

Der Mensch als Sensor - Der Weg zum teleoperierten Fahren

Dr. Frank Diermeyer, Sebastian Gnatzig, Frederic Chucholowski, Tito Tang,
Prof. Dr. Markus Lienkamp

Technische Universität München
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Boltzmannstraße 15

85748 Garching b. München

diermeyer@fm.mw.tum.de

Tel: 089/289-15349

Fax: 089/289-15357

Kurzfassung

Die Erforschung des autonomen Fahrens ist mittlerweile einige Jahrzehnte alt. Über reine Forschungsfahrzeuge ist man dabei aber nicht hinausgekommen. Es wird noch mehrere Jahrzehnte dauern bis autonome Serienfahrzeuge im öffentlichen Verkehr fahren werden. Dennoch gibt es interessante Anwendungsszenarien in denen automatisch fahrende Fahrzeuge einen großen Beitrag zu neuen Mobilitätskonzepten leisten können. Als Übergangstechnologie kann das teleoperierte Fahren dienen. Dieses aus der Robotik entlehene Konzept lässt sich an den Straßenverkehr adaptieren. Über eine drahtlose Kommunikationsverbindung, etwa die Mobilfunknetze der nächsten Generation, wird es möglich einen Live-Video-Stream aus dem Fahrzeug zu senden. Ein Teleoperator kann dann entsprechende Steuersignale von seinem Operator-Arbeitsplatz an das Fahrzeug zurücksenden.

Das Konzept der teleoperierten Straßenfahrzeuge basiert auf einem Kamerakonzept mit acht Kameras. Der Operator-Arbeitsplatz orientiert sich an der menschlichen Informationsaufnahme bei der Fahrzeugführung und stellt demnach hauptsächlich visuelle Informationen dar. Erste Testfahrten haben gezeigt, dass die Teleoperation im Straßenverkehr generell möglich ist. Die Zeitverzögerungen, die durch die Datenübertragung entstehen, sind unterhalb der kritischen Sicherheitsgrenzen. Ein einfaches Sicherheitskonzept, welches den Fall der fehlerhaften oder unterbrochenen Datenübertragung absichert, lässt sich nach dem Prinzip des „freien Korridors“ umsetzen. Der Teleoperator hat dabei die Verantwortung, den Fahrschlauch des Fahrzeugs bis zum Anhaltepunkt frei von jeglichen Hindernissen zu halten.

1 Einleitung

Fahrerassistenzsysteme sind seit Jahren aus der modernen Fahrzeugentwicklung nicht mehr wegzudenken. Dabei steigt der Grad des Szenenverständnisses und der Grad der Autonomie der Systeme immer weiter an. Bereits heute werden einige kleine Bereiche der Fahrzeugführung komplett automatisiert, wie etwa die Längsführung durch Einsatz eines Abstandsregeltempomats. Das vollständige autonome Fahren ist und bleibt allerdings weiterhin eine Vision. Bereits Anfang der 90er Jahre konnte zwar gezeigt werden, dass autonomes Fahren etwa auf Autobahnen möglich ist. Für weitere Verkehrsbereiche, wie beispielsweise den innerstädtischen Verkehr, wird allerdings ein Szenenverständnis notwendig sein, welches weit über die Fähigkeiten der heutigen maschinellen Wahrnehmung hinausgeht. So kann man davon ausgehen, dass es noch Jahrzehnte dauern wird, bis ein Automobilhersteller ein autonomes Fahrzeug anbieten kann (vgl. [1]).

In einem der aktuellen Projekte zum autonomen Fahren, dem DFG Sonderforschungsbereich „Kognitive Automobile“, wurden autonome Fahrzeuge mit Fähigkeiten zur selbständigen Anreicherung von Wissen und darauf basierendem Handeln ausgestattet [2]. Dieses an der menschlichen Informationsverarbeitung orientierte Vorgehen machte deutlich, wo aktuell noch die Defizite der maschinellen Wahrnehmung im Straßenverkehr liegen. Die autonomen Systeme haben zwar gegenüber dem Menschen Vorteile hinsichtlich der Reaktionszeit, der Zuverlässigkeit und bei der parallelen Verarbeitung großer Datenmengen, der Mensch zeichnet sich aber weiterhin dadurch aus, dass er komplexe Szenarien schnell erfassen kann, wobei er erfahrungsbasiert Wichtiges von Unwichtigem trennt und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer antizipiert.

Das gesamte Mobilitätsverhalten, vor allem in Großstädten, steht aktuell vor einem Wandel. Es gibt zwar keine Anzeichen einer postautomobilen Gesellschaft, die Bedeutung des Autos als wichtigstes Individualtransportmittel wird sich allerdings ändern. Es gibt einen klaren Trend zu integrierten Mobilitätskonzepten, in denen das Auto ein Verkehrsmittel von mehreren ist. Hierbei wird vielmehr die anwendungsbezogene Nutzung des optimalen Verkehrsmittels für eine bestimmte Fahrtstrecke im Vordergrund stehen [3].

Vor dem Hintergrund dieser neuen Mobilitätskonzepte bekommt die automatisierbare Fahrzeugführung viele neue Anwendungsfelder. Aus dem Fähigkeitsvorsprung des Menschen gegenüber maschineller Wahrnehmung kann man aber folgern, dass autonome Systeme in naher Zukunft immer noch auf einen Menschen im Hintergrund angewiesen sein werden, vor allem

in komplexen Verkehrsszenarien wie dem Stadtverkehr. Aus unserer Sicht lässt sich daher in den nächsten Jahren erst einmal teleoperiertes Fahren als Übergangstechnologie zum autonomen Fahren realisieren um zukünftige Mobilitätskonzepte zu unterstützen.

