



# **Teil I.**

## **Einleitung**





## Kapitel 1.

# Motivation

---

Innerhalb der EU-Zone (Stand Juni 2013, 27 Länder) hat sich im Laufe der letzten Jahre die Zahl der bei Verkehrsunfällen getöteten Menschen von 75.426 (1991) auf 31.029 (2010) um mehr als 58 % reduziert [11]. Bemerkenswert hierbei ist die Tatsache, dass die Zahl der PKWs auf europäischen Straßen im gleichen Zeitraum um mehr als 41 % angestiegen ist [12].

Einer der Hauptgründe für diese positive Entwicklung findet sich in den technischen Fortschritten der Automobilindustrie. So haben passive Sicherheitssysteme wie Airbags und Sicherheitsgurte nachweislich dazu beigetragen, dass Unfälle in ihrer Schwere deutlich gemindert werden konnten. Alleine die Nutzung eines Sicherheitsgurtes mindert das Sterberisiko bei einem Unfall um etwa 61 % [41]. Darüber hinaus wurden auch aktive beziehungsweise präventive Systeme wie beispielsweise *ABS*<sup>1</sup> und *ESP*<sup>2</sup> entwickelt, welche das Fahrzeug in kritischen Situationen aktiv stabilisieren und somit nicht nur Unfallfolgen mindern, sondern eine große Zahl der Unfälle gänzlich vermeiden [41]. Aktuelle Generationen aktiver Fahrerassistenzsysteme wie beispielsweise der Notbremsassistent (*AEBS*<sup>3</sup>) sind bereits heute in der Lage, im Falle einer drohenden Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern eine automatische Notbremsung einzuleiten. Statistiken aus der Unfallforschung prognostizieren eine weitere Reduktion aller PKW-Unfälle um bis zu 18 % bei flächendeckender Einführung solcher Systeme [33]. Laut einer Studie der Deutschen Verkehrswacht lassen sich heute etwa 94 % aller Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückführen [58].

Mit einer Übernahme der Fahraufgabe durch das Fahrzeug in zunächst einfachen, später komplexeren Szenarien bis hin zur autonomen Fahrt ließe sich dem kritischen Einfluss

---

<sup>1</sup>Antiblockiersystem

<sup>2</sup>Elektronisches Stabilitätsprogramm (*ESP*) / Electronic Stability Control (*ESC*)

<sup>3</sup>Autonomous Emergency Brake System



## 1. Motivation

menschlichen Versagens begegnen und somit die Verkehrssicherheit weiter signifikant erhöhen. Neben dem beschriebenen Sicherheitsaspekt spielt in diesem Zusammenhang auch das Thema Komfort und Zeitersparnis eine große Rolle. Mit der Übernahme der Fahraufgabe durch das Fahrzeug entstehen an dieser Stelle für den Fahrer völlig neue Möglichkeiten zur Nutzung der Reisezeit. Befindet sich der Fahrer - losgelöst von der Fahraufgabe - im Fahrzeug, so gewinnt er Zeit, welche er für produktive Prozesse oder zur Erholung nutzen kann. Situationen wie beispielsweise das Parken, in welchen es nur darum geht, das Fahrzeug unabhängig vom Fahrer abzustellen, können im autonomen Fall gänzlich ohne den Fahrer stattfinden. Dieser verlässt das Fahrzeug an einer für ihn günstigen Position und spart somit effektiv Zeit, während er durch Wegfall der meist lästigen Parkaufgabe an Reisequalität und Komfort gewinnt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen Methoden entwickelt und evaluiert werden, welche es einem Fahrzeug ermöglichen, sich selbst innerhalb einer bekannten Umgebung unter Verwendung von heute verfügbarer Seriensensorik zu lokalisieren und auf dieser Basis autonom in einem entsprechenden Parkszenario, wie beispielsweise einem Parkhaus oder einer Tiefgarage, ein- und wieder auszuparken.

