
Kapitel 1

Einleitung

Automatisiertes Fahren hat das Potential, die Mobilität der Zukunft äußerst sicher, komfortabel und effizient zu gestalten. Erste prototypische Systeme übernehmen bereits in speziellen Situationen, wie etwa auf der Autobahn oder im Parkhaus ohne Mischverkehr, die Fahraufgabe komplett. Diese Systeme sind bisher jedoch auf Situationen in stark strukturierter Umgebung und mit begrenzten Umgebungsvariablen beschränkt. Zukünftig sollen auch im städtischen Umfeld automatisierte Fahrfunktionen realisiert werden.

1.1 Motivation

Im städtischen Umfeld besteht im Vergleich zu den bereits beherrschbaren Szenarien eine deutlich komplexere Verkehrssituation. Diese ist geprägt durch eine Vielzahl an Umgebungsvariablen und ein hohes Interaktionslevel zwischen den Verkehrsteilnehmern. Entgegen heutiger technischer Systeme, ist der menschliche Fahrer sehr gut in der Lage, sich auch in solchen komplexen Situationen seiner Umgebung zutreffend bewusst zu sein und, vor dem Hintergrund des eigenen Ziels, Entscheidungen für ein sicheres und effizientes Handeln zu treffen (Anthony, 2016). Ein Ansatz, um zukünftig auch in komplexen Situationen wie dem städtischen Umfeld automatisiert fahren zu können, ist somit die Übertragung der kognitiven Fähigkeiten des Menschen zum Situationsbewusstsein auf ein Fahrzeugsystem. In Kombination mit einem angemessenen

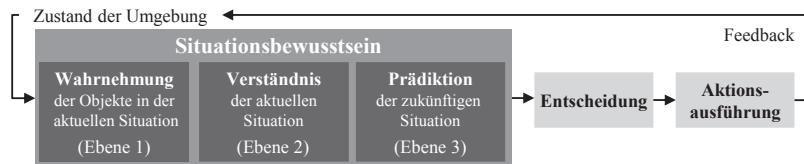


Abbildung 1.1: Vereinfachte Darstellung des Modells zum Situationsbewusstsein von Endsley (1995).

Interaktionskonzept ermöglicht ein entsprechend entwickeltes technisches Situationsbewusstsein zukünftigen automatisierten Fahrzeugen die Generierung menschenähnlichen Verhaltens, das konform den Erwartungen aller menschlichen Teilnehmer ist. Hierdurch wird ein hinreichend konfliktfreier Ablauf des Straßenverkehrs sowie ein hohes Komfortlevel der Passagiere gewährleistet (Schneemann und Gohl, 2016).

Entsprechend dem Modell von Endsley (1995) muss das automatisierte Fahrzeug zur Bildung eines Situationsbewusstseins drei Ebenen durchlaufen (s. Abb. 1.1). Die erste Ebene beschreibt die Wahrnehmung aller Objekte und Elemente der aktuellen Situation innerhalb einer dynamischen Umgebung. Auf der zweiten Ebene wird das Verständnis für die aktuelle Situation gewonnen, indem die wahrgenommenen Objekte miteinander in Bezug gesetzt und mit angeeignetem Wissen verknüpft werden. Ebene drei beschreibt schließlich die Prädiktion der zukünftigen Situation auf Basis der in den vorherigen Ebenen gewonnenen Informationen sowie des Wissens über die mögliche Dynamik der identifizierten Elemente. Das so gebildete Situationsbewusstsein bildet die Grundlage für die anschließende Entscheidungsfindung bezüglich des eigenen Handelns, welche schließlich zur Ausführung entsprechender Aktionen führt. Diese Aktionen nehmen wiederum Einfluss auf den Zustand der dynamischen Umgebung.

Vor dem Hintergrund der Entwicklung aktiver Komfort- und Sicherheitsfunktionen im Bereich der Fahrerassistenzsysteme (FAS) gibt es bezüglich der Abbildung des menschlichen Situationsbewusstseins bereits Erfolge bei der Detektion anderer Objekte mittels fahrzeugeigener Sensorik (Ebene 1), sowie bei der kurzzeitigen Prädiktion der Objektposition (Ebene 3) (s. Abb. 1.2, obere Zeile). Auf Basis dieser Prädiktion werden gemeinhin über die Time-to-Collision (TTC) (Lee, 1976) potentielle Kol-