2 Stand der Technik

Die Teleoperation ist ursprünglich eine Methodik aus der Robotik und wird dort seit dem frühen 20. Jahrhundert verwendet. Allerdings erst etwa seit den 1970ern werden teleoperierte Systeme in größerem Rahmen eingesetzt. Im Allgemeinen werden ferngesteuerte Roboter immer dann eingesetzt, wenn die Anwendung für eine vollständige Automatisierung zu komplex ist, die Aufgabe aber nicht von einem Menschen übernommen werden kann oder soll. Die Anwendungsgebiete von mobilen teleoperierten Systemen reichen von Anwendungen im Weltraum, wie zum Beispiel bei den ersten Mars-Rovern, über die Tiefseerforschung bis hin zu unbemannten Luft- und Bodenfahrzeugen (Abb. 1).

Ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge, auch Remotely Operated Vehicles (ROV), sind der größte Anwendungsfall für teleoperierte Roboter. Sie werden zum Beispiel zur Erforschung des Ökosystems von Gewässern, für Bergungsarbeiten oder zur Suche nach Ölquellen verwendet. ROVs sind in der Regel durch ein Kabel mit dem Kontrollschiff verbunden, von welchem aus der Operator den Roboter steuert [4].



Abb. 1: Verschiedene teleoperierte Fahrzeuge: Links ein Remotely Operated Vehicle (ROV) für Tiefseearbeiten [4], in der Mitte ein unbemanntes Erkundungsflugzeug der United States Coast Guard [5] und rechts der Mars Exploration Rover der NASA [6].

Teleoperierte Luftfahrzeuge, auch bekannt als Unmanned Aerial Vehicles (UAV), dienen hauptsächlich dem militärischen Einsatzzweck. Dabei werden sie etwa zur Erkundung eines Gebietes oder zur Zielerkennung und -markierung in Krisengebieten eingesetzt. Im zivilen Bereich werden UAVs hauptsächlich zur Überwachung eingesetzt [7]. Im Bereich der tele-

operierten Bodenfahrzeuge gibt es die Ausprägungen der Erkundungsfahrzeuge, der unbemannten Bodenfahrzeuge (Unmanned Ground Vehicles (UGV)) und der Fahrzeuge für gefährliche Einsatzorte. Die bekanntesten Beispiele für Erkundungsfahrzeuge sind die Rover der NASA wie etwa Sojourner aus der Mars Pathfinder Mission, die für die Weltraumerkundung eingesetzt werden [8].

Obwohl teleoperierte Fahrzeug in unterschiedlichsten Anwendungsszenarien zum Einsatz kommen, gibt es nach Winfield [9] drei charakteristische Elemente, die jede teleoperierte Anwendung besitzt:

Operator-Arbeitsplatz: Der menschliche Operator steuert den Roboter von einem Kommandostand aus. Daher besteht das Interface zumeist mindestens aus einem Display zur Visualisierung vom Zustand des Roboters. Beim teleoperierten Fahren wird meistens auf diesem Display mindestens eine Kameraperspektive einer on-board Kamera gezeigt. Zusätzlich werden häufig Umgebungs-Informationen wie Navigationskarten oder Radardaten angezeigt, sowie allgemeine Sensor-Information über den Roboter selbst. Weiterhin besteht der Operator-Arbeitsplatz aus einem Gerät zur Eingabe, von dem frei definierbare Stellsignale erzeugt werden. Dieses Eingabegerät kann bei einem Straßenfahrzeug ganz konventionell aus Lenkrad und Pedale bestehen, aber auch ein Joystick oder ein Touchscreen sind mögliche Alternativen.

Kommunikationsverbindung: Die Kommunikation zwischen Roboter und Operator kann mittels kabelloser oder kabelgebundener Datenübertragung geschehen. Die Verbindung muss dafür ausgelegt sein, die notwendigen Daten zwischen Roboter und Operator zu übertragen, wobei ein möglichst geringer zeitlicher Verzug entstehen sollte. Das Videostreaming ist dabei in Bezug auf Zeitverzug und Bandbreite meistens der kritischste Aspekt.

Roboter: Der Roboter selbst ist natürlich sehr anwendungsspezifisch, aber er ist immer dadurch charakterisiert, dass er mit entsprechenden Systemen zur Sensorik, Aktorik und Datenübertragung ausgestattet sein muss, die das teleoperierte Steuern ermöglichen.

Trotz der relativen Ähnlichkeit beim Aufbau aller teleoperierten Systems definiert Kay [10] drei entscheidende Variablen die eine Differentiation ermöglichen: die Bildwiederholrate, die Zeitverzögerung der Datenübertragung und die Methode der Steuerung. Letztendlich lassen sich dadurch teleoperierte Systeme in drei Klassen unterteilen:

1. *Systeme mit einer kontinuierlichen Update-Rate der Bilddaten und praktisch ohne Verzögerung in der Datenübertragung:* Diese Systeme können direkt gesteuert wer-

den. Kabelgebundene ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge gehören beispielsweise in diese Kategorie.

2. *Nahezu kontinuierliche Systeme oder Systeme mit sehr geringer Verzögerung:* In dieser Kategorie befinden sich vor allem teleoperierte Roboter, die lokal über eine kabellose Verbindung mit begrenzter Reichweite gesteuert werden, also etwa Wireless LAN. Die bevorzugte Steuerungsmethodik ist direkt.
3. *Diskrete und verzögerte Systeme:* Diese Systeme zeichnen sich durch eine Datenverbindung mit sehr kleiner Bandbreite und langen Paketlaufzeiten aus. Vor allem die NASA Rover für die Weltraumerforschung befinden sich in dieser Kategorie. Das Steuerungskonzept ist hierbei indirekt. Das heißt, dass übergeordnete Zielgrößen wie etwa Wegpunkte vorgegeben werden.