### 1.1. Lokalisierung im Fahrzeug

**Definition** Die Lokalisierung beschreibt einen Prozess, welcher durch Auswertung verschiedener Sensordaten die Lage des Fahrzeugs relativ zur eigenen Umgebung beschreibt. Diese Lage wird auch Pose genannt. Eine Pose beschreibt klassischerweise die jeweils dreidimensionale Position  $(x, y, z)^T$  und Orientierung  $(\varphi, \theta, \omega)^T$  des lokalen Koordinatensystems eines Objektes im Raum (hier: Fahrzeug) relativ zu einem definierten (Welt-) Koordinatensystem (hier: Umfeldmodell) und besitzt entsprechend sechs Freiheitsgrade. Da sich ein Fahrzeug in der Regel - insbesondere beim Parken - immer auf dem Boden befindet und der Wank- und Neigungswinkel des Fahrzeugs im Geschwindigkeitsbereich eines Parkvorgangs zu vernachlässigen ist, wird die Pose  $x_t$  des Fahrzeugs in der vorliegenden Arbeit unter Verwendung von drei Freiheitsgraden als dreidimensionaler Vektor entsprechend Gleichung 1.1 abgebildet. Die hier verwendete Notation entspricht der gängigen Form aus [53]. Der Winkel  $\theta$  entspricht der Drehung gegenüber der Hochachse  $z$ , welche orthogonal zur  $(x, y)$ -Bodenebene verläuft. Vergleiche hierzu auch Abbildung 9.14.

$$x_t = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (1.1)$$



## 1.1. Lokalisierung im Fahrzeug

Die Wahrnehmung und Interpretation der Fahrzeugumgebung sowie das Wissen über die Lage des eigenen Fahrzeugs innerhalb dieser Umgebung ist bereits heute von grundlegender Bedeutung für die Performanz von Fahrerassistenzsystemen. Insbesondere im Kontext des autonomen Fahrens werden diese beiden Themen eine entscheidende Rolle spielen.

Schon heute existieren unterschiedliche Verfahren in Serienreife, welche die Problemstellung der Lokalisierung im Fahrzeug partiell und funktionspezifisch lösen. Diese lassen sich in zwei Kategorien unterteilen.

Auf der einen Seite werden Objekte der Umgebung direkt sensorisch erfasst und relativ zum Fahrzeug interpretiert. Dies können beispielsweise andere Fahrzeuge, Fußgänger, aber auch Hindernisse beim Einparken sein. Vordergründiges Ziel an dieser Stelle ist eine intelligente - meist unfallvermeidende - direkte Interaktion mit Objekten der lokalen Umgebung. Die absolute Pose des Fahrzeugs innerhalb einer globalen Karte ist in diesem Falle nicht oder nur am Rande relevant, da kein übergeordnetes Ziel auf Planungsebene verfolgt wird. So werden beispielsweise bei der Assistenzfunktion *ACC*<sup>4</sup> mittels einer Fusion aus Radar<sup>5</sup>- und Videosensorik<sup>6</sup> vorausfahrende Fahrzeuge erfasst und verfolgt. Auf Basis dieser Information wird der Tempomat um eine automatische Distanzregelung zum vorausfahrenden Fahrzeug erweitert. Im Falle einer drohenden Kollision bremst das System automatisch ab.

Auf der anderen Seite existieren Verfahren, welche eine globale beziehungsweise absolute Fahrzeugpose relativ zu einem bekannten Koordinatensystem, wie beispielsweise einer Karte, extrahieren. Ist eine Umgebungsrepräsentation sowie die eigene Pose innerhalb dieser Umgebung bekannt, so ist es möglich, eine komplexere Planung zur Erreichung eines gewünschten Systemverhaltens durchzuführen. Der prominenteste - und einzige heute bereits in Serie befindliche - Vertreter der absoluten beziehungsweise globalen Lokalisierung ist die Fahrzeugnavigation. Hierbei erhält das Fahrzeug über einen *GPS*<sup>7</sup>-Empfänger Satellitendaten, deren Interpretation eine Lokalisierung des Fahrzeugs auf dem Globus<sup>8</sup> erlaubt. Durch Störfaktoren, wie beispielsweise Signalabschattungen in Häuserschluchten und Tunneln, sind bei heutigen Navigationssystemen Unsicherheiten bis 20 Meter [47] sowie temporäre Systemausfälle möglich. Die Genauigkeit des Verfahrens ist hierbei in der Regel dennoch ausreichend, um eine sichere und weitgehend robuste Navigation zu

---

<sup>4</sup>Adaptive Cruise Control

<sup>5</sup>Radio Detection and Ranging

<sup>6</sup>Video nur Audi, Lexus

<sup>7</sup>Global Positioning Service

<sup>8</sup>Welt- bzw. Geokoordinatensystem



## 1. Motivation

ermöglichen, da die Kernaufgabe der Fahrzeugführung, Situationsinterpretation und Berücksichtigung der eigenen Umgebung beim Fahrer verbleibt. Allein die Fahrzeugnaviga- tion beantwortet demnach als Serienausstattung heutiger Fahrzeuge die Frage der eigenen Fahrzeugpose innerhalb eines Referenzkoordinatensystems, wie in diesem Falle dem Geo- koordinatensystem, welches in der Lage ist, jede Position unserer Erde zu beschreiben und so prinzipiell eine globale Routen- und Manöverplanung zu ermöglichen.



