



Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Bachelorthesis

**im Studiengang Sicherheitstechnik
beim Fachgebiet Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit**

**zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science**

Thema: Dynamische Sicherheitsanalyse einer Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage für automatisierte Fahrzeuge mittels Simulation eines Regelkreismodells

Autor: Tim M. Julitz
MatNr. 1540160

Bearbeitungszeitraum: 07.06.2018 bis 10.09.2018

Betreuer: Jun.-Prof. Dr. Antoine Tordeux

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist am Lehrstuhl für Verkehrssicherheit und Zuverlässigkeit der Bergischen Universität Wuppertal entstanden. Mein Dank gilt Professor Tordeux, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit unter seiner Betreuung anzufertigen. Des Weiteren möchte ich mich für die tatkräftige Unterstützung und die hervorragende Betreuung bedanken.

Für die Simulationen wird die Open Source Software NetLogo verwendet, welche unter der gleichnamigen Programmiersprache betrieben wird, ein Derivat der Programmiersprache Logo. Sie ist unter <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> frei erhältlich. NetLogo ist eine Multi-Agenten-Programmiersprache mit integrierter Modellierungsumgebung, die v.a. zur Modellierung komplexer Systeme über einen Zeitverlauf geeignet ist.



Wer am Verkehr teilnimmt hat sich so zu verhalten, dass kein Anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird (§ 1 Abs. 2 StVO) [1].

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	v
1 Potential des autonomen Fahrens und die Bedeutung von dynamischen Sicherheitsanalysen	1
2 Grundlegende Theorien für Fahrzeugfolgemodelle	5
2.1 Einführung in das automatisierte Fahren	5
2.1.1 Automatisierungsgrade	5
2.1.2 Unterscheidung von automatisierten und autonomen Fahren . .	6
2.1.3 Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge	7
2.1.4 Die wichtigsten Variablen der Verkehrsflusstheorie	7
2.1.4.1 Mikroskopische Variablen	7
2.1.4.2 Makroskopische Variablen	9
2.1.5 Das Fluss-Dichte-Diagramm	9
2.1.6 Trajektorien	11
2.1.7 Stop-and-Go-Wellen	12
2.1.8 Typen von Fahrzeugfolgemodellen	12
2.2 Sicherheit beim automatisierten Fahren	13
2.2.1 Abgrenzung der grundlegenden Begriffe der Sicherheitswissen- schaft	13
2.2.2 Unfallvermeidung durch Automatisierung und der menschliche Einfluss	16
2.3 Hintergrund der modellbasierten Sicherheitsanalyse	18
2.3.1 Gründe für den Einsatz von Modellen	18
2.3.2 Modellbildung mithilfe des V-Modells	18
2.4 Regelungstechnik für Fahrzeugfolgemodelle	20
2.4.1 Grundbegriffe und der Regelkreis	20
2.4.2 Dynamisches und statisches Verhalten von Systemen	21
2.4.3 Lineare und nichtlineare Systeme	22
2.4.4 Delay-Differentialgleichungen und Totzeit	23
2.4.5 Stabilität von Regelkreisen	23
2.4.6 Anti-Windup	25
3 Dynamische Sicherheitsanalyse des Adaptive-Time-Gap-Modells	27
3.1 Vorstellung gängiger Fahrzeugfolgemodelle	27
3.1.1 Pipes-Modell	27
3.1.2 Optimal-Velocity-Modell	27
3.1.3 Full-Velocity-Difference-Modell	29
3.1.4 Adaptive-Time-Gap-Modell	29
3.1.5 Übersicht weiterer Fahrzeugfolgemodelle	32

3.2	Anforderungen an das Fahrzeugfolgemodell	33
3.2.1	Allgemeines	33
3.2.2	Abstände	34
3.2.3	Geschwindigkeit	34
3.2.4	Beschleunigung	35
3.2.5	Stabilität	36
3.2.6	Reaktionszeit	37
3.2.7	Zusammenfassung der Anforderungen	37
3.3	Simulation	38
3.3.1	Gegenstände der Simulation: Parameter und Variablen des Adaptive-Time-Gap-Modells	38
3.3.2	Regelziele hinsichtlich der Maximierung des Verkehrsflusses . .	39
3.3.3	Verhalten des Modells bei verschiedenen Geschwindigkeiten . .	41
3.3.3.1	Simulation mit niedriger Geschwindigkeit	41
3.3.3.2	Simulation mit hoher Geschwindigkeit	43
3.3.4	Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für hohe Geschwindigkeiten	48
3.3.4.1	Identifikation der Minimalabstände für die Erfüllung der Beschleunigungsanforderungen	48
3.3.4.2	Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen	51
3.3.4.3	Wirksamkeitsüberprüfung und Anwendungsbereich des Sicherheitskonzepts	53
4	Herausforderungen in der Entwicklung des Adaptive-Time-Gap-Modells bis zur Markteinführung	57
	Literaturverzeichnis	61
	Abkürzungsverzeichnis	66
	Bilderverzeichnis	69
	Tabellenverzeichnis	71
	Eidesstattliche Erklärung	72

1 Potential des autonomen Fahrens und die Bedeutung von dynamischen Sicherheitsanalysen

Die Zukunft des Fahrens ist autonom. In absehbarer Zeit werden immer mehr autonome bzw. automatisierte Fahrzeuge auf den öffentlichen Straßen unterwegs sein. Das Unternehmen Tesla zeigt, dass bereits heute automatisiertes Fahren unter bestimmten Bedingungen sicher funktioniert. Aber auch hierzulande belegen Projekte von Automobilherstellern und -zulieferern diese Entwicklung. Zu nennen sind hierbei das Projekt „Future Truck 2025“ von Daimler [2], Teststrecken für autonome Fahrzeuge im schwedischen Gothenburg von Volvo [3] und in Wuppertal von Delphi (heute Aptiv) [4], sowie Förderbescheide für Forschungsprojekte des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) [5]. Automobilzulieferer kündigen bereits für 2019 voll automatisierte Fahrzeugsysteme an, während die Automobilhersteller konservativer, eine Einführung von Stufe 4 Systemen (Kapitel 2.1.1), bis 2021 prognostizieren [6]. In allen Fällen bietet der Wandel in der Automobilbranche große Chancen, aber auch Risiken in Belangen der Wettbewerbsfähigkeit, die es durch Qualifizierung von Personal, sowie kontinuierliche Forschung und Entwicklung zu überwinden gilt, wozu natürlich auch diese Arbeit beiträgt [6]. Mit zunehmender Automatisierung geht nicht nur zunehmender Komfort einher. Automatisiertes Fahren steigert die Effizienz des Verkehrs durch Verkehrsflussoptimierung, trägt zum Umweltschutz durch Reduzierung der Abgas Emissionen bei und vor allem bringt automatisiertes Fahren Sicherheit [7]. Dieses Sicherheitspotential ist aber auch gleichzeitig ein Angriffspunkt. Denn die Sicherheit des automatisierten Fahrens ist ersteinmal nachzuweisen. Eine repräsentative Studie zeigt, dass 68 % der Befragten Angst vor technischen Problemen haben, die zu Unfällen führen könnten [8].

Ziel dieser Arbeit ist es, die Sicherheit einer Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage (AuG) für automatisierte Fahrzeuge (auch Abstandsregeltempomat genannt) nachzuweisen, welche mit dem Adaptive-Time-Gap-Fahrzeugfolgemodell betrieben wird. International hat sich der Ausdruck Adaptive Cruise Control (ACC) etabliert. Die longitudinale Bewegungsplanung einer AuG ist ein zentraler Aspekt des automatisierten Fahrens. Mit der Einführung in den 1990er Jahren stellte die AuG eine der ersten Bemühungen zur automatisierten longitudinalen Bewegungsplanung dar [7]. Viele nachfolgende Fahrerassistenzsysteme (FAS) waren Erweiterungen dieser AuG, welche um

die Querführung und die Verbesserung der Sensorik ergänzt wurden. Die Sicherheitsanalyse dieser Arbeit kann deshalb als Grundlage für Sicherheitsanalysen des automatisierten Fahrens angesehen werden und mit entsprechenden Anpassungen auch für weiterführende Fahrfunktionen angewendet werden. Aktuelle Sicherheitsanalysen der Automobilhersteller basieren hauptsächlich auf statischen Verfahren, wie der ISO 26262, welche für Bewertung von hoch automatisierten Fahrfunktionen nicht mehr geeignet ist und deswegen auch angepasst wird [9]. Automation ist abhängig von der Zeit. Deswegen benötigt eine Analyse der Sicherheit dynamische Verfahren. In dieser Arbeit wird die Sicherheit der AuG dynamisch, mithilfe von Simulationen eines Regelkreismodells analysiert. Viele bisherige Umsetzungen von AuG's basieren auf linearen Modellen, die die Realität nur vereinfacht beschreiben. Mit der Verwendung des Adaptive-Time-Gap-Modells verfolgt diese Arbeit einen nichtlinearen Ansatz. Folgende **Forschungsfragen** werden untersucht:

- Wie muss das Fahrzeugfolgemodell kalibriert werden und unter welchen Umgebungsbedingungen wird Sicherheit und Komfort gewährleistet?
- Welche Forderungen bzw. Regelziele müssen an das System gestellt werden, um Sicherheit und Komfort zu gewährleisten?
- Besitzt das Fahrzeugfolgemodell alle notwendigen Parameter, um Sicherheits- und Komfortaspekte beurteilen zu können? Müssen noch weitere Parameter implementiert werden?
- Inwiefern kann der Verkehrsfluss neben der sonstigen Anforderungserfüllung optimiert werden?
- Welche Maßnahmen müssen ergriffen werden, um die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Komfort und Verkehrsflussoptimierung zu erfüllen?

Um diesen Fragen nachzugehen werden in **Kapitel 2** zunächst Grundlagen über das Thema vermittelt, um ein Verständnis für die Nachfolgenden Ausführungen zu sichern. **Kapitel 3** ist der Sicherheitsanalyse gewidmet. Anfänglich wird ein Überblick über den Stand der Technik der longitudinalen Fahrzeugfolgemodelle gegeben, indem einige wichtige Vertreter erläutert werden. Es ist zu beachten, dass wirklich nur auf die longitudinalen Modelle eingegangen wird. Modelle der Querführung sind bereits etabliert, aber nicht Gegenstand dieser Arbeit. Am Ende dieses Abschnitts wird das Adaptive-Time-Gap-Modell ausführlich besprochen. Eine gute Sicherheitsanalyse basiert auf Anforderungen, die anschließend gemäß des V-Modells nach VDA definiert werden. Die Anforderungen werden so gewählt, dass sie eine Beantwortung der Forschungsfragen zulassen. Auf dessen Grundlage wird das Modell mithilfe von Simulationen analysiert. So werden Sicherheitsdefizite, sowie Mängel im Komfort festgestellt. Werden De-

fizite (bzw. Sicherheitsrisiken) aufgedeckt, so werden daran anknüpfend Maßnahmen entwickelt, die eine Anforderungskonformität des Modells gewährleisten, wodurch die auftretenden Risiken auf ein akzeptables Niveau gesenkt werden. Die Definition von Maßnahmen in Sicherheitskonzepten verlangt immer eine Wirksamkeitsüberprüfung, die auch hier ihre Anwendung finden wird. In **Kapitel 4** werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick darüber gegeben, welche Anstrengungen noch unternommen werden müssen, bis die AuG im realen Straßenverkehr eingesetzt werden kann.

2 Grundlegende Theorien für Fahrzeugfolgemodelle

2.1 Einführung in das automatisierte Fahren

2.1.1 Automatisierungsgrade

Automatisierte Fahrfunktionen können in verschiedene Automatisierungsgrade eingeteilt werden. Für diese Arbeit wird die Definition des Verbands der Automobilindustrie (VDA) herangezogen, welche in Bild 2.1 zu sehen ist.

Fahrer		Automatisierungsgrad der Funktion			
STUFE 0	STUFE 1	STUFE 2	STUFE 3	STUFE 4	STUFE 5
DRIVER ONLY	ASSISTIERT	TEIL-AUTOMATISIERT	HOCH-AUTOMATISIERT	VOLL-AUTOMATISIERT	FAHRERLOS
Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querführung aus.	Fahrer führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus.	Fahrer muss das System dauerhaft überwachen.	Fahrer muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen. Er muss in der Lage sein, zu übernehmen.	Kein Fahrer erforderlich im spezifischen Anwendungsfall.	Von „Start“ bis „Ziel“ ist kein Fahrer erforderlich.
Kein eingreifendes Fahrzeugsystem aktiv.	System übernimmt die jeweils andere Funktion.	System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall*.	System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf.	System kann im spezifischen Anwendungsfall* alle Situationen automatisch bewältigen.	Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen.

* Anwendungsfälle beinhalten Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen

Bild 2.1: Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens nach VDA. In Anlehnung an [7]

Der VDA sieht fünf Automatisierungsgrade vor, wobei der nullte Grad den Betrieb ohne Automatisierung beschreibt. Die Kurve verdeutlicht den Umfang der Automatisierung. Der Anteil des Fahrers beim Fahren ist grau hinterlegt, während der Anteil der Automatisierung blau gekennzeichnet ist. Der größte Anstieg der Automatisierung liegt zwischen Stufe drei und vier. **Anwendungsfälle** beinhalten Straßentypen, Geschwindigkeitsbereiche und Umfeldbedingungen. Ein ACC System ist bspw. aktuell nur für den Autobahnbetrieb ausgelegt und funktioniert erst ab 30 km/h; eine Anforderung an das Umfeld ist die Einhaltung eines minimalen Kurvenradius [10]; sowie Wetterverhältnisse, die die Sicht der Sensoren behindern können.

2.1.2 Unterscheidung von automatisierten und autonomen Fahren

Automatisiertes Fahren ist nicht gleich autonomes Fahren. Ein Automat ist ein System, dessen Verhalten durch vorgegebene Eingangs- und Ausgangsgrößen mit Hilfe von Reglern gebildet wird [11]. Die Größen werden einem Soll- Istwert Vergleich unterzogen, wie er auch bei der betrachteten AuG durchgeführt wird. Dabei handelt es sich um den Vergleich der Soll und Ist Geschwindigkeit und des Abstands. **Die AuG ist ein Automat.** Automatisierte Fahrfunktionen unterstützen den Fahrer. Er muss dauerhaft anwesend sein und ist als Sicherheitsfaktor eingeplant [12]. Ein großer Sprung liegt zwischen Automatisierung und Vollautomatisierung. Anschaulich ist das in Bild 2.1 zu erkennen. Die Steigung der Automatisierungskurve ist zwischen Stufe drei und vier am größten. Hier wird auf den Sicherheitsfaktor Fahrer verzichtet. Dennoch muss er anwesend sein, um vor dem Verlassen des Anwendungsfalls übernehmen zu können.

Das **autonome Fahren** erfordert keinen Eingriff eines Menschen. Anforderungen an einen Anwendungsbereich bestehen nicht mehr. Mit diesem fünften Automatisierungsgrad ist fahrerloses Fahren von Start bis Ziel möglich (vgl. Bild 2.1). Der Autonomiebegriff umfasst neben der **fehlenden Kontrolle** (durch einen Fahrer) einen weiteren Aspekt, den der **Selbstregulation** [13]. Automatisierte Funktionen werden v.a. durch Regelkreismodelle geregelt. Um die Fähigkeiten eines Menschen voll umfänglich ersetzen zu können, werden die Modelle mit Lernalgorithmen ergänzt. Das System erkennt Anwendungsfälle bzw. Fahrsituation eigenständig und optimiert dementsprechend die Regelparameter [14]. Es handelt sich um eine Selbstregulation. Die Verwendung von in der Situation generierten Daten, z.B. durch Sensoren und Kameras ist dabei elementar wichtig, um nicht zurück in das Problem der Anwendungsfälle zu fallen [14]. Nach der Bewältigung einer Fahrsituation werden die Parameter so angepasst, dass ein wiederholter Durchlauf optimierter abläuft (Verstärkungslernen, engl. reinforcement learning). Ein System wird als autonom bezeichnet, wenn **beide** Indikatoren

vorliegen: Das fehlen einer Kontrollinstanz und das Vorhandensein einer Selbstregulation [13].

2.1.3 Funktionale Architektur autonomer Fahrzeuge

Klassischerweise sind autonome Fahrzeugsysteme nach einem dreigliedrigen Muster geteilt [15]:

1. **Wahrnehmung:** Erkennung des Umfelds über Sensoren und Kameras, Vehicle to Vehicle (V2V) und Vehicle to Infrastructure (V2I) Kommunikation, Interpretation der Daten mittels Machine Learning (künstlicher Intelligenz)
2. **Bewegungsplanung:** Berechnung einer kollisionsfreien Trajektorie, Manöverplanung, Routenplanung
3. **Ausführung:** Kontrolle des Fahrzeugs, Ansteuerung bzw. Regelung der Aktoren

Bei ACC Systemen besteht die Wahrnehmung aus der Messung von Abständen und Geschwindigkeiten. Genauer müssen die Abstände und Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den vorausfahrenden und folgenden Fahrzeugen ermittelt werden. Die Bewegungsplanung reduziert sich auf die longitudinale Bewegungsplanung. Die Routenplanung fällt ebenfalls heraus. Fahrzeugfolgemodelle liefern die Grundlage für die Berechnung der Trajektorien (Kapitel 3.1). Für die Ausführung spielt wegen der Reduzierung auf die Längsführung nur das Bremsen und Beschleunigen eine Rolle.

2.1.4 Die wichtigsten Variablen der Verkehrsflusstheorie

2.1.4.1 Mikroskopische Variablen

Mikroskopische Variablen werden an einem festen Straßenquerschnitt gemessen [16]. Sie liefern Informationen über einzelne Fahrzeuge (Agenten), wie Positionen, Abstände und Bewegungen. In Bild 2.2 sind die räumlichen Abstands-Variablen veranschaulicht.

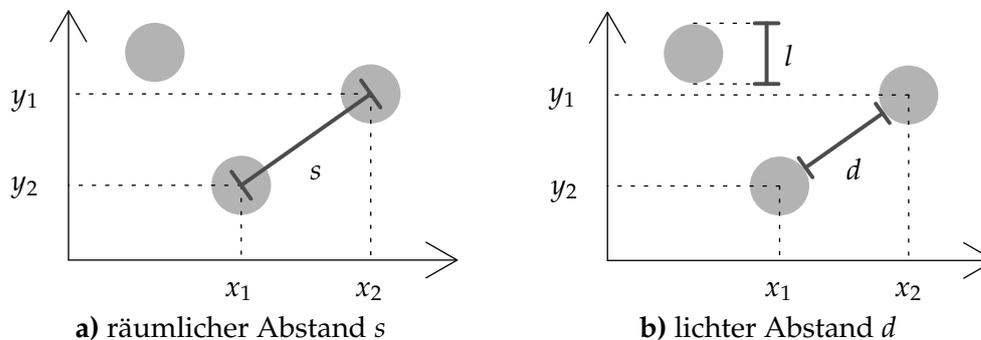


Bild 2.2: Räumliche Abstände zwischen zwei Fahrzeugen mit der Fahrzeuglänge l

Die Kreise stellen die einzelnen Agenten dar, welche mit einem Koordinatensystem mit einer x und y Koordinate lokalisiert werden. Der **räumliche Abstand** beschreibt den Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier Agenten und berechnet sich wie folgt.

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.1)$$

Der **lichte Abstand** ist die Entfernung zwischen Heck und Stoßstange, wobei l die Fahrzeuglänge ist.

$$d = s - l \quad (2.2)$$

Neben den in Längeneinheiten (z.B. Metern) gemessenen Abständen, werden Abstände auch nach dem zeitlichen Unterschied zweier Fahrzeuge beschrieben (Bild 2.3).

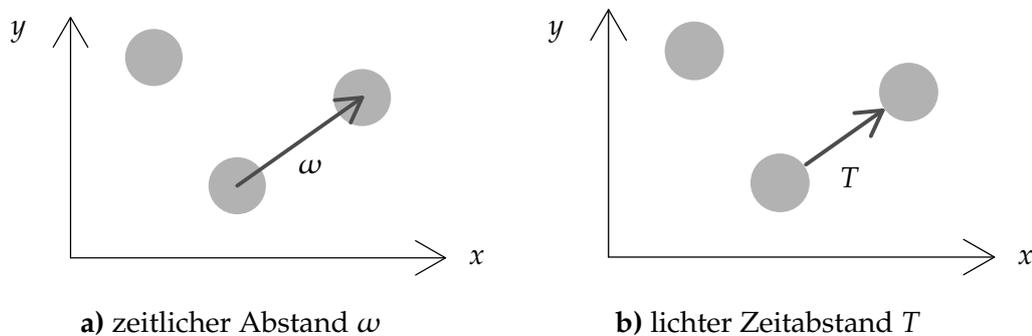


Bild 2.3: Zeitliche Abstände zwischen zwei Fahrzeugen

Bleibt das vorausfahrende Fahrzeug schlagartig stehen, so ist der **zeitliche Abstand** die Zeit, welche der Mittelpunkt des folgenden Fahrzeug braucht, um den Mittelpunkt des vorausfahrenden Fahrzeug einzuholen.

$$\omega = \frac{s}{v} \quad (2.3)$$

Der **lichte Zeitabstand** beschreibt die gleiche Situation, wie der zeitliche Abstand mit dem Unterschied, dass die Zeit von der Einholung der Stoßstange zum Heck genommen wird.

$$T = \frac{d}{v} \quad (2.4)$$

Dabei ist v die **Geschwindigkeit**, welche zusammen mit der **Position** x und der **Beschleunigung** a mit Hilfe von Induktionsschleifen o.ä. auf der Straße gemessen werden kann [16]. Diese Variablen beschreiben die zeitliche Änderung einer Bewegung. Es gilt folgende Beziehung:

$$\ddot{x} = \dot{v} = a \quad (2.5)$$

2.1.4.2 Makroskopische Variablen

Makroskopische Variablen lassen Rückschlüsse auf den Zustand eines Kollektivs von Agenten zu und folgen der hydrodynamischen Physik. Die makroskopischen Variablen lassen sich aus den mikroskopischen Variablen errechnen [16]. Die wichtigsten makroskopischen Variablen sind in Bild 2.4 dargestellt.

Die **makroskopische Geschwindigkeit** V ist nicht zu verwechseln mit der mikroskopischen Geschwindigkeit v . Sie ergibt sich aus der Mittelwertbildung der Einzelgeschwindigkeiten über ein definiertes Zeitintervall Δt an einem bestimmten Ort.

$$V = \frac{\sum v_i}{\Delta N} \quad (2.6)$$

Die Anzahl der Fahrzeuge ΔN , die an einem Ort x einen festgelegten Querschnitt passieren charakterisiert den **Fluss** J .

$$J = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{1}{\omega} \quad (2.7)$$

Die **Dichte** ρ beschreibt, wie viele Fahrzeuge sich auf einer Strecke oder Fläche aufhalten. Sie kann aus der hydrodynamischen Formel (Gl. 2.8) berechnet werden.

$$\rho = \frac{J}{V} \quad (2.8)$$

2.1.5 Das Fluss-Dichte-Diagramm

Das Fluss-Dichte-Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte. Mit Hilfe des Diagramms können wesentliche Aussagen über das makroskopische Verhalten einer Fahrzeugkolonne getroffen werden, weshalb die idealisierte Form auch als **Fundamentaldiagramm** bezeichnet wird [16]. Ein idealer Zustand der Fluss-Dichte-Beziehung liegt vor, wenn sich ein homogener und stationärer Verkehr, bestehend aus identischen Fahrzeugen bzw. Fahrern, im Gleichgewicht befin-

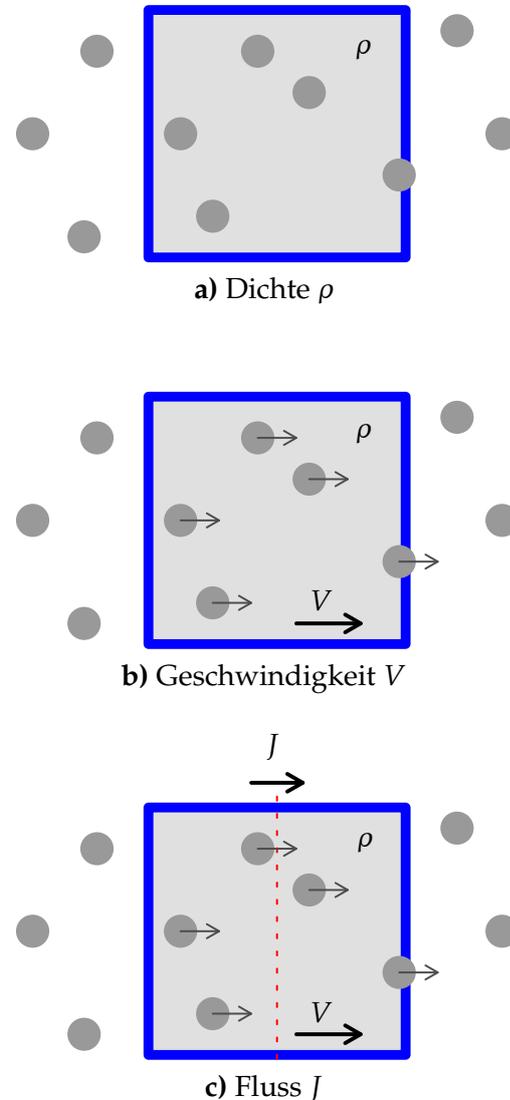


Bild 2.4: Makroskopische Variablen der Verkehrsflusstheorie

det [16]. Reale Verkehrsdaten erfüllen diese Anforderungen i.d.R. nicht, weswegen eine Unterscheidung zwischen Fluss-Dichte-Diagramm und Fundamentaldiagramm zu unternehmen ist (Bild 2.5).

