



Der autonome Unimog U5023 bei einer Erprobungsfahrt auf der ZAK, Kaiserslautern

Commercial Vehicle Cluster-Nutzfahrzeug GmbH

# Autonome Off-Road Navigation von Nutzfahrzeugen

Erfahrungsbericht und Testergebnisse des CVC-Leitprojekts zum autonomen Fahrbetrieb von Nutzfahrzeugen im Off-Road-Bereich

**Der autonome Unimog U5023 demonstriert die Anwendung eines adaptiven Steuerungskonzepts für Nutzfahrzeuge im Langsamfahrbetrieb und bewältigt komplexe Navigationsaufgaben in semi- sowie vollautonomen Off-Road Navigationstests.**

Das CVC-Leitprojekt »Autonomer Fahrbetrieb von Nutzfahrzeugen im Off-Road-Bereich am Beispiel des Unimogs« thematisiert Problemstellungen der autonomen Navigation und Umwelterkennung in stark unstrukturierten Umgebungen. Diese gelten aufgrund der vielfältigen und sich permanent ändernden Umgebungsbedingungen technisch als schwer lösbar. Dennoch bieten Off-Road Szenarien, wie autonomes Arbeiten, auf Baustellen, der Einsatz in der Landwirtschaft, oder Katastrophenschutz großes Potential für Automatisierungen.

Zum einen lässt sich die Produktivität durch einen pausenlosen Einsatz erhöhen, während menschliche Fehler vermieden werden. Zum anderen besteht auf Grundlage von Automatisierungen die Möglichkeit, die Zahl der Arbeitsunfälle zu reduzieren. Ebenso finden sich Applikationsgebiete im Bereich des Katastrophenschutzes oder der Pandemiebekämpfung. Im Umgang mit letzterem zeigt sich beispielsweise ein Vorteil von autonomen Prozessen: Indem selbstfahrende Konvois Hilfsgüter transportieren, erfolgt ein minimalisierter Einsatz des Menschen in hochriskanten Gebieten.

An ähnliche Szenarien anknüpfend befassen sich die Forschungsfragen des CVC-Leitprojekts mit der sicheren nebst zuverlässigen, autonomen Navigation abseits der Straße. Damit begründen sich zudem die Notwendigkeit einer realitätsnahen Simulation von Nutzfahrzeugen sowie entsprechende Konzepte zum technischen Aufbau von Navigations- und Perzeptionssystemen inklusive deren Integration in die Anwendungsplattform.

Neben Handlungsempfehlungen für die Entwicklung von Assistenzsystemen und autonomen Steuerungskomponenten wurde ein Projektdemonstrator in Form des Unimogs U5023 von Mercedes Benz Special Trucks entsprechend zum autonomen Betrieb umgerüstet. Diese Art Fahrzeug eignet sich hervorragend für die Nutzung im Off-Road-Gelände, da es neben einer extremen Geländegängigkeit auch über viele Freiheitsgrade wie Pendelachsen, Differentialsperren, eine hohe Gangzahl oder Reifendruckregelanlage verfügt. In Abgrenzung zu anderen Fahrzeugen kann er

somit Geländezonen befahren, welche anderen Testplattformen nicht zugänglich sind. Dies erlaubt die Adressierung bisher ungeklärter Forschungsfragen.

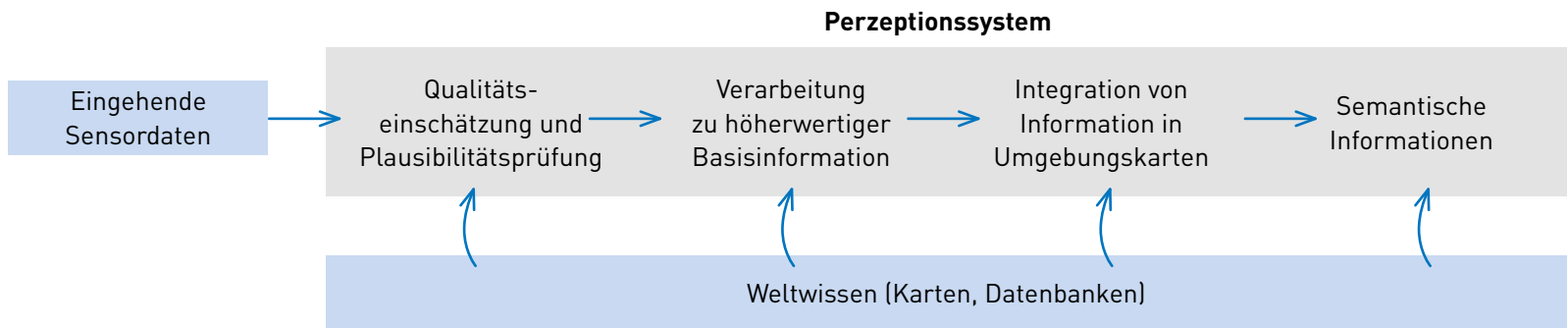
### **Steuerungskonzeption für generische, autonome Nutzfahrzeuge**