## 1.2. Lokalisierung im Kontext des autonomen Fahrens

**Definition** „Als autonomes Fahrzeug bezeichnet man ein Fahrzeug, das frei (also ohne menschliche Unterstützung) navigiert. Derartige Fahrzeuge können mit Hilfe verschiedener Sensoren ihre Umgebung wahrnehmen und aus den gewonnenen Informationen ihre Position bestimmen, ein Ziel ansteuern und Kollisionen auf dem Weg vermeiden.“ [21]

### 1.2.1. Übersicht

In den letzten Jahren haben sich die Innovations- und Entwicklungszyklen stetig verkürzt. Immer neue Technologien halten nach immer kürzeren Entwicklungszeiten Einzug in unsere Gesellschaft und verändern diese nachhaltig. Insbesondere im Bereich der Infrastruktursysteme haben im Zuge dessen auch autonome Technologien Einzug gehalten. So sind beispielsweise bereits seit einigen Jahren autonome Untergrund- und Hochbahnen in den Städten im Einsatz [14]. Diese Entwicklung lässt sich mit einem - aufgrund einer vergleichsweise erhöhten Komplexität - zeitlichen Versatz auch auf den Bereich des Straßenverkehrs projizieren. Es ist zu erwarten, dass in einigen Jahren autonome Fahrzeuge auf den Straßen ihre Dienste verrichten und hierbei neben dem Zeit- und Komfortgewinn auf Seiten des Fahrers außerdem die Verkehrssicherheit maßgeblich erhöhen, vergleiche Kapitel 1. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über eine Auswahl wichtiger prototypischer Realisierungen auf dem Weg zum autonomen Fahren gegeben. Ein Teil der nachfolgend vorgestellten Systeme ist auf menschliche Unterstützung angewiesen und genügt daher nicht den definierten Anforderungen des autonomen Fahrens. Bei ihnen handelt es sich um hochautomatisierte Systeme. Ein System gilt als hochautomatisiert beziehungsweise teilautonom, wenn es in gewissen Geschwindigkeitsbereichen und Situationen in der Lage ist, ein Fahrzeug zu steuern, während es gleichzeitig Situationen und Geschwindigkeitsbereiche gibt, in denen der Fahrer weiterhin die Kontrolle übernehmen muss.

**Historie** Im Jahre 1977 wurde in Japan am *Tsukuba Mechanical Engineering Lab* das erste teilautonom fahrende Fahrzeug der Geschichte entwickelt. Dieses war in der Lage, einer weißen Straßenmarkierung mit bis zu 30 km/h zu folgen [56]. Neun Jahre später, 1986, hatten Professor Dickmanns und sein Forscherteam an der Universität der Bundeswehr in München (*UniBW*) ein Versuchsfahrzeug namens *VaMoRs*<sup>9</sup> entwickelt, welches mittels Verfahren des Rechnersehens in der Lage war, auf einer abgesperrten Autobahn teilau-

---

<sup>9</sup>Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen



## 1. Motivation

tonom mit einer Geschwindigkeit von bis zu 96 *km/h* zu fahren. Im Jahr 1994 hat das Team um Professor Dickmanns der *UniBW* München im Rahmen des *PROMETHEUS*<sup>10</sup>-Projekts [1] die Fahrzeuge *VaMP*<sup>11</sup> und *VITA-2* vorgestellt, welche teilautonom auf einer dreispurigen Autobahn im Verkehr eine Strecke von mehr als 1000 Kilometer mit einer Geschwindigkeit von bis zu 130 *km/h* absolvieren konnten [26].