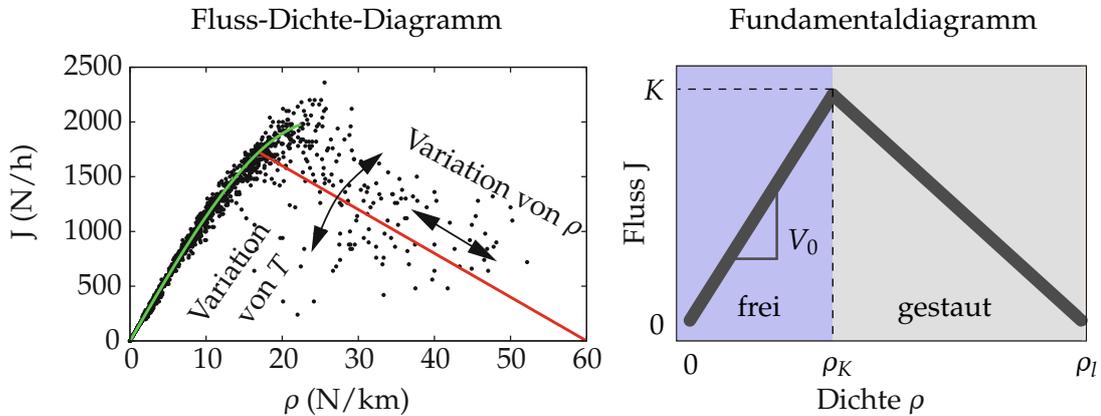


Bild 2.5: Darstellung realer Verkehrsdaten der Autobahn A5 bei Frankfurt im Fluss-Dichte-Diagramm (links) im Vergleich zum idealisierten Fundamentaldiagramm (rechts). In Anlehnung an [16]

Aus dem Fluss-Dichte-Diagramm können verschiedene Informationen abgelesen werden: Die Geschwindigkeit V an der Stelle ρ ist gegeben durch die Steigung der Geraden $J(\rho)/\rho$ (Gl. 2.9). Idealisiert ergibt sich eine Gerade mit einheitlicher Steigung, womit sich die Wunschgeschwindigkeit V_0 bestimmen lässt.

$$V(\rho) = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_l} \right) \quad (2.9)$$

Der Extremwert der Kurve gibt die Kapazität K der Straße an (Gl. 2.10). An diesem Punkt wechselt ein frei laufender Verkehr zu einem gestauten Zustand.

$$K = \frac{V_0}{V_0 T + l} \quad (2.10)$$

Der entsprechende Wert der Dichte ρ_K , an der der Fluss maximal ist, wird mit Gleichung 2.11 berechnet.

$$\rho_K = \frac{\rho_l}{1 + \rho_l V_0 T} \quad (2.11)$$

Nach der Kapazität K nimmt der Fluss immer weiter ab, bis zur maximalen Dichte ρ_l . Dieser Zustand ist erreicht, wenn die Fahrzeuge ohne Abstände zueinander aufgereiht sind, also wenn die Dichte ein Fahrzeug pro Fahrzeuglänge beträgt:

$$\rho_l = \frac{1}{l} \quad (2.12)$$

2.1.6 Trajektorien

Kameras beobachten den Verkehr und zeichnen die Positionen der Fahrzeuge über die Zeit auf. Es wird von Trajektoriedaten gesprochen, die als Orts-Zeit-Linien in einem Diagramm dargestellt werden. Die Trajektorien umfassen alle Fahrzeuge in einem definierten raumzeitlichen Bereich. Die Trajektoriedaten lassen Rückschlüsse auf alle zuvor erwähnten Variablen der Verkehrstheorie zu. Bild 2.6 zeigt idealisierte Trajektorien.

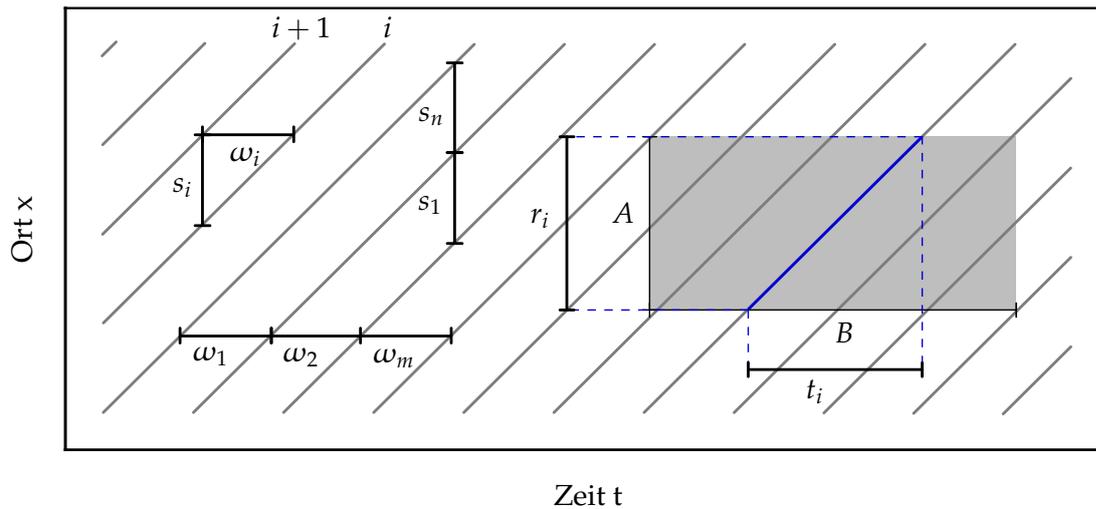


Bild 2.6: Idealisierte Trajektorien mit Variablen der Verkehrsflusstheorie

Die Trajektorien sind Zeitreihen der Fahrzeugpositionen $x_i(t)$, $x_{i+1}(t)$, ... für alle t . Es können die Raumabstände s_i und die Zeitabstände ω_i abgelesen werden. Die Dichte ρ und Fluss J können wie folgt berechnet werden.

$$\rho = \frac{n}{\sum_1^n s_i} = \frac{1}{\bar{s}} \quad (2.13)$$

$$J = \frac{m}{\sum_1^m \omega_i} = \frac{1}{\bar{\omega}} \quad (2.14)$$

In einem definierten Streckenabschnitt von $A \cdot B$ kann die Dichte ρ_{AB} , der Fluss J_{AB} und die Geschwindigkeit V_{AB} mit folgenden Gleichungen berechnet werden.

$$\rho_{AB} = \frac{\sum_i t_i}{AB} \quad (2.15)$$

$$J_{AB} = \frac{\sum_i r_i}{AB} \quad (2.16)$$

$$V_{AB} = \frac{\sum_i r_i}{\sum_i t_i} \quad (2.17)$$

Dabei ist r_i die Strecke, die das Fahrzeug zurücklegt und t_i ist die Zeit, die es dafür benötigt.

2.1.7 Stop-and-Go-Wellen

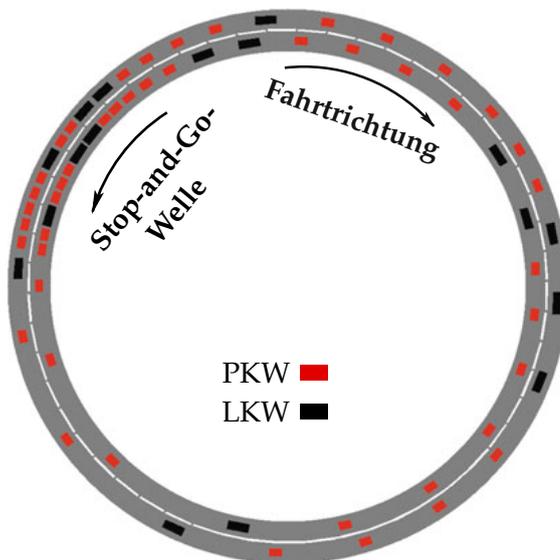


Bild 2.7: Auf einem Kreis simulierte Stop-and-Go-Welle [16]

Stop-and-Go-Wellen sind Instabilitäten im Verkehrsfluss. Sie entstehen durch Reaktionszeiten der Fahrer sowie begrenzte Beschleunigungs- und Bremsfähigkeit der Fahrzeuge, wodurch die Geschwindigkeit nur verzögert an die Soll-Geschwindigkeit angepasst wird [16]. Bei ausreichend großen Fahrzeugkolonnen kann sich eine Stop-and-Go-Welle kontinuierlich fortpflanzen. Bild 2.7 zeigt die Ausbreitung einer Stop-and-Go-Welle. Im Ausgangszustand ist die Fahrzeugkolonne im Gleichgewicht. Bremsen ein Fahrer aus beliebigem Grund, muss der folgende Fahrer ebenfalls bremsen und die Geschwindigkeit

kurzzeitig unter die Geschwindigkeit des ersten Fahrzeugs fallen lassen, damit der ursprüngliche Abstand wiederhergestellt wird. Das dritte Fahrzeug muss ebenfalls auf die Geschwindigkeitsreduzierung reagieren und wird kurzzeitig noch langsamer als Fahrzeug zwei. Der Effekt wiederholt sich so lange, bis das erste Fahrzeug stehen bleiben muss. Diese Dichtewellen im Verkehr breiten sich stets mit einer gleichbleibenden Amplitude, aber unterschiedlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten aus. Hierbei gilt: Je geringer die Dichte ist, desto höher ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit [16]. Bei der Auflösung einer Stop-and-Go-Welle flacht die Ausbreitungsgeschwindigkeit ab. Die Wellen breiten sich mit immer größer werdender Geschwindigkeit aus, bis die Steigung, je nach Achsenzuordnung, senkrecht oder waagrecht wird. Dieser unstetige Übergang wird als Schockwelle bezeichnet [16].

2.1.8 Typen von Fahrzeugfolgmodellen

Fahrzeugfolgemodelle beschreiben das Fahrverhalten aus der Sicht einzelner Fahrzeuge. Es existieren Fahrzeugfolgemodelle für die Längsdynamik (Longitudinalmodelle), welche Geschwindigkeit, Beschleunigung und Abstände regeln; während Modelle für

die Querdynamik (Spurwechselmodelle) in realitätsnahen Fahrsituationen die Wechselwirkungen zwischen Beschleunigung und Fahrstreifenwechsel zu einer Einheit verknüpfen [16]. Die klassischen Elemente eines Longitudinalmodells sind in Bild 2.8 dargestellt.

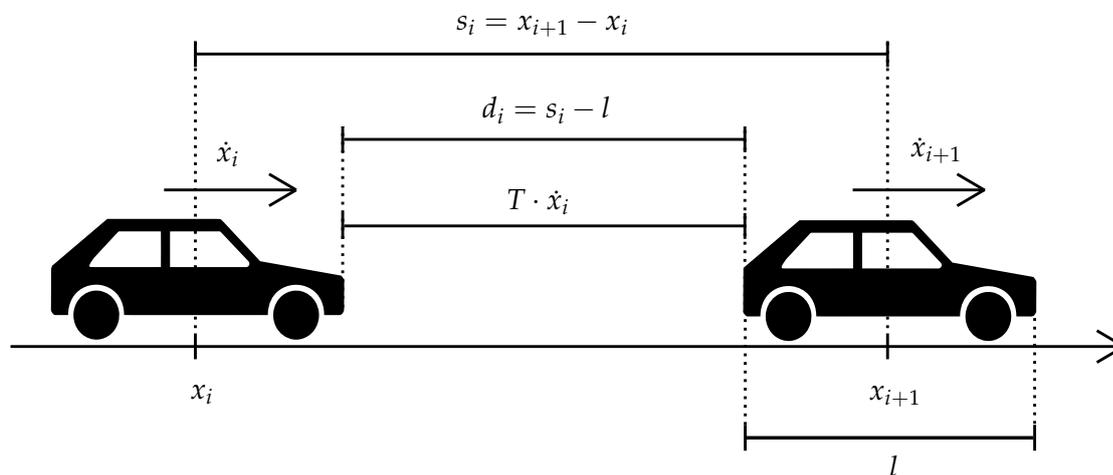


Bild 2.8: Klassische Elemente eines longitudinalen Fahrzeugfolgmodells

Die Position des betrachteten Fahrzeugs x_i und die Position des vorausfahrenden Fahrzeugs x_{i+1} sind eine der wichtigsten Parameter eines jeden Fahrzeugfolgmodells. Aus ihnen kann auf die Geschwindigkeit \dot{x}_i und die Beschleunigung \ddot{x}_i der Fahrzeuge geschlossen werden (Gl. 2.5). Unter Berücksichtigung der Fahrzeuglänge l können die räumlichen, sowie zeitlichen Abstände zwischen den Fahrzeugen berechnet werden (Kapitel 2.1.4.1). Die Zahl der Ableitungen der Position x_i bezeichnet die Ordnung des Modells. Ein Modell, welches nur die Geschwindigkeit \dot{x}_i beinhaltet, ist ein Modell erster Ordnung. Wird die Beschleunigung \ddot{x}_i hinzugenommen, entspricht dies einem Modell zweiter Ordnung. In der Literatur existieren auch Modelle höherer Ordnungen. Einige Vertreter dieser Modelltypen werden in Kapitel 3.1 vorgestellt. Weitere Unterscheidungskriterien sind in Kapitel 2.4 erläutert.

2.2 Sicherheit beim automatisierten Fahren

2.2.1 Abgrenzung der grundlegenden Begriffe der Sicherheitswissenschaft

Die Betrachtung der Sicherheit beim automatisierten Fahren erfordert zunächst eine Definition der Sicherheit selbst. Die grundlegenden Begriffe der Sicherheitswissenschaft sind in Bild 2.9 abgegrenzt.

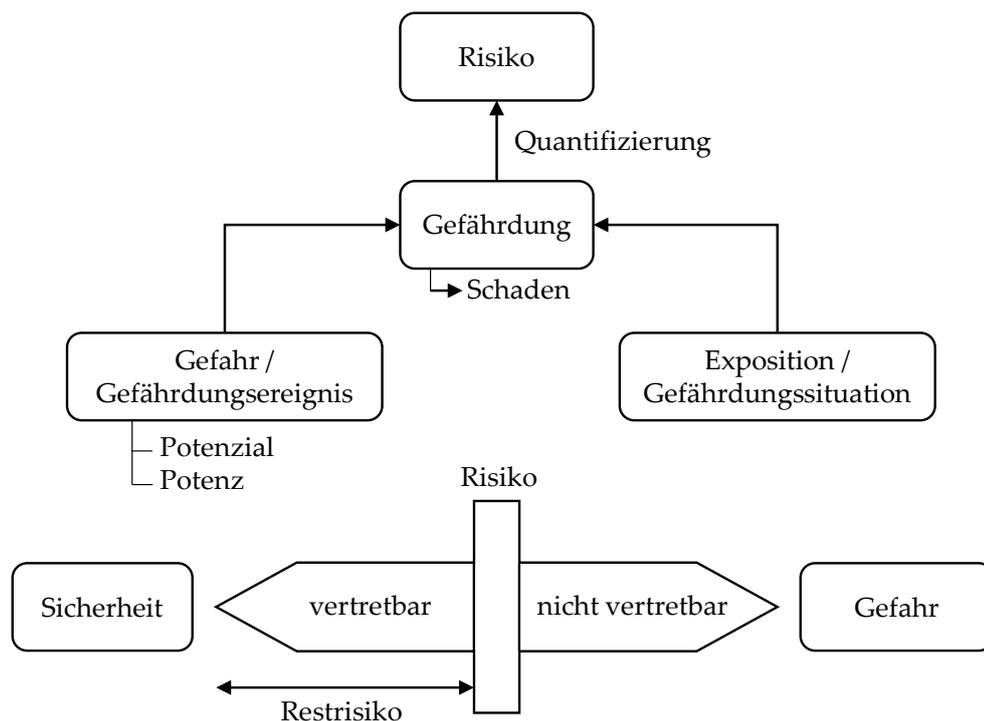


Bild 2.9: Abgrenzung der grundlegenden Begriffe der Sicherheitswissenschaft

Sicherheit ist ein Zustand, der frei von nicht vertretbaren Risiken ist. Ein vertretbares Risiko ist das Risiko, welches nach den Wertevorstellungen der Gesellschaft akzeptiert wird. Kommen Maßnahmen zur Risikominderung zum Einsatz, ist das Restrisiko das Risiko, welches verbleibt. Das Restrisiko darf das vertretbare Risiko nicht übersteigen. Ist das Restrisiko gleich null ist der Zustand gefahrenfrei. Die **Gefährdung** setzt sich zusammen aus Gefahr und Exposition. Es muss eine Koinzidenz (räumliches und zeitliches Zusammentreffen) dieser Faktoren vorliegen, damit es zur Gefährdung kommt. Die **Gefahr** beschreibt ein Gefährdungsereignis, durch das es zu einem Schaden kommen kann. Sie wird durch das Potenzial (Eigenschaft der Gefahr) und der Potenz (Ausmaß der Gefahr) charakterisiert. Ein Beispiel folgt später. Eine **Exposition** des Menschen im Sinne der Sicherheit liegt dann vor, wenn der Mensch einer Gefahr ausgesetzt ist. Dieser Zustand wird auch Gefährdungssituation genannt. Eine Gefährdung kann zu einem **Schaden** führen. Der Begriff Schaden an sich, stellt keine Anforderungen an das Ausmaß. Erst das **Risiko** liefert eine Quantifizierung der Gefährdung. Es ergibt sich aus der Multiplikation der Schadensschwere mit der Eintrittswahrscheinlichkeit. Die sicherheitsrelevanten Definitionen können in der DIN 820-12 nachgelesen werden [17].

Anwendung auf das automatisierte Fahren

Wann ist der automatisierte Verkehr sicher? Die Verkehrssicherheit ist eine Eingren-

zung des Sicherheitsbegriffs. Der verkehrssichere Zustand ist frei von unvermeidbaren Risiken bei der Ortsveränderung von Personen oder Gütern durch Verkehrsmittel unter Berücksichtigung der Verkehrsinfrastruktur [18]. Das gesellschaftlich vertretbare Risiko ist subjektiv und kann variieren. Am 1. Januar 2018 waren in Deutschland 56,5 Millionen Kraftfahrzeuge (Kfz) angemeldet [19]. Im Jahr 2017 wurden 2.638.301 Verkehrsunfälle gemeldet, dabei kam es zu 3.186 Verkehrstoten [20]. Wird eine durchschnittliche Betriebszeit eines Kfz von drei Stunden pro Tag angenommen, dann bestand 2017 in Deutschland eine Wahrscheinlichkeit von $4,264 \cdot 10^{-5}$ pro Stunde einen Verkehrsunfall zu erleiden und eine Wahrscheinlichkeit von $5,15 \cdot 10^{-8}$ pro Stunde dabei zu sterben. Dieses Risiko wird von der Gesellschaft akzeptiert. Anfang 2018 haben tödliche Unfälle eines autonomen Uber Fahrzeugs während einer Testfahrt in Arizona und eines Tesla Fahrzeugs bei eingeschaltetem ACC in Kalifornien gezeigt, dass das vertretbare Risiko beim automatisierten Fahren ungleich geringer ist und zugleich, dass der Stand der Technik nicht als gefahrenfrei angesehen werden kann. Ein gefahrenfreier Zustand sollte aber das Ziel sein, denn es ist verständlich, dass das akzeptierte Risiko kleiner ist, als im manuellen Betrieb. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Exposition. Der Mensch hat keinen Einfluss auf automatisierte Fahrfunktionen und ist der Gefahr ständig ausgesetzt. Er muss auf die Technik vertrauen. Die Exposition kann beim automatisierten Fahren also nicht eingegrenzt werden. Sie ist immer vorhanden. Die Gefahr charakterisiert also allein die Gefährdung, wodurch die Möglichkeit eines Schadens immer gegeben ist. Die Gefahr besteht dabei aus der physikalischen Kraft der Kollision (Potential). Der Typ der Kollision kann variieren. Ein frontaler Aufprall führt zu einer größeren Schadensschwere als ein seitlicher Kontakt. Das Ausmaß (Potenz) wird in diesem Fall durch die kinetische Energie bestimmt. Bei der lateralen Bewegung des Fahrzeugs ist das die Masse und Geschwindigkeit. Die Gefährdung, die beim automatisierten Fahren nur durch die Gefahr beschrieben wird, wird mit dem Risiko quantifiziert. Eine Verringerung der Schadensschwere kann durch eine Geschwindigkeitsreduzierung erreicht werden, wobei die Variation des Kollisionstyps außen vor gelassen werden muss. Es muss der schwerste Kollisionsfall angenommen werden, denn dieser kann nicht dauerhaft ausgeschlossen werden. Eine zu starke Reduzierung der Geschwindigkeit bewirkt Verschlechterung des Verkehrsflusses. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten im Stadtverkehr, vergrößert sich das Schadensausmaß durch Anwesenheit von weiteren Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern und Fahrradfahrern. Die Gefahr bzw. die Schadensschwere bleibt folglich immer auf einer hohen Ebene. Das Risiko kann deshalb nur über die Eintrittswahrscheinlichkeit begrenzt werden. Die Automatisierung bietet hierbei ein großes Sicherheitspotenzial. Durch die Abwesenheit des menschlichen Einflusses können die Wahrscheinlichkeiten für Unfälle stark gemindert werden (siehe Kapitel 2.2.2).

2.2.2 Unfallvermeidung durch Automatisierung und der menschliche Einfluss

Ein Unfall ist ein plötzliches, unvorhergesehenes zeitlich und örtlich bestimmtes und unfreiwilliges von außen einwirkendes Ereignis, bei dem eine Person Schaden erleidet [21]. Der Verkehrsunfall ist dadurch charakterisiert, dass es nicht zwangsweise zum Personenschaden kommen muss. Ein Sachschaden als Unfallfolge reicht hierbei aus. H.W. Heinrich beschäftigte sich 1931 mit der Unfallverhütung an Arbeitsplätzen. Eine Analyse ergab, dass 88 % aller Unfälle auf menschliche Fehler zurückzuführen sind [22]. Er bildete dabei das Modell der Unfallkette, nach der sich der Unfall aus einer Abfolge von Ereignissen ergibt. Die Verletzung bzw. der Schaden ist die direkte Folge des Unfalls. Im Kern bedeutet dies, dass ein Unfall nicht aus einer alleinigen Ursache resultiert. Heinrich schreibt den unsicheren Handlungen von Personen eine zentrale Rolle zu. Er betont aber auch, Unfallverhütung nicht nur von diesem Standpunkt aus umzusetzen. Zu berücksichtigen sind auch andere Ereignisse in der Unfallkette.