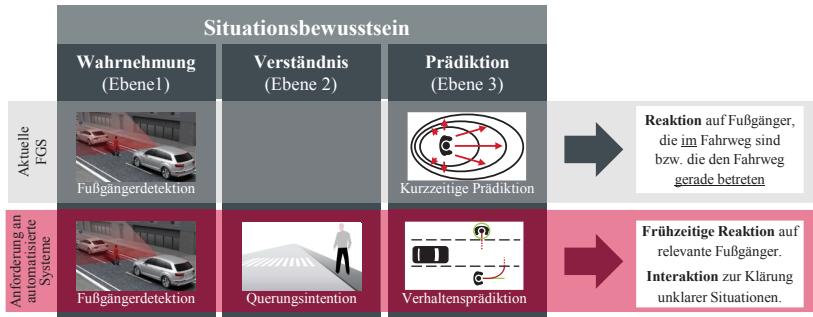


Abbildung 1.2: Vergleich des Situationsbewusstseins aktueller Fahrerassistenzsysteme (FAS) mit den Anforderungen an zukünftige automatisierte Systemen am Beispiel aktueller Fußgängerschutzsysteme (FGS).

lisionsrisiken mit den anderen Verkehrsteilnehmern erkannt, um daraufhin geeignete Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung, wie eine Fahrerwarnung oder eine automatische Notbremsung, einzuleiten (Winner et al., 2015). Die bisher zur Prädiktion der Objektpositionen verwendeten Modelle basieren auf den physikalischen Zusammenhängen zwischen den kinematischen Größen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung (Scherf und Zecha, 2009). Dadurch können die zukünftigen Zustände der detektierten Objekte nur durch eine, auf der theoretischen Dynamik der Verkehrsteilnehmer basierenden, Extrapolation des aktuellen Bewegungszustands prädiziert werden. Dieses resultiert in kurzen Vorhersagehorizonten, da die Prädiktionsunsicherheit mit steigenden Zeithorizonten schnell über ein vertretbares Niveau ansteigt (Rehder et al., 2015). Der Handlungsspielraum aktueller FAS ist deswegen auf ein rein reaktives Verhalten begrenzt, was für ein automatisiertes Fahrzeug nicht ausreichend ist. Eine allein auf physikalischen Dynamikparametern basierende Prädiktion genügt daher nicht, um für das automatisierte Fahren in hochdynamischen Bereichen, wie dem städtischen Umfeld, ein akzeptables Fahrverhalten zu generieren.

Abhilfe kann eine auf der Ebene 2 einzuordnende Erkennung der Intention der anderen Verkehrsteilnehmer schaffen (s. Abb. 1.2, untere Zeile). Die Intention wird in der philosophischen Handlungstheorie als Ursache menschlicher Handlung betrachtet

(s. Abschn. 2.1). Ihre Erkennung ermöglicht somit die Prädiktion der zukünftigen Situation (Ebene 3) anhand der zu erwartenden Handlung und den dazu durchzuführenden Aktionen. Zudem kann bei der Prädiktion die wechselseitige Beeinflussung des Handelns der Verkehrsteilnehmer berücksichtigt werden. Im Vergleich zur Verwendung rein physikalischer Bewegungsmodelle können so deutlich längere Prädiktionshorizonte erreicht und der Einfluss des eigenen geplanten Verhaltens auf die anderen Verkehrsteilnehmer einbezogen werden.

Im Gegensatz zu den in bisherigen Fahrerassistenzsystemen verwendeten kinematischen Größen ist die Intention jedoch kein quantitativer Parameter, der direkt über eine Sensormessung erfasst werden kann. Dieses stellt die Entwicklung eines technischen Systems zur Intentionserkennung vor neue Herausforderungen: Die Intention muss im Rahmen einer Operationalisierung zunächst beobachtbar und messbar gemacht werden. Dazu bedarf es eines Modells, das die Erkennung der Intention auf Basis beobachtbarer Größen zulässt. Zudem fordert die nicht direkte Messbarkeit der Intention neue Ansätze zur Referenzbestimmung. Eine besondere Herausforderung bei der Operationalisierung bilden schließlich die Unsicherheiten, mit denen Hypothesen zur Intention der anderen Verkehrsteilnehmer vermutlich behaftet sind. Denn selbst ein menschlicher Fahrer ist sich bei der Einschätzung des Gefahrenpotentials anderer Verkehrsteilnehmer nicht immer sicher (Tsimhoni et al., 2008) und sagt deren zukünftiges Verhalten mitunter falsch vorher (Schmidt et al., 2008; Vollrath et al., 2006). Dennoch ist ein aufmerksamer und erfahrener Fahrer eher selten in kritische Situationen mit anderen Verkehrsteilnehmern involviert (OECD/ITF, 2015), da er sein Fahrverhalten an die Unsicherheit der Situation anpasst (Schneemann und Gohl, 2016).