Neben dem Halten der Spur waren die Fahrzeuge auch in der Lage, Konvoi zu fahren, Spurwechsel durchzuführen sowie zu überholen. Die zugrunde liegende Methode zur Wahrnehmung der Umgebung war auch in diesem Fall das Rechnersehen mittels Videokameras. Das gleiche Fahrzeug fuhr im Jahr 1995 teilautonom von München (Deutschland) nach Odense (Dänemark) und wieder zurück [37]. Die Höchstgeschwindigkeit lag auf dieser Fahrt bei 177 *km/h*. Im Durchschnitt alle 9 Kilometer war ein Eingriff durch den Fahrer nötig. Die längste vollständig autonom gefahrene Teilstrecke betrug bei dieser Fahrt 158 Kilometer. Etwa 95 % der Fahrt über insgesamt 1758 Kilometer wurde vollständig autonom absolviert.

Nachdem die erste *DARPA*<sup>12</sup> *Grand Challenge* im Jahr 2004 ohne Sieger blieb, gab es im Folgejahr 2005 gleich 5 der 23 teilnehmenden Teams, welche mit ihren Fahrzeugen die geforderte Aufgabe erfolgreich absolvierten. Ziel des Wettbewerbs im Jahr 2005 war eine vollständig autonome Fahrt über einen Kurs von etwa 212 Kilometer in der Mojave-Wüste in Nevada (USA) innerhalb von maximal zehn Stunden. Sieger des Wettbewerbs war das Fahrzeug *Stanley* der Stanford University, welches den Kurs in 6 Stunden, 53 Minuten und 58 Sekunden bewältigte. *Stanley* ist ein VW Touareg, welcher mit entsprechender *Drive-by-Wire*-Technik sowie einem aufwändigen Sensorset ausgestattet wurde (5 Lidar-sensoren, 1 Farbkamera und 2 Radarsensoren auf dem Fahrzeugdach; GPS-Modul und IMU<sup>13</sup>-Sensoren) [51].

Der dritte Wettbewerb der *DARPA* im Kontext autonomen Fahrens wurde 2007 unter dem Namen *Urban Challenge* in einer verlassenen Kaserne des Air-Force-Stützpunktes *George Air Force Base* in den USA ausgetragen. Im Mittelpunkt der *Urban Challenge* stand nicht mehr nur die autonome Navigation, sondern vielmehr die autonome Interaktion mit anderen Fahrzeugen in urbaner Umgebung unter Berücksichtigung der geltenden Verkehrsregeln. Ziel des Wettbewerbs war das Absolvieren eines etwa 97 Kilometer (60 Meilen) langen Parcours, welcher in drei Missionen unterteilt war. Die maximale Zeit zum Erreichen dieses Ziels lag in diesem Jahr bei sechs Stunden und Regelverstöße wur-

---

<sup>10</sup>PROgramMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety, 1987-1995

<sup>11</sup>VaMoRs Passenger Car

<sup>12</sup>Defense Advanced Research Projects Agency

<sup>13</sup>Inertial Measurement Unit





## 1.2. Lokalisierung im Kontext des autonomen Fahrens

den mit Abzügen in der Gesamtwertung bestraft. Gesamtsieger der *Urban Challenge* 2007 war das Fahrzeug *Boss* des Team *Tartan Racing* der Carnegie Mellon University (CMU). Das Siegerteam der vorherigen *DARPA Grand Challenge* konnte bei der *Urban Challenge* mit seinem Fahrzeug *Junior* den zweiten Platz belegen. Im Jahr 2009 wurde mit *Junior* unter Verwendung eines aufwändigen Sensorsets, vergleiche Kapitel 1.2.2, autonom in ein mehrstöckiges Parkhaus eingeparkt [35].