Eine Voraussetzung zur Entwicklung von fahrzeugübergreifender Autonomiefunktionalität ist eine gemeinsame Steuerungsarchitektur. Die Besonderheit stellt hier das stark wechselnde Anforderungsportfolio unterschiedlicher Nutzfahrzeuge dar, die oftmals auf eine Anwendung hochspezialisiert sind. Somit muss die Architektur alle notwendigen Besonderheiten verschiedener Maschinentypen berücksichtigen, ohne dabei zu sehr zu spezialisieren und somit Handlungsspielräume einzuzugrenzen.

Ein Lösungsansatz zeigt sich in der in diesem Projekt entwickelten Steuerungsarchitektur REACTION, die einen Rahmen für den autonomen Langsamfahrbetrieb in unbekannter und unstrukturierter Umgebung bildet. Eine Kernanforderung ist die sichere Adaption auf unbekanntes Situationen sowie die Robustheit der Steuerung bei gleichzeitig anhaltender Verfügbarkeit. Ein Robotersteuerungsparadigma, welches sich mit Bezug auf die Adaption auf unvorhergesehene Situationen bewährt hat, ist die Klasse der verhaltensbasierten Steuerungen.

### **Ein Steuerungskonzept ohne Widersprüche**

Wesentliche Merkmale sind die Unterteilung der Perzeptions- oder Kontrollaufgabe in unabhängige Module mit klar umrissener Funktion sowie deren Interaktion. Durch einen parallelen Einsatz vieler Verhalten mit überlappender Funktionalität entsteht ein hoch robustes System. Etwaige Widersprüche werden durch Datenfusion sowie Verhaltensinteraktion aufgelöst. Die Metasignalkommunikation findet hierbei über standardisierte Schnittstellen statt, die jedes Verhaltensmodul dazu befähigt, mit anderen arbiträren Verhalten zu interagieren. Hierbei wird die Relevanz einzelner Verhalten im Gesamtnetz erhöht oder respektive reduziert, wodurch das Gesamtverhaltensnetzwerk stets optimal auf die gegebenen Umstände adaptiert wird.



Vereinfachte Darstellung der REACTiON Steuerungsarchitektur zur autonomen Navigation in Off-Road Umgebungen

### **REACTiON wendet dieses Konzept konsequent auf allen Abstraktionsniveaus und Hierarchien an.**

Das Framework unterteilt die Gesamtautonomie in klar abgerissene Subsysteme, die sich einfach erweitern sowie anpassen lassen. Der vorgesehene Multiplattformbetrieb macht eine Deklaration von standardisierten Schnittstellendefinitionen erforderlich. Somit wird geteilte Autonomiefunktionalität, beispielsweise die Lokalisation und Kollisionsvermeidung, die für jegliches autonome System relevant ist, roboterübergreifend realisiert. Die Hardwareabstraktionsschnittstelle wandelt dabei Rohdaten in vordefinierte Datenformate um und tätigt grundlegende Vorverarbeitung. Zudem wird zwischen sicherheitskritischer und Missionshardware differenziert.

Ersteres beschreibt Sensorik und Aktuatorik, die benötigt werden, um das Fahrzeug stets in einen als sicher definierten Zustand zu überführen. Missionshardware ist dagegen für die Erfüllung der angedachten Aufgabe notwendig, aber nicht im vorher genannten Sinne sicherheitsrelevant. Auf dieser Schnittstelle baut ein Fail-Safe-Sicherheitssystem auf, welches eine simplistische Minimalsteuerung realisiert.

