

RoboMobil – das robotische Elektromobil mit kamerabasiertem Autonomieansatz

Prof. Dr.-Ing. Gerd Hirzinger, Dipl. -Ing. Alexander Schaub,
Dipl. -Ing. Jonathan Brembeck, Prof. Dr. -Ing. Darius Burschka



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Robotik und Mechatronik Zentrum, RMC
Oberpfaffenhofen, D-82234 Wessling
Tel. 08153 28-2401; Fax: 08153 28-1134
Gerd.Hirzinger@dlr.de



Einführung

Das Auto der Zukunft ist – mehr noch als heute – ein Paradebeispiel für die höchste Stufe der Mechatronik, das ist die engst mögliche Integration von Mechanik/Optik, Elektronik und Informationstechnik zur Schaffung intelligenter Mechanismen, die den Menschen in verschiedensten Lebens- und Arbeitsbereichen unterstützen. Roboter als mit dem Fabrik-Arbeiter kooperierende Produktionsassistenten oder intelligente Helfer für Bettlägerige und Behinderte stellen ein anderes Beispiel dar. Roboter und Auto der Zukunft werden sich aber auf vielen Ebenen auch immer ähnlicher. Der Mensch will die Möglichkeit haben, sie nach Wunsch vollständig selbst zu kommandieren, ihnen ggf. aber nur Grobkommandos zu geben und ihnen die Fein-Bewegungsplanung über eigene sensorische Intelligenz zu überlassen, oder ihnen zu erlauben, zumindest zeitweise ganz selbstständig zu agieren und Entscheidungen zu treffen. Über die Fahrerassistenzsysteme wurden beim Auto diese Stufen einer Evolution in der Vergangenheit schon gut sichtbar, während in der Robotik vor allem in der Raumfahrt und in der Chirurgie die Konzepte der Autonomieteilung zwischen Mensch und Maschine (shared autonomy) schon sehr frühe Beachtung fanden.

Fahrerassistenzsysteme fordern schon seit Jahren die Diskussion heraus, in wieweit dem Menschen das „Ruder“ (genauer gesagt das Lenkrad und die Bremse) durch eine sensorgestützte Rechner-Entscheidung weggenommen werden darf in Situationen, die ihn und anderen massive gefährden, weil seine Reaktionszeiten typischerweise zu langsam sind. Fragen

der Haltung schienen jahrelang dringend notwendige Weiterentwicklungen zu hemmen. Und dennoch erschienen in den letzten Jahren zunehmend Fahrzeuge auf dem Markt, die im Ernstfall aktiv in Lenkung und Bremse eingreifen, wenn der Fahrer nicht schnell genug auf die kritische Situation reagiert. Mit anderen Worten: das Auto der Zukunft, das sich weigert, einen Unfall zu begehen oder als Suizid-Instrument zu fungieren, ist in Sicht.

Auch voll-autonomes Fahren erfährt in den letzten Jahren durch verschiedene Forschungsprojekte ein gesteigertes öffentliches Interesse. Dabei werden allerdings meist herkömmliche PKWs mit großem Aufwand umgebaut und mit Dachaufbauten voller Sensorik bestückt. Der Vormarsch der Elektromobilität bietet die Chance für grundlegend neue Fahrzeugkonzepte. Löst man sich von klassischen Ansätzen, so ist es möglich, die Autonomie von Anfang an in die Automobilarchitektur hinsichtlich IT- und Sensor-Systemen, Energiemanagement und Design zu integrieren.

Das ROBOMOBIL des DLR

Beim ROboMObil (ROMO) handelt es sich um ein innovatives Elektromobilitäts-Konzept, basierend auf der zentralen intelligenten Steuerung von vier unabhängigen „Radrobotern“, die jeweils eigene Brems-, Lenkungs- und Antriebskomponenten (Radnabenmotoren) sowie Dämpfer besitzen. Die elektrisch angesteuerte drive-by-wire-Lenkung mit Komponenten aus der Robotertechnik schafft Radeinschläge im Bereich von -25° bis 95° . Durch Einzelrad-Lenkung und -Antrieb erhält das ROMO eine einzigartige Manövrierbarkeit. Seitwärtsfahrten und Rotation um die zentrische Hochachse oder um weitgehend freie Punkte außerhalb des Fahrzeuges sind möglich (Abb. 1). Ziel war es von Anfang der Entwicklung an, das ROMO über einen Sidestick mit verschiedenen Autonomiegraden von teil- bis vollautonom (ggf. ferngesteuert) fahren zu können. Das ROMO ist sehr flexibel aufgebaut, da es nach einem Viermodul-Konzept entworfen wurde. Dabei bilden vordere und hintere Achseinheit, das Kohlefaser-Chassis und die Batterie jeweils ein Modul. Diese lassen sich einfach austauschen, da die Funktionen lokal gruppiert und einfache Schnittstellen, sowohl mechanisch als auch elektronisch, untereinander gegeben sind. Neben dem autonomen Fahren dient es als Technologieträger für verschiedene Forschungsthemen von der optimierten Fahrdynamikregelung bis hin zu den Energiemanagement-Konzepten en. Wie in der modernen Robotik wird aus einer gewünschten Bewegung des Systems in Echtzeit über ein sog. inverses Dynamikmodell die erforderliche Ansteuerung der Aktuatoren durch den Chassis-Controller berechnet. Am ROMO soll auf verschiedenen Ebenen demonstriert werden, wie eng die Elektromobilität in Zukunft mit der Robotik verknüpft sein wird.

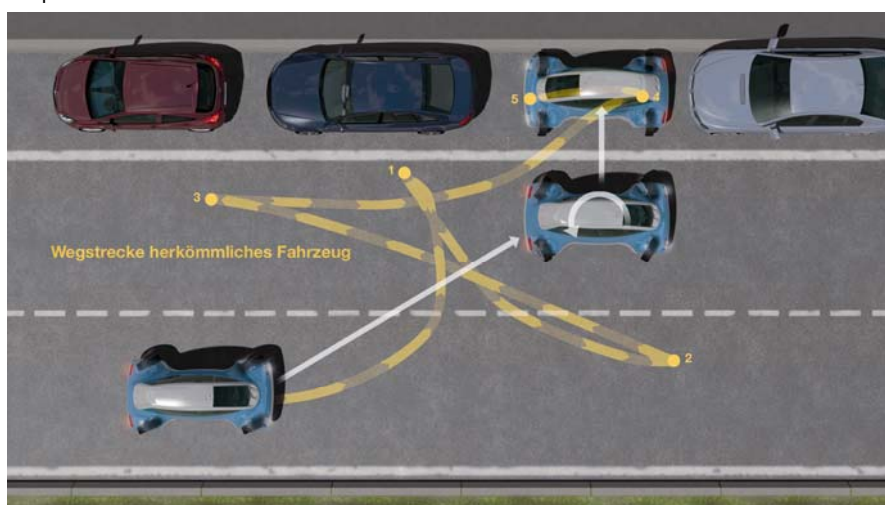


Abb. 1 ROMO Manövrierbarkeit beim Einparken

Das ROMO-Konzept ist sehr stark beeinflusst von den Arbeiten des DLR- Zentrums in der Raumfahrtrobotik und der planetaren Rovertechnik, insbesondere den Mars- und Mond-Rover-Konzepten wie sie am DLR entwickelt werden. Sie weisen Einzelradantrieb und Einzelradlenkung

auf und stellen in gewisser Weise eine Weiterentwicklung der Apollo-Mondautos dar, die auch schon ins Rad integrierte Elektroantriebe (d.h. Radnaben-Motoren) und damit Einzelradantrieb hatten, sowie Sidestick-Steuerung (Abb. 2). Die drei Hauptbetriebsarten signalisieren den Raumfahrtbezug (Abb. 3):

