ko-PER auch nach seiner Pensionierung in 2011.

ANTEIL KOMPLEXER UNFÄLLE NIMMT ZU

Die zunehmende Marktdurchdringung von Systemen der aktiven und präventiven Fahrzeugsicherheit wie etwa ESP (ESC oder DSC), ACC und EBA bewirkt eine deutliche Reduktion der Unfälle in den zugeordneten Klassen der Allein- beziehungsweise Auffahrunfälle, also in Szenarien vergleichsweise geringer Komplexität. Folglich nimmt die relative Häufigkeit von Unfällen in komplexeren Situationen stetig zu. Sowohl im Folge als auch im Kreuzungsverkehr betrifft dies Szenarien, bei denen Verdeckungen, Nichteinsehbarkeit und unerwartetes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer eine wichtige Rolle spielen. Beispielsweise liegt der Anteil der schweren Unfälle an Kreuzungen in Deutschland bereits bei über 35 % – Tendenz steigend.

Im Förderprojekt Ko-PER wird daher untersucht, inwieweit sich das Gefährdungspotenzial komplexerer Szenarien durch Integration der sensorischen Wahrnehmungen mehrerer benachbarter Fahrzeuge und – kreuzungslokal – auch der Ergebnisse infrastrukturegebundener Sensornetzwerke verringern lässt. Dazu werden lokale Perzeptionsausgaben drahtlos kommuniziert und in den jeweiligen Empfängerfahrzeugen zu einem dynamischen Gesamtbild fusioniert, um im Anschluss die aktuell vorliegende Verkehrssituation zu analysieren. ❶ zeigt die für diesen Ansatz erforderlichen Bausteine, wobei die Basis der Pyramide den sensornahen, die Spitze den sensorfernen Schichten der Informationsverarbeitungskette entspricht.

Eine grundsätzliche Voraussetzung für die Fusion der Wahrnehmungen individueller Beobachter ist deren zuverlässige Eigenlokalisierung (Position, Orientierung und Zeit). Die Darstellung der sensorischen Wahrnehmung in relativen Koordinaten ist hierzu nicht ausreichend: Die Aussage „In 42 m Entfernung, 31° linker Hand befindet sich ...“ ist offenkundig entzogen, sofern sie nicht durch die Angabe, wann und wo diese Beobachtung gemacht wurde, ergänzt wird.

Eine für die kooperative Sicherheit hinreichend genaue, und dabei schritthaltende Eigenlokalisierung der Fahrzeuge (Orientierung auf wenige Grad und Position zumindest fahrstreifen-genaue) stellt eine erhebliche Herausforderung dar. Daher wird in Ko-PER das Potenzial unterschiedlicher Ansätze untersucht, von denen einige in diesem Beitrag kurz vorgestellt werden.

ENG GEKOPPELTES GNSS/INS

Die Güte und Verfügbarkeit von Positions- und Geschwindigkeitsinformationen, die ein Globales Navigations-Satellitensystem (GNSS) ermittelt, zum Beispiel GPS, Galileo, Glonass oder deren Kombination, wird durch die lokalen Umgebungsbedingungen wesentlich beeinflusst. Mehrwegeausbreitung durch Signalreflexion kann die Qualität der Satellitensignale deutlich verringern, und die Anzahl an sichtbaren und damit nutzbaren Satelliten wird durch Abschattungen (Gebäude, Bäume) mitunter erheblich reduziert. Mit weniger als vier verfügbaren Satelliten kann ein GNSS-Empfänger allein keine Positionslösung bereitstellen.

Demgegenüber ermittelt ein inertiales Navigationssystem (INS) seine Position und Orientierung kurzzeitgenau durch Messung und Integration der Drehraten und Beschleunigungen und ist damit unabhängig von externen Informationen. Der differenziellen Natur der Messgrößen gemäß sind die so ermittelten Positionen und Orientierungen jedoch einer Drift unterworfen. Letz-