Neben den Fail-Safe-Komponenten werden zur Missionserfüllung Sensordaten durch das Perzeptionssystem mehrstufig analysiert und zu abstrakterer Information zusammengesetzt. Beginnend mit einer initialen Qualitätseinschätzung und Plausibilitätsprüfung erfolgt eine Verarbeitung der zur Aufgabe korrespondierenden Daten zu höherwertiger Basisinformation. Hindernisse oder ähnliche relevante Informationen werden in lokale sowie globale Umgebungskarten integriert, welche ein Kurzzeitgedächtnis abbilden und zur Entscheidungsfindung beitragen. Die Kognitionseinheit stellt hierbei

semantische Informationen bereit, welche aus der Szeneninterpretation resultiert. In diesem Schritt kann eine Zuhilfenahme von Weltwissen, wie beispielsweise Karten oder Datenbanken erfolgen.

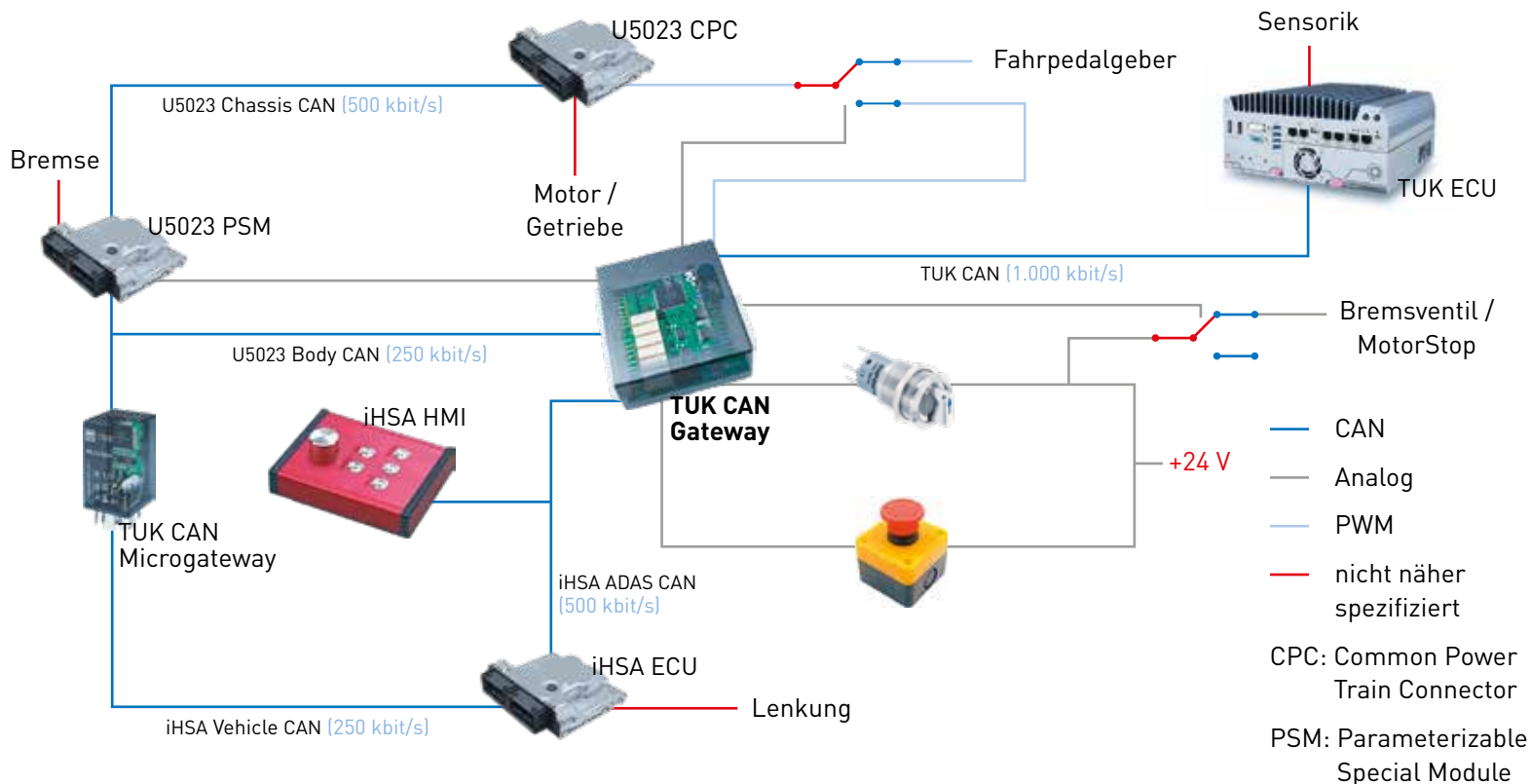
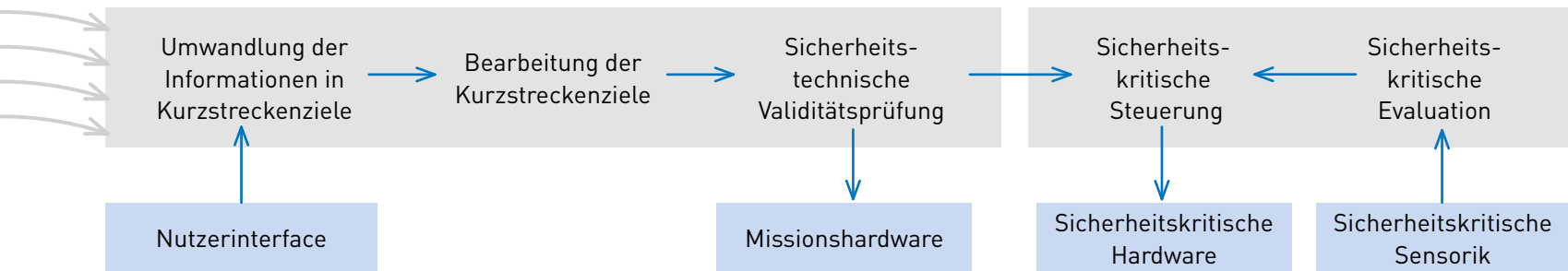
Die extrahierten Informationen werden auf Steuerungsseite in die jeweilige Aufgabenausführung eingebunden. Zunächst erfolgt von Nutzungsseite eine Aktivierung der entsprechenden Autonomiefunktion. Die Navigatoreinheit wandelt diese in ein Set an Kurzstreckenzielen um, welche wiederum durch den Piloten bearbeitet werden. Resultierende Steuersignale, z.B. Geschwindigkeit oder Lenkwinkel, werden von einer Low-Level Steuerung auf sicherheitstechnische Validität überprüft. Diese Kontrolleinheit beinhaltet Prüfungen zur Kollisionsfreiheit der Trajektorie, der Überrollprävention, oder der Limitierung der Zentrifugalbeschleunigung. Gegebenenfalls werden Steuerungswerte abgewandelt, Lenkwinkel oder Geschwindigkeit können angepasst und nach erneuter Fail-Safe-Prüfung in das Hardware Interface zur Aktorensteuerung eingespielt werden.