In der Literatur sind bereits vielfältige praktische Erfahrungen mit teleoperierten Fahrzeugen dokumentiert. Dabei lassen sich neben verschiedenen Anwendungsszenarien aber auch klare Defizite in der Fahrzeugführung durch den Teleoperator erkennen. Bei Testfahrten am amerikanischen Naval Ocean System Center kam es durchgängig zu Orientierungslosigkeit bei den Teleoperatoren. Die Tests fanden dabei mit einem umgebauten Geländewagen des US-Militärs statt, wobei der Testaufbau insbesondere so gestaltet wurde, dass durch eine breitbandige Datenübertragung, die sogar Stereo-Vision ermöglichte, ein sehr hoher Grad an Telepräsenz realisiert werden konnte. Dennoch waren die Probanden nicht in der Lage, nach einer teleoperierten Testfahrt das Fahrzeug selbstständig wieder an den Ausgangspunkt zurückzufahren. Ferner kam es bei Tests in den amerikanischen Sandia National Laboratories zu einigen Unfällen mit den Testfahrzeugen. Dabei verlor der Teleoperator bei Offroad-Fahrten das Verständnis für die Fahrzeugausrichtung und steuerte das Fahrzeug so einen Hang hinauf, dass das Fahrzeug umkippte. Hierbei wird insbesondere erwähnt, dass der Teleoperator angab, bis zum Unfall selber nichts von einem bevorstehenden Umkippen erkannt zu haben [10].

All diese negativen Erfahrungen mit teleoperierten Fahrzeugen lassen sich auf ein begrenztes Feedback für den Teleoperator zurückführen. Der Operator hat nicht dieselben Fahreindrücke wie ein Fahrer im Fahrzeug und kann daher ohne Hilfsmittel das Fahrzeug nicht komplett sicher führen.

Bei der Adaption der Teleoperation an den Straßenverkehr lassen sich aus dem Stand der Technik drei elementare Problemstellungen identifizieren:

- *Zeitverzögerungen:* Da die Datenübertragung definitiv kabellos erfolgen muss, sind die verfügbaren Übertragungstechnologien erheblich eingeschränkt. Bei der Verwendung von zum Beispiel Mobilfunknetzen führen Bandbreite und Paketlaufzeiten zu nicht mehr vernachlässigbaren Zeitverzügen in der Datenkommunikation. Es stellt sich die Frage wie groß diese Zeitverzögerungen sein dürfen, damit eine sichere Fahrzeugführung im Straßenverkehr noch gewährleistet werden kann.
- *Operator-Arbeitsplatz:* Die Schnittstelle zum Operator stellt den Erkenntnissen der Literatur folgend eine sehr wichtige Komponente dar. Dabei muss definiert werden welche Informationen ein Operator benötigt, um das Fahrzeug genauso gut steuern zu können wie ein on-board Fahrer. Dazu gehört auch die Untersuchung, wie diese Informationen dem Operator idealerweise dargestellt werden müssen.
- *Sicherheitskonzept:* In Bezug auf ein ferngesteuertes Fahrzeug stellt sich die Frage, wie ein Sicherheitskonzept gestaltet werden muss, um zu jedem Zeitpunkt eine sichere Fahrzeugführung gewährleisten zu können. Das Konzept wird vor allem berücksichtigen müssen, dass es zu einem Ausfall der Datenübertragung kommen kann und das Fahrzeug sich dann wiederum in einer Art autonomen Betrieb befindet, in dem es selbstständig einen sicheren Fahrzustand erreichen muss.

3 Ein Konzept für teleoperierte Straßenfahrzeuge

Im Gegensatz zu den bisher in der Literatur beschriebenen Ansätzen der Teleoperation bietet der Straßenverkehr eine wesentlich größere Vielfalt an Restriktionen, da eine Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern unerlässlich ist. Vorherige Projekte mit teleoperierten Fahrzeugen haben sich allerdings lediglich mit Offroad-Anwendungen befasst. Das Risiko einer solchen Anwendung ist jedoch deutlich geringer als beim Fahren im öffentlichen Straßenverkehr, da man im Gelände davon ausgehen kann, dass die Interaktion mit anderen dynamischen Objekten entfällt und lediglich statische Objekte als Hindernisse betrachtet werden müssen. Ferner finden viele teleoperierte Anwendungen auf abgesperrten und begrenzten Räumlichkeiten statt. Dies hat einen großen Einfluss auf die zugrunde liegende Übertragungstechnologie. Daher werden in der Literatur viele Systeme beschrieben, die in lokalen Netzwerken mittels Wireless LAN oder sogar kabelgebunden eingesetzt werden. Auch dieses

Vorgehen kann im öffentlichen Straßenverkehr wegen mitunter großen Entfernungen nicht eingesetzt werden.