- voll autonom fahrend
- ferngesteuert fahrend per „Teleoperator“ (mit Teilautonomie)
- direkt gesteuert werden durch einen Fahrer (mit Teilautonomie)

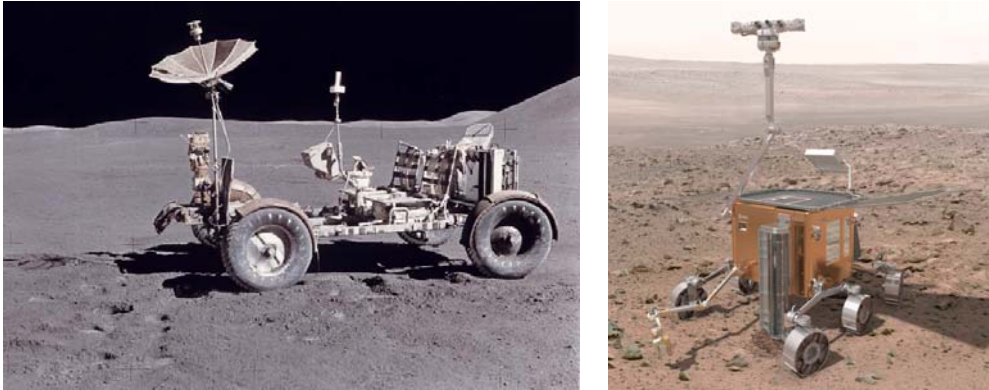


Abb. 2 Apollo-Mondauto und europäischer Mars-Rover-Konzept ExoMars

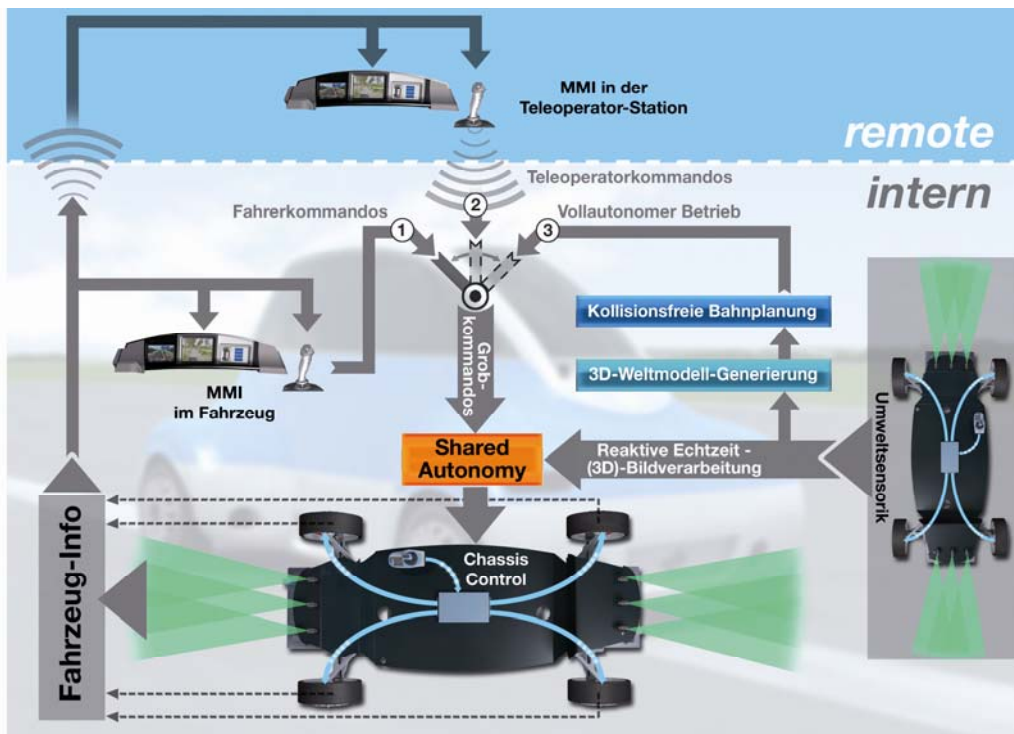


Abb. 3 Die drei Hauptbetriebsarten des ROMO

Die besonders interessanten Einsatz-Szenarien zielen wegen des hohen Grads an (Teil-)Autonomie und Manövrierbarkeit (Krabbengang seitwärts, auf der Stelle drehen), auf

- den sog. Sicherheits- und Überwachungsbereich
- den Logistik- und Transport-Bereich im industriellen Umfeld bis hin zu ganz neuen Anwendungen, bei denen ROboMObil z.B. als autonome, hochbewegliche (insbes. auch seitlich versetzbare) Lande-Plattform für unbemannte Extremleichtbauflugzeuge ohne Fahrwerk fungiert
- den Stadtbereich mit flexiblen Car-Sharing-Autos.

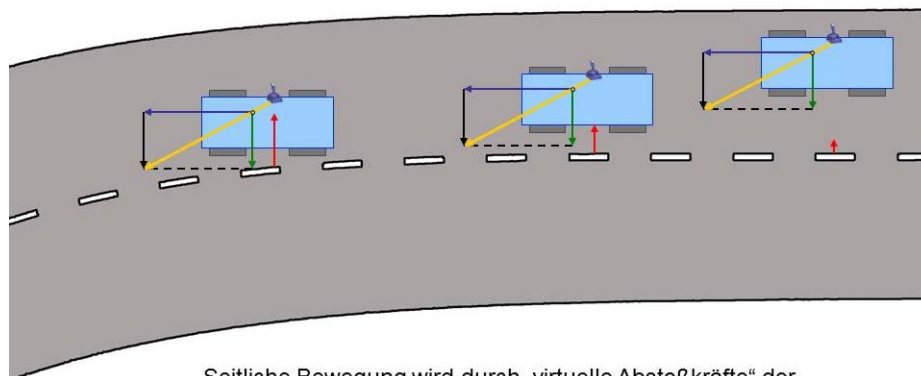
Das im letzteren Bereich angestrebte Szenario kann folgendermaßen skizziert werden:

In den Städten befinden sich eMobil-Depots (-Hallen) mit ROboMObilen. Auf den telefonischen

oder internet-basierten „Anruf“ eines Interessenten fährt eines der ROboMOBILE autonom mit moderater Geschwindigkeit (z.B. 30km/h) und damit besonders gut kalkulierbarer Sicherheit zur Adresse des Interessenten. Dieser steigt ein, macht seine Erledigungen (selbst steuernd oder sich vom ROboMObil fahren lassend), fährt dann wieder nach Hause, stellt das Fahrzeug dort ab und teilt ihm (z.B. per Sprachkommando) mit, dass es jetzt nicht mehr gebraucht wird und wieder in sein Depot zurückfahren kann. ROboMObil erledigt dies prompt und kündigt seine Rückkehr dem Depot an. Sollte es aus irgendeinem Grund nicht in angemessener Zeit zurückkommen, nutzt der Depotverwalter die Fernsteuer-Option um das Fahrzeug „remote“ sicher ins Depot zurückzusteuern.