### **Das Hardwarekonzept des Unimog**

Zur Konzeptionsvalidierung wurde im Rahmen des Projekts ein Unimog U5023 aufwendig technisch umgerüstet, so dass sowohl Längs- als auch Querdynamik vollständig autonom gesteuert werden können. Zentrales Element zur Verbindung der verschiedenen Komponenten ist hier ein nachgerüstetes, programmierbares CAN-Gatewaysteuergerät, welches zusätzlich mit Schaltrelais sowie Ein- und Ausgängen (digital/analog) ausgestattet ist. Es verbindet den autonomen Steuerrechner, den Fahrzeugaufbau-Bus und den Lenkungs-Bus untereinander und übersetzt ausgewählte Nachrichten für den Informationsaustausch zwischen den Systemen.

**Steuerungssystem / Aktuatorik**

**Fail-Safe- bzw. ausfallsichere Steuerung / Evaluation**



**Das Lenkungssystem**

Durch den Projektpartner Knorr Steering Systems wurde eine Lenkungsansteuerung verbaut, die an der vorhandenen hydraulischen Lenkunterstützung ansetzt und das Einstellen von Lenkwinkelsollwerten durch das autonome System über CAN-Bus ermöglicht. Darüber werden auch aktuelle Informationen wie der Lenkwinkel rückgespeist. Nach intensiven Regelparametereinstellungen im Gelände funktioniert das System zuverlässig.