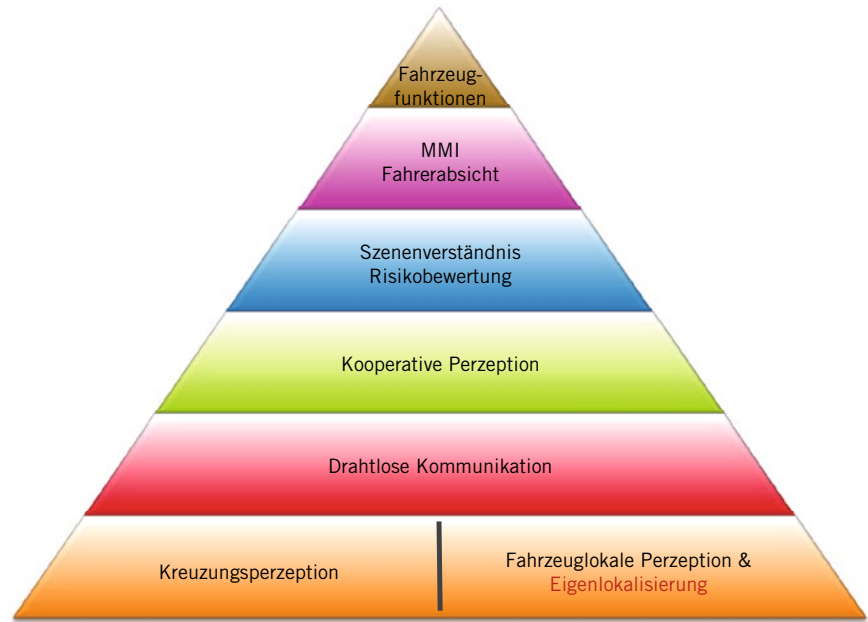
tere ist entscheidend von der Qualität des INS abhängig. Eine Sensordatenfusion der inertialen Messgrößen und der Satellitensignale über ein Kalman-Filter ermöglicht jedoch die Fehlerschätzung (zum Beispiel Skalierungsfaktor, Bias) und Stützung der verwendeten INS-Sensorik. Stehen nun keine sichtbaren Satelliten zur Verfügung (GNSS-Ausfall), kann das fusionierte System eine Lokalisierung über einen Zeitraum von wenigen Sekunden ausschließlich per Inertialsensorik sicherstellen.

Beim lose gekoppelten GNSS/INS-Ansatz (Loosely-Coupled System, LCS) wird das zunächst autark berechnete Positionsergebnis des GNSS-Empfängers anschließend zur Datenfusion verwendet. Bei weniger als vier sichtbaren Satelliten steht damit vom GNSS-Empfänger keine Information zur Stützung der INS-Position zur Verfügung.

Das in Ko-PER umgesetzte eng gekoppelte System (Tightly-Coupled System, TCS) fusioniert hingegen die Rohdaten einzelner Satelliten. Deren individuelle Einbeziehung ermöglicht nicht nur eine optimale Gewichtung der einzelnen GNSS-Messgrößen, sondern erlaubt insbesondere eine Stützung der Navigationslösung auch bei weniger als vier sichtbaren Satelliten.

Die Evaluierung des vorgestellten Systems, ② und ③, liefert horizontale Positionsgenauigkeiten im Meterbereich. Dies entspricht noch nicht der eingangs geforderten Spurgengenauigkeit. Durch Fusion mit fahrzeuglokalen Messgrößen (Odometriedaten, Fahrzeugdynamikmodell) werden aber weitere Genauigkeitsverbesserungen erwartet.

Das kontinuierlich bereitgestellte TCS-Navigationsergebnis (3-D-Position, Geschwindigkeit und Lage) wird einerseits als eigenständige georeferenzierende



① Die Ko-PER-Verarbeitungskette als Pyramide

Lokalisierungslösung genutzt und dient andererseits für eine präzisere und robustere Initialisierung hochgenauer relativer Lokalisierungsansätze (beispielsweise mittels Kartenabgleich), die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