Über die Analogie Roboter-Auto der Zukunft

Eine der besonders interessanten „Betriebsarten“ beim Roboter wie beim Auto der Zukunft ist die sogenannte Autonomieteilung (shared autonomy). Für ferngesteuerte Raumfahrt-Robotik wurden am DLR-Institut für Robotik und Mechatronik schon in den siebziger Jahren entsprechende Konzepte entwickelt, angelehnt an die „hybrid force control“ – Philosophie von M. Raibert und J. Craig [4]. Nach diesem Konzept wird ein sechs dimensionaler Kraft-Momentenvektor generiert durch die menschliche Hand an einer (Fern-) Steuerkugel, projiziert in einen Unterraum, der (je nach spezieller Aufgabe wie dem Drehen einer Kurbel) freie Bewegung zulässt und einen dazu orthogonalen (die Dimension sechs ergänzenden) sensorgeregelten Unterraum. Ob es sich bei der Sensorik um Kraft-Momenten-Sensorik handelt, oder z.B. um berührungslose Entfernungssensorik, der man über eine wählbare „Steifigkeit“ einen Gummiband-Effekt zuschreibt, spielt nicht die entscheidende Rolle. In Abb. 4 wird dieser Prozess in der zweidimensionalen Ebene einer Fahrzeugbewegung angedeutet. Das schräg zur optimalen, spurhaltenden Fahrtrichtung zeigende Grobkommando wird zerlegt in eine Komponente parallel zur Fahrbahnspur und eine dazu senkrechte Komponente. Wie in der Robotik üblich, kann man diese Komponente einfach vernachlässigen und stattdessen über Sensorik, die die Spurmitte ermittelt, die Querbewegung so beeinflussen, das z.B. ein definierbarer Abstand zum Straßenrand gehalten wird. Oder aber man setzt dieser Komponente regelungstechnisch eine „Abstoßkraft“ entgegen, die umso größer wird (ggf. stark nichtlinear steigend) je näher das Fahrzeug einer Spurbegrenzung kommt, um auf diese Weise dem Fahrer auch Abweichungen von der Spurmitte zu ermöglichen.



Seitliche Bewegung wird durch „virtuelle Abstoßkräfte“ der Bewegungslinien (rot) im Vergleich mit vorgegebenen Sollwerten oder aber mit der Vertikalprojektion (grün) des Fahrer-Kommandos (gelb) geregelt (ausbalanciert). An die Stelle des Fahrer-Kommandos kann das Grobkommando eines Bahnplaners treten. Die Vorwärtsbewegung ist durch die blauen Pfeile markiert.

Abb. 4 „Shared Autonomy“ im Robomobil-Konzept

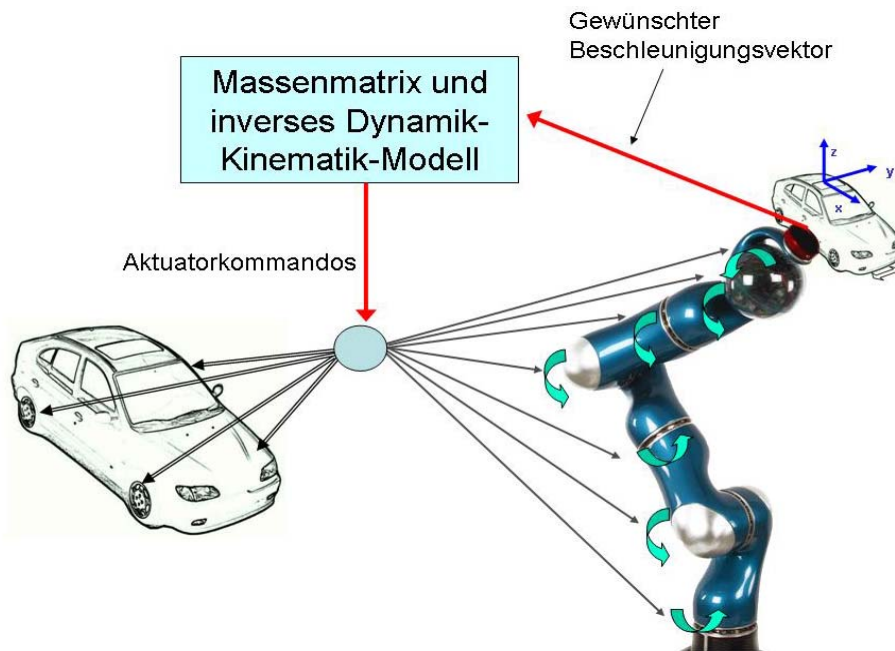


Abb. 5 Roboter und Auto werden eins

Hat man auf diese Weise ein „sicheres“ Bewegungskommando ermittelt, das bei plötzlich auftretenden Hindernissen über Sensorik ggf. noch reaktiv abgeändert wird, bleibt die Frage der Umsetzung auf die verfügbaren Aktuatoren, um die gewünschte Bewegung sicherzustellen. Die Analogie zum modernen Roboter wird hier ganz klar (s. Abb. 5): Aus dem gewünschten 6dimensionalen Beschleunigungsvektor seines „Endeffektors“ (d.i. die physikalische „Wurzel“ seiner Bewegung) wird über die Massenmatrix und die sog. Invers-Dynamik der am Endeffektor benötigte Kraft-Momentenvektor errechnet und dann auf die Gelenkdrehmomente als die einzig verfügbaren Aktuatoren heruntergerechnet. Kein Mensch kann diese Umrechnung im Kopf in der nötigen Geschwindigkeit vollziehen. Beim Auto kann man statt des Endeffektors ein mit dem Massenschwerpunkt verbundenes Dreibein betrachten, dessen gewünschte 3dimensionale Bewegung im Raum ebenfalls einen der Massenmatrix und der Invers-Dynamik entsprechenden Kraft-Momentenvektor erfordert, der über die verfügbaren Aktoren aufgebracht werden muss. Beim Auto mit Einzelrad-Antrieb und -Lenkung wie dem hier vorgestellten ROBOMOBIL sind dies bereits 8 Aktoren (4mal Radnabenantrieb und Lenkung), mit der zusätzlichen Vorder- und Hinterachsbremse 10. Auch hier kann kein Mensch versuchen, diese einzeln zu steuern. Wir sprechen hier auch von integrierter Fahrwerksregelung.