Im Jahr 2010 wurde unter der Leitung von Prof. Alberto Broggi vom *VisLab*<sup>14</sup>-Institut der Universität Parma die erste interkontinentale teilautonome Fahrt realisiert [9]. Die Route führte von Parma nach Shanghai. Für die Strecke durch neun Länder von über 15.926 Kilometern benötigten Broggi und sein Team mit ihren beiden Fahrzeugen 100 Tage. Die Umfeldwahrnehmung der Fahrzeuge wurde mittels sieben Kameras, vier Laserscannern sowie *GPS* realisiert. Seit 2009 arbeitet auch das IT-Unternehmen Google an der Vision des autonomen Fahrens. Hierzu wurden zunächst sechs Fahrzeuge des Typs Toyota Prius, ein Lexus RX 450H sowie ein Audi TT sensorisch hochgerüstet (360° Laserscanner, Radar, Kameras) [25]. Mit diesen Fahrzeugen ist Google nach eigenen Angaben - Stand Anfang 2014 - bereits mehr als 700.000 Meilen (1.100.000 km) autonom gefahren [24]. Im Mai 2014 präsentierte Google außerdem erstmals ein selbst produziertes autonomes Fahrzeug ohne Pedale und Lenkrad, welches sich autonom mit bis zu 40 *km/h* im urbanen Verkehr zurechtfindet. Auch dieses Fahrzeug ist unter anderem mit einem kostenintensiven 360°-Laserscanner auf dem Dach ausgestattet. Im Jahr 2010 wurde in einer Kooperation zwischen Bosch und der Stanford University das autonome Fahrzeug *Shelley* - ein mit Laserscanner, Kameras, Radar und *GPS* ausgerüsteter Audi TTS - vorgestellt, welches in der Lage war, selbstständig die legendäre Rennstrecke des *Pikes Peak* in Colorado, USA, mit hoher Geschwindigkeit zu absolvieren. Im Jahr 2011 wurde das autonome Fahrzeug *Leonie* der TU Braunschweig vorgestellt, welches sich autonom ohne Zwischenfälle auf dem nordöstlichen Stadtring in Braunschweig innerhalb des normalen Verkehrsgeschehens bewegen konnte [39]. Das Fahrzeug war ausgestattet mit einer kostenintensiven *iMAR iTrace GPS/INS*-Einheit zur *GPS*-basierten Lokalisierung, einem *Hella IDIS2*-Laserscanner mit 160° Öffnungswinkel zur Objektdetektion sowie jeweils einer Kamera nach vorne und hinten. Ebenfalls im Jahr 2011 wurde das Fahrzeug *MadeInGermany* der FU Berlin präsentiert, welches eine autonome Fahrt im Berliner Stadtverkehr durchgeführt hat. Das Fahrzeug war ausgestattet mit drei Laserscannern im Frontbereich, drei Radarsensoren, einem 360°-Laserscanner auf dem Dach, einem *GPS*-System, einer Mono-Frontkamera sowie einer Stereokamera hinter der Windschutzscheibe.

---

<sup>14</sup>Visualization and Intelligent Systems Laboratory

## 1. Motivation



Abbildung 1.1.: Projekt Parkhauspilot: Per Knopfdruck startet der Fahrer nach dem Aussteigen den autonomen Einparkvorgang ins Parkhaus

In den letzten Jahren arbeiten auch verstärkt Automobilhersteller an Technologien zum autonomen Fahren. Im Jahr 2013 hat Audi im Rahmen der CES<sup>15</sup> in Las Vegas neben dem *Staupilot*, welcher ein autonomes Fahren in Stausituationen bis 60 km/h beherrscht, auch den *Parkhauspilot* vorgestellt, welcher im Kontext dieser Arbeit entstanden ist, vergleiche Abbildung 1.1. Dieser ermöglicht es dem Fahrer, sein Fahrzeug außerhalb des Parkhauses zu verlassen und den autonomen Parkvorgang per Smartphone-App zu starten. Im Jahr 2013 hat Daimler mit einem teilautonomen Prototypen namens *Bertha* für Aufsehen gesorgt. Eine modifizierte S-Klasse ist hier im Rahmen einer Demonstration fast vollständig autonom eine etwa 100 km lange Strecke zwischen Pforzheim und Mannheim gefahren [20]. Selbst komplexe Stadtszenarien konnten dabei mit insgesamt nur zweimaligem menschlichen Eingriff gemeistert werden. Der Prototyp wurde hierzu sensorisch entsprechend ausgestattet, jedoch mit der Besonderheit, dass hierbei vorzugsweise seriennahe Sensorik (leistungsstärkere Stereokamera verglichen mit der Serienkamera, vier zusätzliche *Mid-Range*-Radarsensoren, zwei zusätzliche Farbkameras) zum Einsatz kam. Neben der sensorischen Ausstattung wurde außerdem in Zusammenarbeit mit Nokia sowie dem Karlsruher Institut für Technologie (*KIT*) eine hochgradig genaue, dreidimensionale Karte der zu absolvierenden Strecke angefertigt. Die geometrische Karte wurde zusätzlich um topologische Informationen wie Position und Art von Schildern, Ampeln und Straßenverläufen angereichert [20].

---

<sup>15</sup>Consumer Electronics Show