Heinrichs Erkenntnisse lassen sich auch auf Verkehrsunfälle anwenden. Studien ergaben einen Einfluss von menschlichen Fehlern (Human Error) bei 75 % bis 95 % aller Verkehrsunfälle [23, 24]. Das Sicherheitspotenzial von automatisierten Fahrfunktionen lässt sich hieran nicht einfach ableiten. Bei der Betrachtung der Unfallzahlen in Deutschland von 1970 bis 2016 in Bild 2.10 werden zwei Trends deutlich. Die Verkehrstoten sinken kontinuierlich von 1970 bis 2016 auf 3.206. Das Jahr 1990 stellt eine Ausnahme dar. Mit der Vereinigung Deutschlands wurden die Statistiken der ehemaligen Länder BRD und DDR zusammengezählt. Das Jahr markiert so einen sprunghaften Anstieg der Zahlen. Die gegensätzliche Beobachtung ist bei den gesamt Unfallzahlen zu machen. Bis 2016 sind sie auf einen Höchstwert von 2.585.327 angestiegen. Der Rückgang der Verkehrstoten durch eine zunehmende Einführung von Automatisierung kann nicht ohne weiteres verifiziert werden, denn parallel zur Einführung von FAS wurden auch andere Sicherheitsmaßnahmen implementiert, wie z.B. die Gurtpflicht, eine Höchstgrenze für den Blutalkoholkonzentrationswert, verstärkte Verkehrssteuerung oder die Einrichtung von Fußgängerzonen [26]. Mit der retrospektiven Analyse kann nur schwer festgestellt werden, welche Maßnahmen welchen Anteil an der Reduzierung der Todesopfer tragen. Belegt ist der Sicherheitsgewinn von Fahrdynamikregelungen wie dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) [27]. Die wachsenden Unfallzahlen insgesamt gehen mit der steigenden Zahl von Fahrzeugen einher [28]. Eine höhere Verkehrsdichte führt zu einer höheren Unfallwahrscheinlichkeit. Die Statistik zeigt, dass die Vision der Unfallfreiheit noch weit entfernt ist und das hat zwei Gründe. FAS sind nicht weit genug verbreitet. Eine Umfrage des deutschen Verkehrssicherheitsrats ergab, dass nur 40 % der Fahrzeuge der Befragten mit mindestens einem

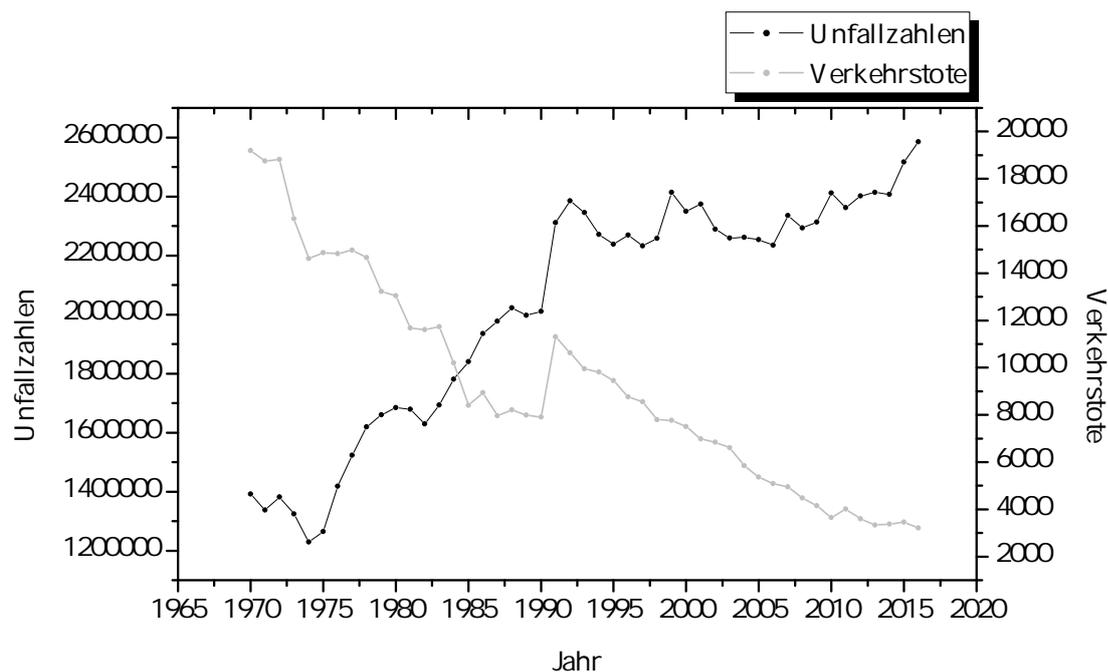


Bild 2.10: Entwicklung der Unfallzahlen und Verkehrstoten in Deutschland von 1970 bis 2016 (Daten entnommen aus [25])

FAS ausgestattet sind [29]. Dieses Problem wird die Zeit beheben. 80 % der Befragten können sich vorstellen ihren Neuwagen mit FAS auszurüsten. Auf der anderen Seite werden aktuell FAS nur unterstützend eingesetzt. Etabliert sind Systeme der Stufe 1 (assistiert) bis teilweise auch Systeme der Stufe 2 (teilautomatisiert) [7]. Der menschliche Einfluss bleibt zunächst noch weitestgehend erhalten, wodurch eine Anfälligkeit für Unfälle besteht. Die Systeme, die heute schon die Aufgabe des Menschen in einigen Fahrsituationen komplett übernehmen, finden sich hauptsächlich auf der Autobahn wieder. Die Automatisierung in den Stadtverkehr zu implementieren würde zunächst einen Anstieg der Verkehrsunfälle verursachen [27]. Die Fähigkeiten des Menschen übersteigen in einigen Fahrsituationen die der Maschine. Der Mensch kann Bewegungen von z.B. Kindern besser interpretieren und dadurch Kollisionen aus Verdeckungen heraus eher verhindern [27]. Erst gut ausgereifte vollautomatisierte Systeme liefern in solchen Situationen einen Mehrwert.

Eine Prognose von Daimler mittels angenommener Einführungs- und Marktdurchdringungsszenarien durch Expertenabschätzungen und Prognosen Dritter, zusammen mit GIDAS-Daten (einer Verkehrsunfalldatenbank), liefert Schätzungen über das zukünftige Unfallvermeidungspotenzial von automatisierten Fahrzeugen [27, 30]. Demnach ist eine Unfallreduzierung um 10 % bis 2020, um 19 % bis 2030, um 23 % bis 2040, um 50 %

bis 2050 und um 71 % bis 2060 denkbar. Eine vollständige Unfallfreiheit wird für das Jahr 2070 angenommen.

2.3 Hintergrund der modellbasierten Sicherheitsanalyse

2.3.1 Gründe für den Einsatz von Modellen

Modellbasierte Sicherheitsanalysen werden eingesetzt, wenn klassische Analyseverfahren wie die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) oder Fehlerbaumanalysen (FBA) die Anforderungen an die Realisierung nur begrenzt oder gar nicht wiedergeben können [31]. Die Modellbasierte Analyse ermöglicht die Darstellung des dynamischen Verhaltens eines Systems, welches so rechnergestützt sicherheitstechnisch analysiert werden kann. Übergänge von statische in dynamische Zustände und umgekehrt müssen auf Fehlverhalten untersucht werden. Bei hochdynamischen Fahrzeugfolgmodellen kann bspw. eine Propagierung von Stop & Go Wellen zu gefährlichen Effekten führen, die in Kollisionen münden können. Klassische Analysemethoden können dieses dynamische Verhalten nicht vollständig beschreiben. Dagegen ermöglicht die Simulation von Modellen, die Abbildung mithilfe von Parametern, wobei Ausgangszustände, Abweichungen, sowie Fehlerzustände analysiert werden können; dabei kann ebenfalls die Kombination von statischen und dynamischen Fehlern ersichtlich gemacht werden [31]. Die Darstellung des dynamischen Verhaltens von einer Fahrzeugkolonne ist mittels Trajektorien möglich. Die VDI 2206 bezeichnet eine solche rechnergestützte Analyse als Software-in-the-Loop (SIL). Werden reale Steuergeräte und Aktoren an den Rechner für die Simulation angeschlossen wird die Bezeichnung Hardware-in-the-Loop (HIL) verwendet. Die Vorteile beider Verfahren liegen in der Einsparung von Zeit und Kosten [32]. Für den Nachweis der Sicherheit mit herkömmlichen Succes-Run Tests werden sehr lange Testzeiten benötigt. Es wurde ermittelt, dass 100 autonome Fahrzeuge vier Monate lang (hinsichtlich Personenschäden) oder 19 Jahre lang (hinsichtlich tödlicher Unfälle) 24 Stunden am Tag unfallfrei fahren müssen, damit mit einer statistischen Konfidenz von 95 % nachgewiesen werden kann, dass die Verletzungs- bzw. Todesrate von autonomen Fahrzeugen kleiner ist, als von manuellen Fahrzeugen [33].

2.3.2 Modellbildung mithilfe des V-Modells

Die Simulation von Modellen wird insbesondere für Verifikationsaktivitäten angewandt; aber auch für die Entwicklung werden Modelle verwendet [31]. Das V-Modell beschreibt das generische Vorgehen bei der Entwicklung mechatronischer Modelle bzw. Systeme (Bild 2.11).

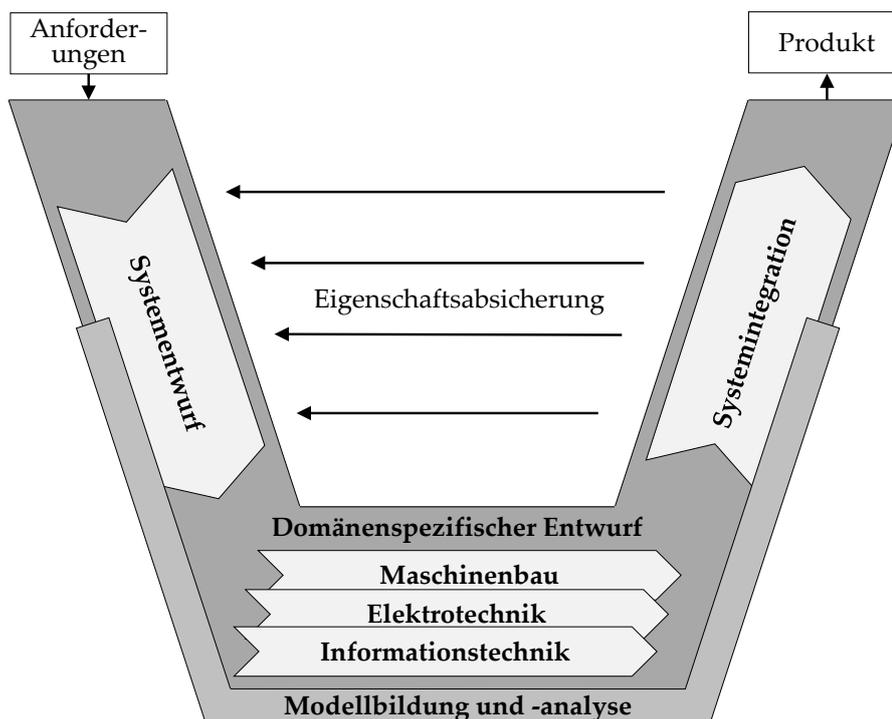


Bild 2.11: Makroskopisches V-Modell nach VDI 2206 [32]

Den Start einer Entwicklung markiert ein Auftrag, der präzise durch **Anforderungen** an das Produkt beschrieben ist [32]. Der Formulierung von Anforderungen ist besonders sorgfältig vorzugehen, denn ein Produkt ist nur so gut wie die Anforderungen, die an dieses gestellt werden [31]. Sie bilden gleichzeitig den Bewertungsmaßstab [32]. Die Anforderungen an ein Fahrzeugfolgemodell werden in Form von Regelzielen beschrieben (Kapitel 3.2). An erster Stelle steht dabei die Gewährleistung von Sicherheit. Erst danach kommen Anforderungen an den Komfort und andere Eigenschaften die Kapitel 1 geschildert wurden.

Das reale Verhalten eines Systems soll möglichst genau wiedergeben werden. Im **Systementwurf** wird hierfür die Gesamtfunktion in wesentliche Teilfunktionen zerlegt [32]. Für das Fahrzeugfolgemodell kann das durch die Betrachtung der einzelnen Parametern geschehen: Welchen Abstand müssen die Fahrzeug bspw. halten, um Kollisionen zu verhindern oder welche Beschleunigung ist für die Erhaltung des Komforts maximal möglich? Dabei muss sich streng an die Anforderungen gehalten werden.

Im **domänenspezifischen Entwurf** erfolgt eine weitere Konkretisierung meist getrennt in die beteiligten Domänen [32]. Für die betrachtete Anwendung ist dies jedoch sinnfrei, da in dieser Arbeit nur die funktionalen Aspekte der AuG betrachtet werden. Die Betrachtung von z.B. Aspekten der Elektrotechnik oder Informationstechnik bleibt aus. Stattdessen wird das herausgearbeitete Konzept zur Umsetzung der Anforderungen in

der **Systemintegration** direkt in ein Gesamtsystem zusammengesetzt [32]. Für mathematische Modelle werden in der Regel nichtlineare Mehrgrößen-Differenzialgleichungen mit einer Vielzahl von Parametern (Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, ...) benötigt [34].

Bei der Eigenschaftsabsicherung wird verifiziert, ob die Eigenschaften des entwickelten Systems mit den Anforderungen übereinstimmen [32]. Die Verifikation ist nicht erst am fertigen Produkt durchzuführen, sondern soll die einzelnen Reifegrade bereits mit einbeziehen. Für das Modell bedeutet das, zu überprüfen, ob die festgelegten Koeffizienten der Parameter die Anforderungen erfüllen. Bei Abweichungen muss das Modell und die Parameter angepasst werden. Die **Modellbildung und -analyse** begleitet die Phasen parallel [32]. Die Koeffizienten werden mithilfe von Simulationen gewählt. Am Ende steht das den Anforderungen entsprechend verifizierte **Produkt** bzw. eine Produktreife [32]. Steht am Ende eine Produktreife, so wird der gesamte Zyklus für den nächsten Reifegrad noch einmal durchlaufen.

2.4 Regelungstechnik für Fahrzeugfolgemodelle

2.4.1 Grundbegriffe und der Regelkreis

Die Regelungstechnik ist die Grundlage für viele Mechanismen im Alltag. Bspw. funktioniert das Konstanthalten der Körpertemperatur und des Blutdrucks oder der aufrechte Gang auf der Basis von Regelung [34]. Dabei ist eine Unterscheidung in Steuerung und Regelung vorzunehmen. **Steuern** ist der Vorgang, bei dem in einem System Eingangsgrößen auf Ausgangsgrößen wirken und diese damit beeinflussen. Eine Steuerung ist speziell dadurch gekennzeichnet, dass sie einen offenen Wirkungsweg besitzt, wodurch die Ausgangsgrößen nicht wieder auf die Eingangsgrößen wirken [11]. Die Sensoren arbeiten hierbei v.a. binär durch Ein- und Ausschalter, die bei Sollwertabweichung betätigt werden [34]. Die **Regelung** folgt dem Prinzip der Rückkopplung: Der Wirkungsweg ist geschlossen. Eine **Regelgröße** (Ist-Wert) wird kontinuierlich gemessen und mit einer **Führungsgröße** (Soll-Wert) verglichen. Die resultierende **Regeldifferenz** (Abweichung) wirkt auf die **Stellgröße**, welche die Regelgröße im Sinn einer Annäherung an die Führungsgröße ändert [11]. Der geschlossene Wirkungsweg der Regelung wird auch als **Regelkreis** bezeichnet. Die Regelgröße wirkt fortlaufend auf sich selbst, wodurch die Kreisstruktur der Regelung entsteht: 1. Messen 2. Vergleichen 3. Stellen [34]. Der Signalflussplan eines Regelkreises ist in Bild 2.12 dargestellt.

Im Wesentlichen hat der Regelkreis zwei Aufgaben zu erfüllen: Die Regelgröße $x(t)$ muss der Führungsgröße $w(t)$ möglichst gut folgen (Führungsverhalten) und der Re-

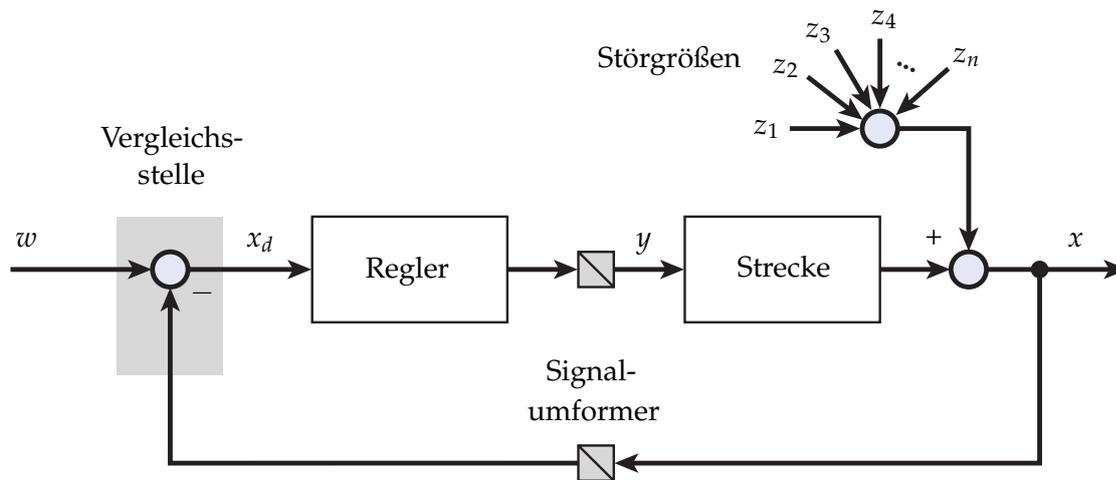


Bild 2.12: Signalflussplan eines Regelkreises [34]

w	Führungsgröße (Soll-Wert)	x_d	Regeldifferenz	z_i	Störgrößen
x	Regelgröße (Ist-Wert)	y	Stellgröße		

gelkreis muss Störungen, die auf die Strecke einwirken optimal ausregeln (Störverhalten), sodass auch bei dauerhafter Störungseinwirkung die Führungsgröße gehalten werden kann [34]. Ein ideales System übersetzt zu 100 % die Führungsgröße zur Regelgröße. Aber selbst wenn keine Störgrößen auftreten ist das nicht möglich. Denn der zweite Satz der Thermodynamik besagt: Eine 100 prozentige Transformation ist nicht möglich. Es gibt kein Perpetuum mobile. Die deswegen immer notwendige Regelung unterliegt einer Verzögerung bzw. Reaktionszeit. Sie charakterisiert das **Übertragungsverhalten** eines Regelkreises. Die Annahme eines idealen Modells bei 100 prozentiger Transformation kann auch als Referenz für die Anforderungserfüllung gesehen werden [31]. Der Grad der Abweichung markiert die Abweichung von den Anforderungen.

2.4.2 Dynamisches und statisches Verhalten von Systemen

Systeme werden in dynamische und statische Systeme unterteilt. Dabei spielt das Zeitverhalten eine Rolle. **Dynamische Systeme** beschreiben den zeitlichen Verlauf der Ausgangsgröße x_a bei vorgegebener Eingangsgröße x_e [34]. Bild 2.13 zeigt ein dynamisches Systemverhalten.

Das **statische Verhalten** beschreibt die Abhängigkeit der sich einstellenden stationären Werte der Ausgangsgröße auf Basis der stationären Endwerte der Eingangsgröße [34]. Die Zeit hat keinen Einfluss auf ein statisches System. Während die Regelgröße eines

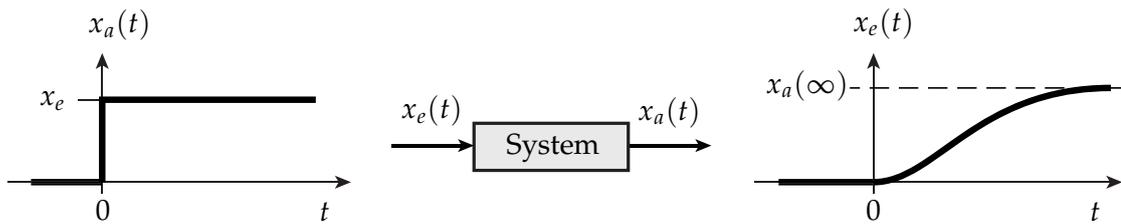


Bild 2.13: Beispiel für ein dynamisches Systemverhalten [34]

dynamischen Systems sich im zeitlichen Verlauf ändert, bleibt die Größe im statischen System konstant. Werden die Ausgangswerte in einem Diagramm über die Eingangswerte aufgetragen, kann auf die Linearität des Systems geschlossen werden.

2.4.3 Lineare und nichtlineare Systeme

Lineares und nichtlineares Verhalten ist unabhängig vom dynamischen bzw. statischen Verhalten. Ein System ist linear, wenn das Verstärkungsprinzip und das Überlagerungsprinzip gilt [34]. Das **Verstärkungsprinzip** ist durch folgende Gleichung beschrieben:

$$x_a = K_p \cdot x_e \quad (2.18)$$

Folglich ist ein System linear, wenn die Eingangsgröße proportional zu der Ausgangsgröße ist. Dabei ist K_p der Proportionalitätsfaktor oder Verstärkungsfaktor. Zusätzlich muss das **Überlagerungsprinzip** gelten:

$$x_{a,1} = K_p \cdot x_{e,1} \quad (2.19)$$

$$x_{a,2} = K_p \cdot x_{e,2} \quad (2.20)$$

$$x_{a,1} \pm x_{a,2} = K_p \cdot x_{e,1} \pm K_p \cdot x_{e,2} = K_p \cdot (x_{e,1} \pm x_{e,2}) \quad (2.21)$$

Ein System ist nichtlinear, wenn es mindestens eines dieser beiden Prinzipien nicht gehorcht [34]. Ihre Kennlinien sind keine Gerade, sondern folgend unterschiedliche nicht-lineare Zusammenhänge (Bild 2.14).

Eine lineare Kennlinie besteht dementsprechend nur aus einer Geraden, die keine Begrenzungen aufweist. Kommen Begrenzungen oder Totzonen hinzu, ist das System als nichtlinear einzustufen. In der Realität kommen fast ausschließlich nichtlineare Systeme vor. Diese müssen oft linearisiert werden, da ihre Differentialgleichungen nicht analytisch gelöst werden können. Wie auch in dieser Arbeit muss dafür auf Simulationen zurückgegriffen werden. Vorteile der nichtlinearen Systeme ist die genauere Be-

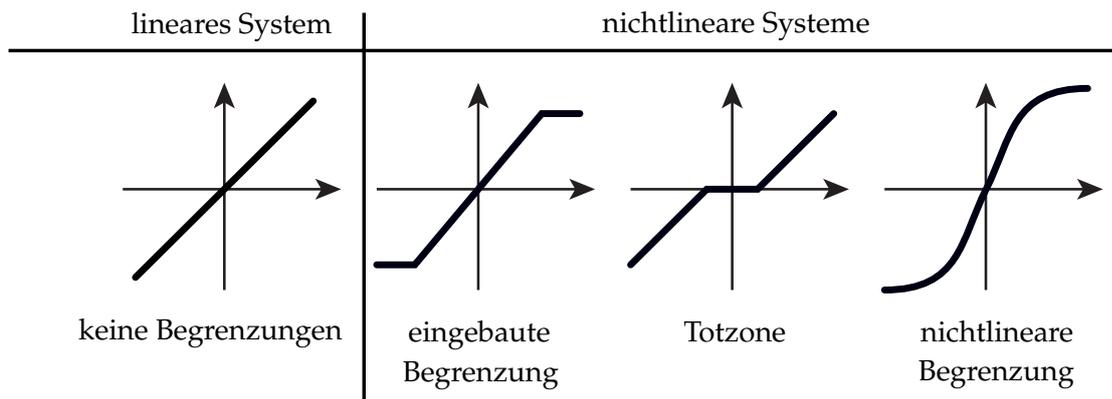


Bild 2.14: Beispiel für lineare und nichtlineare Systeme [34]

schreibung der Realität. Bspw. beschreibt die nichtlineare Begrenzung aus Bild 2.14 das Beschleunigungsverhalten eines Fahrzeugs viel besser, als ein lineares System.

2.4.4 Delay-Differentialgleichungen und Totzeit

Oft werden mithilfe von Delay-Differentialgleichungen Reaktionszeiten in Modelle implementiert. In der Regelungstechnik werden sie als Totzeit bezeichnet. Die Differentialgleichungen sind dann analytisch nicht mehr zu lösen [16]. Es muss wieder auf Simulationen für eine numerische Lösung zurückgegriffen werden. Mit ausgeprägteren Totzeiten werden Systeme instabiler [16]. Ein Eingangssignal mit Totzeit beeinflusst das Ausgangssignal solange nicht, bis die definierte Totzeit bzw. Reaktionszeit abgelaufen ist [34]. Gleichung 2.22 ist ein Beispiel für eine Differentialgleichung mit einer Reaktionszeit T^r .

$$\dot{x}_i(t + T^r) = \dot{x}_{i+1}(t) \quad (2.22)$$

Die Gleichung beschreibt das Fahrzeugfolgemodell von Pipes, welches in Kapitel 3.1.1 vorgestellt wird.

2.4.5 Stabilität von Regelkreisen

Reale technische Systeme unterliegen Reaktionszeiten, weswegen die Regelung, also die Wirkung der Stellgröße, verzögert geschieht. Eine Regelung braucht daher Zeit, um auf die Änderung der Regelgröße zu reagieren und die Störungen auszuregulieren [34]. Während dieser Ausregelung kann es zu Instabilitäten kommen. Eine Regelung muss immer stabil sein, weswegen Stabilitätsbetrachtungen durchzuführen sind. Stabilität liegt vor, wenn ein dynamisches System nach einer Auslenkung aus einer Ruhelage, wieder zurück in diese Ruhelage kehrt (Bild 2.15) [34].

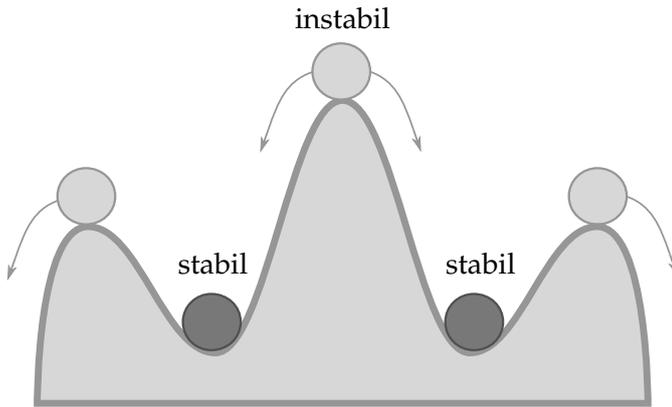


Bild 2.15: Stabilitätslagen. In Anlehnung an [34]

Die Kugeln in den Tälern kehren nach einem Stoß wieder zurück in ihre Ausgangsposition zurück. Sie sind stabil. Dagegen befinden sich die Kugeln auf den Spitzen in instabiler Lage. Befindet sich ein System einmal in stabiler Lage, bleibt es auch dort. Für Fahrzeugfolgemodelle bedeutet das, dass eine Kolonne die im Anfangszu-

stand mit homogenen Trajektorien fährt auch homogen weiterfahren wird, sodass keine ausschlaggebenden Oszillationen mehr zu erwarten sind.