**Die Bremssteuerung**

Im Bereich Längsdynamik wurde zunächst das sichere Anhalten auch bei Systemausfällen fokussiert: Hierzu wurde das Fahrzeug von Mercedes-Benz Special Trucks mit einem zusätzlichen Ventil parallel zum serienmäßigen Feststellbremsventil ausgestattet,

welches im autonomen Betrieb durch die Versorgungsspannung des Gatewaysteuergeräts offen gehalten wird, aber auch von diesem selbst aktiv unterbrochen werden kann. Fällt die Versorgungsspannung also aus oder wird diese vom Steuergerät getrennt, resultiert dies in einer Bremsung der Hinterachse und einer parallelen Abschaltung des Motors. Zusätzlich zur Funktionsbremsung ist das Bremsensteuergerät des Unimogs um eine Haltestellenbremse, wie bei Bussen oder Müllsammelfahrzeugen serienmäßig, erweitert worden. Diese wird per Relais angesteuert, für den Langsamfahrbetrieb reicht sonst die Bremswirkung durch den Motor aus.

**Regelung der Geschwindigkeit**

Zur Geschwindigkeitsregelung verfügt der Unimog zwar über die Möglichkeit per Aufbau-Bus einen

Komponenteninteraktion der Steuer- und Autonomiesysteme zur Realisierung der Autonomiehardware.



Links: Fernsteuerung durch Joystick mit Fail-Safe Autonomie Unterstützung bei Rückwärtsnavigation.

Mitte: Navigation in Hanglage mit Gelände-profilvermessung und aktiver Überrollvermeidung.

Rechts: Simulierte Testfahrt in der 3D-rekonstruierten Kiesgrube, Ötigheim, dem Mercedes-Benz Special Trucks Testgelände

Sollwert für den Tempomat vorzugeben, dies funktioniert allerdings nicht aus dem Stand. Deshalb war ein Umschalten und eine Emulation der Fahrpedalsignale durch das Gatewaysteuergerät notwendig. Die Regelung übernimmt das autonome System, das Steuergerät übersetzt den Sollwert dann in die zwei gegenläufigen PWM-Signale, die normalerweise vom Fahrpedal am Motorsteuergerät eingehen. Die Gangwahl kann vom autonomen System vollständig über den Aufbau-Bus gemanagt werden, Differential-sperren sind allerdings nicht ansteuerbar.

Fehler im Lenksystem sowie Kommunikationsabbrüche der verschiedenen CAN-Busse (insbesondere vom autonomen System zur Fahrpedalemulation) müssen wie auch der Zustand der Notauskette (zu der auch ein Funknotaussystem gehört) auf möglichst niedriger Ebene überwacht werden. Hierzu ist das Gatewaysteuergerät mit einfachen, getesteten Funktionsblöcken programmiert und leitet im Fehlerfall die genannte Bremsung der Hinterachse und die Motorabschaltung ein. Der Fehler muss dann durch einen Bediener quittiert werden und ein sicherer Zustand vor Wiederfreigabe vorhanden sein.

Somit sind alle essentiellen Funktionen durch das autonome System ansteuerbar und das Testen der Erkennungs- und Planungsalgorithmen des autonomen Systems mit dem realen Fahrzeug konnte beginnen.

### Off-Road Autonomieszenarien

Bezüglich der autonomen Einsatzmöglichkeiten des Unimogs reichen diese von einfacher Assistenzfunktionalität bis hin zu einer vollständigen autonomen Steuerung. In diesem Rahmen wurde ein Katalog von verschiedenen Testszenerarien sowie Einsatzmöglichkeiten erarbeitet. Unter Hinzunahme von Autonomiefunktionen werden somit zunehmend schwierigere Aufgaben bewältigt.

### Der einfachste Anwendungsfall ist die teleoperierte Steuerung des Unimogs.

Hier stehen verschiedene Alternativen zur Verfügung, beispielsweise eine direkte Joystickfahrt durch einen externen Bediener ohne Autonomieunterstützung durch die Autonomieschnittstelle des Unimogs. Hierbei übersetzt der Joystick die Navigationsbefehle in Geschwindigkeit sowie Lenkwinkel und sendet diese direkt in die Hardwareabstraktion.