KOOPERATIVES GNSS

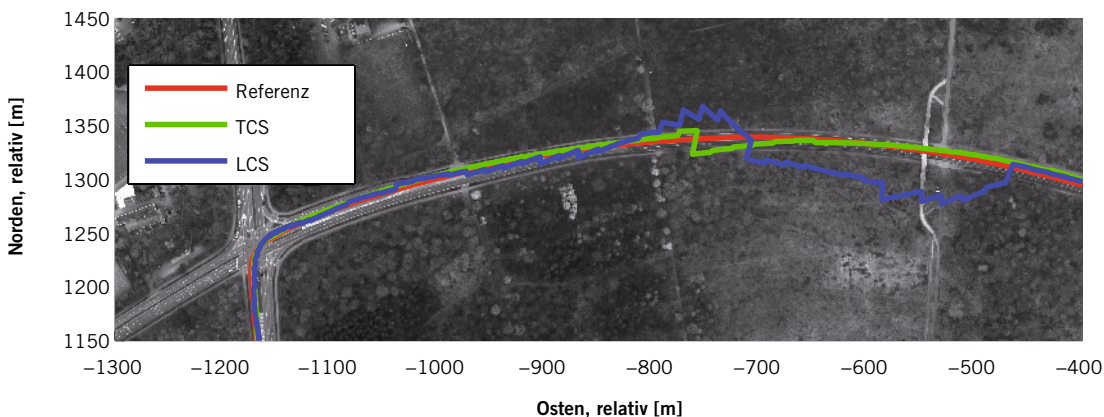
Für viele Fahrzeugfunktionen der präventiven Sicherheit ist eine relative Positionsbestimmung zwischen den Verkehrsteilnehmern ausreichend, sofern deren korrekte Assoziation gewährleistet ist. Nun enthalten die für die GNSS-Positionierung verwendeten Signallaufzeiten (Pseudorange) systematische Messfehler (zum Beispiel aufgrund variierender Sig-

nallaufzeit in der Ionosphäre), die sich auf die Empfangsdaten benachbarter GNSS-Empfänger ähnlich auswirken und sich bei der Relativpositionierung folglich eliminieren lassen müssten.

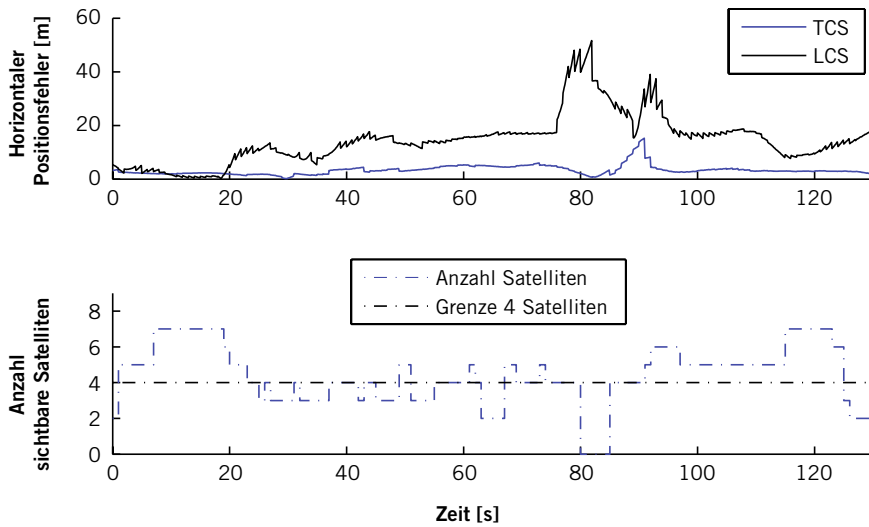
Durch den Austausch von GNSS-Rohdaten wird daher untersucht, unter welchen Bedingungen sich Genauigkeitsverbesserungen erzielen lassen. Zu den in Entwicklung befindlichen Arbeiten liegen derzeit noch keine experimentellen Ergebnisse vor.

KO-TAG-TRANSPONDER AN KREUZUNGEN

Über die infrastrukturgestützte Eigenlokalisierung mit Ko-TAG-Transpondern wurde bereits in [1] berichtet. Ein Haupt-



② Auszug einer Messfahrt: Vergleich der TCS-Position mit einer LCS-georeferenzierten Position (Kartenbasis mit freundlicher Genehmigung der Stadt Karlsruhe, Liegenschaftsamt)



③ Positionsfehler und Anzahl sichtbarer Satelliten – siehe auch ②

ziel dieses Forschungsprojekts ist es, dass ein Automobil herannahende Personen samt ihrer Position anhand der von ihnen mitgeführten aktiven RFID-Transponder, die beispielsweise in Mobiltelefone oder in Schulranzen eingebaut sind, erkennen kann. An Kreuzungen stationär verbaute Transponder können folglich auch zur Fahrzeug-Eigenlokalisierung genutzt werden.