Stabilitätsanalysen sind zu unterscheiden in Analysen der lokalen Stabilität (auf einer endlichen Fahrbahn) und in Analysen der globalen Stabilität (auf einem Kreis, bzw. einer unendlichen Fahrbahn) [35]. Dabei sind globale Analysen aussagekräftiger, da sie auch konvektive Störungen berücksichtigen, welche lokal verschwinden [36]. Konvektive Störungen sind Störungen, die von den Fahrzeugen weitergeleitet werden (vgl. Stop-and-Go-Wellen). Mit folgender Gleichung kann die Stabilität analysiert werden [37]:

$$\tilde{x}_n(t) = x_n(t) - (x_n(t=0) + Vt) \quad \wedge \quad \tilde{v}_n(t) = v_n(t) - V \quad (2.23)$$

Die makroskopische Geschwindigkeit V multipliziert mit der Zeit t ergibt die Position eines Fahrzeugs mit der entsprechenden Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t . Entspricht die Position des n -ten Fahrzeugs, dieser mit V berechneten Position, haben sich die Positionen der Fahrzeuge homogenisiert. Analog dazu haben sich die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge homogenisiert, wenn die Geschwindigkeit des Fahrzeugs n mit der makroskopischen Geschwindigkeit übereinstimmt. Diese beiden Zustände sind eingetreten, wenn $\tilde{x}_n(t)$ und $\tilde{v}_n(t)$ gegen null streben. Dieser Fall beschreibt den Gleichgewichtszustand des Fahrzeugfolgmodells. Eine globale Stabilität liegt vor, wenn das Modell gegen diesen Wert konvergiert [37]. Der Stabilitätsnachweis kann mit dem **Hurwitz-Kriterium** erbracht werden. Dafür muss die Beziehung aus Gleichung 2.23 in eine charakteristische Gleichung folgender Form überführt werden [34]:

$$a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s^1 + a_0 = 0 \quad (2.24)$$

Das ist möglich, indem die Formeln aus Gl. 2.23 über die Beziehung $\dot{x}_n(t) = \tilde{v}_n(t)$, unter zur Hilfenahme des Taylor-Theorems, gleichgesetzt werden [37]. Nach Hurwitz ist ein System n-ter Ordnung dann stabil, wenn alle Koeffizienten der charakteristischen Gleichung und die folgenden n Determinanten Werte größer null annehmen [34]:

$$D_1 = a_1 > 0, \quad D_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0, \quad D_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}, \quad D_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}$$

Das n-te System wird mit folgender Determinanten beschrieben [34]:

$$D_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & a_n \end{vmatrix}$$

Darauf basierend wird eine kritische Relaxationszeit berechnet [37]. Die Relaxationszeit ist die Zeit, die ein System benötigt, um in seinen Gleichgewichtszustand nach einer Störung zurückzukehren. Das System ist global stabil, wenn die Relaxationszeit unter der kritischen Relaxationszeit liegt [37].

2.4.6 Anti-Windup

Wird in der Regelungstechnik eine Stellgrößenbegrenzung eingesetzt, kann es vorkommen, dass das Verhalten eines Regelkreises vom gewünschten Verhalten abweicht [38]. Es tritt ein Fehlverhalten auf. Dieses Phänomen wird Windup genannt (zu deutsch: aufwickeln, aufspulen) [38]. Die Aufgabe des Anti-Windups besteht darin, dieses Fehlverhalten zu beseitigen, um das gewünschte dynamische Verhalten auch bei aktiver Begrenzung zu ermöglichen. Dieses Ziel lässt sich noch einmal untergliedern in den Erhalt des Kleinsignalverhaltens, wodurch die Stabilität erhalten bleibt und in die Rückgewinnung des unbeschränkten Verhaltens [38]. Es gibt keine vorgeschriebene Methode für die Konstruktion einer Anti-Windup Rückführung. Die Umsetzung ist mit einer Vielzahl von Entwurfsverfahren möglich [38]. Eine Möglichkeit ist die Abschaltung des Integralteils des PID-Reglers (P: Proportionalteil, I: Integralteil, D: Differenzierer), solange die Begrenzung aktiv ist, um ein aufintegrieren zu verhindern [34]. Eine andere Variante ist die Beaufschlagung der Eingangsgröße mit der Differenz der Größe vor und nach

dem Begrenzer [38]. Letztlich muss für jedes Problem eine spezifische Lösung entwickelt werden, da v.a. das Gütekriterium des Regelkreises individuell festgelegt werden muss [38].

Eine komplexere Form des Anti-Windups ist das modulare Anti-Windup. Hierbei verschwindet der Nachteil der individuellen Auslegung. Die Windup Effekte werden separat betrachtet und durch verschiedene strukturelle Maßnahmen beseitigt, wodurch der resultierende modulare Aufbau auf beliebige Situationen anwenden [38]. Ein Stabilitätsnachweis kann für den modularen Aufbau nicht erbracht werden, weswegen Simulationen sowie Iterationen notwendig sind [38].

3 Dynamische Sicherheitsanalyse des Adaptive-Time-Gap-Modells

3.1 Vorstellung gängiger Fahrzeugfolgemodelle

3.1.1 Pipes-Modell

Das Modell von Louis A. Pipes ist ein frühes Fahrzeugfolgmodell, welches 1953 entwickelt wurde [39]. Das Pipes-Modell beschreibt die Geschwindigkeit zweier Fahrzeuge zueinander unter Zuhilfenahme einer Reaktionszeit $T^r \geq 0$.

$$\dot{x}_i(t + T^r) = \dot{x}_{i+1}(t) \quad (3.1)$$

Die Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeugs soll der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs inklusive einer Reaktionszeit entsprechen. Eine Linearisierung des Modells ergibt Gleichung 3.2.

$$\dot{x}_i(t + T^r) \approx \dot{x}_i(t) + T^r \cdot \ddot{x}_i(t) \quad (3.2)$$

Wird Gleichung 3.1 nocheinmal abgeleitet und dann nach der Beschleunigung umgestellt, wird aus dem Modell erster Ordnung ein Modell zweiter Ordnung:

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{T^r} [\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i(t)] \quad (3.3)$$

Zu kritisieren ist an diesem Modell, dass die Abstände zwischen den Fahrzeugen nicht betrachtet werden. Das Modell kann somit keine Kollisionsfreiheit garantieren. Die Geschwindigkeiten werden ohne Regelung des Abstandes homogenisiert, wodurch auch negative Abstände getragen werden.

3.1.2 Optimal-Velocity-Modell

Das Optimal-Velocity-Modell (OVM) wurde von Bando et al im Jahr 1995 entwickelt [40]. Unter Verwendung einer Reaktionszeit wird die aktuelle Geschwindigkeit \dot{x}_i an eine optimale Geschwindigkeit V angepasst, die abhängig von den Fahrzeugabständen ist.

$$\dot{x}_i(t + T^r) = V(x_{i+1}(t) - x_i(t)) \quad (3.4)$$

Auch das OVM kann in ein Modell zweiter Ordnung umgestellt werden:

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{T^r} [V(x_{i+1}(t) - x_i(t)) - \dot{x}_i(t)] \quad (3.5)$$

Bando et al schlägt für die Funktion der optimalen Geschwindigkeit Gleichung 3.6 vor [40].

$$V(d_i) = V_0 \frac{\tanh\left(\frac{d_0}{d_i} - \beta\right) + \tanh\beta}{1 + \tanh\beta} \quad (3.6)$$

Diese Gleichung ist für die praktische Anwendung eher unhandlich, weswegen die Verwendung von Gleichung 3.7 von Nutzen ist, welche aus Gleichung 3.6 hergeleitet werden kann [16].

$$V(d_i) = \max\left[0, \min\left(V_0, \frac{d_i - d_0}{T}\right)\right] \quad (3.7)$$

Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.1 benannt. Daneben stehen beispielhafte Werte der Parameter, die explizit für das OVM kalibriert sind. Sie sind also nicht als Optimalwerte anzusehen, die unter allen Umständen anzustreben sind. Andere Fahrzeugfolgemodelle verlangen andere Parameterkonfigurationen.

Tabelle 3.1: Parameter des OVM bei einer Fahrzeuglänge von 5 m mit beispielhaften Werten. In Anlehnung an [16]

Parameter	Typischer Wert	
	Autobahn	Stadtverkehr
Wunschgeschwindigkeit V_0	120 km/h	50 km/h
Reaktionszeit T^r	0,65 s	0,65 s
Minimalabstand d_0	3 m	2 m
Formfaktor β	1,5	1,5
Lichter Zeitsabstand T	1,4 s	1,2 s

Der Formfaktor β charakterisiert den Verlauf der Abstands-Geschwindigkeits-Kurve, womit Anpassungen an spezielle Fahrsituationen vorgenommen werden können. Nicht in der Liste aufgenommen ist die Variable des Fahrzeugabstands d_i . Diese Variable beschreibt den Ist-Abstand, der nicht beliebig eingestellt werden kann. Hierfür wird der Minimalabstand verwendet. Problematisch ist, dass das Modell nur die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs \dot{x}_i betrachtet, ohne dabei die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs \dot{x}_{i+1} zu berücksichtigen. Auf große Geschwindigkeitsdifferenzen kann so nur schwer reagiert werden, wodurch das Modell zu Unfällen neigt [16]. Simulationen zeigen, dass ein homogenisierter Verkehr ohne Stop-and-Go-Wellen mit

diesem Modell nur eintritt, wenn die Reaktionszeit T^r unrealistisch klein gewählt wird, wobei nicht realisierbare hohe Beschleunigungen auftreten [16].

3.1.3 Full-Velocity-Difference-Modell

Jiang et al lieferte 2001 mit dem Full-Velocity-Difference-Modell (FVDM) eine Kombination des Fahrzeugfolgmodells von Pipes mit dem OVM [41]:

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{T^r} [V(x_{i+1}(t) - x_i(t)) - \dot{x}_i(t)] + \frac{1}{T_2^r} [\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_i(t)] \quad (3.8)$$

Es wird eine zusätzliche Reaktionszeit T_2^r eingeführt und für die Funktion der optimalen Geschwindigkeit gelten weiterhin Gleichungen 3.6 und 3.7. Die zweite Reaktionszeit resultiert aus der Betrachtung der Geschwindigkeiten und der räumlichen Abstände beider Fahrzeuge, des folgenden und des vorausfahrenden Fahrzeugs. Die Anpassung der Parameter werden mit separaten Reaktionszeiten bedacht. Die Erweiterung um Geschwindigkeitsdifferenzen nach dem Pipes-Modell sorgt für eine größere Sensitivität in diesem Bereich, worin eine Schwäche des OVM liegt [16]. Im Vergleich zum OVM liefert das FVDM realistischere Reaktionszeiten und realisierbare komfortable Beschleunigungswerte [16]. Jedoch fallen Mängel in der Abstandsmodellierung im Lokalbereich auf. Bei der Annäherung eines Fahrzeugs an ein stehendes Fahrzeug kann die Wunschgeschwindigkeit auch bei großen Abständen nicht erreicht werden [16].

3.1.4 Adaptive-Time-Gap-Modell

Das Adaptive-Time-Gap-Modell (ATG) ist das Modell, welches in dieser Arbeit analysiert wird. Es regelt die Geschwindigkeit des Folgefahrzeugs adaptiv über die Anpassung des lichten Zeitabstands $T_i(t)$ nach dem lichten Sollzeitabstand T unter Verwendung der Konstanten-Lichten-Zeitabstand-Strategie (KLZS) [42]:

$$\dot{T}_i(t) = \frac{1}{T^r} [T - T_i(t)] \quad (3.9)$$

Die Ableitung des lichten Zeitabstandes ist das Produkt des Kehrwerts der Reaktionszeit T^r mit der Differenz zwischen dem lichten Zeitabstand und dem Sollzeitabstand. Der Inhalt der Klammer beschreibt also den Unterschied zwischen dem aktuell vorhandenen lichten Zeitabstand und dem Soll-Zeitabstand. Damit diese Abweichung rechtzeitig ausgeglichen werden kann, muss die Änderung des lichten Zeitabstandes \dot{T}_i der

Abweichung des Ist- und Soll-Abstandes pro Reaktionszeit T^r entsprechen. Daraus entsteht Gleichung 3.9. Der lichte Zeitabstand $T_i(t)$ wird mit Gleichung 3.10 ermittelt.

$$T_i(t) = \frac{x_{i+1}(t) - x_i(t) - l}{\dot{x}_i(t)} \quad (3.10)$$

Der lichte Soll-Zeitabstand kann mit der KLZS nach ISO 15622 bestimmt werden [43]. Die KLZS beschreibt den Abstand als proportional zur Geschwindigkeit:

$$d_i = T \cdot \dot{x}_i \quad (3.11)$$

Der Proportionalitätsfaktor ist dabei der lichte Zeitabstand T . Es entsteht eine stabile Dynamik, die ein realistisches Halten eines möglichst konstanten Zeitabstandes darstellt. Der lichte Soll-Zeitabstand kann errechnet werden, indem Gleichung 3.11 nach T umgestellt wird und für \dot{x}_i die makroskopische Wunschgeschwindigkeit V_0 verwendet wird:

$$T = \frac{d_i}{V_0} \quad (3.12)$$

Im nächsten Schritt wird eine neue Variable entsprechend der Wunschgeschwindigkeit V_0 eingeführt: Der lichte Wunschzeitabstand T_0 . Je nach Fragestellung kann es notwendig sein, V_0 oder T_0 oder beide festzulegen. Mit Gleichung 3.13 wird eine Worst-Case-Betrachtung durchgeführt, wie sie für Sicherheitsanalysen üblich ist.

$$T = \max \left[T_0, \frac{d_i}{V_0} \right] \quad (3.13)$$

Als lichter Soll-Zeitabstand T wird derjenige Abstand aus Gleichung 3.13 verwendet und in Gleichung 3.9 eingesetzt, welcher größer ist. So wird das Risiko vermieden, zu kleine lichte Wunschzeitabstände anzugeben, da die KLZS parallel immer adäquate Zeitabstände berechnet, die verwendet werden, wenn T_0 zu klein gewählt wird. Die Abstände d_i werden aus den Positionen der Fahrzeuge berechnet.

Nach dem Einsetzen in Gleichung 3.9 kann es zu zwei Fällen kommen: Entweder ist der lichte Ist-Zeitabstand $T_i(t)$ größer oder kleiner als der lichte Soll-Zeitabstand T . Ist der lichte Soll-Zeitabstand T kleiner, muss der lichte Ist-Zeitabstand $T_i(t)$ angeglichen werden, indem er reduziert wird. Für den Fall wird die Klammer aus Gleichung 3.9 negativ, wodurch die Lösung der Gleichung, also die Änderung bzw. Ableitung des lichten Zeitabstandes $\dot{T}_i(t)$ auch negativ wird. Für den nächsten Zeitschritt wird der lichte Zeitabstand verkleinert und nähert sich dem lichten Soll-Zeitabstand an. Wenn der lichte Soll-Zeitabstand T größer als der lichte Ist-Zeitabstand $T_i(t)$ ist, muss der lichte Ist-Zeitabstand vergrößert werden. Die Ableitung des lichten Zeitabstandes aus

Gleichung 3.9 wird positiv und sorgt für eine Vergrößerung des lichten Ist-Zeitabstandes.

Der Bezug auf die Reaktionszeit T^r (Gl. 3.9) dient der zeitlichen Realisierbarkeit der Regelung. Die Gleichung kann auch als anteilige Beziehung gesehen werden. Ist der Betrag der Differenz der lichten Zeitabstände kleiner als die Reaktionszeit, beträgt die Zeit in der nach geregelt werden muss, einen Teil der Reaktionszeit. Es kann gewährleistet werden, dass die neuen Abstände innerhalb der Reaktionszeit eingestellt werden können. Die Steigung der Änderung liegt dann unter 1, wodurch moderate Beschleunigungen auftreten. Wenn aber der Betrag der lichten Zeitabstände größer ist als die Reaktionszeit bedeutet das, dass innerhalb eines Vielfachen der Reaktionszeit nach geregelt werden muss. Die Ableitung der Änderung liegt also über 1, wodurch sehr hohe Beschleunigungen auftreten können, um rechtzeitig die Abstände anpassen zu können. Besonders kritisch ist das bei zu kleinen Abständen. Hier kann es zu Kollisionen kommen, wenn die Reaktionszeit nicht eingehalten werden kann. Bei zu großen Abständen kann es zu Stop-and-Go-Wellen kommen.

Das Modell der ersten Ordnung (Gl. 3.9) kann in ein Modell der zweiten Ordnung transformiert werden, welches die Beschleunigung berücksichtigt. Dafür sind folgende Schritte notwendig: Zunächst wird der lichte Zeitabstand T_i in seine Komponenten zerlegt (Gl. 3.14).

$$T_i = \frac{d}{v} = \frac{s-l}{\dot{x}_i} = \frac{\Delta x_i - l}{\dot{x}_i} \quad (3.14)$$

Die Ableitung des hinteren Teils von Gleichung 3.14 läuft auf Gleichung 3.15 hinaus.

$$\dot{T}_i = \frac{\Delta \dot{x}_i \dot{x}_i - \ddot{x}_i (\Delta x_i - l)}{(\dot{x}_i)^2} \quad (3.15)$$

Diese Gleichung entspricht der ersten Ordnung Modellgleichung des ATG (Gl. 3.9), da sie ebenfalls die Ableitung des lichten Zeitabstandes beschreibt. Die beiden Gleichungen können also gleichgesetzt werden, um dann nach der Beschleunigung umzustellen:

$$\frac{\Delta \dot{x}_i \dot{x}_i - \ddot{x}_i (\Delta x_i - l)}{(\dot{x}_i)^2} = \frac{1}{T^r} [T - T_i] \quad (3.16)$$

$$\ddot{x}_i (\Delta x_i - l) = - \left(\frac{1}{T^r} (T - T_i) (\dot{x}_i)^2 - \Delta \dot{x}_i \dot{x}_i \right) \quad (3.17)$$

$$\ddot{x}_i = \frac{\Delta \dot{x}_i \dot{x}_i - \frac{(\dot{x}_i)^2}{T^r} (T - T_i)}{\Delta x_i - l} \quad (3.18)$$

$$\ddot{x}_i = \frac{\Delta \dot{x}_i \dot{x}_i - \frac{(\dot{x}_i)^2}{T^r} (T - T_i)}{d} \quad (3.19)$$

$$\ddot{x}_i = \frac{(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \dot{x}_i}{d} - \frac{\dot{x}_i \frac{\dot{x}_i}{T^r} (T - T_i)}{d} \quad (3.20)$$

$$\ddot{x}_i = (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_i} \frac{\dot{x}_i}{T^r} (T - T_i) \quad (3.21)$$

$$\ddot{x}_i = (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \frac{1}{T_i} - \left(\frac{T}{T_i} - \frac{T_i}{T_i} \right) \frac{\dot{x}_i}{T^r} \quad (3.22)$$

$$\ddot{x}_i = (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \frac{1}{T_i} - \left(\frac{T}{T_i} - 1 \right) \frac{\dot{x}_i}{T^r} \quad (3.23)$$

$$\ddot{x}_i = \frac{\dot{x}_i}{T^r} \left(1 - \frac{T}{T_i} \right) + \frac{1}{T_i} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \quad (3.24)$$

Bisher wurde die Zeitabhängigkeit vernachlässigt. Wird Gleichung 3.24 um die Variable t ergänzt, ist das Ergebnis die endgültige Modellgleichung zweiter Ordnung des ATG.

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{\dot{x}_i(t)}{T^r} \left[1 - \frac{T}{T_i(t)} \right] + \frac{1}{T_i(t)} [\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_i(t)] \quad (3.25)$$

Für die Simulation wird dieses Modell der zweiten Ordnung nach Gleichung 3.25 verwendet. Die Beschleunigung ist ein wichtiger Parameter, die sonst nicht berücksichtigt werden kann.

Das ATG ist ein nichtlineares Abstands- und Geschwindigkeitsbasiertes Modell, welches die Parameter der klassischen Modelle (V_0, T, l, T^r) beinhaltet. Ein Vorteil des ATG besteht in dem Vorhandensein nur eines Reaktionszeit-Parameters. Denn eine Vielzahl von Parametern neigen zu einer abnehmenden Robustheit von Modellen. Die Eigenschaften dieses Modells und die Wahl der Parameter gilt es in dieser Arbeit zu untersuchen.

3.1.5 Übersicht weiterer Fahrzeugfolgemodelle

Die bisher vorgestellten Modelle sind nur eine Stichprobe (auch wenn sie wichtige Vertreter sind) aus der Grundgesamtheit der bisher etablierten Fahrzeugfolgemodelle. Um den Blick auf den Stand der Technik noch etwas mehr zu weiten, sind in Tabelle 3.2 weitere Modelle aufgelistet. Allerdings werden diese nicht näher erläutert.

Die Besonderheit am Modell von Lenz ist, dass sich von der Sichtweise gelöst wird, nur die Beziehung zwischen vorausfahrenden und folgendem Fahrzeug zu betrachten. Beim Lenz-Modell wird nicht nur das $n + 1$ te Fahrzeug für die Regelung der Parameter herangezogen, sondern es werden die Fahrzeuge bis zum $n + k$ ten Fahrzeug in einer

Tabelle 3.2: Auflistung einiger longitudinaler Fahrzeugfolgmodelle

Modell	Defintion
Helly (1961):	$\ddot{x}_i(t + T^r) = \frac{1}{T_1^r} [x_{i+1}(t) - x_i(t) - D(\dot{x}_i(t))] + \frac{1}{T_2^r} [\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_i(t)]$
Gazis (1961):	$\ddot{x}_i(t + T^r) = \lambda \pm [\dot{x}_i(t + T^r)]^n \frac{\dot{x}_{i+1}(t) - \dot{x}_i(t)}{[x_{i+1}(t) - x_i(t)]^m}$
Gipps (1981):	$\dot{x}_i(t + T^r) = aT^r + \left((aT^r)^2 - a \left[2d_i(t) - \dot{x}_i(t)T^r - \frac{\dot{x}_{i+1}^2(t)}{a} \right] \right)^{\frac{1}{2}}$
Lenz (1999):	$\ddot{x}_i(t) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{T_k^r} \left(V \left(\frac{x_{i+k}(t) - x_i(t)}{k} \right) - \dot{x}_i(t) \right)$
IDM (2000):	$\begin{cases} \ddot{v}_i(t) = a \left[1 - \left(\frac{\dot{x}_i(t)}{V_0} \right)^4 - \left(\frac{f(\dot{x}_{i+1}(t), \dot{x}_i(t))}{x_{i+1}(t) - x_i(t) - l} \right)^2 \right] \\ f(v, v_1) = \Delta_0 + \Delta_1 \sqrt{\frac{v}{V_0}} + Tv + v \frac{v - v_1}{2\sqrt{ab}} \end{cases}$

Kolonne von K Agenten betrachtet. Dabei kann die Kolonne auch in mehrere Unter-einheiten von K Agenten aufgeteilt werden, um nicht zwangsläufig die ganze Kolonne in die Regelung mit aufnehmen zu müssen. Das Intelligent-Driver-Modell (IDM) ist ein wie in Kapitel 2.1.8 erwähntes Modell höherer Ordnung. Es beinhaltet die zweite Ableitung der Geschwindigkeit und ist damit ein Modell dritter Ordnung. Das IDM ist ein zeitkontinuierliches Modell, welches nachweislich in allen Verkehrssituationen realistische Parameter erzielt, um Kollisionsfreiheit zu gewährleisten [16]. Die Komplexität des Modells macht es jedoch anfällig für Störungen, wie Messungenauigkeiten oder Systemausfälle. Grundsätzlich kann gesagt werden: Je mehr gegenseitig abhängige Komponenten ein System beinhaltet, desto unzuverlässiger wird es.