### Herausforderungen der teleoperierten Steuerung

In diesem Modus gilt es zu bedenken, dass die teleoperierte Fahrt leicht zu Fehlentscheidungen des Operators führen kann, da die korrekte Einschätzung von Hindernissen und Abständen aus Sensor oder Kamerabildern sich als schwierig erweist. Insofern steht im erweiterten Modus der Joystickfahrt die Fail-Safe-Autonomieunterstützung zur Verfügung. Diese ist als laserbasierte Kollisionsvermeidung



realisiert, welche die Fahrzeugdimensionen virtuell vergrößert. Dabei berücksichtigte Faktoren sind die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie die erwartete Rauheit der Umgebung. Kommt ein Hindernis dem Fahrzeug zu nahe und dringt in den unmittelbaren Arbeitsbereich ein, so bremst oder stoppt der Unimog. Diese Funktion verhindert damit im Teleoperations- oder Autonomiebetrieb Kollisionen mit größeren Objekten.

Dennoch kann es dabei nach wie vor zu fatalen Fehlentscheidungen kommen, da keine Gelände- oder Lagedaten des Unimogs verarbeitet werden. Ebenso kann die Fail-Safe-Schicht schwer zwischen kritischen und unkritischen Objekten unterscheiden. Beispielsweise stellt hohes Gras, welches auf einem Weg aufragt, ein Hindernis dar, das der Unimog im Autonomiebetrieb nicht eigenständig überfährt.

#### **Die Lösung steckt in der Fail-Safe-Funktion.**

Diese kann in einer zusätzlichen Stufe mit der Low-Level-Autonomie erweitert werden. Die Lasersensorik wird dabei um die Tiefenbilder der Stereokameras ergänzt, welche messtechnische Redundanz erzeugen. Die Abstandsdaten der Umgebung werden fusioniert sowie auf statische und dynamische Hindernisse evaluiert. Hieraus resultieren fahrzeuglokale Hindernis- und Geländeprofile. Die eingestellte Trajektorie des Fahrzeugs kann gegen Objekt- und Unterbodenkollisionen unter Berücksichtigung des Pendelachsen-

zustands, der Bodenfreiheit sowie der Rahmenverwindung geprüft werden. Dementsprechend findet eine Anpassung der Steuerungswerte statt, sodass der Unimog stets in sicheren Parametern navigiert. Dabei wird entweder der Lenkwinkel korrigiert oder eine Bremsung eingeleitet. Ergänzend findet eine Begrenzung der Zentrifugalbeschleunigung anhand der Interiorsensorik sowie Überrollvermeidung statt. Bei letzterem richtet sich der Unimog aktiv in der Steigung aus, um den Lagewinkel der Längsachse zu minimieren.

Wie eingangs beschrieben verfügt der Unimog über Differentialsperren sowie eine Vielzahl an Gängen, um Gelände zu bewältigen. Die korrekte Ansteuerung im Gelände erfordert Expertenwissen und ist stark von der derzeitigen sowie zukünftigen Bewegung abhängig. Daher stellt die automatisierte Ansteuerung der Differentialsperren und Gangschaltung eine weitere Funktionalität im Selbstfahrbetrieb dar. Des Weiteren wird reaktiv auf den derzeitigen Fahrzeugzustand reagiert, wodurch Radschlupf mit der Einlegung des passenden Sperrdifferentials verhindert werden kann. Zusätzlich kann prädiktiv eine Reaktion auf die Geländegeometrie anhand der eingestellten Trajektorie erfolgen. Unter der Zuhilfenahme von Höhenprofilen werden zukünftige Normalenvektoren des kinematischen Zentrums des Unimogs bestimmt und somit eine Aussage über zu erwartende Achs- und

**Kontakt**

Lehrstuhl  
 Robotersysteme  
 TU Kaiserslautern  
 Gottlieb-Daimler-Str. 48  
 67663 Kaiserslautern  
[agrosy.cs.uni-kl.de](http://agrosy.cs.uni-kl.de)