Es bleibt dann noch eine Frage: Wie erzeugt man die Grobkommandos idealerweise? Beim herkömmlichen Auto sind es Lenkung, Gas und Bremse, beim ROBOMOBIL ist es nur mehr ein Sidestick, der auch um die Hochachse drehbar ist. Wie sollte man auch mit den klassischen Steuereingriffen ausdrücken, dass sich das Auto um eine Hochachse drehen oder im „Krabbengang“ schräg fahren soll. Es gab in der Vergangenheit schon viele kontroverse Diskussionen um die Eignung verschiedener Sidesticks zum Autofahren, doch scheinen aus unserer heutigen Sicht vor allem 2 Beobachtungen interessant:

- Die junge Computerspiel-Generation hat wenige Probleme, mit Sidestick Auto zu fahren.
- Nach ausgiebigen Versuchsreihen, die der Frage nachgingen, ob man ggf. die 3 Freiheitsgrade der Fahrzeug-Kommandierung (geradeaus, seitlich, Rotation um eine Hochachse) auf die 2 Hände aufteilen sollte, erwies sich doch der 3 Freiheitsgrad-Sidestick als bester Kompromiss (mit vor-zurück, rechts-links, Drehung um Hochachse). Allerdings sind dabei Mehrdeutigkeiten aufzulösen, z.B. könnte eine schräg seitwärts-Auslenkung nur die Vorderräder meinen, ggf. aber gleichzeitig die Hinterräder in Gegenrichtung (Kurve fahren) oder aber den „sog. Krabbengang“ mit allen Rädern schräg parallel. Als sehr vorteilhaft für die Untersuchung unterschiedlichster Sidestick-Typen und anderen Betriebsarten erwies sich die Nutzung des DLR-Leichtbauroboters mit seiner in allen kartesischen Freiheitsgraden frei

wählbaren Steifigkeit.

- Aber auch der etablierte Autofahrer hat immer weniger Probleme mit einem Sidestick, wenn ihm klar wird, dass es in Zukunft nicht mehr so sehr um die „Detailsteuerung“ geht (in engen Baustellen verkrampft und ängstlich hinter dem Lenkrad sitzend), sondern nur mehr um die grobe Willensäußerung und um Bewegungsmuster, die es bisher im Automobil nicht gab.

Generell kann man u.E. davon ausgehen, dass trotz der Haftungs- und Rechtsunsicherheits-Diskussionen die robotische Automation das Auto immer erfassen wird. Mit relativ hoher Geschwindigkeit selbstfahrende Autos, wie sie jetzt z.B. von Google aber auch von BMW demonstriert werden, vollziehen bereits den Übergang von der oben beschriebenen Teilautonomie in die Vollautonomie. Der US-Bundesstaat Nevada lässt als erster solche Fahrzeuge im Straßenverkehr zu. Im Kontext der oben gemachten Ausführungen heißt das ja nur, dass auch das Grobkommando nicht mehr vom Menschen direkt kommt, sondern von einem Bahnplaner, der im Navigationssystem die Route geplant hat und in Verbindung mit der GPS-Lokalisation ihre Ausführung kommandiert.

Grundlagen für das (teil-)autonome Fahren im ROMO

Die Grundlage für das (teil-)autonome Fahren im ROMO bildet die visuelle Perzeption. Die außergewöhnliche Beweglichkeit des Fahrzeuges resultiert in gesteigerten Anforderungen an die Umgebungswahrnehmung. Um eine 360° Stereokamerabildabdeckung zu schaffen, sind insgesamt 18 Kameras, jeweils als Stereopaare konfiguriert, und zwar im Dach, in der Front und im Heck (Abb. 6, Abb. 7). Im nächsten Abschnitt wird auf die Wahl von passiven optischen Systemen als primäre Sensorik noch detailliert eingegangen. Alle Kameras sind mit Gigabit Ethernet Anschlüssen ausgestattet und werden über Switches mit dem Bildverarbeitungsrechner im Heck des Fahrzeuges verbunden. Um die großen Datenmengen des unkomprimierten Bild-Streams handhaben zu können, werden funktionelle Subsysteme mit separaten Datenleitungen an den Vision-PC gebildet. Die jeweils benötigten Kameras werden nach einem intelligenten Schema aktiviert und die restlichen auf Standby gehalten. Das ROMO besitzt größtenteils monochrome Kameras, die am besten zur Extraktion von Bildinformationen geeignet sind, da bei gleicher Chipgröße viermal mehr Pixel als bei einer Farbkamera zur Verfügung stehen. Zusätzlich sind Farbkameras in der Front verbaut, um zum Beispiel Ampelzustände zu erkennen. Trotz optimierter Anbringung der Kameras lassen sich Abschattungen nicht vermeiden (Abb. 6). Um diese nichteinsehbaren Nahbereiche abzudecken wird ein Ring aus automotiv tauglichen Ultraschallsensoren um das Auto gelegt. Die Abschattungen werden nur dann kritisch, wenn sich ein Objekt in die tote Zone bewegt, während das Perzeptionssystem nicht aktiv ist, und das ROMO anschließend losfahren möchte. Zur globalen Orientierung und Bestimmung der sechs Freiheitsgrade im Raum wird ein dGPS gestütztes Inertialnavigationssystem verwendet. Mit dem globalen Positionssystem mit Differentialsignal lassen sich Positionierungsgenauigkeiten im Zentimeterbereich erreichen. Zusätzlich ist das System mit einer zweiten GPS-Antenne ausgestattet, um die Orientierung im Stand bestimmen zu können.

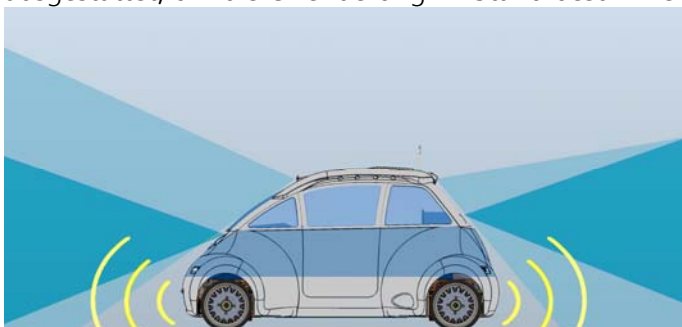


Abb. 6 Kameraabdeckung und Ultraschall an Vorder- und Rückseite

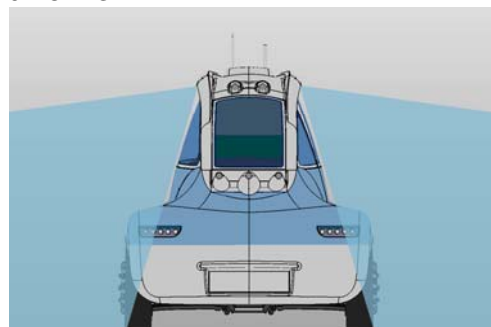


Abb. 7 Kameraabdeckung Links und Rechts

Warum Kamera-Einsatz als zentrale Technik im ROMO?