3.2 Anforderungen an das Fahrzeugfolgmodell

3.2.1 Allgemeines

Als Grundlage für die modellbasierte Sicherheitsanalyse ist es notwendig Anforderungen an das Fahrzeugfolgmodell zu definieren (Kapitel 2.3.2). So kann verifiziert werden, welches Verhalten des Systems und welche Zustände der Parameter als sicher bzw. komfortabel angesehen werden können. Ziel dieser Arbeit ist es, die Eigenschaften bzw. Parameter des Adaptive-Time-Gap-Modells hinsichtlich Sicherheits- und Komfortaspekten zu verifizieren und zu validieren. Dafür wird in diesem Kapitel eine fundierte Anforderungsliste erstellt. Regelungen für die Sicherheit im Straßenverkehr liefert die Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) [1]. Einige Anforderungen können hieraus abgeleitet werden. Die in der Verordnung getroffenen Regeln sind jedoch auch in Frage

zu stellen, um einen Beitrag zur Forschung zu leisten und Verbesserungen vornehmen zu können. Für die flächendeckende Einführung des automatisierten und autonomen Fahrbetriebs wird eine Anpassung der StVO benötigt, wie es derzeit bereits mit anderen Gesetzen und Verordnungen geschieht. Außerdem liefern die Normen ISO 15622 und ISO 22179 Anforderungen für ACC-Systeme, welche ebenfalls für die folgende Spezifikation herangezogen werden [43, 44].

3.2.2 Abstände

Für die Regulierung der longitudinalen Abstände der Fahrzeuge im Straßenverkehr sieht die StVO folgende Strategie vor:

Der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter diesem gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird. (...), der Führer des Kraftfahrzeuges [hat] über seine allgemeinen Verpflichtungen hinaus einen Abstand in Metern zu einem vorausfahrenden Fahrzeug von mindestens der Hälfte des auf dem Geschwindigkeitsmesser in km/h angezeigten Zahlenwertes der gefahrenen Geschwindigkeit einzuhalten ... (§ 2 Abs. 3a und § 4 Abs. 1 StVO) [1].

Das Schutzziel besteht also darin, keine Verkehrsteilnehmer durch Kollisionen zu schädigen. Kollisionen treten auf, wenn die Abstände zwischen den Fahrzeugen negativ oder null werden. Die Anforderungen des halben Tacho-Abstandes kann mit der Konstanten-Lichten-Zeitabstand-Strategie nach ISO 15622 in das Fahrzeugfolgenmodell implementiert werden (Gl. 3.11). Als lichter Zeitabstand muss dementsprechend $T = 1,8 \text{ s}$ gewählt werden, denn dies entspricht etwa einem Abstand der halben Geschwindigkeit in Metern. Die Norm schlägt einen lichten Zeitabstand von 1,8 s bis 2,2 s vor [43]. Mithilfe der Simulation soll verifiziert werden, welche Zeitabstände gewählt werden können, um eine Kollisionsfreiheit zu garantieren.

3.2.3 Geschwindigkeit

Die StVO gibt Regelungen für die Geschwindigkeit vor, die mithilfe von Simulationen schwer zu prüfen sind, da hier einige Anforderungen an die Umgebung getroffen werden:

Wer ein Fahrzeug führt, darf nur so schnell fahren, dass das Fahrzeug ständig beherrscht wird. Die Geschwindigkeit ist insbesondere den Straßen-, Verkehrs-, Sicht- und Wetterverhältnissen sowie ... den Eigenschaften von Fahrzeug und Ladung anzupassen. Beträgt die Sichtweite durch Nebel, Schneefall oder Regen weniger als

50 m, darf nicht schneller als 50 km/h gefahren werden, wenn nicht eine geringere Geschwindigkeit geboten ist. Es darf nur so schnell gefahren werden, dass innerhalb der übersehbaren Strecke gehalten werden kann. (...) Ohne triftigen Grund dürfen Kraftfahrzeuge nicht so langsam fahren, dass sie den Verkehrsfluss behindern. (§ 3 Abs. 1 und 2 StVO) [1].

Die Geschwindigkeit soll an Wetterbedingungen und an Eigenschaften des Fahrzeugs angepasst werden. Denn auch bei automatisierten Fahrzeugen kann es zu Kontrollverlusten kommen. Zusätzlich sind fahrsituativ abhängige Höchstgeschwindigkeiten angegeben. Das Fahrzeugfolgemodell benötigt also Schnittstellen an denen die Geschwindigkeitsparameter verändert werden können. Die Schnittstellen können mit Informationen von Sensorik gespeist werden. Zusätzlich muss die Möglichkeit gegeben sein, eine manuelle Einstellung der Parameter im Cockpit vorzunehmen, um Anpassungen der Geschwindigkeit hinsichtlich des Fahrzeugtyps und der Ladung zu ermöglichen. Diese Einstellung kann auch automatisch ablaufen. Auf den Umfang der Parameteranpassungen hinsichtlich äußerer Einflüsse wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Zu hohe Geschwindigkeiten werden das Wohlbefinden der Mitfahrer eines automatisierten Fahrzeugs negativ beeinflussen. Die Abgabe der Kontrolle des Fahrzeugs bei sehr hohen Geschwindigkeiten führt zu einem Gefühl der Unsicherheit. Schließlich steigt die Gefahr bei zunehmender Geschwindigkeit (Kapitel 2.2.1). Welche Geschwindigkeit als zu hoch angesehen wird ist subjektiv. Dieselbe Beanspruchung führt bei unterschiedlichen Personen zu verschiedenen Belastungen. Deswegen muss manuell einstellbar sein, welche maximale Geschwindigkeit zugelassen wird, sofern diese in der Simulation als sicher verifiziert werden. Die betrachtete AuG besitzt den Anspruch, den gesamten Geschwindigkeitsbereich, anfangend bei 0 km/h zu regeln. Damit der Verkehrsfluss nicht behindert wird, muss die Wunschgeschwindigkeit über 25 km/h (7 m/s) eingestellt werden [44].

3.2.4 Beschleunigung

Die Frage nach den Anforderungen hinsichtlich der Beschleunigung ist hauptsächlich eine Angelegenheit des Komforts. Hier bestehen aber auch technische Limitationen. Eine Beschleunigung von 4 m/s^2 (7 s von Null auf 100 km/h) ist die obere Grenze der technischen Realisierbarkeit [16]. Die maximale mögliche negative Beschleunigung ist durch eine Notbremsung auf trockener Straße markiert, welche einer Beschleunigung von -9 m/s^2 entspricht [16]. Schnelle Änderungen der Geschwindigkeit sind für die Mitfahrer unkomfortabel. Außerdem wird so das Fahrzeug für andere Verkehrsteilneh-

mer unberechenbar, wodurch es zu einem erhöhten Sicherheitsrisiko wird. Deswegen sind die Beschleunigungen nach Bild 3.1 zu begrenzen.

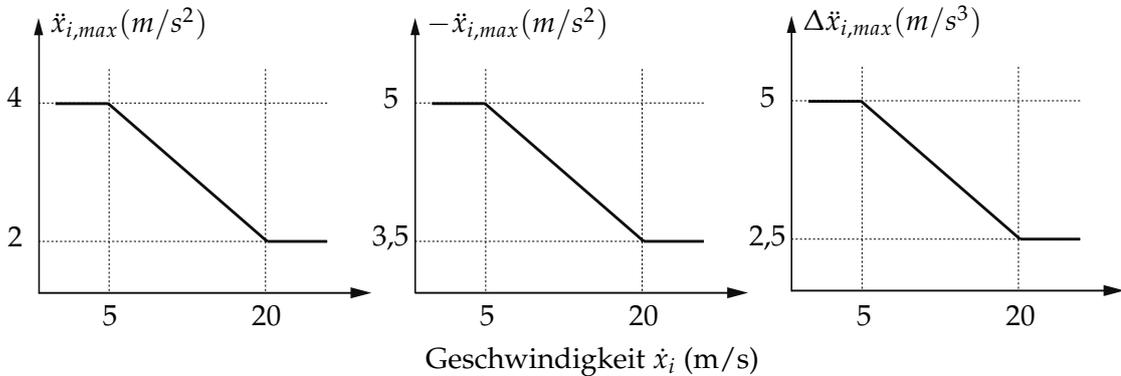


Bild 3.1: Begrenzung der maximalen Beschleunigung bei Adaptive Cruise Control Systemen nach ISO 22179. In Anlehnung an [44]

Die maximalen Beschleunigungen unter 5 m/s (18 km/h) und über 20 m/s (72 km/h) bleiben konstant. Werte in diesem Geschwindigkeitsbereich können mit Gleichung 3.26 interpoliert werden. Wobei z die Geschwindigkeit ist, für die die maximale Beschleunigung berechnet werden soll.

$$\ddot{x}_{berechnet}(z) = \ddot{x}_{i,1} + \frac{\ddot{x}_{i,2} - \ddot{x}_{i,1}}{\dot{x}_{i,2} - \dot{x}_{i,1}} (z - \dot{x}_{i,1}) \quad (3.26)$$

Die Beschleunigung $-\ddot{x}_{i,max}$ beschreibt die negative Beschleunigung beim Bremsvorgang. $\Delta\ddot{x}_{i,max}$ ist die maximale Abweichung der Beschleunigung pro Sekunde. Begrenzungswerte der positiven und negativen Beschleunigung werden gemittelt über 2 s betrachtet. Für die Beschleunigungsabweichung wird über 1 s gemittelt.

3.2.5 Stabilität

Wie in Kapitel 2.4.5 erwähnt kann die Stabilität des ATG wegen seiner nichtlinearen Form, nicht durch Verfahren quantifizierbar geprüft werden. Die Stabilität muss anhand der Simulation beurteilt werden. Das ist Modell ist als stabil anzusehen, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Abstände, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sollen zwischen den Fahrzeugen homogen sein, d.h. ohne große Abweichungen. Das ist die Stabilitätslage, in die nach einer Abweichung zurück gekehrt wird. Diese Forderungen resultieren in der Abwesenheit von Stop-and-Go-Wellen. Die Homogenität kann anhand der Trajektorien geprüft werden. Das dritte Diagramm aus Bild 3.1 ist für die Sicherstellung des homogenen Zustands zu beachten. Oszillationen der Beschleunigungen und Abstände konvergieren

gegen den Soll-Wert und bei den Beschleunigungen gegen 0 m/s^2 . Eine Spezifikation der Zeit in der das Abklingen vollzogen sein muss (Relaxationszeit), ist nicht notwendig. Hier wird sich nach dem Auftreten von Kollisionen orientiert. Jede Zeit, die in einer Kollisionsfreiheit mündet, wird akzeptiert. Umgekehrt bedeutet das, dass Beschleunigungen und Abstände nicht divergieren dürfen, also sich nicht kontinuierlich vom Soll-Wert entfernen dürfen. Das System ist robust gegen Störungen.

3.2.6 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit des Menschen liegt bei ca. 0,3 s [45]. Im Verkehrsgeschehen kommen dazu noch die sogenannte Schrecksekunde und die Fußumsetzzeit, wodurch eine Reaktionszeit von ca. 1 s erreicht wird [45]. Individuelle Unterschiede und die Möglichkeit von verschiedenen mentalen Zuständen wie Müdigkeit lassen eine Varianz der menschlichen Reaktionszeit erwarten. Für die Erfüllung der Regel des halben Tachoabstands wird deswegen von einer Reaktionszeit von 1,8 s ausgegangen [46]. In ACC Systemen sind Reaktionszeiten bis 0,5 s möglich [47]. Da die Automation eine Verbesserung der Menschlichen Fähigkeiten darstellen soll, wird eine Reaktionszeit unter 1,8 s simuliert. Folglich gilt die Anforderung: Die Reaktionszeit muss zwischen 0,5 s und 1,5 s liegen.

3.2.7 Zusammenfassung der Anforderungen

Die Anforderungen an das Fahrzeugfolgemedell sind in folgender Auflistung zusammengefasst. Sie dienen als Grundlage für die Simulation.

Abstand

keine Kollisionen: keine negativen Abstände

lichter Zeitabstand: $1,8 \text{ s} \leq T \leq 2,2 \text{ s}$

Geschwindigkeit

Regelung des gesamten Geschwindigkeitsbereichs

minimale Wunschgeschwindigkeit von 25 km/h (7 m/s)

Einstellung der maximalen Wunschgeschwindigkeiten ermöglichen

Beschleunigung

$$\left. \begin{array}{l} 2 \text{ m/s}^2 \leq \ddot{x}_{i,max} \leq 4 \text{ m/s}^2 \\ 3,5 \text{ m/s}^2 \leq -\ddot{x}_{i,max} \leq 5 \text{ m/s}^2 \\ 2,5 \text{ m/s}^3 \leq \Delta\ddot{x}_{i,max} \leq 5 \text{ m/s}^3 \end{array} \right\} \text{abhängig von der Geschwindigkeit}$$

Bsp.:

$$-3,5 \text{ m/s}^2 \leq \ddot{x}_{i,max}(33 \text{ m/s (120 km/h)}) \leq 2 \text{ m/s}^2$$

$$-4,4 \text{ m/s}^2 \leq \ddot{x}_{i,max}(14 \text{ m/s (50 km/h)}) \leq 3,2 \text{ m/s}^2$$

Stabilität

homogene Trajektorien

keine Stop-and-Go-Wellen

gegen den Soll-Wert konvergierende Oszillationen

keine divergierenden Oszillationen

Jede Relaxationszeit wird akzeptiert, in der keine Kollisionen auftreten, während die Stabilitätsanforderungen eingehalten werden.

Reaktionszeit

$$0,5 \text{ s} \leq T^r \leq 1,5 \text{ s}$$

3.3 Simulation

3.3.1 Gegenstände der Simulation: Parameter und Variablen des Adaptive-Time-Gap-Modells

Für die Simulation sind vor allem vier Parameter des ATG von Bedeutung: Die Wunschgeschwindigkeit V_0 , der lichte Zeitabstand T , die Reaktionszeit T^r und die Fahrzeuglänge l . Letzteres wird konstant gehalten, um den Umfang der Simulation zu begrenzen und die Umsetzbarkeit im Straßenverkehr zu erleichtern. Zudem spielt die Verkehrsdichte eine Rolle, welche im nächsten Abschnitt genauer betrachtet wird. Die Fahrzeuglänge wird mit 5,3 m angesetzt. Dies entspricht der durchschnittlichen Fahrzeuglänge auf Autobahnen unter Berücksichtigung aller gängiger Fahrzeugarten (PKW, LKW, Reisebus, ...) und deren Gewichtung im Straßenverkehr [48]. Die Wunschgeschwindigkeit V_0 wird variiert. Zufällige Startpositionen der Fahrzeuge sorgen für eine optimale Grundlage der Sicherheitsanalyse. So werden möglichst variable Anfangspositionen betrachtet, die einen großen Bereich der Fahrsituationen abdecken. Hierbei liegt auch ein Problem. Es können nicht alle Fahrsituationen betrachtet werden, um den Umfang der Arbeit zu begrenzen. Eine Sicherheitsanalyse sollte aber den Anspruch einer Ganzheitlichkeit haben, weswegen die zufälligen Positionen sich gut eignen. Dabei kann es jedoch auch zu unrealistischen Fahrzeugkonfigurationen kommen, z.B. wenn Fahrzeu-

ge unrealistisch nah bei hohen Geschwindigkeiten positioniert werden. Das Verhalten diesbezüglich muss beobachtet werden.

3.3.2 Regelziele hinsichtlich der Maximierung des Verkehrsflusses

Ein Ziel des automatisierten Fahrens ist die Maximierung des Verkehrsflusses. Die Berechnungsgrundlage hierfür liefern die Kapitel 2.1.4 bis 2.1.5. Der maximale Fluss, also die Kapazität der Straße K , ist gegeben durch die Wunschgeschwindigkeit V_0 , den lichten Zeitabstand T und die Fahrzeuglänge l (Gl. 3.27). Grundlage der Simulation werden Parameter sein, die einen maximalen Verkehrsfluss ermöglichen. Aufgabe der simulationsbasierten dynamischen Sicherheitsanalyse wird es im nächsten Schritt sein, die Sicherheit und den Komfort des Modells nach den in Kapitel 3.2 definierten Anforderungen zu beurteilen. Genauer soll ermittelt werden, wie weit die Parameter den Parametern hinsichtlich des optimalen Flusses angenähert werden können, um die besagten Anforderungen noch zu erfüllen.

Bei einer typischen Autobahngeschwindigkeit von 120 km/h, bei der ein lichter Zeitabstand von $T = 2$ s gehalten wird, beträgt der maximale Fluss

$$K = \frac{V_0}{V_0 \cdot T + l} = \frac{33,333 \frac{m}{s}}{33,333 \frac{m}{s} \cdot 2 s + 5,3 m} = 0,463 \frac{1}{s}. \quad (3.27)$$

Dieser wird auch als Kapazität der Straße K bezeichnet, welche erreicht wird, wenn die Dichte der Fahrzeuge auf dem Streckenabstand den Wert nach Gleichung 3.28 annimmt.

$$\rho(K) = \frac{\rho_l}{1 + \rho_l V_0 T} = \frac{\frac{1}{5,3 m}}{1 + \frac{1}{5,3 m} \cdot 33,333 \frac{m}{s} \cdot 2 s} = 0,014 \frac{1}{m} \quad (3.28)$$

Auf einer Fahrbahn von 1000 m entspricht das einer Zahl von 14 Fahrzeugen. Die Diagramme auf der nächsten Seite (Bild 3.2 und 3.3) zeigen, dass die optimale Dichte hinsichtlich des maximalen Verkehrsflusses je nach Wahl des lichten Zeitabstandes und der Wunschgeschwindigkeit schwankt. Für die Sicherheitsanalyse wird der Dichtewert an die Wahl der Parameter nach Gleichung 3.28 angepasst. In der Realität würde das auch geschehen. Denn die Dichte passt sich in Form der Abstandsänderung durch die Konstante-Lichte-Zeitabstand-Strategie (Gl 3.11) an. Folgende Diagramme zeigen den Einfluss des lichten Zeitabstands (Bild 3.2) und der Geschwindigkeit (Bild 3.3) auf den Fluss bei gleichzeitigem Konstanthalten des jeweiligen anderen Parameters.

Mit abnehmendem lichten Zeitabstand steigt der Fluss. Zudem sind die Sprünge der Steigerung bei niedrigeren lichten Zeitabständen größer. Es ist also anzustreben, den

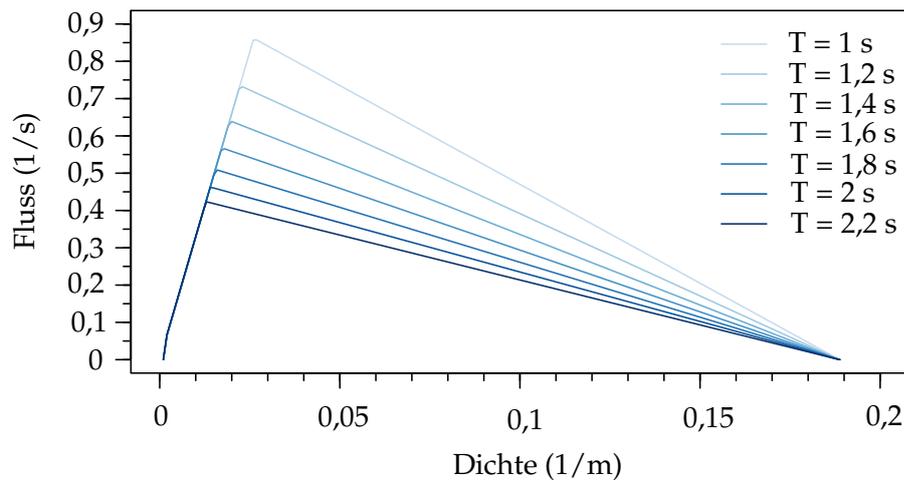


Bild 3.2: Einfluss des lichten Zeitabstandes auf den Verkehrsfluss bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h und einer Fahrzeuglänge von 5,3 m

lichten Zeitabstand so klein wie möglich zu wählen. In der Simulation wird ermittelt, wie weit T gesenkt werden kann, sodass die definierten Anforderungen noch erfüllt werden. Bild 3.3 zeigt den Einfluss der Geschwindigkeit auf den Verkehrsfluss.

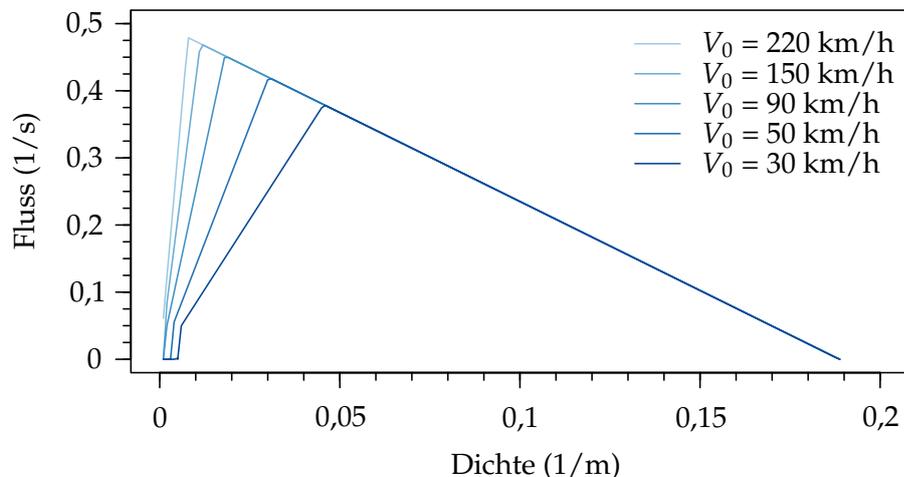


Bild 3.3: Einfluss der Geschwindigkeit auf den Verkehrsfluss bei einem konstanten lichten Zeitabstand von 2 s und einer Fahrzeuglänge von 5,3 m

Die Auswirkung der Geschwindigkeit auf den Verkehrsfluss ist geringer, als die Auswirkung des lichten Zeitabstands. Außerdem ist die Veränderung des Flusses, also die Sprünge zwischen zwei Spitzen, bei den simulierten Geschwindigkeiten im Vergleich geringer. Die größten Steigerungen des Flusses sind bei niedrigeren Geschwindigkeiten zu verzeichnen. Ab ca. 90 km/h ist die Steigerung nur noch marginal, was der Praxis zur Gute kommt (Stichwort Geschwindigkeitsbegrenzungen und Komfort). Denn so

muss die Geschwindigkeit nicht in die Höhe getrieben werden, um den Fluss zu maximieren. Das Diagramm zeigt, dass die bereits angenommene Geschwindigkeit von 120 km/h einen guten Zielwert darstellt.

3.3.3 Verhalten des Modells bei verschiedenen Geschwindigkeiten

3.3.3.1 Simulation mit niedriger Geschwindigkeit

Das Adaptive-Time-Gap-Modell reagiert unterschiedlich auf hohe und niedrige Geschwindigkeiten. Zur vergleichenden Analyse wird das Modell mit einer Geschwindigkeit von 18 km/h (5 m/s) und 120 km/h (33,3 m/s) simuliert. Die Geschwindigkeit von 18 km/h kommt einer langsamen aber flüssigen Fahrt im Stau oder Feierabend Verkehr nah. Flüssig, weil wie in Kapitel 3.3.2 erwähnt wird, die optimale Dichte eingestellt wird, sodass der Fluss maximal ist. Dabei wird ein lichter Zeitabstand von $T = 2$ s gewählt. Für die Reaktionszeit wird die Mitte des Spezifikationsbereich verwendet, also $T^r = 1$ s. Die Wahl der beiden Parameter folgt hier nur dem Zweck eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Simulationsergebnisse mit der **Geschwindigkeit von 18 km/h** sind in Bild 3.4 zu sehen.