Aus den Defiziten im Stand der Technik haben wir daher folgendes Konzept für ein teleoperiertes Straßenfahrzeug entwickelt. Die Konzeptfindung orientiert sich dabei an den drei charakteristischen Elementen der Teleoperation. Diese müssen an den Straßenverkehr adaptiert werden (siehe Abb. 2):

1. *Operator-Arbeitsplatz:* Aus der Entwicklung von Fahrsimulatoren ist bekannt, dass der Mensch vor allem das Auge und in geringerem Umfang das Ohr zur Führung von Fahrzeugen benötigt. Zusätzlich spielen das haptische und vestibuläre System eine Rolle bei der Wahrnehmung des aktuellen Fahrzustands [11]. Das Konzept des Arbeitsplatzes basiert daher hauptsächlich auf der Darstellung visueller Informationen und besteht aus einem Aufbau mit mehreren Monitoren, an denen die Kameraperspektiven der on-board Videokameras live angezeigt werden. Zusätzlich werden weitere Informationen im Videobild angezeigt, die das Fahren erleichtern sollen. Damit die Orientierung dem Operator leichter fällt, wird eine Karte aus der Vogelperspektive angezeigt, die auch mit einer Navigationsfunktion verbunden werden kann. Zusätzlich werden Informationen der umgebungserfassenden Sensorik visualisiert, um den Teleoperator bei der Entfernungs- und Geschwindigkeitseinschätzung anderer Verkehrsteilnehmer zu unterstützen. Diese Informationen werden zusätzlich im Videobild eingeblendet.

Eine auditive Telepräsenz ist vor allem für Geschwindigkeitsgefühl, Fahrzustandserkennung und Ortung anderer Verkehrsteilnehmer relevant und soll durch ein Surround-Soundsystem realisiert werden. Das haptische Feedback kann über Force-Feedback in den Steuerelementen und Vibrationen des Sitzes durch Körperschallwandler realisiert werden.

Beschleunigungen sollen bei diesem Konzept hingegen nicht abgebildet werden. Wilkie und Wann [12] fanden heraus, dass die Wahrnehmung von Beschleunigungen durch das vestibuläre System minimalen bis keinen Effekt auf die Leistungsfähigkeit bei der Fahrzeugführung hat. Daher lassen sich der große finanzielle und räumliche Aufwand hier für den Aufbau eines Bewegungssystems nicht rechtfertigen. Vielmehr soll der Operator-Arbeitsplatz nur diejenigen Informationen bieten, die für eine sichere Fahrzeugführung notwendig sind, damit das Konzept der teleoperierten Fahrzeuge flexibel einsetzbar ist.

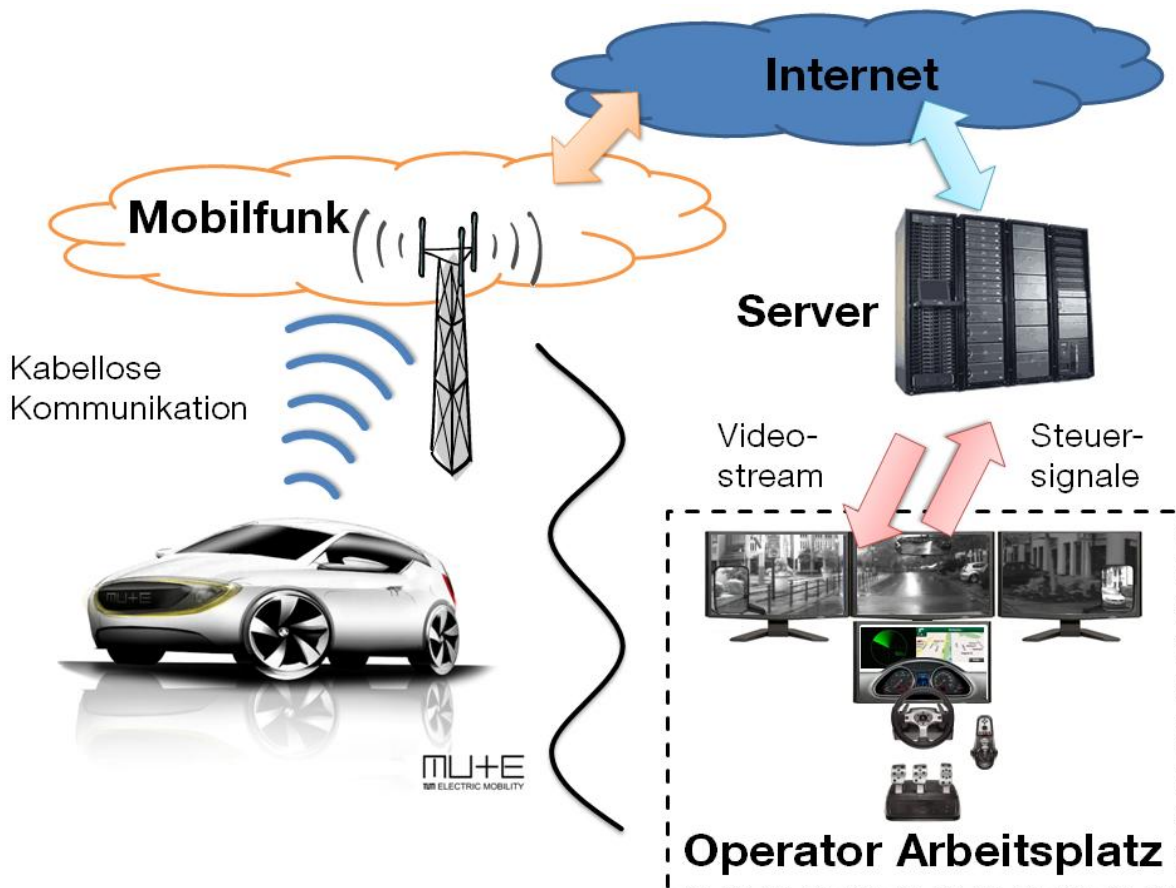


Abb. 2: Basiskonzept zum teleoperierten Fahren im Straßenverkehr.