Intelligente mobile Systeme bestehen heutzutage nicht nur aus ausgeklügelten Regelsystemen, die die Bedienung des Fahrzeuges erleichtern, sondern übernehmen mehr und mehr eine aktiv unterstützende Funktion. Eine sensorische Umgebungserfassung wird dabei zu einem zentralen Element, das eine zuverlässige Wahrnehmung in dem kompletten Spektrum der möglichen Witterungsbedingungen gewährleisten muss. Bei der Auswahl eines Sensorsystems muss man system-technische Aspekte wie der zur Verarbeitung notwendigen Rechenleistung, die Zuverlässigkeit in der Datenerfassung bei sich verändernder Wetterlage, Sicherheit für den Menschen und mögliche gegenseitige Beeinträchtigung der Sensoren im Falle von aktiven Messprinzipien berücksichtigen.

Laser- und Radar-basierte Systeme finden starken Einzug in die neuen Fahrzeugmodelle, basieren jedoch auf aktiven Messprinzipien, was mit einer für den Menschen unter Umständen gefährlichen Strahlung im Falle einer Fehlfunktion führen kann. Gleichzeitig sind solche Systeme anfälliger gegenüber gegenseitigem Übersprechen in Situationen, in denen mehrere Sensoren in derselben Umgebung agieren, was bei immer höheren Verkehrsdichten heutzutage immer häufiger der Fall ist. Ein anderer zu berücksichtigender Aspekt ist die Tatsache, dass solche Systeme prinzipbedingt aktiv Signale in die Umgebung aussenden müssen, wodurch ihre maximale Reichweite in jedem Fall beschränkt ist.

Ein wichtiger Aspekt, der für die Wahl von Kamerasystemen für ein Fahrzeugkonzept spricht, ist die Tatsache, dass derzeitige Verkehrsführungssysteme für den menschlichen Fahrer und somit für eine visuelle Wahrnehmung und Verarbeitung ausgelegt sind. Als Beispiel sollen hier Verkehrsbeschilderungen und Straßenmarkierungen dienen, die für visuelle Wahrnehmung durch den Fahrer optimiert und mit Laser- oder Radarsystemen nur schwer oder gar nicht korrekt interpretierbar sind. Die Straßenmarkierungen werden entsprechend einer ISO-Norm in ihrem Reflektionsvermögen nachts besonders hervorgehoben, was eine Navigation in dieser an sich schwierigen Beleuchtungslage für ein Kamerasystem prädestiniert. Zudem lassen neue, empfindlichere Kameratechnologien die Grenzen zum Nachtsichtgerät immer mehr verschwinden. Die passiven Kamerasysteme beinhalten keinerlei bewegliche Elemente, was eine besondere Robustheit gegenüber von Erschütterungen gewährleistet. Sie können platzsparend an vielen Stellen in der Fahrzeugkarosserie integriert werden und benötigen nur minimale Energie, um betrieben zu werden. Der passive Charakter erlaubt eine weitgehend freie Bestimmung der Reichweite, da kein aktives Signal die Szene ausleuchten muss.

Die neuartigen Entwicklungen in dem Bereich der optischen Systeme haben zu einem sehr guten Verständnis des Bildentstehungsprozesses geführt. Es kommen Sensoren zum Einsatz, die über einen sehr großen Winkelbereich gleichzeitig eine Information liefern können, was für den Fall einer hohen Eigenbewegung des Fahrzeuges in einer Szene mit vielen unabhängig voneinander sich bewegenden Szenenelementen essenziell ist, um den zeitlichen Zusammenhang korrekt zu erfassen. Die hohen Integrationsdichten der bildgebenden Elemente erlauben eine sehr genaue Abtastung der Umgebung auch in großer Entfernung vom Fahrzeug. Die Auflösung wird lediglich durch den räumlichen Versatz der Kamera während der Messung bestimmt, was aus der Bewegung des Fahrzeuges in weiten Grenzen frei wählbar ist. Die einzige Einschränkung wird hier durch die im Fahrzeug vorhandene Rechenleistung gemacht. Hier sind effiziente Algorithmen gefragt, um mit der eingeschränkten Rechenleistung die notwendige Wahrnehmungsqualität und Zuverlässigkeit zu erreichen. Das entwickelte Sensorkonzept stellt ein Beispiel dafür dar, welche Leistungsfähigkeit mit den heutigen Verarbeitungsalgorithmen erreicht werden kann.

Die Autonomiemodule des ROMO nutzen als Eingangsdaten bewährte Technologien in der Sensordatenvorverarbeitung, die in zahlreichen Projekten des DLR bereits zum Einsatz kommt. Das System kann sich auf robuste Tiefenrekonstruktion sowie optische Navigation und Detektion von beweglichen Objekten in der Szene stützen, aus denen das sichere Verhalten abgeleitet werden kann.

Eine sichere Navigation vor allem im Stadtverkehr und in Parkplatzszenarien wird durch das binokulare Stereo-System des ROMOs sichergestellt. Alle Objekte, die nicht in der Ebene der Straße liegen, werden hier entfernungsabhängig farbkodiert (Abb. 8). Diese Information kann für die Trajektorienplanung benutzt werden. Als Stereoverfahren kommt das am Robotik und Mechatronik-Zentrum des DLRs entwickelte „Semi-Global Matching“ (SGM) zum Einsatz [2], das auch DAIMLER in künftigen Fahrzeugen nutzen wird. Bei DAIMLER bildet das SGM eine entscheidende Grundlage für den Ausweichassistenten 6dVision, mit dem DAIMLER ins Finale des Deutschen Zukunftspreises gekommen ist. ROMO kann dabei zwischen zwei verschiedenen Abständen der Kameras zueinander wählen, um in unterschiedlichen Entfernungsbereichen (Parkplatz/Stadtverkehr oder Landstraße) ausreichende Sensorgenaugigkeit zu erhalten.



Abb. 8 Tiefenrekonstruktion aus binokularem Stereo

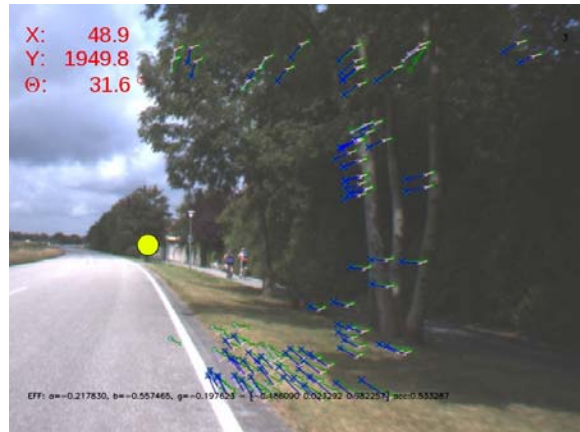


Abb. 9 Optische Navigation

Als optische Navigationseinheit wird ein bildbasiertes Trackingsystem (Zinf) benutzt [3], bei dem zuerst die Rotationsinformation zwischen den beiden Bildern einer zeitlichen Bildfolge ermittelt wird, um anschließend die Bewegungsrichtung und den Bewegungsbetrag mit einer zusätzlichen Genauigkeitsangabe für das aktuelle Navigationsergebnis zu ermitteln. Im Bild (Abb. 9) wird die Bewegungsrichtung durch den gelben Kreis als Schnittpunkt der resultierenden Flussvektoren ermittelt. Die Information kann einerseits zur Integration der Weginformation dienen, andererseits zur Bestimmung des Sollflusses der optischen Flussvektoren, die zur der im Folgenden beschriebenen Detektion von beweglichen Objekten in Fahrzeugumfeld benutzt werden.