Ansprechpartner:  
 Prof. Dr. Karsten Berns  
 Tel.: +49 631 205-2613  
[berns@cs.uni-kl.de](mailto:berns@cs.uni-kl.de)

Patrick Wolf  
 Tel.: +49 631 205-3588  
[patrick.wolf@cs.uni-kl.de](mailto:patrick.wolf@cs.uni-kl.de)

Steffen Hemer  
 Tel.: +49 631 205-2805  
[s\\_hemer@cs.uni-kl.de](mailto:s_hemer@cs.uni-kl.de)

Radpositionen sowie der Rauheit des Geländes getroffen. Diese Funktion ist auch als Geländeassistent denkbar, indem der Steuerungsrechner dem Fahrer Vorschläge zur Differentialwahl unterbreitet, die dieser dann umsetzt.

Die Ansteuerung der Gänge nutzt als reaktive Funktion die aktive Motordrehzahlüberwachung und selektiert den damit verbundenen optimalen Gang. Außerdem findet eine Verhinderung eines Gangwechsels in der schiefen Ebene statt, der unkontrolliertes Rollen beim Auskuppeln zur Folge hätte. Die prädiktive Ansteuerung der Gänge berücksichtigt die in einer Steigung notwendige zu erwartende Motordrehzahl und Drehmoment, sodass in dem entsprechenden Geländeabschnitt nicht weiter geschaltet wird.

Die beschriebenen Autonomiefunktionen ermöglichen eine hochrobuste teleoperierte Steuerung des Unimogs. Weiterhin eruieren sie auch Steuersignale durch höhere Kontrollinstanzen wie dem Navigator im vollautonomen Modus.

**Fazit**

Insgesamt wurden für den Unimog mehrere vollautonome Funktionen anhand der Zielfahrt von Wegpunkten realisiert, welche durch die Benutzeroberfläche gesetzt werden. Der Unimog folgt den Stützpunkten sukzessive und plant die jeweiligen Zwischenabschnitte im Gelände eigenständig. Ebenso kann alternativ eine reine Festlegung der finalen Zielkoordinate vorgenommen werden, die Routenplanung erfolgt dann mittels auf Kartenmaterial basierenden Daten. In diesem Modus folgt das Fahrzeug bevorzugt existierenden Wegen sowie Pfaden, welche auf dem Weg zum Ziel liegen. Im Zuge dessen wird die Zahl von Querfeldeinstrecken und das damit verbundene Ausfallsrisiko minimiert. Weiterhin können Konvoifahrten auf Grundlage einer Objektverfolgung durch optische Marker umgesetzt werden. Alternativ bietet sich ein autonomes Abfahren von Wegen an, wobei ein Weg mittels Deep Learning sowie Multifeature-Karten erkannt und bevorzugt verfolgt wird.

**Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick**

Die bisherigen Forschungs- und Projektergebnisse zeigen sich als vielversprechender Meilenstein für die weitere Entwicklung vollautonomer Nutzfahrzeuge. So wurde ein generisches Steuerungskonzept für die autonome Navigation von Nutzfahrzeugen erarbeitet und in verschiedenen Anwendungen validiert. Dabei wurden Themenstellungen rund um die Spezifikation, Simulation, Hardwareintegration, Lokalisation, Perzeption, Kartierung und Navigation bearbeitet.

Hinsichtlich der Themenstellungen für die zukünftige Erforschung der Off-Road-Navigation zeigt sich unter anderem ein Bedarf in der darauf bezogenen Weiterentwicklung semantischer Szeneninterpretation. Entscheidungen, ob beispielsweise ein Hindernis passierbar ist, können nicht trivial anhand von Geometrie oder Abstandsmessungen getroffen werden. Auch derzeitige State-of-the-Art-Verfahren des maschinellen Lernens geraten schnell an ihre Grenzen, was zu teils fatalen Fehlentscheidungen im Autonomiebetrieb führt. Hier deutet sich die Notwendigkeit zur Entwicklung gänzlich neuer Perzeptionskonzepte an. Weiterhin sollte die Plattformintegration mit Bezug auf die Schnittstellengestaltung zwischen den einzelnen Subsystemen fokussiert werden, um durch Standards von OEM-Systemen Entwicklungs-, Integrations- und Wartungsaufwand zu reduzieren.