HOCHGENAUE DIGITALE KARTEN

Eine Reihe von Anwendungen, wie die landmarkenbasierte Eigenlokalisierung und Spurzuordnung von Fahrzeugen, die Situationsanalyse und die Kreuzungsassistentz, setzen hochpräzises digitales Kartenmaterial voraus. Daher enthält die digitale Karte in Ko-PER detaillierte Informationen über individuelle Fahrstreifen, Fahrbahnmarkierungen und

sogenannte Punktlandmarken wie zum Beispiel Leitpfosten, Verkehrszeichen oder Bäume. Diese Karte weist folgende Besonderheiten auf:

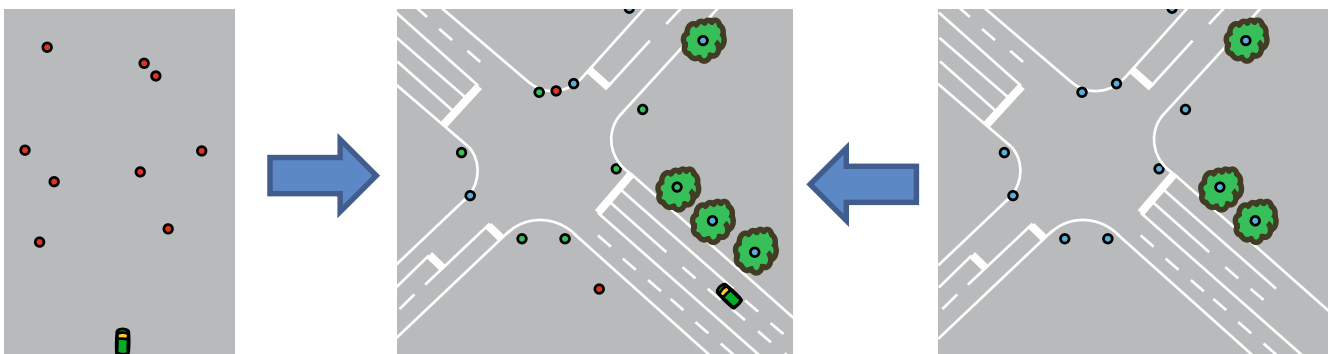
- : Innovative Kurvenmodellierung: Fahrstreifen und Fahrbahnmarkierungen sind als glatte Kreisbogensplines (KBS) hinterlegt, also als Kurven, die aus Geraden- und Kreisbogensegmenten bestehen. Diese Modellierung erfordert deutlich weniger Speicherbedarf als ein Streckenzugmodell. Durch Hinzunahme eines KBS-Höhenprofils ist eine vollständige 3-D-Repräsentation verfügbar.
- : Hocheffiziente Berechnung von Abständen: Die schnelle Berechnung von Abständen zu Fahrstreifen und Fahrbahnmarkierungen ist Grundlage für viele verschiedene Aufgabenstellungen (Spurzuordnung, Kreuzungsassistentz, Fahrzeug-Eigenlokalisierung).

Durch die Verwendung von Kreisbogensplines können die nötigen Abstände direkt und effizient ermittelt werden.