Die Tiefeninformation aus dem Stereosystem kann mit der Information aus einer zeitlichen Bildfolge ergänzt werden, die eine robuste Erkennung von Objekten erlaubt (Abb. 10), die im kritischen Abstand zum Fahrzeug sind und eine Eigenbewegung aufweisen. Die Eigenbewegung der Objekte wird aus der Abweichung vom Sollvektorfeld bestimmt, das in der Eigenbewegungsschätzung bereits berechnet wurde.

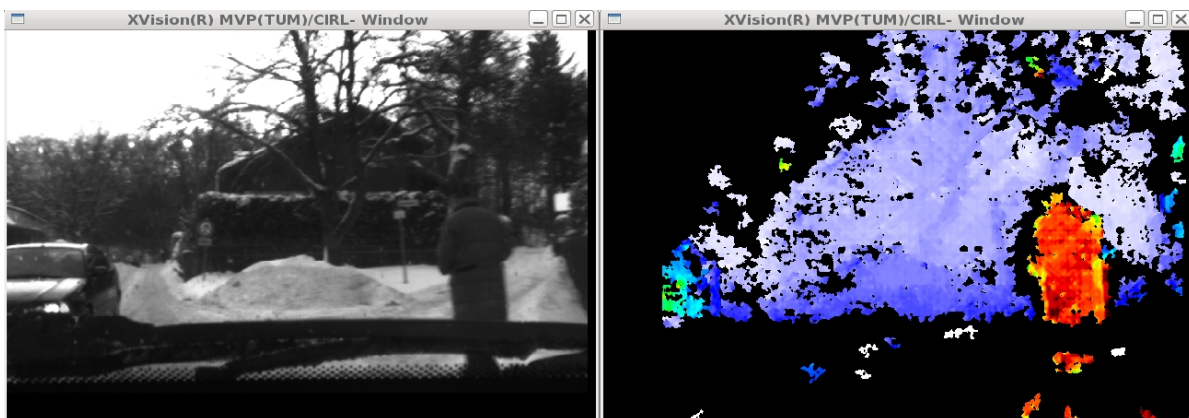


Abb. 10 Bewegungsschätzung basierend auf optischem Fluss

Intelligente Sensoreinsatzplanung

Die 3D Rekonstruktion durch Semi Global Matching (SGM) hat trotz Echtzeitfähigkeit einen erheblichen Rechenbedarf. Um eine 360° 3D-Rekonstruktion um das ROboMObil zu gewährleisten, sind mindestens 6 Stereokameras auszuwerten. Insgesamt hat ROMO 18 rundum verteilte, zu Stereopaaren kombinierte Kameras vorzuweisen. Die Rechenressourcen auf einem Elektromobil sind beschränkt durch Platz- und Energiebedarf. Die Lösung ist eine intelligente Sensoreinsatzplanung, die die vorhandenen Ressourcen optimal nutzt und dadurch ein kohärentes und aktuelles Umgebungsabbild aufrechterhält. Im ROboMObil sind 2 spezielle SGM FPGAs verbaut. Dabei wertet der erste FPGA immer das Stereokamerapaar in Fahrtrichtung aus. Die restlichen Kamerabereiche werden von einem Scheduler getriggert und vom zweiten FPGA ausgewertet.

Auch ein menschlicher Autofahrer hat niemals alle Richtungen um sein Auto gleichzeitig im Blick. Der Hauptfokus liegt auf der Fahrtrichtung. Bei Fahrmanövern, wie zum Beispiel einem Überholvorgang, werden auch die seitlichen und der rückwärtige Bereich interessant und daher gezielt vom Fahrer durch die jeweiligen Spiegel untersucht. Zusätzlich wecken spielende Kinder, Autos auf Kollisionskurs und andere auffällige Objekte das Interesse des Fahrers. Der Mensch gewichtet die Bereiche um sein Fahrzeug instinktiv und wertet höher gewichtete und somit interessantere öfters aus. Nach dem gleichen Grundprinzip handelt der intelligente Sensorplaner des ROboMObils. Die Kamerapaare decken unterschiedliche Bereiche um das Fahrzeug ab und erhalten zu jedem Zeitschritt eine Priorität. Bestimmt wird diese durch die Objekte, die sich im Kamerabereich befinden. Dabei wird nach der relativen Position des Objektes zum ROboMObil, der Zeit bis zu einer möglichen Kollision und dem Objekttypus gewichtet. Da sich auch statische Objekte durch die Eigenbewegung des Fahrzeuges ständig bewegen, muss die aktuelle Position aller Objekte zu jedem Zeitschritt geschätzt werden, falls sie nicht aktuell gemessen werden kann. Diese Prädiktion wird von einem für jedes Objekt angepassten Partikelfilter erledigt. Der Einsatz eines Partikelfilters bietet sich hier besonders an, da die Partikel einzelnen Kamerabereichen zugeordnet werden können. Chaotische und schwer einzuschätzende Hindernisse müssen öfters betrachtet werden. Daher fließen die Varianz der Partikel und der Vorhersagefehler für ein Objekt ebenfalls mit in die Gewichtung der Kamerabereiche ein. Der Scheduler aktiviert Kameras mit einer hohen Priorität öfters und schaut zusätzlich, dass alle Kamerabereiche mit einer Mindestfrequenz abgetastet werden, um neue Objekte rechtzeitig zu detektieren. So behält das ROboMObil auch Bereiche, die nicht in Fahrtrichtung liegen, ständig im Auge.

Systemarchitektur

Das Schema, mit der das autonome Fahren realisiert werden soll, basiert auf der Kombination zweier grundsätzlich verschiedener Architekturen (Abb. 11). Die Unterscheidung dieser in eine vertikal und eine horizontal aufgebaute Architektur zur Berechnung der Aktuator-Stellgrößen aus den Sensorwerten führte Rodney A. Brooks am MIT bereits in den 80er Jahren für mobile autonome Roboter ein [1] (Abb. 12). Bei einer vertikal orientierten Anordnung müssen mehrere Module sequentiell durchlaufen werden, bis eine Aktion ausgeführt wird. Bei einer horizontalen Anordnung werden mehrere nach Funktionen unterteilte Module parallel ausgeführt. Das Hauptmerkmal des vertikal aufgebauten Teils des ROMO Autonomie-Schemas stellt die Akkumulation von Sensordaten dar. Es werden Daten über mehrere Zeitschritte gespeichert, weiterverarbeitet und eine Umgebungskarte aufgebaut. Dadurch wird versucht, eine langfristige Planung der autonomen Aktionen zu gewährleisten. Im horizontalen Part werden nur Daten aus den letzten paar Zeitschritten ausgewertet, um eine kurzfristige schnelle Planung und ein reaktiveres Verhalten sicherzustellen. Üblicherweise setzen autonome Fahrzeuge auf einem umgerüsteten Serienfahrzeug auf. Dadurch muss ein vertikal hierarchischer Aufbau gewählt werden, da der direkte Durchgriff vom Sensor zum Aktuator nicht möglich ist. Diese Architektur entspricht dem gelben Teil des Schemas im (Abb. 11), der auf einem beliebigen Fahrzeug realisiert werden könnte. Der sequentielle Ablauf des vertikalen Teils des Schemas wird zunächst beschrieben.