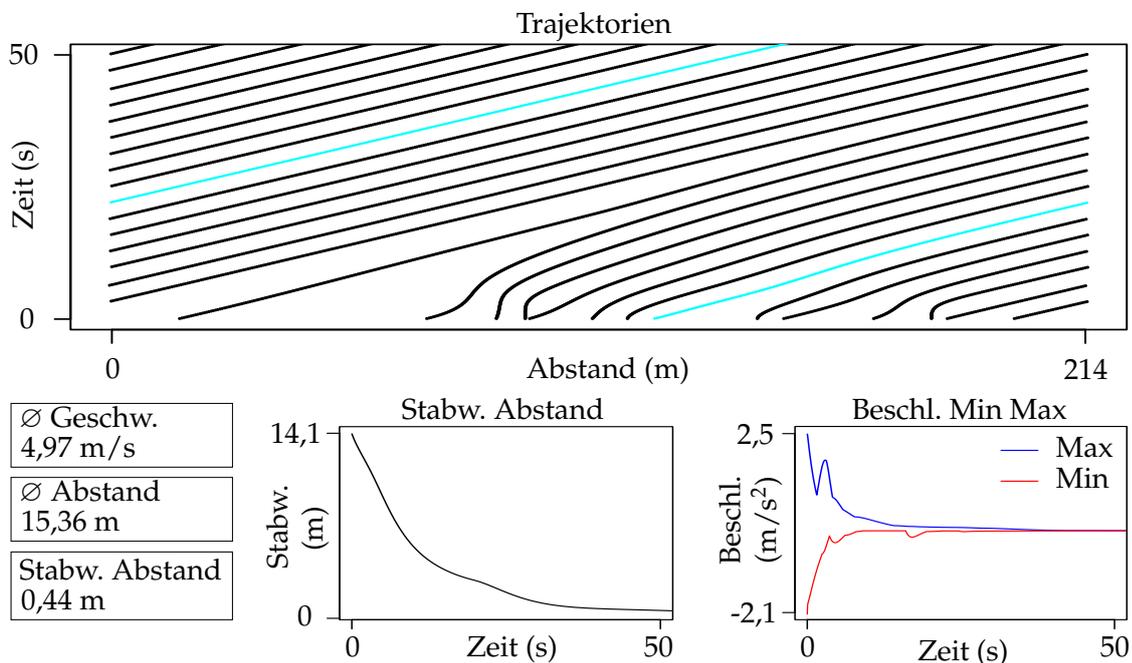


Bild 3.4: Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen auf einem Kreis mit der Länge von 214 m, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer **Wunschgeschwindigkeit von 18 km/h**, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell

Da die Fahrzeugkolonne auf einem Kreis simuliert wird, wird eine Endlosschleife von Trajektorien aufgezeichnet. Die cyanfarbene Trajektorie markiert das Führungsfahrzeug. Die anfänglich inhomogenen Startpositionen werden schnell kollisionsfrei homogenisiert. Nach ca. 20 s stellen sich perfekt homogene Trajektorien ein. Dabei werden gute Beschleunigungswerte erzielt. Zur Erinnerung: Bis 18 km/h (5 m/s) darf die Beschleunigung Werte zwischen -5 m/s^2 und 4 m/s^2 annehmen. Das Min Max Beschleunigungsdiagramm zeigt, dass die Werte deutlich eingehalten werden. Die zu Beginn große Standardabweichung der Abstände resultiert aus den inhomogenen Startpositionen. Ein Fahrzeug war, wie in den Trajektorien zu sehen ist, im Verhältnis sehr weit von dem vorausfahrenden und folgenden Fahrzeug entfernt. Die Standardabweichung wird schnell kleiner und nimmt nach 50 s einen Wert 0,44 m an. Der durchschnittliche Abstand ist mit 15,36 m sehr groß geraten. Der Zielwert beträgt $2 \text{ s} \cdot 5 \text{ m/s} = 10 \text{ m}$. Mit zunehmender Simulationzeit würde sich der Abstand verringern. Der aktuelle Wert ist v.a. geprägt durch die große Abstandsabweichung am Anfang. Die Wunschgeschwindigkeit wurde erreicht.

Zusätzlich muss noch die maximale Änderung der Beschleunigung pro Sekunde verifiziert werden. Bis 18 km/h darf sie 5 m/s^3 betragen. Für die Untersuchung wurden die Beschleunigungen der 14 Fahrzeuge in dreier Gruppierungen aufgezeichnet. Gezeigt werden nur die relevanten Diagramme, also die Diagramme der Fahrzeuge mit der größten Beschleunigungsänderung, da die Erkennbarkeit bereits bei einer geringen Verkleinerung der Diagramme stark leidet. Bei der 18 km/h Simulation erreichte Fahrzeug 9 die maximale Beschleunigungsänderung (Bild 3.5).

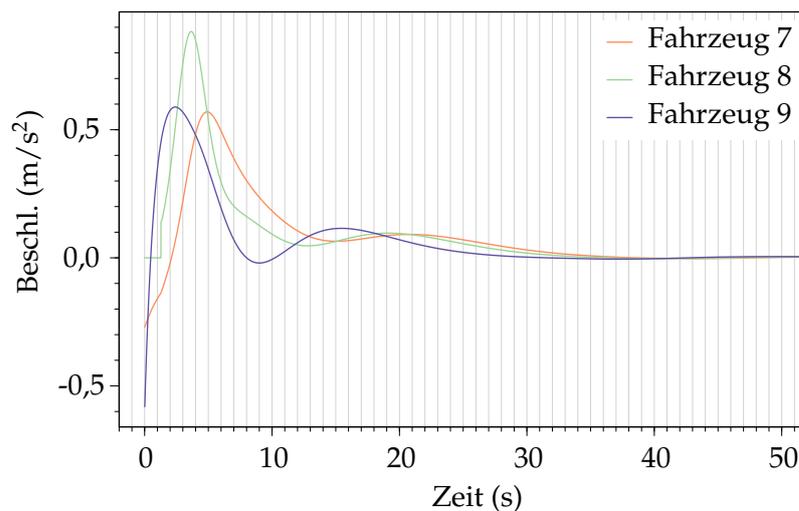


Bild 3.5: Beschleunigung dreier Fahrzeuge während einer Simulation des Adaptive-Time-Gap-Modells

In der ersten Sekunde erreicht Fahrzeug 9 den Maximalwert der Beschleunigungänderung aller Fahrzeuge mit einer Änderung von $0,95 \text{ m/s}^2$ pro s. Damit ist die Anforderung erfüllt. Bild 3.5 zeigt außerdem ein gutes Stabilitätsverhalten. Die Oszillation der Beschleunigung klingt schnell ab und läuft gegen null. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Simulation mit 18 km/h sämtliche Anforderungen erfüllt.

3.3.3.2 Simulation mit hoher Geschwindigkeit

Als nächstes wird eine **Simulation des Modells mit 120 km/h** und angepasster Dichte durchgeführt. Sonstige Parameter werden gleich gehalten. Die Simulationsergebnisse (Bild 3.6) zeigen mit dem Blick auf die Beschleunigungen ein schlechtes Verhalten.

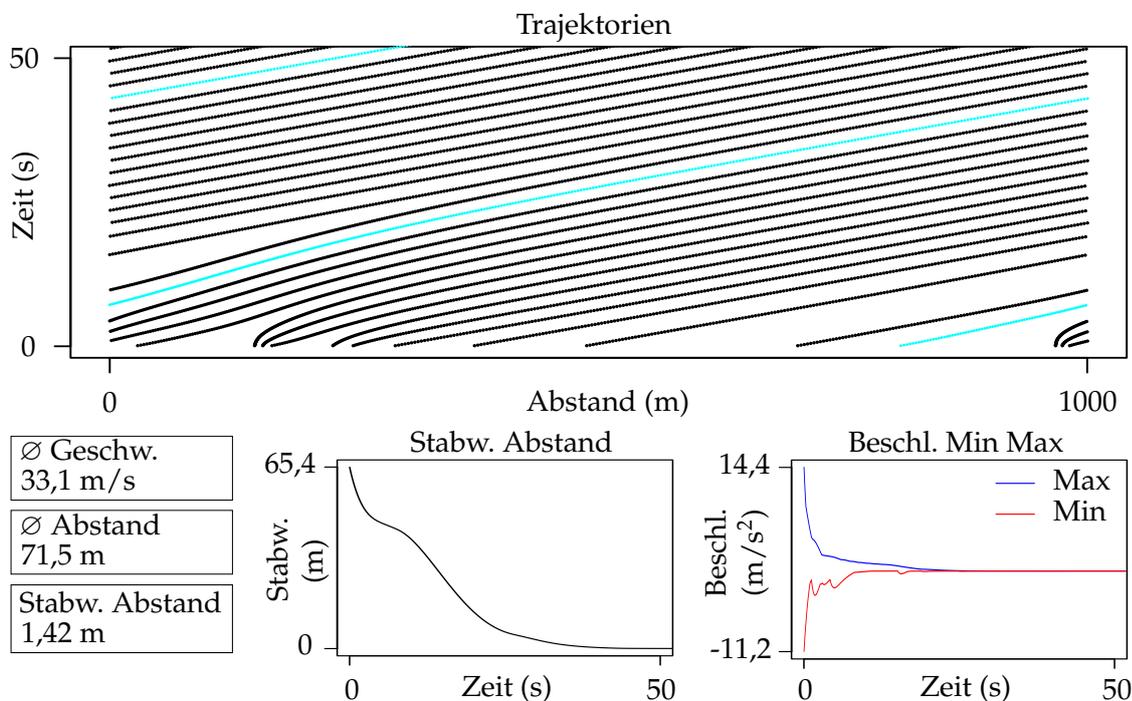


Bild 3.6: Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen auf einem Kreis der Länge von 1000 m, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer **Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h**, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell

Für das Halten der Sollabstände bei hoher Geschwindigkeit stellt das ATG hier viel zu große Beschleunigungen ein, die in dieser Simulation 7 mal größer sind, als die Spezifikation erlaubt. Bei 120 km/h dürfen die Beschleunigungen zwischen $-3,5 \text{ m/s}^2$ und 2 m/s^2 liegen. Mit diesen Werten erreicht das Modell eine sichere Fahrt. Es gibt keine Kollisionen und die raumzeitlichen Abstände werden schnell homogenisiert. Der durchschnittliche Abstand liegt sogar mit einer Sicherheitsmarge von 10 m über dem

Sollwert. So kann das Modell aber auf keinen Fall eingesetzt werden. Die hohen Beschleunigungen können in der Realität nicht umgesetzt werden. Von Komfort ist gar nicht zu sprechen. Die Beschleunigungsänderung braucht sich ebenfalls gar nicht erst angeguckt zu werden. Bei diesen Werten ist klar, dass die Anforderungen nicht erfüllt werden. Abhilfe kann die Erhöhung des lichten Zeitabstandes schaffen. Bild 3.7 zeigt, dass der lichte Zeitabstand auf 12 s erhöht werden muss, um mit 120 km/h die Anforderungen an die Maximalbeschleunigung zu erfüllen.

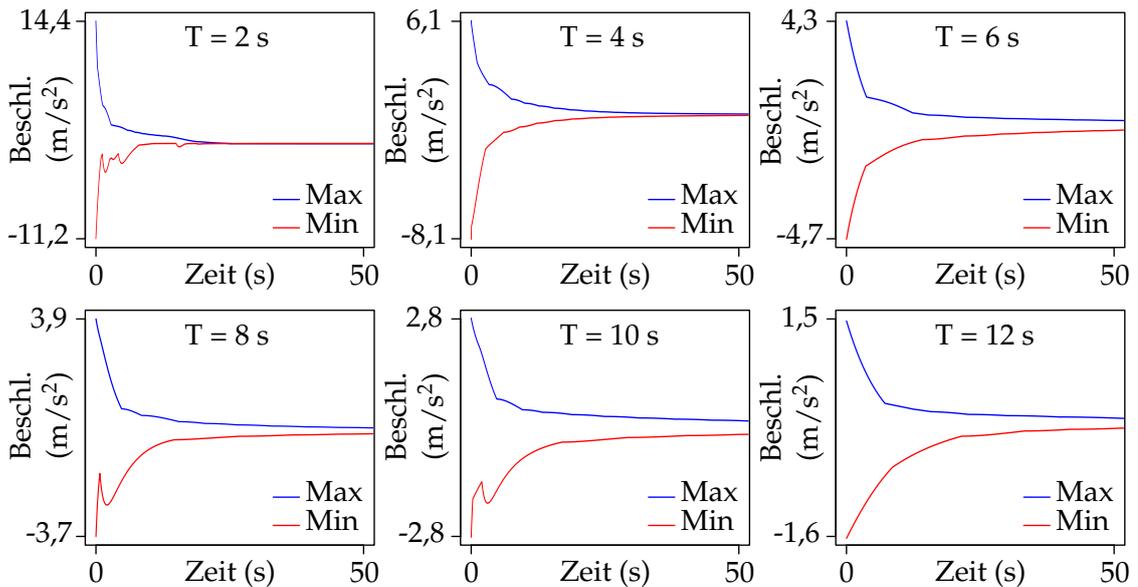


Bild 3.7: Simulation der Maximalbeschleunigungen bei 120 km/h mit Erhöhung des lichten Zeitabstandes nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell

Eine derartige Erhöhung des lichten Zeitabstandes macht jedoch keinen Sinn. Der Verkehrsfluss würde darunter leiden. Außerdem zeigt die Simulation (hier nicht dargestellt) eine erhöhte Neigung zu Stop-and-Go-Wellen bei hohem T . Es muss also ein Weg gefunden werden die Beschleunigungen auch bei kleinen lichten Zeitabständen gering zu halten. Dafür kann in den Regelkreis eine Begrenzung eingebaut werden, die die minimale und maximale Beschleunigung begrenzt. Jedoch ist ein mathematischer Beweis der Stabilität des Modells mit eingebautem Begrenzer nur schwer zu erbringen. Deswegen muss über Simulationen gezeigt werden, dass das Modell auch mit eingebauter Begrenzung stabil bleibt und keine Kollisionen auftreten. Dieselbe Simulation mit 120 km/h wird jetzt noch einmal mit Beschleunigungsbegrenzung durchgeführt. Die Ergebnisse können in Bild 3.8 eingesehen werden.

Das Modell mit der begrenzten Beschleunigung kann die Anforderungen erfüllen. Im vorgegebenen Beschleunigungsbereich homogenisieren sich die Trajektorien kollision-

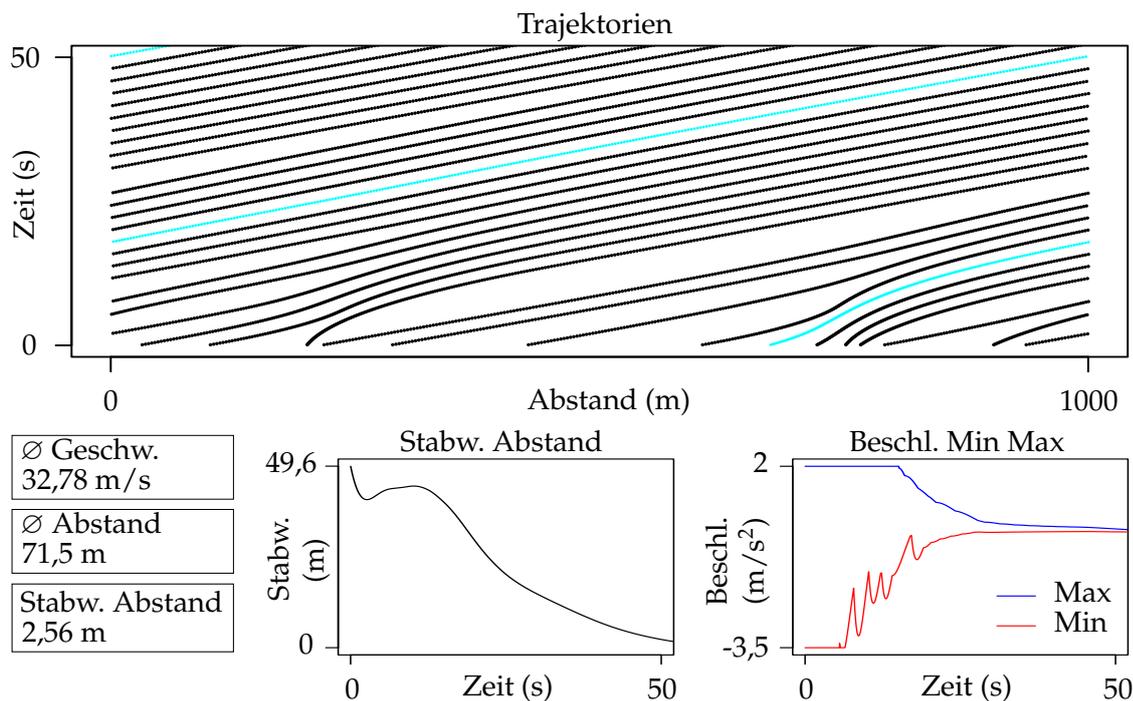


Bild 3.8: Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen mit **Beschleunigungsbegrenzung** auf einem Kreis der Länge von 1000 m, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell

frei. Weiterhin ist das Stabilitätsverhalten hervorragend, zu erkennen an der abnehmenden Oszillation im Min Max Diagramm der Beschleunigung. Auffällig ist, dass die Standardabweichung der Abstände erst ansteigt und dann kontinuierlich auf einen kleinen Wert sinkt. Das liegt an der begrenzten Beschleunigung. Fahrzeuge mit größerem Abstand können sich nur mit begrenzter Geschwindigkeitserhöhung nähern, während andere bereits nach kurzer Zeit ihren Sollabstand erreicht haben. So entfernen sich die Fahrzeug erst voneinander und nähern sich dann wieder an. In der Simulation hat das kein Problem dargestellt. Die Beschleunigungsbegrenzung hat jedoch einige Nachteile: Da die ursprünglich vorgesehene Beschleunigung, wegen der Begrenzung, an einigen Stellen nicht erreicht werden kann, steigt die Änderung der Beschleunigung an den betroffenen Stellen stark an, um den Beschleunigungsverlust aufzuholen. In dieser Simulation weist Fahrzeug 6 die größte Beschleunigungsänderung vor (Bild 3.9).

Die hinterlegten Linien markieren jeweils eine Sekunde in der Simulation. Mit Ihrer Hilfe kann die Änderung der Beschleunigung pro Sekunde abgelesen werden. In Sekunde 6 beträgt sie ca. $4,2 \text{ m/s}^3$. Das ist 1,6 mal so groß, als die Anforderung erlaubt. Durch eine Senkung der Geschwindigkeit können diese starken Anstiege nicht vermieden

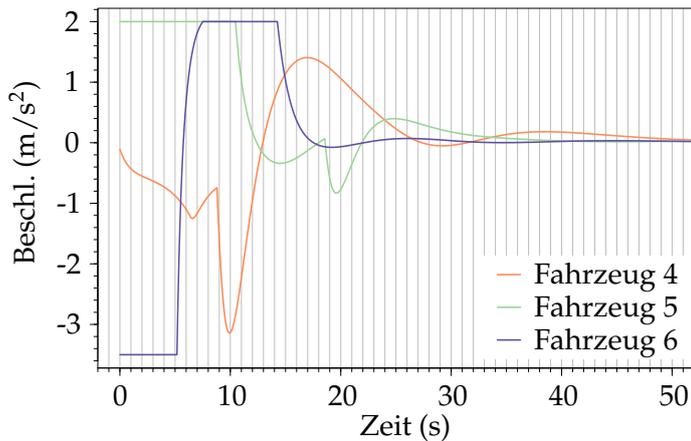


Bild 3.9: Begrenzte Beschleunigung dreier Fahrzeuge während einer Simulation des Adaptive-Time-Gap-Modells mit zufälligen Startpositionen

werden. Selbst bei 90 km/h treten sie noch auf. Es gibt aber eine Erklärung für das Problem. Sie steht im Zusammenhang mit der Wahl der zufälligen Startpositionen. Im Kapitel 3.3.1 wurde bereits darauf aufmerksam gemacht. Die Fahrzeuge haben für eine Geschwindigkeit von 120 km/h teilweise zu geringe Abstände (vgl. Bild 3.8). Denn das ATG wird die Wunschgeschwindigkeit so schnell wie möglich einstellen, wenn genügend Raum da ist. Einige Fahrzeuge sind wegen der geringen Abstände aber blockiert und fahren deswegen mit niedriger Geschwindigkeit, während andere Fahrzeuge eine freie Fahrbahn vor sich haben und entsprechend mit der Wunschgeschwindigkeit fahren können. Das Phänomen ist in Bild 3.10 zu sehen. Es zeigt die Geschwindigkeiten der 14 simulierten Fahrzeuge im zeitlichen Verlauf.

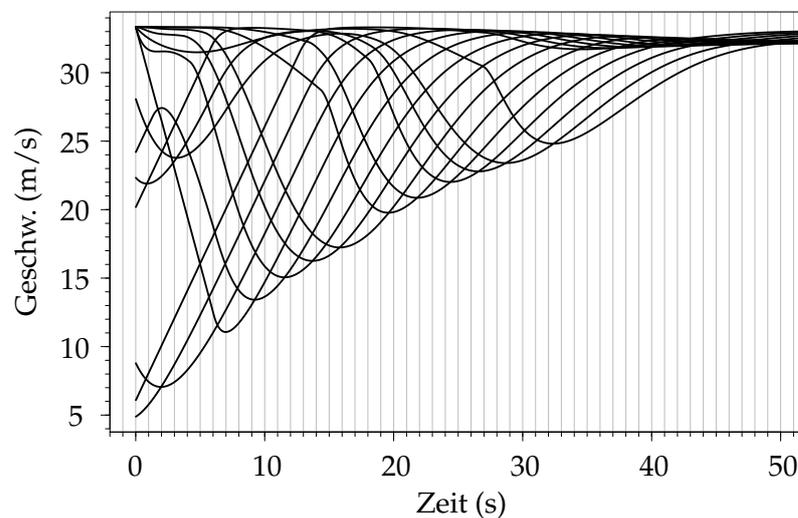


Bild 3.10: Begrenzte Beschleunigung dreier Fahrzeuge während einer Simulation des Adaptive-Time-Gap-Modells mit zufälligen Startpositionen

Die geblockten Fahrzeuge, die mit niedriger Geschwindigkeit starten, können konstant beschleunigen. Dabei entsteht die große Beschleunigungsänderung. Denn eine Geschwindigkeitsdifferenz von hier 100 km/h wird so schnell wie es geht aufgeholt.

Eine Lösung des Problems kann also erfolgen, indem geringe Abstände bei hohen Geschwindigkeiten vermieden werden. Und das ist realitätsnah. Inhomogene Fahrzeugpositionen sind nur anfänglich zu erwarten. In vorherigen Simulationen wurde bereits gezeigt, dass die Trajektorien sich im Laufe der Zeit schnell homogenisieren. Das Anfahren nach Stillstand geschieht mit geringer Geschwindigkeit. Hierfür wurde ebenfalls eine Anforderungskonformität gezeigt (Kapitel 3.3.3.1). Erst nach einer Verzögerung wird eine hohe Geschwindigkeit erreicht. Die Trajektorien haben sich bis dahin homogenisiert. Für die Simulation von großen Geschwindigkeiten macht es also Sinn homogenere Startpositionen zu simulieren. Um die Realität besser zu beschreiben werden aber keine komplett homogenen Startpositionen verwendet. Die Positionen werden basierend auf dem homogenen Zustand um ± 20 m verfälscht. Auf einer Strecke von 1000 m beträgt der durchschnittliche Abstand bei 14 Fahrzeugen 71,5 m. So kann beim Start ein Minimalabstand von 31,5 m vorliegen. Die Simulationsergebnisse können in Bild 3.11 betrachtet werden.

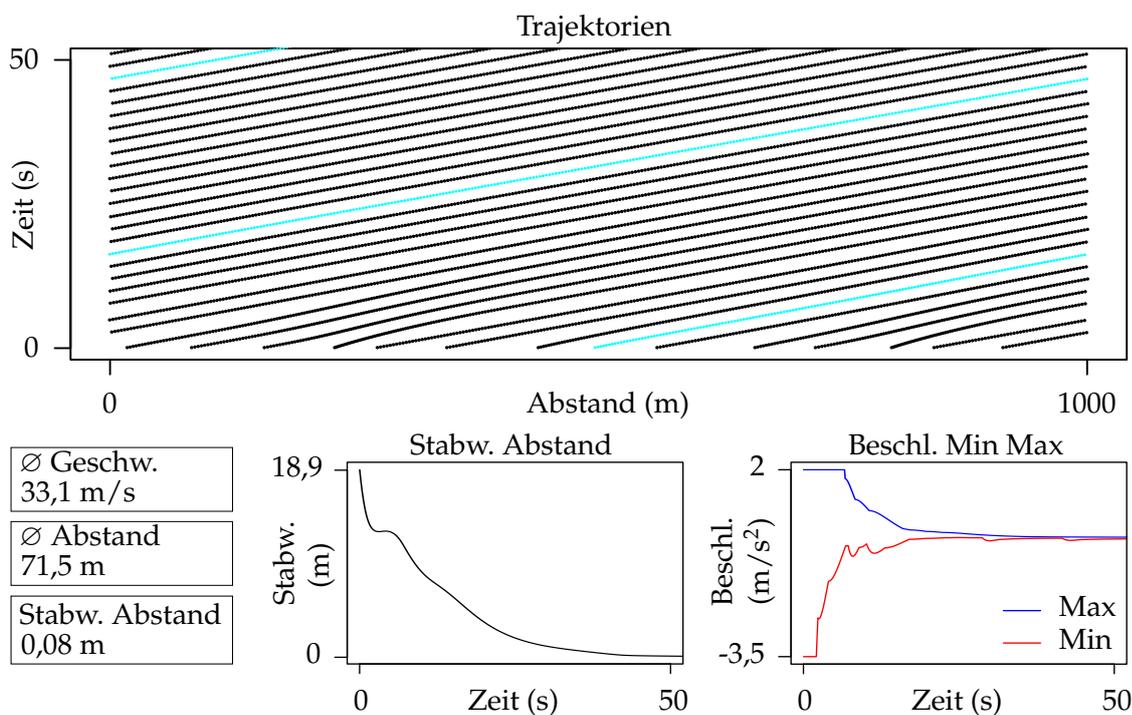


Bild 3.11: Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen mit auf einem Kreis der Länge von 1000 m mit **Störung der homogenen Abstände um ± 20 m**, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell

Da die Abstände zwischen den Fahrzeugen ähnlich sind, muss nicht mehr so intensiv geregelt werden. Die Trajektorien sind schon sehr früh sehr homogen. Dementspre-

chend gering ist die Standardabweichung der Abstände. Außerdem fällt mit dem Blick auf die Beschleunigungen auf, dass die Begrenzung nur etwa halb so lang aktiv ist, wie bei den zufälligen Anfangspositionen (Bild 3.8). Wie gut die homogenen Abstände die großen Beschleunigungsänderungen zurückhalten, kann in Bild 3.12 gesehen werden. Hier sind die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der 14 Fahrzeuge gegenübergestellt.