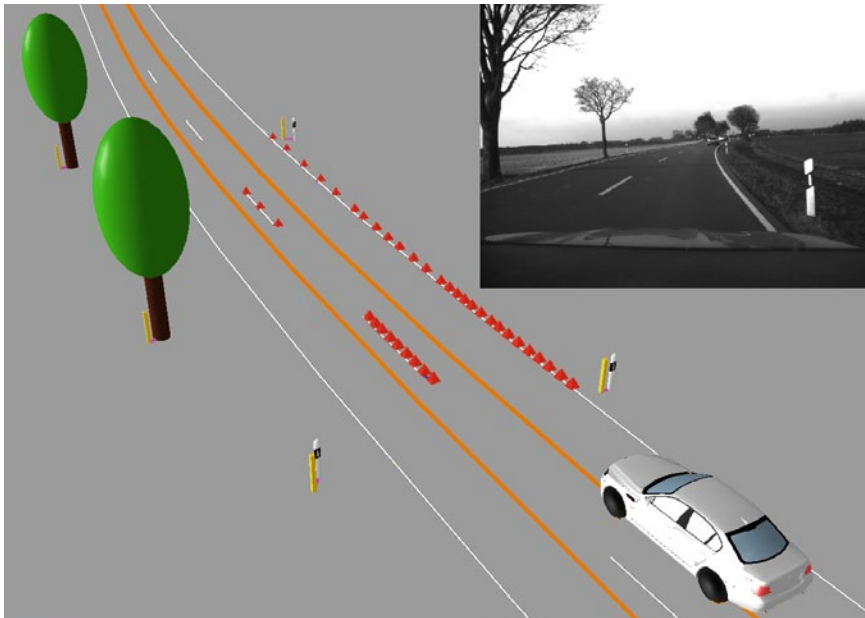
- : Minimalitätseigenschaft: Die Algorithmik zur Erstellung der Karte liefert für jeden Kreisbogenspline bei vorgegebener Genauigkeit die minimale Segmentzahl. Die resultierende Repräsentation führt somit zu einem minimalen Speichervolumen bei garantierter Genauigkeit.
- : Offenes Kartenformat: Um Austauschbarkeit und Erweiterbarkeit zu gewährleisten, sind die Kartendaten im sogenannten OpenStreetMap-Format hinterlegt [2].
- : Hohe Genauigkeit: Die Präzision der Karte wurde mit Hilfe hochgenauer Referenzmessungen evaluiert. Dabei wurde eine globale Genauigkeit der Fahrbahnmarkierungen von circa 10 cm nachgewiesen.

LASERSCANNER UND FAHRBAHNBEGLEITENDE LANDMARKEN

Landmarkenbasierte Lokalisierungsmethoden im industriellen Umfeld setzen in der Regel spezielle Objekte voraus, die sich signifikant von ihrer Umgebung unterscheiden, zum Beispiel spezielle Schachbrett- oder Strichmuster beim Einsatz von Kameras oder retroreflektierende Objekte bei Laserscannern. Diese sogenannten Landmarken werden an den Stellen installiert, an denen Lokalisierungen stattfinden sollen. Im Straßenverkehr ist die Montage solcher Objekte nicht praktikabel. Zur Bestimmung der Fahrzeugposition mittels Landmarken sind daher bereits vorhandene Objekte, wie zum Beispiel Straßenschilder, Leitpfosten oder Laternenpfähle zu nutzen.



④ Fahrbahn begleitende Landmarken, die von einem Laserscanner des Fahrzeugs erfasst werden (rot) (links); durch assoziierte Landmarken (grün) kann die Fahrzeugposition berechnet werden, was unter anderem eine spurgenaue Fahrzeugzuordnung erlaubt (Mitte); digitale Karte mit eingetragenen Landmarken (blau) (rechts)



5 Assoziation von Landmarken mittels digitaler Karte; dargestellt sind: berechnete Fahrstreifenmitte (orange), Fahrbahnmarkierungen (weiß) mit Korrespondenzen aus der Fahrspurerkennung (rote Pyramiden), erfasste Baumstämme und Leitpfosten als Punktlanmarken (gelb) samt Korrespondenzen aus der Karte (Abstands-differenzen: magenta); oben rechts: Kamerabild der realen Szene (Bild © BMW Group Forschung und Technik)

Speziell für den Fahrzeugeinsatz entwickelte Laserscanner bieten die Möglichkeit, solche in 4 schematisch dargestellten fahrbahnbegleitenden Landmarken in der Umgebung eines Fahrzeugs zuverlässig zu detektieren. Steht eine digitale Karte im Fahrzeug zur Verfügung, welche die globalen Koordinaten der Landmarken beinhaltet, werden die mit dem Laserscanner erfassten Kandidaten mit den hinterlegten Referenzdaten der Karte assoziiert, und die Fahrzeugposition kann berechnet werden.

Den Kern dieser Berechnung bildet ein erweitertes Kalman-Filter (EKF), welches mit einer vorhandenen GNSS-Position (Genauigkeit circa 5 – 15 m) initialisiert wird. Der Abstand und der Winkel der erfassten natürlichen Landmarken in Bezug auf die assoziierten Landmarken der digitalen Karte sind die Eingangsdaten für das EKF. Die Prädiktion im EKF wird unter Nutzung der Geschwindigkeit und Gierrate des Fahrzeugs durchgeführt. Der aktuelle Zustand des Kalman-Filters beschreibt die Position sowie die Orientierung des Fahrzeugs.