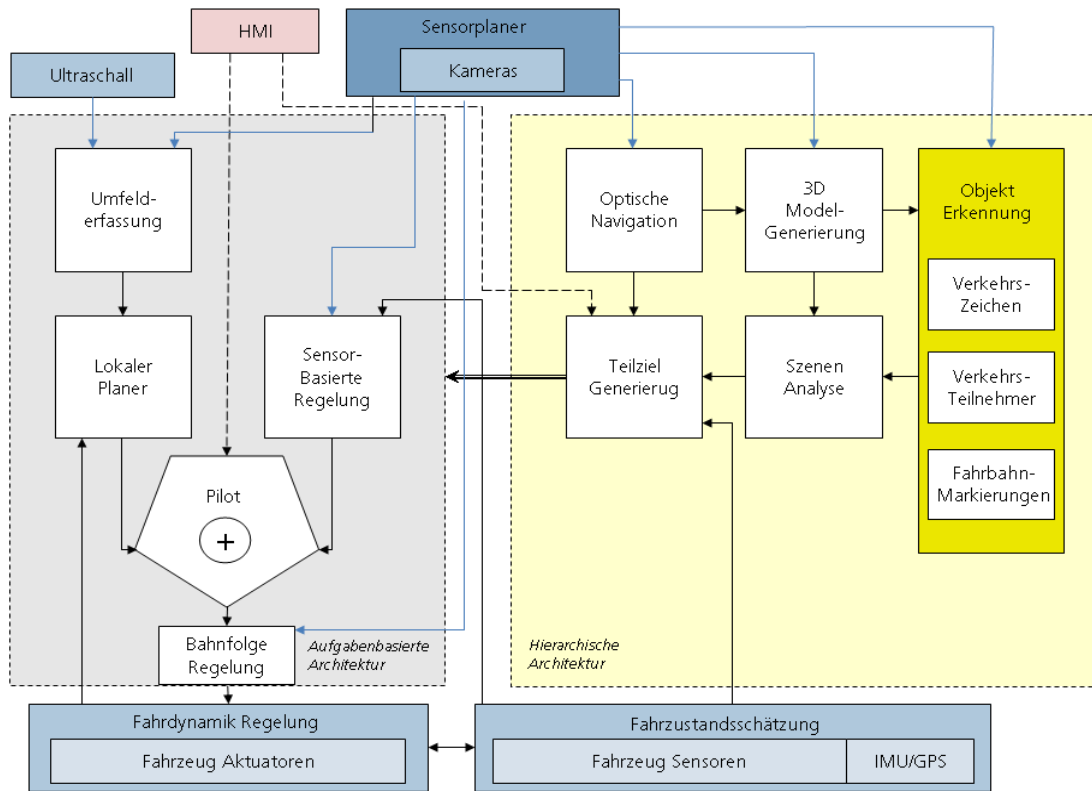


Abb. 11 Autonomie Architektur ROMO

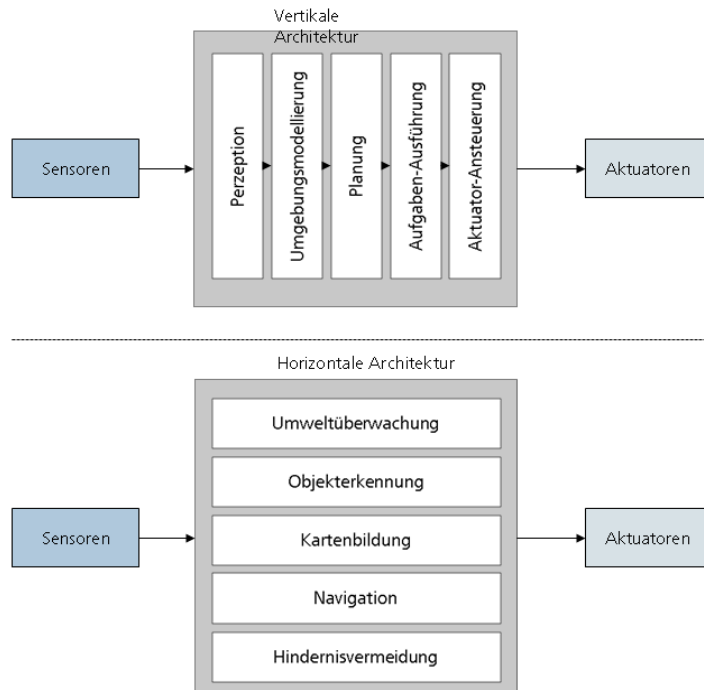


Abb. 12 Architekturen autonomer Systeme nach Brooks

Die für das autonome Fahren vorgesehenen Kameras werden von einem Sensorplaner der Situation angepasst aktiviert. Aus den Bildern des aktuellen Kamerapaars wird ein 3D-Modell der Umgebung generiert. Nicht nur für die 3D-Modellierung ist es wichtig zu wissen, wie man sich im dreidimensionalen Raum bewegt. Im Optical Navigation Modul werden die Information über die sechs Freiheitsgrade rein auf Kameradaten basierend gewonnen.

Daraufhin müssen in den konstruierten 3D-Daten und den zweidimensionalen Kamerabildern relevante Objekte erkannt werden. Dabei braucht man jeweils eigene Algorithmen zum Erkennen von Verkehrs-teilnehmern, -spuren und -schildern, da sich die einzelnen Komponenten

erheblich unterscheiden. Sobald diese richtig identifiziert wurden, müssen sie im Zusammenhang der gesamten Szene korrekt interpretiert werden, um in der gegebenen Verkehrssituation ein regelkonformes Verhalten gewährleisten zu können.

Danach wird das Verhalten des ROMOs im globalen Planungsmodul anhand der Daten aus der Szenenanalyse, des Fahrzeugzustands und der optischen Navigation für mehrere Schritte im Voraus geplant. Hierzu wird eine bestimmte Aufgabe wie zum Beispiel das Suchen eines Parkplatzes mit anschließendem Einparken in bestimmte Teilziele zerlegt. Der gesamte Prozess arbeitet anhand der mit bisher gesammelten Sensordaten erstellten und immer wieder erneuerten Karte. Dadurch verstreicht eine gewisse Zeit, bis plötzliche Änderungen der Umwelt berücksichtigt werden.

Im ROMO-Konzept ist die Realisierung eines schnellen reaktiven Verhaltens nach einer horizontalen Architektur vorgesehen. Im Gegensatz zum vorher beschriebenen portierbaren Teil des Autonomie-Schemas ist der nun beschriebene reaktive Part sehr fahrzeugspezifisch und abhängig von einer schnellen Kommunikation innerhalb des Fahrzeuges. Das Sensor Based Control Modul im reaktiven Part des Schemas, der in (Abb. 11) grau dargestellt ist, erhält zwar bestimmte Teilziele aus der globalen Planung, aber die Regelung zum Erreichen dieser Teilziele findet nicht anhand einer generierten 3D-Karte statt, sondern basiert ausschließlich auf den Kameradaten und Fahrzeugzuständen, die im entsprechenden Schätzungs-Modul durch Fusion verschiedener Sensoren gewonnen werden. Die Teilziele werden lediglich in Form von Sollpositionen einzelner Merkmale im Bild von der globalen Planung übergeben und der Regler versucht das Fahrzeug so zu bewegen, dass die Merkmale im Kamerabild an ihren Sollpositionen liegen.