2. *Kommunikationsverbindung:* Als Kommunikationsstruktur wird eine Car-2-Server-Kommunikation verwendet. Dabei ist das Fahrzeug permanent via Mobilfunk und Internet mit einem Server verbunden, welcher Daten zur Unterstützung des Fahrers liefert. Dies könnten etwa die Routingdaten spezieller Navigationsalgorithmen sein, für die ein Steuergerät im Fahrzeug nicht leistungsfähig genug wäre. Das teleoperierte Fahrzeug nutzt diese vorhandene Car-2-Server-Verbindung und versendet dabei Video- und Sensordaten und empfängt Steuersignale. Aufgrund des hohen Datenaufkommens durch das Live-Videostreaming sind die Mobilfunknetze der nächsten Generation („4G“) eine grundlegende Voraussetzung, um teleoperiertes Fahren zu ermöglichen. Zusätzlich müssen hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit und die Datenverschlüsselung gestellt werden.
3. *Roboter:* Der Roboter ist in diesem Fall ein Straßenfahrzeug, in welchem alle Elemente der primären, sekundären und tertiären Fahrzeugführung elektronisch steuerbar sind (X-By-Wire). Um dem Fahrer eine ähnliche Sicht auf das Verkehrsgeschehen wie ei-

nem on-board Fahrer zu geben, wird ein Kamerakzept mit acht Kameras verwendet. Fünf Kameras bieten dabei eine umfassende 200-Grad-Sicht nach vorne. Für die Sicht nach hinten sind zwei Kameras in den Außenspiegeln und eine Rückfahrkamera in der Heckklappe vorgesehen (Abb. 3). Dieses umfassende Kamerakzept ist wiederum der menschlichen Sinneswahrnehmung bei der Fahrzeugführung geschuldet, die ein besonders hohes Maß an visuellen Informationen benötigt. Ein Car-PC verwaltet die Datenströme der Gigabit-Ethernet-Kameras im Auto und encodiert die Videostreams. Diese werden dann drahtlos an den Server geschickt, der die Daten aufbereitet und mit weiteren Informationen aus dem Internet zum Beispiel über das aktuelle Verkehrsgeschehen oder geltende Höchstgeschwindigkeiten anreichert. Der Operator bekommt dann die aufbereiteten Daten am Operator-Arbeitsplatz angezeigt.

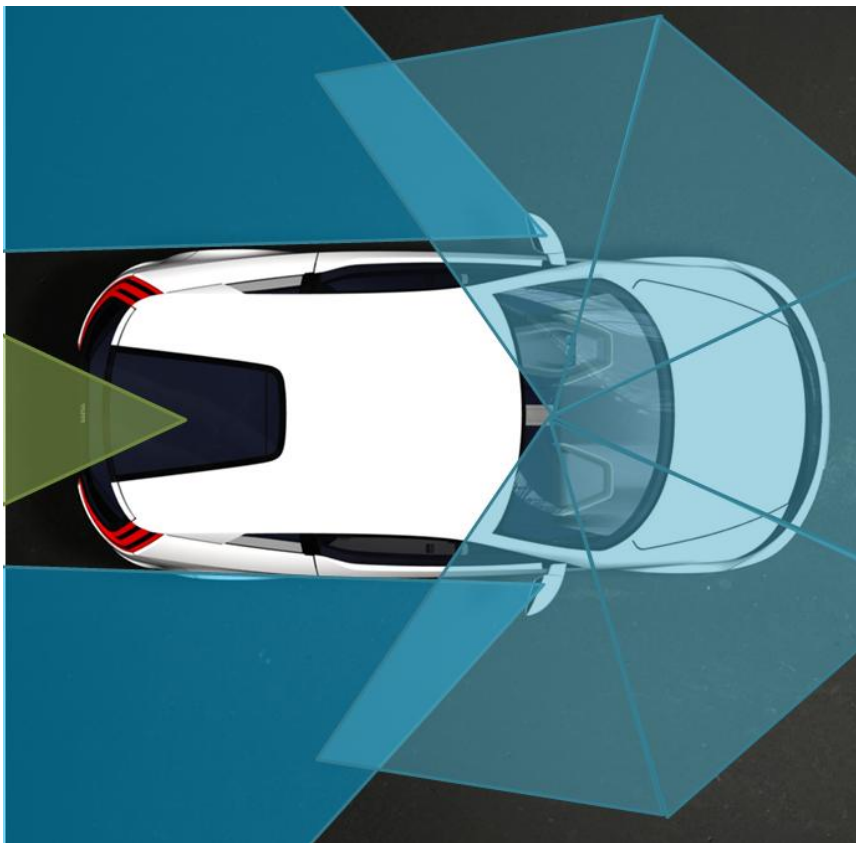


Abb. 3: Kamerakzept für das teleoperierte Fahren.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die ersten Ergebnisse dargestellt, die einerseits in der Simulation untersucht und andererseits mit dem ferngesteuerten Versuchsträger in Testfahrten erzielt wurden.