Im Vergleich zur Vorhersage des Bewegungsverhalten anderer Fahrzeuge oder Radfahrer bildet die Verhaltensvorhersage von Fußgängern eine besondere Herausforderung. Fußgänger können ihre Bewegungszustände sehr dynamisch ändern (Rehder et al., 2015), wodurch die auf Basis kinematischer Parameter erreichbaren Prädiktionshorizonte auf einige Zehntelsekunden begrenzt sind (Kloeden et al., 2014). Aktuelle Fußgängerschutzsysteme (FGS) sind daher nur in der Lage auf Fußgänger zu reagieren, die den Verkehrsraum des Fahrzeugs bereits betreten haben oder gerade dabei sind, dieses zu tun. Daher verspricht vor allem bei Fußgängern die Erkennung der Intention

eine deutliche Verbesserung der Prädiktionsgüte und bildet somit einen wesentlichen Baustein bei der technischen Abbildung des menschlichen Situationsbewusstseins. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an.

Im Hinblick auf das automatisierte Fahren sind für das Fahrzeug nur Verhaltensweisen des Fußgängers relevant, die eine Anpassung des eigenen Fahrverhaltens fordern. Da die Verkehrsräume von Fußgängern und Fahrzeugen in der Regel getrennt sind¹, kann die Erkennung der Fußgängerintention daher auf die Erkennung seiner Absicht, den Fahrstreifen queren zu wollen, beschränkt werden. Diese Absicht wird im Folgenden als Querungsintention (QI) bezeichnet. Eine Klassifikation der Fußgänger in solche mit und solche ohne Querungsintention ermöglicht einem automatisierten Fahrzeug somit die frühzeitige Identifikation der Fußgänger, deren zukünftige intendierte Handlungen für die eigene Verhaltensplanung relevant sind. Hierdurch ist das automatisierte Fahrzeug nicht nur in der Lage frühzeitig auf querungswillige Fußgänger zu reagieren; es kann zudem mit diesen in Interaktion treten, um beispielsweise unklare Situationen zu lösen, indem es durch die eigenen Verhaltensweisen, das Verhalten des querungswilligen Fußgängers positiv beeinflusst (Schneemann und Gohl, 2016). Im Vergleich zu einer reinen Aktionserkennung, wie dem Betreten der Straße durch den Fußgänger (s. Abschn. 2.3), bietet diese Intentionserkennung somit einen deutlichen Mehrwert für die Gestaltung des Verhaltens zukünftiger automatisierter Fahrzeuge.

¹Ausnahmen bilden verkehrsberuhigte Bereiche und Shared Spaces (Bad architects group, 2012), bei denen die gesamte Verkehrsfläche von Fahrzeugen und Fußgängern gleichermaßen genutzt werden darf.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines technischen Systems zur Erkennung der Querungsintention von Fußgängern. Die vorliegende Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Übertragung des menschlichen Situationsbewusstseins auf ein technisches System und bildet eine Basis für das automatisierte Fahren im städtischen Umfeld. Im Rahmen der Entwicklung des Systems werden zunächst bestehende Modelle zur menschlichen Intention vorgestellt und auf Ihre Anwendbarkeit in einem technischen System zur Intentionserkennung analysiert. Der aus dieser Analyse basierende Systementwurf wird auf bereits vorhandenem Wissen über das beobachtbare Verhalten von Fußgängern zurückgreifen, dessen Ausprägung im Rahmen der Implementierung anhand von Beispielen erlernt wird. Hierzu werden Methoden des maschinellen Lernens angewendet, über die die menschliche Einschätzung einer Situation möglichst genau nachgebildet wird. Das zu entwickelnde System muss dabei auch die bei der Erkennung der Querungsintention potentiell bestehenden Unsicherheiten in der Beobachtung abbilden können.

Damit automatisierte Fahrzeuge unabhängig vom Ausbau infrastrukturseitiger Sensorik zukünftig in allen Bereichen des städtischen Umfelds agieren können, soll das zu entwickelnde System mit fahrzeugeigener Sensorik arbeiten. Vor dem Hintergrund kultureller Einflüsse auf das Fußgängerverhalten, beschränkt sich das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte System auf die Anwendung im deutschen Verkehrsraum. Die für das System notwendige Bestimmung physikalisch messbarer Größen, wie die Position und Körperorientierung der Fußgänger, sowie die Position von Fahrstreifenbegrenzungen werden in dieser Arbeit als gelöstes Problem betrachtet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert ist in die folgenden Themenbereiche gegliedert: Kapitel 2 gibt einen Überblick über den Hintergrund der Fußgängerintentionserkennung mit Definitionen und Modellen zur menschlichen Intention, Studien zu beobachtbarem Fußgängerverhalten und bereits bekannten Ansätzen zur Erkennung der Fußgängerintention. Kapitel 3 erläutert den zum Verständnis des eigenen Ansatzes er-