Zur schnellen Reaktion auf Hindernisse wird das entsprechende Hindernisvermeidungs-Modul einerseits mit Bildern aus der aktuell relevanten Kamera, andererseits mit Informationen aus den Ultraschallsensoren als virtuelle Stoßfänger versorgt, um unerwünschte Objekte, die auf dem Fahrweg des ROMOs liegen, zu detektieren. Darauf errechnet ein lokales Planungsmodul die benötigte Aktion zur Hindernisvermeidung für die nächsten paar Zeitschritte, ohne die detaillierte und langsame Karte des vertikal aufgebauten Teils zu nutzen, um so ein schnelles reaktives Verhalten zu gewährleisten.

Damit bei der Hindernisvermeidung das eigentliche Ziel nicht vernachlässigt wird, kombiniert das Pilot-Modul die Bahnvorgaben der sensorbasierten Regelung und der lokalen Planung. Die Bewegungsvorgabe der Autonomie wird vom Piloten an die Fahrdynamikregelung übergeben. Diese stellt die zehn einzelnen Brems-, Lenk- und Antriebsaktuatoren so ein, dass die gewünschte Bahn eingehalten wird. Dabei unterstützt ein enger Informationsaustausch mit der Fahrzustandsschätzung.

Die im Schema vorgesehene Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) bietet dem Menschen verschiedene Eingriffsmöglichkeiten im Autonomiekonzept des ROMO. Beim vollautonomen Fahren kann die HMI dem globalen Planer die Missionsziele vorgeben. Die Kopplung der HMI mit dem Autonomie-Schema ist besonders eng beim teilautonomen Fahren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

Das Autonomie-Schema des ROboMObils hat eine hybride Charakteristik, da es aus einem aufgabenbasierten reaktiven Teil und einem hierarchisch aufgebauten Teil besteht. Sensoren erfassen die Umwelt, die Daten werden interpretiert und Aktionen daraus abgeleitet, die wiederum von den Aktuatoren umgesetzt werden. Die künstliche Intelligenz eines autonomen Fahrzeuges besteht nicht nur aus einem einzigen Bahnplaner, sondern aus mehreren dem jeweiligen Ziel angepasste und miteinander vernetzt agierenden Algorithmen.

Ein klassischer Bahnplaner errechnet anhand eines vom Auto selbst erstellten Umgebungsabbild und den Systemzuständen eine möglichst optimale Bahn, um ein Ziel zu erreichen. Dieser Planer ist Teil des hierarchischen Teils.

Eine reaktive Kollisionsvermeidung läuft ständig als überwachende Instanz mit, falls, abhängig

vom aktuellen Autonomiemodus, durch einen Fehler des Fahrers oder des Highlevel Bahnplaners eine Kollision bevorsteht. Eine Zielverfolgung ist nicht Bestandteil des Kollisionsvermeidungsmoduls. Es wird auch nicht auf Basis einer Umgebungskarte geplant, sondern direkt auf von der Perzeption erkannte Hindernisse reagiert. Das Kollisionsvermeidungsmodul ist der fundamentalste Teil einer aufgabenbasierten Autonomie.

Zusätzlich kommen für spezielle Aufgaben eigene Planer zum Einsatz. Für das autonome Folgefahren kann ein bildbasierter Regelungsansatz verwendet werden. Dazu muss eine Ansicht des zu folgenden Fahrzeuges verfügbar sein. Aus dieser Ansicht werden Features extrahiert und im aktuellen Bild gesucht – wenn von einer Sichtbarkeit des Führungsfahrzeuges ausgegangen werden kann. Dadurch erhält man die relative Position, auf die so geregelt wird, dass das ROboMObil dem Zielfahrzeug folgt. Wie beim Visual Servoing oder Vision Based Control wird versucht, das Zielobjekt unter gleichem Winkel und gleicher Größe wie im Zielbild zu sehen. Die Hindernisvermeidung läuft parallel, um ein kollisionsfreies Fortbewegen zu ermöglichen. Im Gegensatz zum klassischen Bahnplaner wird kein umfangreiches Umgebungsmodell benötigt.

Ausblick

Bei der vor allem für die Raumfahrt-Robotik schon lange propagierten und vom DLR mehrfach demonstrierten Teilautonomie („shared autonomy“) gibt der Mensch über das HMI einen groben Wunsch vor, der von dem unterlagerten autonomen System selbständig verfeinert wird. Im Gegensatz zum klassischen Assistenzsystem hat der Mensch hierbei nicht mehr den direkten Durchgriff auf das System.

Die jetzt vorrangig zu optimierenden Technologien wie das Chassis Control-Konzept mit Fahrdynamik Regelung auf Basis inverser Dynamikmodelle und die hier beschriebene kollisionsfreie Bewegungssteuerung über die FPGA-Implementierung der neuen SGM-Stereoalgorithmen sollen zurück in die Entwicklung künftiger planetarer Rover fließen. Beispiel dafür ist auch die bereits erfolgte Mitentwicklung eines schnellen, autonomen Mondrovers für einen von Google ausgeschriebenen, privat finanzierten Mondflug-Wettbewerb (mit dem deutschen PartTimeScientists PTS Team). Die Optimierung des Menschmaschine-Interface und des Energiemanagements, letzteres gegebenenfalls auf Basis der hoch genauen 3D-Landschaftsmodelle aus dem Institut sind weitere Schwerpunkte der nächsten Zeit, wie auch ausgiebige Fahrtests in den drei anvisierten Einsatzbereichen.

Wie anfangs erwähnt, erfordert eine Sensorintegration in das Fahrzeugkonzept nicht nur eine Anbindung auf der abstrakten Hierarchiestufe der Missionsplanung, wie sie häufig bei Projekten mit konventionellen Fahrzeugen zu beobachten ist. Eine Interaktion mit der Sensorik muss auch auf den tieferen Ebenen der Fahrzeugsteuerung stattfinden. Das hier vorgestellte Sensorkonzept des ROMO-Systems zeigt, wie Sensordaten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen in das Fahrzeugsystem eingebunden werden können.

Zitate:

[1] Brooks, R. A.: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. In: IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 1, März 1986, S. 14–23

[2] Hirschmüller, H: Stereo Vision in Structured Environments by Consistent Semi-Global Matching. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 17-22 Juni 2006, New York, NY, USA, S. 2386-2393.

[3] Mair, E.; Burschka, D.: Zinf-Monocular Localization Algorithm with Uncertainty Analysis for Outdoor Applications. Kapitel aus Mobile Robot Navigation. INTECH, 2010.

[4] M. H. Raibert, John Craig: „Hybrid Position/Force Control of Manipulators“, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Juni 1981.