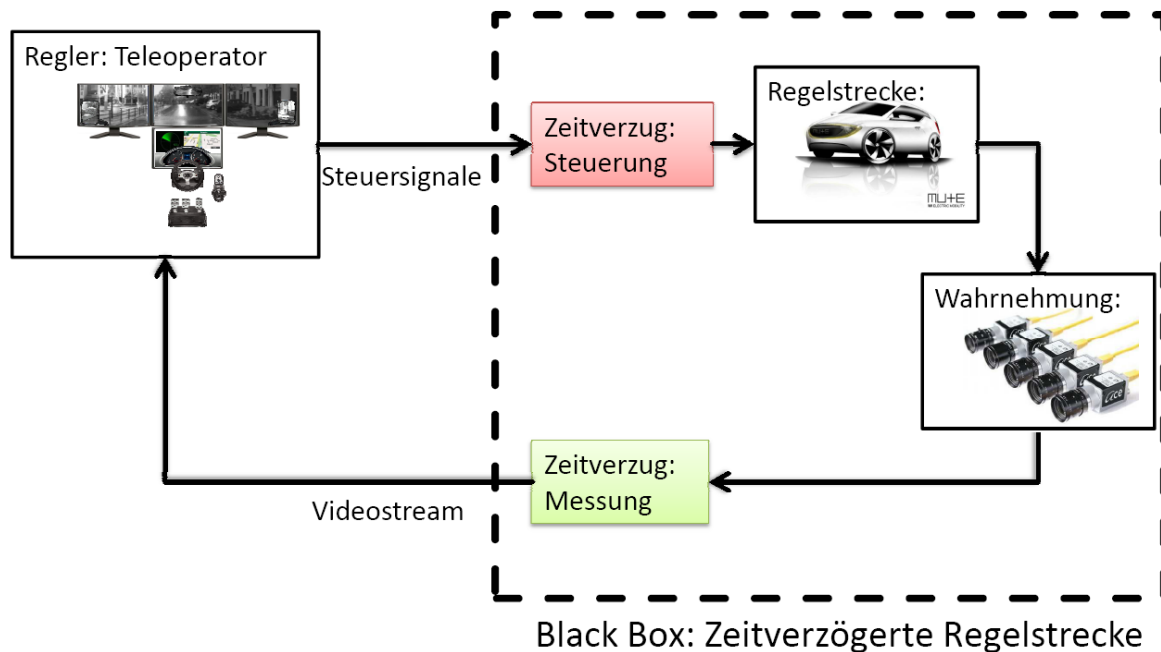


Abb. 4: Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis beim teleoperierten Fahren.

4.1 Zeitverzögerungen

Das direkte Steuerungskonzept für das teleoperierte Fahren ist bereits in der Simulation und in der Realität untersucht worden. Die Simulationsumgebung besteht dabei aus Matlab/Simulink und der Fahrdynamiksimulation veDyna der Firma TESIS DYNAware in Kombination mit der 3D-Animation DYNAanimation. Dadurch wird es möglich, das ferngesteuerte Fahren mit allen relevanten Zeitverzögerungen in der Simulation abzubilden (vgl. Abb. 4).

Die Simulation bietet die Möglichkeit beliebige Kombinationen von Zeitverzögerungen einzustellen und an geeigneten Fahrversuchen zu validieren. Zur Bewertung des Fahrverhaltens mit unterschiedlichen Randbedingungen eignen sich im Allgemeinen verschiedene instationäre Fahrdynamiktests. Im Folgenden wird explizit das Verhalten am doppelten Fahrspurwechsel erläutert.

Der doppelte Fahrspurwechsel stellt ein Ausweichmanöver mit einem Zurückklenken auf die eigene Spur dar. Dabei ist im Bezug auf das teleoperierte Fahren besonders interessant, in welchem Maße der Teleoperator noch exakt in eine Gasse ausweichen kann und wie viel Stellgrößenaufwand er dazu aufbringen muss bzw. wie groß der Korrekturaufwand ist.

Als Randbedingungen für die simulativen Untersuchungen gelten die Anwendungsrestriktionen der teleoperierten Fahrzeuge. Da das Konzept auf eine Anwendung innerhalb von Mobilitätskonzepten in urbanen Szenarien ausgelegt ist, werden zunächst lediglich Geschwindigkeiten von bis zu 50 km/h untersucht.

Aus den Testfahrten in der Simulation konnten die Ergebnisse gewonnen werden, dass eine Gesamt-Totzeit von 400 bis 500 Millisekunden das Maximum der tolerierbaren Zeitverzögerung darstellt. Ab diesen Werten kann der menschliche Fahrer den doppelten Fahrspurwechsel bei 50 km/h nicht mehr mit hinreichender Güte durchführen. Eines der ausschlaggebenden Kriterien für diese Bewertung ist die erreichte maximale Querschleunigung. Aus der Unfallforschung [13] ist bekannt, dass der Normalfahrer bei Kurvenfahrten eine Sicherheitsgrenze in Abhängigkeit der Geschwindigkeit erreicht. Diese Sicherheitsgrenze kennzeichnet diejenige Querschleunigung, ab der eine Kurve nicht mehr kontrolliert durchfahren werden kann. In unseren Fahrversuchen wurden diese Grenzen durchgängig ab Totzeiten von über einer halben Sekunde überschritten. Die maximal zulässigen Zeitverzögerungen sind abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit, wobei mit sinkender Dynamik des Systems größere Zeitverzögerungen zulässig sind.

In realen Testfahrten konnten durch einen Aufbau mit einer Wireless-LAN-Datenübertragung und MPEG-Video-Encodierung Gesamtzeitverzögerungen von 150 bis 200 Millisekunden erreicht werden. Geschwindigkeiten bis zu 50 km/h erscheinen damit zunächst erreichbar.

4.2 Sicherheitskonzept bei direkter Steuerung

Einem Sicherheitskonzept für ein direktes Steuerungskonzept sind enge Grenzen gesetzt. Auf Grund der nicht oder nur in begrenztem Umfang vorhandenen Regelungsalgorithmen im Fahrzeug, muss ein Sicherheitskonzept bei direkter Steuerung im besonderen Maße die Eingaben des Teleoperators verwenden. Der direkte Steuerungsbetrieb des teleoperierten Fahrzeugs ist insbesondere dafür ausgelegt, in komplexen Verkehrsszenarien angewendet zu werden, in denen eine verlässliche maschinelle Fahrspurerkennung nicht möglich ist. Dies trifft etwa auf die oben beschriebenen Szenarien im innerstädtischen Verkehr zu. Aus dieser Randbedingung ergibt sich, dass alle relevanten Informationen für das Sicherheitskonzept vom Teleoperator selbst vorgegeben werden und im Vorhinein übermittelt werden müssen.