Die zu erwartende Gesamtgenauigkeit dieses Lokalisierungsansatzes liegt – bei bestmöglichen Umgebungsbedingungen (ausreichende Anzahl korrekt assoziierter Landmarken) – im Bereich der Messgenauigkeit der verwendeten Karte

beziehungsweise der Laserscanner, das heißt in der Größenordnung >10 cm. Entsprechende Genauigkeitsgrenzen sind bei gegebenen Voraussetzungen im Straßenverkehr sowohl an den Kreuzungen als auch im Überlandbereich zu erwarten. Wird die Schätzgenauigkeit des Algorithmus schlechter als die der verfügbaren GNSS-Position, wird der Schätzfehler auf die GNSS-Genauigkeit begrenzt.

LANDMARKEN UND FAHRSTREIFEN – LASERSCANNER UND KAMERA

Unter Zuhilfenahme der hochgenauen digitalen Karte wurde im nächsten Schritt ein noch weitergehender landmarkenbasierter Lokalisierungsansatz entwickelt. Die Fahrzeugperzeption erlaubt unter Einbeziehung einer Videokamera zusätzlich zur Detektion erhabener Objekte wie Leitpfosten, Verkehrszeichen oder Baumstämmen auch die Extraktion flächiger Elemente wie zum Beispiel Fahrbahnmarkierungen. All diese Objekte werden mit Einträgen in der digitalen Karte assoziiert, 5, um aus den Korrespondenzen auf die Position des Fahrzeugs zu schließen.

Die Assoziation der per Video detektierten Fahrbahnmarkierungen mit den in der digitalen Karte hinterlegten

Informationen ermöglicht eine sehr gute Schätzung der lateralen Position und Orientierung des Fahrzeugs zur Fahrbahn. Unter Verwendung der mit Laserscanner extrahierten Landmarken lässt sich die longitudinale Fahrzeugposition noch weiter verbessern. Ein Partikelfilter realisiert dabei den probabilistischen Ansatz zur Fusion der Eingangsdaten. Erste experimentelle Untersuchungen zeigen, dass mit diesem Ansatz globale Positionsgenauigkeiten lateral unter 0,5 m und longitudinal unter 1 m erreicht werden. Der Orientierungsfehler liegt bei unter 1°.

Um die jeweiligen Stärken der einzelnen Lokalisierungsansätze zu nutzen, werden deren Ergebnisse künftig durch einen geeigneten Fusionsansatz integriert. Damit lassen sich Ausreißer beziehungsweise Aussetzer in der Positionsschätzung einzelner Verfahren weitgehend eliminieren. Vertiefende Informationen und weitere Literaturangaben zum Projekt Ko-PER und seinen Lokalisierungsansätzen finden sich in [3].

LITERATURHINWEISE

- [1] Schwarz, D.: Erweiterung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation mit Funkortungstechniken. In: ATZelextronik 7 (2012), Nr. 5, S. 323 – 329
- [2] <http://www.openstreetmap.org/>
- [3] <http://ko-fas.de/deutsch/ko-per-kooperative-perzeption.html>

DANKE

Das Projekt Ko-PER und die hier vorgestellten Arbeiten werden vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) teilweise gefördert (Kennzeichen 19 S 9022). Die Autoren bedanken sich bei der BMW Group Forschung und Technik für die Durchführung der Messfahrten zur Erstellung und Evaluierung der hochpräzisen digitalen Karte sowie der landmarkenbasierten Lokalisierungsansätze.



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com

A Material Advantage



Auf der ganzen Welt arbeiten Automobilhersteller daran, die strengen Umweltstandards zu erfüllen und gleichzeitig die von ihren Kunden gewünschte Leistungsfähigkeit und Individualität ihrer Fahrzeuge zu erhalten. Aluminium von Novelis schafft den materiellen Vorteil, um in dem hartumkämpften Markt erfolgreich zu sein. Unsere Leichtbautechnologie und fortschrittlichen Legierungen erfordern keine Kompromisse und machen den entscheidenden Unterschied für den Erfolg Ihrer Marke aus.

Not just aluminium, Novelis Aluminium.™

novelis.com/auto

Novelis