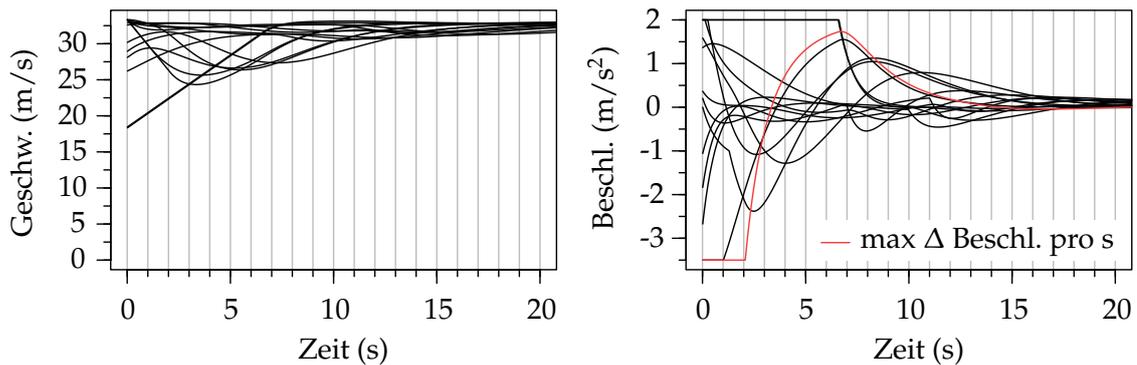


Bild 3.12: Geschwindigkeiten (links) und Beschleunigungen (rechts) der 14 Fahrzeuge mit homogenisierten Startpositionen bei 120 km/h

Die Geschwindigkeitsunterschiede wurden schonmal deutlich verringert. Trotzdem gibt es immer noch zwei Ausreißer (liegen übereinander), die im Verhältnis wesentlich langsamer sind. Das zeigt sich auch in den Beschleunigungen. Hier treten zwei Fahrzeuge mit großer Beschleunigungsänderung hervor. In Sekunde drei beträgt die Änderung der Beschleunigung eines Fahrzeugs 3 m/s^3 . Das ist immer noch zu viel, auch wenn in vielen Iterationen die Beschleunigungsänderungen die Spezifikation erfüllen. In einigen wenigen Anläufen wird sie jedoch überschritten und das kann nicht akzeptiert werden. Deswegen wird nachfolgend ein Sicherheitskonzept entworfen, welches u.a. auch dieses Problem behandelt.

3.3.4 Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für hohe Geschwindigkeiten

3.3.4.1 Identifikation der Minimalabstände für die Erfüllung der Beschleunigungsanforderungen

Bisher wurde herausgestellt, dass das Adaptive-Time-Gap-Modell zu große Beschleunigungsänderungen bei hohen Geschwindigkeiten zulässt. Das ist nicht nur eine Beeinträchtigung des Komforts, sondern auch ein Sicherheitsrisiko. Denn auf plötzliche Positionswechsel müssen die anderen Verkehrsteilnehmer schnell genug reagieren. Außerdem führen technische Limitationen dazu, dass nicht alle Fahrzeuge die geforderten

Werte aufbringen können, wodurch es zu Kollisionen kommen kann. Es wurde ermittelt, dass die Beschleunigungsänderung reduziert werden kann, wenn die Abstände vergrößert werden. Eine Strategie kann also sein, die Minimalabstände einzuhalten, die noch ausreichende Werte liefern. Der Minimalabstand kann ermittelt werden, indem alle Abstände gleich gehalten werden, bis auf den Abstand eines Fahrzeugs. Dieser Abstand wird Schrittweise geändert, bis der minimal mögliche Abstand erreicht ist (Bild 3.13).

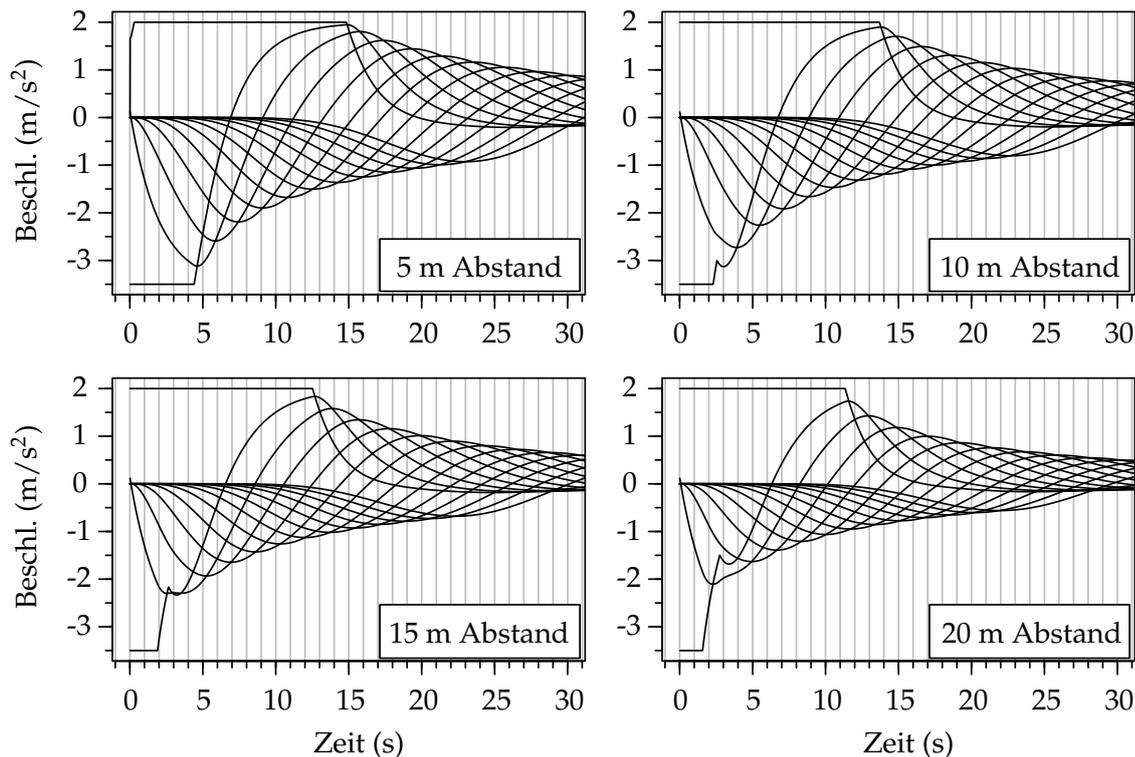


Bild 3.13: Beschleunigungsverhalten von 14 Fahrzeugen bei Veränderung des Abstands zwischen zwei Fahrzeugen

In den Beschleunigungs-Zeit-Diagrammen ist der Abstand des betrachteten Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug eingetragen. Die jeweils obere Kennlinie, die die nach oben hin begrenzt ist, zeigt die Beschleunigung des betrachteten Fahrzeugs. Das folgende Fahrzeug wird durch die untere Beschleunigungskennlinie, die die nach unten hin begrenzt ist, beschrieben. In ihr zeigen sich die maßgeblichen Auswirkungen der Abstandsveränderung. Denn das direkte Folgefahrzeug muss auf das Verhalten des betrachteten Fahrzeugs reagieren. Die darauf folgenden Fahrzeuge müssen wiederum reagieren. Vorausfahrende Fahrzeuge sind von der Abstandsänderung nicht direkt betroffen. Sie sind jedoch auch Folgefahrzeuge, da im Kreis simuliert wird. Es ist zu sehen, dass mit größer werdendem Abstand die Zeit der aktiven Beschleunigungsbe-

grenzung nach unten und nach oben kleiner wird. Die maximale Beschleunigung wird bei großem Abstand vorher reduziert, weil die Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs direkt zu Beginn relativ hoch ist, wodurch nicht mehr so lange beschleunigt werden muss. Bei kleinem Abstand ist die Geschwindigkeit viel geringer, wodurch länger beschleunigt werden muss, um die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen. Gut zu sehen ist im 5 m Abstand-Diagramm. Das betrachtete Fahrzeug beschleunigt am Anfang gar nicht. Der Abstand ist zu gering. Erst bei weiterfahren des vorderen Fahrzeugs kann beschleunigt werden. Dieses schlagartige beschleunigen liegt zwar noch in den Anforderungen, stellt aber eine erhebliche Einschränkung des Komforts dar, welche wie zuvor beschrieben auch zu einem Sicherheitsrisiko werden kann. Deswegen müssen hier Maßnahmen ergriffen werden (Kapitel 3.3.4.2).

Die anschließende Reduzierung der Beschleunigung des betrachteten Fahrzeugs weist zwischen den verschiedenen Abständen keine markanten Unterschiede auf. Dagegen zeigt das Beschleunigungsverhalten des Folgefahrzeugs eine deutliche Veränderung. Neben der Verkleinerung der Begrenzungszeit, vergrößert sich die Steigung der Beschleunigung mit abnehmenden Abstand. Die Anforderung der Beschleunigungsänderung von $2,5 \text{ m/s}^3$ wird dabei bis zum kleinsten simulierten Abstand von 5 m eingehalten. Problematisch sind die Spitzen, die sich am Anfang der Kennlinien bilden. Sie besitzen eine große Steigung, die bei den betrachteten Abständen nur anforderungskonform sind, weil sie bei kleinen Abständen wenig ausgeprägt sind, bei größeren Abständen aber länger werden, weswegen der Beschleunigungsgrenzwert bei voranschreitenden Abständen überschritten werden kann. Die Spitzen stehen im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs. Ist der Abstand klein, ist die Geschwindigkeit entsprechend gering. Das Folgefahrzeug erreicht schnell die Position des betrachteten Fahrzeugs und muss wieder langsamer werden. Bei größeren Abständen kann das betrachtete Fahrzeug zu Beginn schneller fahren. Es ist aber immer noch langsamer als das Folgende. So kann das Folgefahrzeug länger beschleunigen (bzw. schwächer bremsen), bis die Position des betrachteten Fahrzeugs erreicht wird. Diese Beschleunigungsspitzen können auch in den vorherigen Simulationen mit zufälligen Abständen beobachtet werden. Die Untersuchung des weiteren Verlaufs der Spitzen zeigt, dass sie bei großen Abständen verschwinden (Bild 3.14).

Fortgesetzt von Bild 3.13 wird in Bild 3.14 der Abstand bis zu einem Wert von 70 m weiter erhöht. Hier wird nur der Beschleunigungsverlauf des Folgefahrzeugs abgebildet. Die beschriebenen Spitzen sind annähernd bei einem Abstand von 45 m und komplett bei 50 m verschwunden. Ab diesen Abständen hat das betrachtete Fahrzeug bereits eine ausreichend hohe Geschwindigkeit, sodass das Folgefahrzeug nicht mehr bremsen

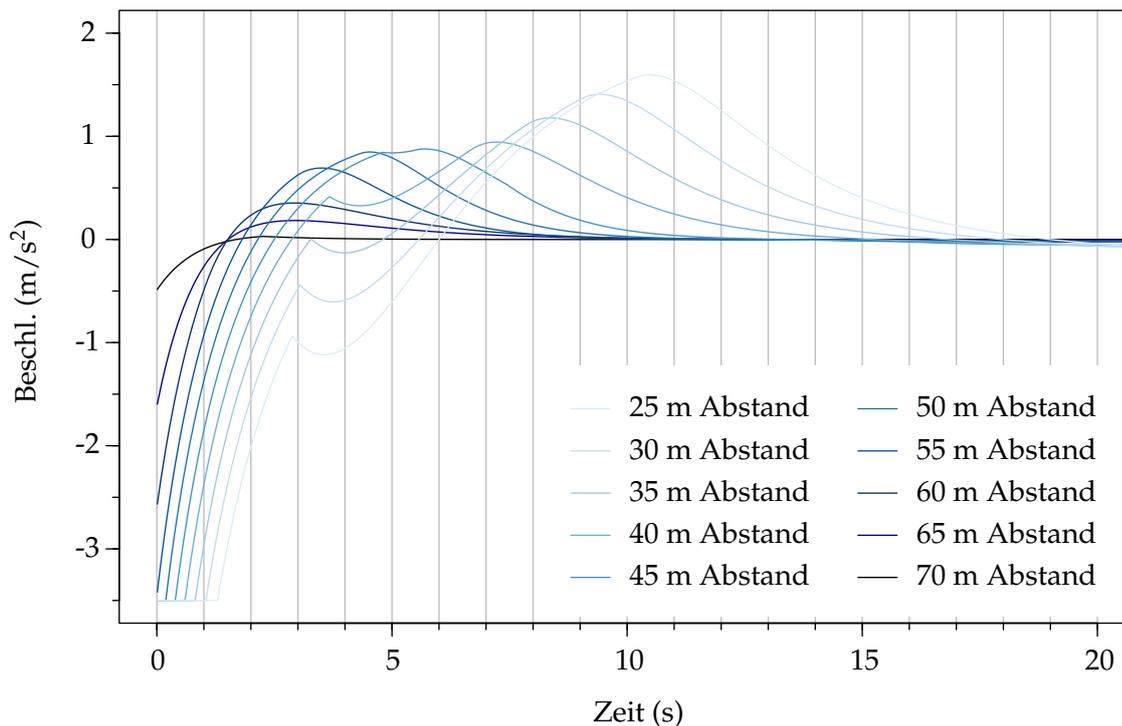


Bild 3.14: Beschleunigungsverhalten des Folgefahrzeugs bei Verringerung des Abstands vom vorausfahrend Fahrzeug zum Führungsfahrzeug

muss. Die Anforderung von $2,5 m/s^3$ wird hier überall eingehalten. Bei 55 m wird diese Grenze jedoch nur knapp unterschritten. Ein Annehmen dieses Abstandes als anforderungskonform wäre ein typischer Fall von „Torpfostendenken“, welches nicht anzustreben ist. Denn bei bereits leicht abweichenden Bedingungen könnte die Anforderung nicht mehr eingehalten werden. Die vorherigen Simulationen mit geringerer Homogenität haben das bestätigt (Bild 3.11). Bild 3.14 zeigt, dass für die betrachtete Geschwindigkeit von 120 km/h die Beschleunigungsanforderungen ab einem Abstand von 60 m sicher eingehalten werden. Das entspricht genau der Vorgabe der StVO des halben Tachoabstands in Metern. Der lichte Zeitabstand muss also auch entsprechend der ISO 22179 mindestens 1,8 s betragen.

3.3.4.2 Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen

In den bisherigen Abschnitten wurde erörtert, dass bei hohen Geschwindigkeiten die Maximalwerte der Beschleunigung im positiven und negativen Bereich, sowie die Änderung der Beschleunigung pro Sekunde zu hoch sind. Die Maximalwerte können mit einer Begrenzung der Beschleunigung reduziert werden, welche jedoch weitere Probleme mit sich bringt. Es wurde gezeigt, dass die Beschleunigungsänderung pro Sekunde mit einer Reduzierung des Abstands gedrosselt werden kann. Je nach Fahrsituation,

Umweltbedingungen oder Störungen kann eine Unterschreitung der Soll-Werte jedoch vorkommen. Im Realverkehr werden die Mindestabstände ebenfalls nicht ständig eingehalten. Deswegen ist es notwendig, weitere Maßnahmen zu ergreifen, die redundant zur Einhaltung von Minimalabständen wirken. Bild 3.15 zeigt in welchen Bereichen Handlungsbedarf besteht.

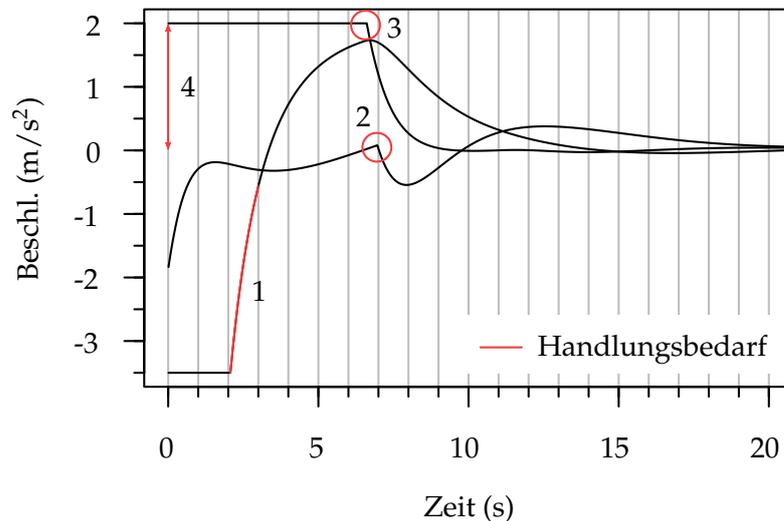


Bild 3.15: Handlungsbedarf beim Beschleunigungsverhalten des Adaptive-Time-Gap-Modells bei hohen Geschwindigkeiten

① Für Geschwindigkeiten größer 20 m/s (72 km/h) muss die maximale Beschleunigungsänderung unter $2,5 \text{ m/s}^3$ gehalten werden. Das kann erreicht werden, indem der lichte Zeitabstand mindestens 1,8 s beträgt (Kapitel 3.3.4.1). Wie beschrieben ist es hier notwendig eine Redundanz vorzusehen, die aus einer Begrenzung der Beschleunigungsänderung bestehen kann, wie es schon bei den Maximalwerten der Beschleunigung gemacht wird. Dafür ist eine weitere Ableitung des ATG zu einem Modell dritter Ordnung notwendig. Die dadurch freigelegte Ableitung der Beschleunigung kann dann begrenzt werden. Bei der Ableitung ist zu beachten, dass die vorliegenden Parameter Abstand, Geschwindigkeit, Beschleunigung, lichter Zeitabstand und Reaktionszeit in der Modellgleichung nicht verschwinden, damit sie weiterhin regelbar bleiben. Anschließend muss die Anforderungskonformität noch einmal mit Simulationen überprüft werden.

② Die Simulationen haben gezeigt, dass im Beschleunigungsverlauf gelegentlich solche Knicke auftreten. Im Wesentlichen beeinflussen sie den Komfort negativ und stellen weniger ein Sicherheitsrisiko dar. In Testfahrten ist zu ermitteln, inwiefern diese Knicke das Komfortempfinden beeinträchtigen und ob dementsprechend Maßnahmen notwendig sind. Problematisch ist, dass die Maßnahme aus ① hier nicht angewandt

werden könnte. Denn die Kurve ist an diesen Stellen nicht differenzierbar. Denkbar ist auch, dass diese Ausprägungen von selbst verschwinden, wenn die restlichen Maßnahmen angewendet werden. In einem weiterführenden Schritt ist das zu beobachten.

③ Dieser Punkt bezieht sich auf die Begrenzung der maximalen Beschleunigung. Die Übergänge vom begrenzten zum nicht begrenzten Verlauf sind zu hart. Ein Anti-Windup Mechanismus kann dem entgegenwirken, der einen weniger statischen nichtlinearen Übergang integriert. Die Entwicklung des Anti-Windup Mechanismus kann jedoch auch nicht im Umfang dieser Arbeit erbracht werden und sollte in einem weiterführenden Schritt vollzogen werden. In Bild 3.15 ist nur die Stelle 3 markiert, die die Ausgangsseite der positiven Begrenzung zeigt. Punkt 3 bezieht sich auch auf die Eingangsseite und die negative Begrenzung.

④ Befindet sich ein Fahrzeug in voller Fahrt, ist eine maximale Beschleunigung zu Sekunde null kein Problem. Hier kommt es auf die Beschleunigungsänderung an, welche in diesem Fall nicht vorhanden ist. Anders ist es, wenn das Fahrzeug steht oder langsam Fahrt. Ein Ausschlag der Beschleunigung von null auf den Maximalwert, ist dann ein Risiko für Sicherheit und Komfort, obwohl der in Bild 3.15 mit 4 markierte Beschleunigungsanstieg mit 2 m/s^3 anforderungsgerecht ist. Genauso gilt das aber auch für den negativen Bereich, wobei die hier definierten $2,5 \text{ m/s}^3$ nicht mehr eingehalten werden. Es ist nicht mehr notwendig eine weitere Maßnahme hierfür festzulegen. Denn die Kombination aus der Begrenzung der Beschleunigungsänderung und des Anti-Windup Mechanismus werden dieses Problem lösen.

3.3.4.3 Wirksamkeitsüberprüfung und Anwendungsbereich des Sicherheitskonzepts

Der Entwurf der Anti-Windup Rückführung sowie der Begrenzung der Beschleunigungsänderung werden nicht mehr in dieser Arbeit geleistet, weswegen ihre Wirksamkeit auch nicht überprüft werden kann. Die Wirksamkeit der Mindestabstände kann dagegen geprüft werden. Das ist notwendig, weil die ermittelten Minimalabstände unter idealisierten Bedingungen und nur für eine Geschwindigkeit getestet wurden. Bei realistischeren Bedingungen wird mehr als ein Folgefahrzeug beeinflusst. So können Wechselwirkungen entstehen, die noch einmal andere Ergebnisse liefern. Für die Überprüfung der Wirksamkeit des ermittelten Mindestabstands von $T = 1,8 \text{ s}$ (also dem halben Tachoabstand in Metern) werden die Startpositionen der Fahrzeuge wieder zufällig gesetzt, mit der Auflage, dass der lichte Zeitabstand von $1,8 \text{ s}$ nicht unterschritten wird. Gleichzeitig wird festgestellt, wann die restlichen Maßnahmen des Sicherheitskonzepts, abgesehen von den Mindestabständen, angewendet werden müs-

sen. Sie sind für die Absicherung der Beschleunigungsbegrenzung zuständig. Dementsprechend wird ermittelt, ab welcher Geschwindigkeit eine Begrenzung zum Einsatz kommt. Also bis wohin keine zusätzlichen Maßnahmen, außer der Mindestabstände, erforderlich sind. Denn die zusätzlichen Sicherungssysteme können auch ausfallen oder gestört werden, wodurch ein höheres Risiko im Vergleich zum Fahren mit unbegrenzter Beschleunigung entsteht. Hilfreich ist das bei Transporten, die ein geringeres vertretbares Risiko zulassen, z.B. bei Gefahrgut-, Kranken-, Tier- oder Schwerlasttransporten. Bei diesen Transporten, oder anderen Fahrsituationen nach Wahl, kann dann eine Maximalgeschwindigkeit festgelegt werden, bei der keine Begrenzung notwendig ist. Beide Betrachtungen, die Wirksamkeitsüberprüfung und die Ermittlung des Anwendungsbereichs des Sicherheitskonzepts, können mithilfe von Bild 3.16 unternommen werden.

Wirksamkeitsüberprüfung

In Bild 3.16 ist die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der 14 simulierten Fahrzeuge über die Zeit aufgetragen. Die Simulationsumgebung ist in oben beschriebener Weise realistischer gewählt, um die Wirksamkeit der Maßnahme des Haltens eines Minimalabstandes zu prüfen, welche zuvor nur unter idealisierten Bedingungen getestet wurde. Zusätzlich wird die Wirksamkeit der Maßnahme bei anderen Geschwindigkeiten verifiziert. Dafür werden Geschwindigkeiten von 120 km/h bis 100 km/h betrachtet. Höhere Geschwindigkeiten werden nicht untersucht, weil diese generell aus Komfortgründen nicht angesteuert werden. Bezüglich des Verzichts auf die Betrachtung kleinerer Geschwindigkeiten ist auf den folgenden Abschnitt „Anwendungsbereich“ zu verweisen. Die beiden Diagramme in einer Reihe beziehen sich jeweils auf die angegebene Wunschgeschwindigkeit. Entsprechend der Konstanten-Lichten-Zeitabstand-Strategie ändert sich der Mindestabstand je nach Geschwindigkeit. Er wird mit d_{min} angegeben. Außerdem wird die optimale Verkehrsdichte ρ eingestellt.