Als Zielvorgabe für das Sicherheitskonzept gilt das Prinzip, einen sicheren Fahrzustand zu erreichen. Da das teleoperierte Fahren hauptsächlich im städtischen Bereich bei moderaten

Geschwindigkeiten zum Einsatz kommen soll, kann man generell als sicheren Zustand den Stillstand postulieren. Nach Hörwick [14] ist ein sicheres Abbremsen in den Stillstand innerhalb der eigenen Fahrspur als Notfallstrategie die geeignetste Methode im Straßenverkehr, um ein Fahrzeug aus einem automatischen Betrieb bei Führerlosigkeit in einen sicheren Fahrzustand zu überführen. Andere Fahrmanöver, wie ein Anhalten am Straßenrand beziehungsweise auf dem Standstreifen der Autobahn, erfordern einen Spurwechsel und sind demnach von ihrer Ausprägung her zu komplex, als dass man sie als verlässliche Notfallstrategie einsetzen sollte.

Als geeignetes Sicherheitskonzept für das direkte teleoperierte Fahren wurde daher das Prinzip des „freien Korridors“ eingeführt. Hierbei hat der Teleoperator die Verantwortung darüber, den Fahrschlauch des Fahrzeugs so zu wählen, dass sich dieser stets innerhalb der Fahrspur befindet und frei von Hindernissen ist. Dazu wird dem Teleoperator der prädizierte Fahrschlauch ins Videobild eingeblendet. Darüber hinaus wird zusätzlich mittels Reibwertschätzung der prädizierte Anhalteweg in Abhängigkeit von Fahrbahnbeschaffenheit, Geschwindigkeit, Kurvenradius, entsprechender Zeitverzögerungen und Ansprechzeiten sowie der maximalen Verzögerung eingeblendet. Das Ziel des Operators muss es nun bei diesem Sicherheitskonzept sein, zu jeder Zeit den Fahrschlauch bis zum Anhalteweg frei zu halten und diesen bei jedem Fahrmanöver in der Fahrspur zu halten. Wenn dieses in der Art möglich ist, dann kann zu jedem Zeitpunkt garantiert werden, dass bei einem Ausfall der Datenübertragung das Fahrzeug selbstständig in den sicheren Fahrzustand überführt werden kann, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu gefährden oder von der Fahrbahn abzukommen.

Das hier vorgestellte Sicherheitskonzept ist nur dann sinnvoll umsetzbar, wenn es für den Teleoperator bei normaler Fahrweise möglich ist den Fahrschlauch tatsächlich frei zu halten. Es ist offensichtlich, dass bei beliebig langsamer Fahrweise der Anhalteweg immer so kurz wird, dass ein generelles Fahren mit diesem Sicherheitskonzept möglich ist. Es stellt sich allerdings die Frage, inwieweit eine geordnete Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr erreichbar ist.

Unterschiedlichste Testfahrten in realen Stadtszenarien haben aber gezeigt, dass die Kombination aus Geschwindigkeit und Lenkradwinkel bereits beim Normalfahrer die Vorgaben sehr gut einhält (vgl. Abb. 5). Für einen geschulten Teleoperator ist es demnach kein Problem stets einen freien Fahrschlauch bis zum Anhalteweg vorzugeben beziehungsweise die Geschwindigkeit entsprechend anzupassen. Damit ist es immer möglich, das Fahrzeug bei einem Prob-

lem mit der Datenkommunikation ohne aufwändige on-board Algorithmen innerhalb der Fahrspur in den sicheren Stillstand zu überführen.



Abb. 5: Sicherheitskonzept „freier Korridor“: Fahrschlauch bei unterschiedlichen Kurvenradien und Bremswegen.

5 Ausblick

Die ersten Testfahrten mit einem teleoperierten Versuchsträger haben bereits gezeigt, dass diese Methodik aktuell deutliche Vorzüge gegenüber rein autonom fahrenden Fahrzeugen hat. Die maschinelle Wahrnehmung ist bei weitem noch nicht in der Lage an die menschliche Leistungsfähigkeit heranzukommen. Der Mensch ist deutlich besser in der Lage auch komplexe Situationen schnell zu erfassen und zu interpretieren. Besonders das Verhalten von anderen Verkehrsteilnehmern kann sehr gut antizipiert werden. Daher stellt sich die Teleoperation als geeignete Übergangstechnologie zum autonomen Fahren dar.

Autonome Fahrzeuge wird es voraussichtlich in den nächsten Jahrzehnten nur in einigen Teilbereichen des Straßenverkehrs geben. Besonders in Situationen, die durch eine geringe und maschinell beherrschbare Komplexität gekennzeichnet sind, kann bereits heute autonom gefahren werden. Dies trifft hauptsächlich auf Autobahnszenarien zu, besonders in Stau- und Stop-And-Go-Situationen. Wenn die Situation maschinell beherrschbar ist, haben automatisierte Systeme gegenüber dem Mensch vor allem Vorteile hinsichtlich Reaktionszeit und Zuverlässigkeit.

Teleoperierte Fahrzeuge können hingegen in vorwiegend komplexen Verkehrssituationen eingesetzt werden, da der menschliche Operator als Sensor jede Situation erkennen und das

Fahrzeug sicher führen kann. Besonders der von autonomen Forschungsfahrzeugen noch relativ vernachlässigte innerstädtische Bereich ist als Anwendungsbereich für teleoperierte Fahrzeuge geeignet, da hier das Berücksichtigen des Verhaltens von anderen Verkehrsteilnehmern ein hohes Maß an Interaktion und Antizipation erfordert.