forderlichen Hintergrund aus dem Bereich des maschinellen Lernens. Kapitel 4 befasst sich mit der in dieser Arbeit entwickelten, beobachterbasierten Referenzmethode und geht auf die Reliabilität dieser ein. In Kapitel 5 wird das Konzept des zur Erkennung der Querungsintention von Fußgängern entwickelten, eigenen Ansatzes vorgestellt und auf Details der Implementierung eingegangen. Kapitel 6 stellt den zur Evaluation verwendeten Datensatz vor und zeigt die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems, indem die durchgeführte Evaluation des neuen Ansatzes sowie die erreichten Ergebnisse dargestellt und im Detail diskutiert werden. Kapitel 7 fasst die Ergebnisse schließlich zusammen, zieht Schlussfolgerungen und gibt einen Ausblick für zukünftige Arbeiten.

Kapitel 2

Hintergrund der Fußgängerintentionserkennung

Die Erkennung von Fußgängerintentionen ist ein junges, aufstrebendes Forschungsfeld im Bereich der Verhaltenserkenntnis und -prädiktion. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Hintergründen und dem Stand der Technik zu diesem Thema. In Abschnitt 2.1 werden hierzu allgemein der Begriff „Intention“ erläutert und bestehende Modelle aus dem Bereich der Handlungstheorie vorgestellt. In Abschnitt 2.2 werden anschließend Erkenntnisse über das Verhalten von Fußgängern beschrieben, die für den Entwurf eines technischen Systems zur Intentionserkennung relevant sind. Abschnitt 2.3 beschäftigt sich mit bisher bekannten Systemen zur Fußgängerverhaltenserkenntnis und -prädiktion und stellt in diesem Rahmen das bisherige Verständnis des Begriffs „Fußgängerintention“ vor. Abschnitt 2.4 geht anschließend auf bekannte Referenzmethoden zur Bestimmung der Leistung von intentionserkennenden Systemen ein. Da sich die Bewertung des Vorgestellten auf das gesamte Forschungsfeld stützt, erfolgt diese unter dem Ziel, bestehende Forschungsdefizite in Bezug auf die Entwicklung eines Systems zur Erkennung der Querungsintention von Fußgängern aufzudecken, gesamtheitlich in Abschnitt 2.5.

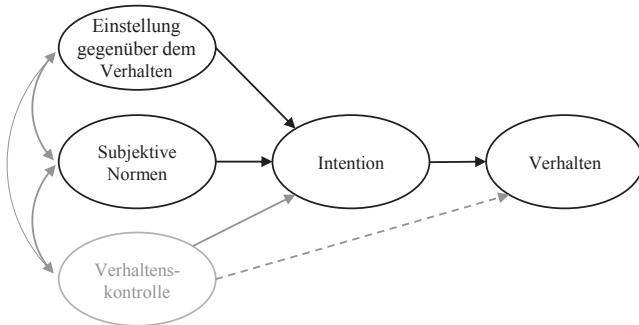


Abbildung 2.1: Die Theorie des überlegten Handelns (schwarz) von Fishbein und Ajzen (1975) und die Erweiterung zur Theorie des geplanten Verhaltens (grau) von Ajzen (1985).

2.1 Definitionen und Modelle der Intention

Der Begriff „Intention“ findet seinen Wortursprung im lateinischen *intendere* (= sein Streben/seine Aufmerksamkeit auf etwas richten) und beschreibt die Absicht eine bestimmte Handlung durchzuführen bzw. ein bestimmtes Ziel zu erreichen (Puca, 2014). Die Intention ist als ein kognitiver, nicht von außen beobachtbarer Zustand oder Prozess zu verstehen (Diederichs, 2017) und wird in der philosophischen Handlungstheorie als Ursache menschlicher Handlung betrachtet (Anscombe, 1957; Davidson, 1963).

2.1.1 Handlungstheoretische Modelle der Intention

Die Kausalität zwischen Intention und Handeln findet sich in der häufig zur Verhaltensvorhersage verwendeten **Theorie des überlegten Handelns** (*Theory of Reasoned Action*) von Fishbein und Ajzen (1975) wieder. Der Theorie zufolge werden Handlungen direkt von Intentionen gesteuert, wobei die Intentionen wiederum aus einer positiven Einstellung gegenüber der Handlung, sowie einer als subjektive Norm bezeichneten, positiv wahrgenommenen Einstellung relevanter anderer Personen bezüglich der Ausführung des Verhaltens entstehen (s. Abb. 2.1). Die Erweiterung der