Gerade die Individualmobilität im innerstädtischen Bereich wird sich in naher Zukunft vor allem im Zuge des Vormarsches von Elektrofahrzeugen wandeln. Dabei wird es im Rahmen von neuen integrierten Mobilitätskonzepten ganz neue Anwendungsfälle für automatisch fahrende Fahrzeuge geben. Das teleoperierte Fahren könnte dabei bereits zeitnah etwa ein teleoperiertes Bereitstellen und Wegparken ermöglichen und somit Mobilitätskonzepte wie Car-Sharing deutlich attraktiver für die Nutzer machen.

6 Zusammenfassung

Die Erforschung des autonomen Fahrens ist mittlerweile einige Jahrzehnte alt. Bereits Anfang der 90er-Jahre konnte man autonom auf Autobahnen fahren. Über reine Forschungsfahrzeuge ist man dabei aber nicht hinausgekommen. Es wird noch mehrere Jahrzehnte dauern bis autonome Serienfahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr fahren werden. Dennoch gibt es interessante Anwendungsszenarien in denen automatisch fahrende Fahrzeuge einen großen Beitrag zu neuen Mobilitätskonzepten leisten könnten, besonders in innerstädtischen Bereichen, etwa wenn Fahrzeuge automatisch bereitgestellt und weggeparkt werden könnten. Als Übergangstechnologie könnte daher das teleoperierte Fahren dienen. Dieses aus der Robotik entlehene Konzept lässt sich an den Straßenverkehr adaptieren. Das Konzept setzt dabei voraus, dass Fahrzeuge zukünftig vor allem in Ballungszentren eine breitbandige drahtlose Kommunikationsverbindung besitzen werden, etwas durch die Mobilfunknetze der nächsten Generation. Dadurch wird es möglich einen Live-Video-Stream aus dem Fahrzeug zu senden. Ein Teleoperator kann dann entsprechende Steuersignale von seinem Operator-Arbeitsplatz an das Fahrzeug zurücksenden.

Das Konzept der teleoperierten Straßenfahrzeuge basiert auf einem Kamerakzept mit acht Kameras. Der Operator-Arbeitsplatz orientiert sich an der menschlichen Informationsaufnahme bei der Fahrzeugführung und stellt demnach hauptsächlich visuelle Informationen dar. Dabei werden die Kamerabilder insbesondere mit weiterführenden Informationen angereichert wie etwa einer Navigationsfunktion. Dadurch werden aus der Literatur abgeleitete Defizite der teleoperierten Fahrzeugführung berücksichtigt.

Erste Testfahrten haben gezeigt, dass die Teleoperation im Straßenverkehr generell möglich ist. Die Zeitverzögerungen, die durch die Datenübertragung entstehen, sind unterhalb der kritischen Sicherheitsgrenzen. Eine sichere Fahrzeugführung im Stadtverkehr bei Geschwindigkeiten bis zu 50 km/h ist daher ferngesteuert trotz Zeitverzögerungen möglich.

Ein einfaches Sicherheitskonzept, welches den Fall der fehlerhaften oder unterbrochenen Datenübertragung absichert, lässt sich nach dem Prinzip des „freien Korridors“ umsetzen. Der Teleoperator hat dabei die Verantwortung, den Fahrschlauch des Fahrzeugs bis zum Anhaltepunkt frei von jeglichen Hindernissen zu halten.

Referenzen

- [1] Bartels, A.: *Roadmap Automatisches Fahren*. In: AAET - Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, 2008
- [2] Kraus, S.; Wang, C.: *Design and Capabilities of the Munich Cognitive Automobile*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Eindhoven, 2008
- [3] Canzler, W.; Knie A.: *Grüne Wege aus der Autokrise*. In: Schriften zur Ökologie, Band 4. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, 2009
- [4] Marine Technology Society: *Remotely Operated Vehicles Committee of the Marine Technology Society*. <http://www.rov.org/>, 2010
- [5] United States Coast Guard: *Vertical Unmanned Aerial Vehicle*. http://cgvi.uscg.mil/media/main.php?g2_itemId=107488, 2010
- [6] NASA: *Mars Exploration Rover Mission*. <http://marsrover.nasa.gov/home/index.html>, 2010
- [7] Fong, T. W. ; Thorpe, C.: *Vehicle Teleoperation Interfaces*. In: Autonomous Robots 11, July, Nr. 1, S. 09-18, 2001
- [8] Mishkin, A.; Morrison, J.; Nguyen, T.; Stone, H.; Cooper, B.: *Operations and autonomy of the Mars Pathfinder Microrover*, Proc. IEEE Aerospace Conf., 1998.
- [9] Winfield A.: *Future directions in tele-operated robotics*, In: Telerobotic Applications, 2000
- [10] Kay, J.: *STRIFE: Remote Driving Using Limited Image Data*, PhD Thesis, Carnegie Mellon University, 1997

- [11] Negele, H. J.: *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung*, Dissertation, Technische Universität München, 2007
- [12] Wilkie, R. M.; Wann, J. P.: *The Role of Visual and Nonvisual Information in the Control of Locomotion*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 31, No. 5, 901–911, 2005
- [13] Schimmelpfennig, K. H. und Nackenhorst, U.: *Bedeutung der Querbesehleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion: Sicherheitsgrenze des Normalfahrers*. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 23, 1985
- [14] Hörwick, M.; Siedersberger, K.-H.: *Aktionspläne zur Erlangung eines sicheren Zustandes bei einem Autonomen Fahrzeug*. In: *Tagung aktive Sicherheit*, München, 2010