Bild 3.16 zeigt, dass die Maßnahme des Mindestabstands bei allen simulierten Geschwindigkeiten auch bei inhomogenen Anfangssituationen wirksam ist. Die Spitzen im Beschleunigung-Zeit-Diagramm mit ihren starken Beschleunigungsänderungen treten nicht mehr auf. Erkennbar ist hier auch der Zusammenhang zwischen den Beschleunigungsänderungen und der Geschwindigkeitsabweichungen. Bei den beiden Geschwindigkeiten 115 km/h und 110 km/h, bei denen die Steigung der Beschleunigung am größten ist, treten auch die größten Geschwindigkeitsabweichungen auf. Außerdem klingt die Oszillation der Beschleunigung bei Einhalten des Mindestabstands von $T_{min} = 1,8$ s wesentlich schneller ab, als bei kleineren Abständen. Nach 5 s sind die Beschleunigungen der 14 Fahrzeuge annähernd und bei 10 s vollständig homoge-

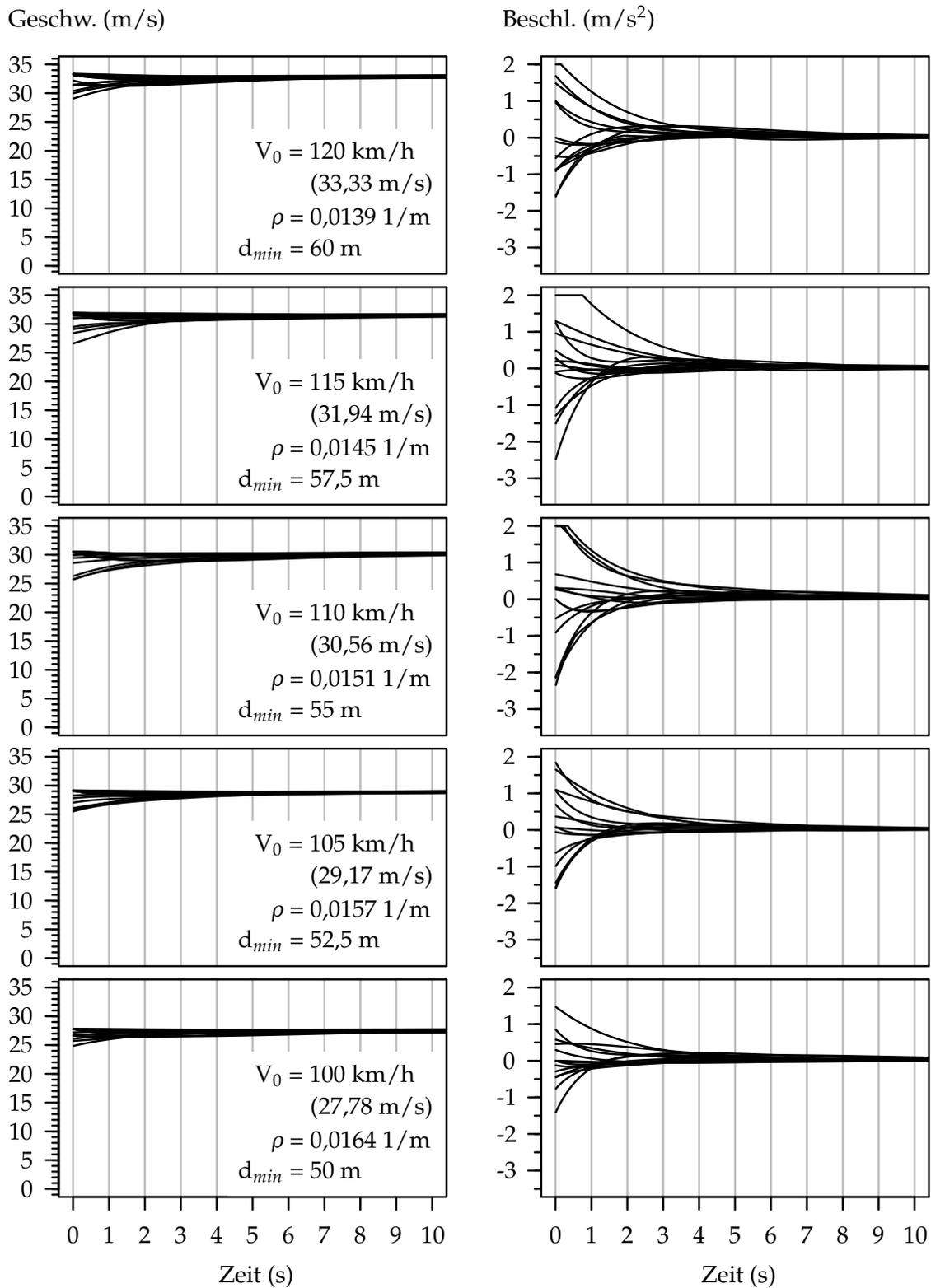


Bild 3.16: Geschwindigkeit und Beschleunigung 14 simulierter Fahrzeuge mit veränderter Wunschgeschwindigkeit, angepasster Verkehrsdichte und einem minimalen lichten Zeitabstand von 1,8 s

nisiert. Ohne Begrenzung der Minimalabstände ist das erst bei 20 s der Fall. Zusätzlich oszillieren die Beschleunigungen mit abnehmender Geschwindigkeit weniger.

Anwendungsbereich

Die Wirksamkeitsüberprüfung hat gezeigt, dass das Halten eines Mindestabstandes eine adäquate Maßnahme zur Erfüllung der Beschleunigungsanforderungen ist und ist deshalb durchgehend anzuwenden. Die restlichen definierten Maßnahmen beziehen sich auf die Beschleunigungsbegrenzung. In Bild 3.16 kann gesehen werden, wann diese Maßnahmen zum tragen kommen. Die Begrenzung der Beschleunigung ist bis 110 km/h aktiv. Auffällig ist, dass die Dauer der Begrenzung mit abnehmender Geschwindigkeit nicht kontinuierlich kleiner wird, wie es eigentlich passieren müsste. Diese Verringerung ist nur von 115 km/h bis 110 km/h zu beobachten. Darüber ist die Dauer der Begrenzung geringer. Diese Beobachtung ist auf die zufällige Ausprägung der Abstände zurückzuführen. Sie sind gleich verteilt zwischen dem jeweiligen Minimalwert und dem maximal möglichen Wert, der von der Dichte bestimmt wird. Ein Mittelwert über mehrere Simulationen würde einen kontinuierlichen Rückgang der Begrenzungsdauer zeigen. Wegen diesem zufälligen Verhalten sollte noch eine Sicherheitsmarge integriert werden. Infolgedessen kann eine höchst mögliche Geschwindigkeiten von 100 km/h angenommen werden, bei der eine Beschleunigungsbegrenzung nicht mehr notwendig ist. Trotzdem sollen die Maßnahmen des Anti-Windups und eine weitere Begrenzung der Beschleunigung auch unterhalb dieser Geschwindigkeit eingesetzt werden, um eine Redundanz zu schaffen, die das System noch zuverlässiger macht. Die Bestimmung des Anwendungsbereichs dient wie eingangs des Kapitels erwähnt, zur Identifikation eines Geschwindigkeitsbereichs mit erhöhtem Risiko, der für einige Fahrsituationen umgangen werden sollte.

4 Herausforderungen in der Entwicklung des Adaptive-Time-Gap-Modells bis zur Markteinführung

Die Sicherheitsanalyse hat eine Anforderungskonformität des Adaptive-Time-Gap-Modells bei einer Geschwindigkeit von 18 km/h gezeigt, ohne zusätzliche Maßnahmen implementieren zu müssen. Die Erhöhung der Geschwindigkeit auf 120 km/h geht mit Defiziten in der Anforderungserfüllung einher. Genauer sind die maximal erlaubten Beschleunigungen betroffen. Ihre Grenzwerte werden bei dieser höheren Geschwindigkeit deutlich nicht eingehalten. Eine Erhöhung der lichten Zeitabstände auf 12 s kann Abhilfe verschaffen. Aus Gründen der Verkehrsflussoptimierung ist dies jedoch nicht praktikabel. Ein Weg zur sicheren Einhaltung der Beschleunigungsspezifikation ist die Verwendung von Begrenzungen, welche jedoch einige Nachteile mit sich bringen. Zum einen ist der mathematische Nachweis der Stabilität des Modells nur schwer möglich, weswegen simuliert werden muss. Die Simulationen zeigen eine ausgezeichnete Stabilität des Adaptive-Time-Gap-Modells in allen Geschwindigkeitsbereichen. In kurzer Zeit homogenisieren sich die Trajektorien und Beschleunigungs- sowie Geschwindigkeitskurven selbst bei stark inhomogenen Anfangspositionen der Fahrzeuge. Die Stabilität stellt sich als eine besondere Stärke des Modells heraus. Der Einsatz der Beschleunigungsbegrenzung führt jedoch zu großen Beschleunigungsänderungen pro Sekunde, welche nicht mehr in den Anforderungen liegen, wodurch neben Komfortaspekten auch indirekt die Sicherheit gefährdet wird. Maßgeblich sind zu geringe Abstände zwischen den Fahrzeugen für die Nichterfüllung dieser Beschleunigungsanforderung verantwortlich. Unterschreitet der lichte Zeitabstand einen Wert von 1,8 s nicht, so bleibt die Beschleunigungsänderung unter der Spezifikation von $2,5 \text{ m/s}^3$. Da das Halten eines Mindestabstandes jedoch nicht ständig gewährleistet werden kann (siehe Realverkehr), werden noch weitere Maßnahmen benötigt. Außerdem ist eine Redundanz für eine solch komplexe Sicherheitsfunktion wie das automatisierte bzw. autonome Fahren sinnvoll, welche die Zuverlässigkeit und damit auch das Vertrauen der Anwender erhöht. Die zu etablierenden Maßnahmen bestehen aus der Anti-Windup Rückführung und der Begrenzung der Beschleunigungsänderung durch eine weitere Ableitung des Modells, welche genauer in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurden. Simulationen haben ergeben, dass diese Maßnahmen erst über 100 km/h angewendet werden müssen. Empfohlen wird ihre Anwendung aus den genannten Gründen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich. Im einführenden Kapitel wurden Forschungsfragen

aufgestellt. Inwiefern diese Fragen beantwortet wurden, wird im folgenden Teil geklärt.

Wie muss das Fahrzeugfolgemodell kalibriert werden und unter welchen Umgebungsbedingungen wird Sicherheit und Komfort gewährleistet?

Mit der Definition der Anforderungen wurde erörtert, welche Ausprägungen der Parameter Sicherheit und Komfort gewährleisten und es wurde analysiert wie das Modell kalibriert werden muss, um dieses Ziel zu erreichen. Damit wurde auch der Frage „**Welche Forderungen bzw. Regelziele müssen an das System gestellt werden, um Sicherheit und Komfort zu gewährleisten?**“ erfolgreich nachgegangen. Eine tiefere Kalibrierung hat, jedoch nicht stattgefunden. Bspw. wurde die Reaktionszeit nicht ausführlich betrachtet. Sie wurde lediglich auf einem konstanten Wert gehalten. In den Anforderungen wurde zwar auf die Umgebungsbedingungen eingegangen, in der Sicherheitsanalyse wurden verschiedene Varianten jedoch vernachlässigt, um den Umfang zu begrenzen. So wurden nur einige typische Fahrsituationen simuliert. Um den Anspruch einer ganzheitlichen Beurteilung gerecht zu werden, müssen weitere Fahrsituationen in einem weiteren Schritt betrachtet werden. Des Weiteren ist mindestens zu betrachten: Die Simulation eines Staus mit ausgeprägten Stop-and-Go-Wellen, die Annäherung an ein stehendes Objekt mit verschiedenen Geschwindigkeiten, die Annäherung an ein Fahrzeug auf der Autobahn mit großer Geschwindigkeitsdifferenz, sowie die Simulation von Störungen in der Abstandsmessung. Außerdem müssen noch weitere physikalische Variablen berücksichtigt werden, wie das Fahrzeuggewicht und die Rutschhemmung des Bodens infolge von Witterungseinflüssen. Zum Punkt Umgebungsbedingungen gehört außerdem noch die Tatsache, dass in den Simulationen alle Fahrzeuge mit dem ATG geregelt wurden, womit in der Realität nicht zu rechnen ist. Für eine noch größere Konfidenz des Sicherheitsnachweises sollte das Modell noch im Zusammenspiel mit anderen Fahrzeugfolgemodellen verifiziert werden.

Besitzt das Fahrzeugfolgemodell alle notwendigen Parameter, um Sicherheits- und Komfortaspekte beurteilen zu können? Müssen noch weitere Parameter implementiert werden?

Das Modell erster Ordnung des ATG beinhaltet nicht alle notwendigen Parameter, um allen Anforderungen nachgehen zu können. Deswegen wurden es in ein Modell zweiter Ordnung transformiert, welches auch die Beschleunigung beinhaltet. In der Sicherheitsanalyse ist aufgefallen, dass noch eine weitere Ableitung des Modells notwendig ist, also ein Modell dritter Ordnung, um die Maßnahme der Begrenzung der Beschleunigungsdifferenz umzusetzen. Diese Arbeit konnte also aufdecken, dass für eine Beurteilung noch ein Parameter im Modell fehlt. Die Umsetzung muss in einem weiterführenden Schritt erfolgen.

Inwiefern kann der Verkehrsfluss neben der sonstigen Anforderungserfüllung optimiert werden?

Direkt zu Beginn der Simulationen wurden die Parameter ermittelt (speziell die Verkehrsdichte), die zu einer Maximierung des Flusses führen. Für die nachfolgenden Simulationen wurden dann auch diese Parameter verwendet. Die Sicherheitsanalyse basiert also auf einem maximalen Verkehrsfluss. Folglich ist es möglich, neben der Gewährleistung von Sicherheit und Komfort, auch den Verkehrsfluss zu optimieren.

Welche Maßnahmen müssen ergriffen werden, um die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Komfort und Verkehrsflussoptimierung zu erfüllen?

Es wurde ermittelt, dass eine Begrenzung der Beschleunigung und eine Sicherstellung eines Mindestabstands von $T = 1,8$ s erfolgen muss, um die Beschleunigungsanforderungen zu erfüllen. Die Wirksamkeit dieser beiden Maßnahmen wurde mit positiven Ergebnis geprüft. Darüber hinaus ist es erforderlich für Geschwindigkeiten über 100 km/h eine Anti-Windup Rückführung und eine Begrenzung der Beschleunigungsänderung zu implementieren. Diese Maßnahmen sollen aber auch redundant unter 100 km/h wirken. Letztere Maßnahmen müssen ebenfalls in einem weiterführenden Schritt entwickelt werden.

Mit dem Abschluss der Sicherheitsanalyse in dieser Arbeit hat das ATG nach einmaligem Durchlauf des V-Modells einen Reifegrad erreicht. Bis zur Erlangung der Serienreife sind jedoch noch einige Arbeitsschritte zu erledigen. Der nächste Reifegrad wird erreicht, indem die noch offenen Maßnahmen nach dem Vorgehen des V-Modells in das ATG implementiert werden. Dazu gehört auch die Vervollständigung der Ganzheitlichkeit der Sicherheitsanalyse, durch Betrachtung der beschriebenen fehlenden Fahrsituationen, eine Berücksichtigung von Umgebungsbedingungen wie Wetter und Fahrzeuggewicht, sowie eine tiefe Kalibrierung aller Parameter und Variablen des ATG. Bei letzterem wurden neben der Reaktionszeit außerdem die Fahrzeuglängen zu wenig betrachtet, indem sie ebenfalls mit einem Durchschnittswert konstant gehalten wurden. Eine Lösung kann hier in einer Vehicle-to-Vehicle Kommunikation liegen, bei der Werte wie die Fahrzeuglängen direkt zwischen den Fahrzeugen in einem lokalen Bereich ausgetauscht werden. Nach der in dieser Arbeit durchgeführten Software-Verifikation über Simulationen muss eine Hardware-Verifikation stattfinden, also eine Verifikation der Anforderungen auf Fahrzeugebene auf realen Teststrecken. Bevor die Serienreife schließlich erteilt werden kann, muss außerdem die Erfüllung der Anforderungen an die funktionale Sicherheit im Automobilbau gemäß ISO 26262 nachgewiesen werden. Einer Markteinführung steht dann nichts mehr im Weg.

Literaturverzeichnis

- [1] Straßenverkehrs-Ordnung vom 06.05.2013 (BGBl. I p. 367); die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 06.10.2017 (BGBl. I p. 3549) geändert worden ist. Available from: https://www.gesetze-im-internet.de/stvo_2013/.
- [2] Daimler AG. Mercedes-Benz Future Truck 2025: Weltpremiere der spektakulären Studie des Lkw von morgen – autonome Fahrt in eine faszinierende Zukunft. Pressemitteilung. Stuttgart; 22.09.2014. Available from: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Future-Truck-2025.xhtml?oid=9266156>.
- [3] Volvo Car Group. Volvo Car Group's first self-driving Autopilot cars test on public roads around Gothenburg. Pressemitteilung. Gothenburg; 29.04.2014. Available from: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/145619/volvo-car-groups-first-self-driving-autopilot-cars-test-on-public-roads-around-gothenburg>.
- [4] Stadt Wuppertal. Teststrecke für neue Automotive-Technik in Wuppertal. Pressemitteilung. Wuppertal; 21.08.2015. Available from: <https://www.wuppertal.de/pressearchiv/meldungen-2015/august/102370100000655785.php>.
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. BMVI vergibt dreizehn Förderbescheide für neue Forschungsprojekte. Pressemitteilung. Berlin; 20.07.2017. Available from: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/102-dobrindt-22-millionen-euro-fuer-forschungsprojekte-zum-automatisierten-fahren.html>.
- [6] Anton Kummert, Stephan A Vogelskamp (editor). Zukunftsstudie Automotive Region Bergisches Städtedreieck 2030. Bergische Universität Wuppertal in Kooperation mit Bergische Struktur- und Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH; 2018. p. 151–234. Available from: <https://www.zukunftsstudie-automotive.de/>.
- [7] Verband der Automobilindustrie. Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. VDA Magazin - Automatisierung; 2015. p. 8–15. Available from: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/automatisierung.html>.
- [8] Bitkom Research, VdTÜV. Mobility Studie 2018. Bitkom Research Marktberichte; 2018. p. 18–19. Available from: https://www.bitkom-research.de/epages/63742557.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/63742557/Products/MS2018.
- [9] Carl Bergenhem, Rolf Johansson, Andreas Söderberg, Jonas Nilsson, Jörgen Tryggvesson, Martin Törngren, et al. How to Reach Complete Safety Requirement Refinement for Autonomous Vehicles. Matthieu Roy. CARS 2015 - Critical Automotive applications: Robustness & Safety. Paris; 2015. Available from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01190734>.

- [10] Konrad Reif. Adaptive Cruise Control (ACC). In: Konrad Reif, editor. Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg+Teubner; 2010. p. 172–173. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-8348-9717-6_14.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik. Berlin: Beuth Verlag; 2014. p. 31–32, 136–137. Available from: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/dke/normen/wdc-beuth:din21:208013542>.
- [12] Hans Beck. Automatisch ist nicht gleich autonom; 2017. Available from: <https://gloeckner-schuhwerk.de/2017/03/automatisch-ist-nicht-gleich-autonom/>.
- [13] Gudela Grote. Autonomie und Kontrolle: Zur Gestaltung automatisierter und risikoreicher Systeme. vol. 16 of Mensch, Technik, Organisation. Zürich: vdf Hochschulverlag AG; 1997. p. 5–8. Available from: https://books.google.de/books?id=0R8wn_kn4_kC.
- [14] Michael Krödel. Autonome Optimierung des Verhaltens von Fahrzeugsteuerungen auf der Basis von Verstärkungslernen. Dr.-Ing. Dissertation. Universität Siegen: Fachbereich Elektrotechnik und Informatik; 2006. p. 6–7, 12–13. Available from: <http://dokumentix.ub.uni-siegen.de/opus/volltexte/2006/237/pdf/kroedel.pdf>.
- [15] Sagar Behere, Martin Törngren. A Functional Architecture for Autonomous Driving. In: Information and Software Technology. vol. 73. Stockholm: Elsevier; 2016. p. 136–150. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584915002177>.
- [16] Martin Treiber, Arne Kesting. Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2010. p. 7–35, 139–176. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-05228-6>.
- [17] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 820-12 Normungsarbeit – Teil 12: Leitfaden für die Aufnahme von Sicherheitsaspekten in Normen. Berlin: Beuth Verlag; 2014. p. 11–13. Available from: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nagln/normen/wdc-beuth:din21:206724880>.
- [18] Jörn Drewes. Verkehrssicherheit im systemischen Kontext. Dr.-Ing. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik; 2009. p. 104. Available from: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00031800>.
- [19] Kraftfahrtbundesamt. Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2018; 2018. Available from: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html.
- [20] Statistisches Bundesamt. Verkehrsunfälle; 2018. Available from: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Verkehrsunfaelle.html>.

- [21] Joachim Gehringer, Wolfgang Rücker. Unfallversicherungen erfolgreich verkaufen: Einstieg ins Personenversicherungsgeschäft. Wiesbaden: Gabler Verlag; 1994. p. 43–45. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-322-89858-6_6.
- [22] Herbert William Heinrich. Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach. McGraw-Hill insurance series. McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1931. Available from: <https://books.google.de/books?id=mPZAAAAIAAJ>.
- [23] Neville A Stanton, Paul M Salmon. Human error taxonomies applied to driving: A generic driver error taxonomy and its implications for intelligent transport systems. vol. 47 no. 2 of Safety Science. Elsevier BV; 2009. p. 227–237. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753508000441>.
- [24] Lars Aberg, Per-Arne Rimmo. Dimensions of aberrant driver behaviour. vol. 41 of Ergonomics; 2010. p. 39–56. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/001401398187314>.
- [25] Statistisches Bundesamt. Polizeilich erfasste Unfälle; 2018. Available from: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen_/Strassenverkehrsunfaelle.html.
- [26] Statistisches Bundesamt. Unfallentwicklung auf deutschen Straßen; 2010. p. 9–10. Available from: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2011/Unfaelle2010/pressebroschuere_unfaelle.pdf?__blob=publicationFile.
- [27] Thomas Winkle. Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: Erkenntnisse aus der Unfallforschung. In: Markus Maurer, J Christian Gerdes, Barbara Lenz, Hermann Winner, editors. Autonomes Fahren. Vieweg, Berlin, Heidelberg: Springer; 2015. p. 351–376. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45854-9_17.
- [28] Kraftfahrtbundesamt. Bestand in den Jahren 1960 bis 2018 nach Fahrzeugklassen; 2018. Available from: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html.
- [29] Deutscher Verkehrssicherheitsrat. Fahrerassistenzsysteme: geringe Verbreitung trotz hoher Akzeptanz; 2016. Available from: https://www.dvr.de/presse/informationen/fahrerassistenzsysteme-geringe-verbreitung-trotz-hoher-akzeptanz-_id-4519.html.
- [30] Thomas Winkle. Safety Benefits of Automated Vehicles: Extended Findings from Accident Research for Development, Validation and Testing: Technical, Legal and Social Aspects. In: Markus Maurer, J Christian Gerdes, Barbara Lenz, Hermann Winner, editors. Autonomous Driving. Berlin, Heidelberg: Springer; 2016. p. 249–351. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-48847-8>.

- [31] Hans-Leo Ross. Funktionale Sicherheit im Automobil: ISO 26262, Systemengineering auf Basis eines Sicherheitslebenszyklus und bewährten Managementsystemen. München: Hanser; 2014. p. 237–246. Available from: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446438408>.
- [32] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag; 2004. p. 29–31, 46–56. Available from: https://www.vdi.de/nc/richtlinie/vdi_2206-entwicklungsmethodik_fuer_mechatronische_systeme/.
- [33] Nidhi Kalra, Susan M Paddock. Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability? Santa Monica: RAND Corporation; 2016. Available from: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR1478.html.
- [34] Jürgen Bechtloff. Regelungstechnik. Vogel Studienmodule. Würzburg: Vogel Buchverlag; 2014. p. 13–97. Available from: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/ubwuppertal-ebooks/detail.action?docID=3445540>.
- [35] Gábor Orosz, R Eddie Wilson, Gábor Stépán. Traffic jams: dynamics and control. vol. 368 of Philosophical Transactions of The Royal Society A; 2010. p. 4455–4479. Available from: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/368/1928/4455>.
- [36] Yuki Sugiyama, Minoru Fukui, Macoto Kikuchi, Katsuya Hasebe, Akihiro Nakayama, Katsuhiko Nishinari, et al. Traffic jams without bottlenecks? Experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. vol. 10 of New Journal of Physics. IOP Publishing und Deutsche Physikalische Gesellschaft; 2008. Available from: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/10/3/033001/meta>.
- [37] Antoine Tordeux, Mohcine Chraïbi, Andreas Schadschneider, Armin Seyfried. Influence of the number of predecessors in interaction within acceleration-based flow models. vol. 50 (34) of Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. IOP Publishing Ltd; 2017. Available from: <http://stacks.iop.org/1751-8121/50/i=34/a=345102>.
- [38] Andreas Ortseifen. Entwurf von modellbasierten Anti-Windup-Methoden für Systeme mit Stellbegrenzungen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 (1225). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH; 2013. p. 53–69. Available from: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3748>.
- [39] Louis A Pipes. An Operational Analysis of Traffic Dynamics. vol. 24 (3) of Journal of Applied Physics; 1953. p. 274–281. Available from: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1721265>.
- [40] M Bando, K Hasebe, A Nakayama, A Shibata, Y Sugiyama. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. vol. 51 (2) of Physical Review E. American Physical Society; 1995. p. 1035–1042. Available from: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.51.1035>.

- [41] Rui Jiang, Qingsong Wu, Zuojin Zhu. Full velocity difference model for a car-following theory. vol. 64 (1) of *Physical Review E*. American Physical Society; 2001. p. 017101. Available from: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.64.017101>.
- [42] Antoine Tordeux, Sylvain Lassarre, Michel Roussignol. An adaptive time gap car-following model. vol. 44 (8-9) of *Transportation Research Part B: Methodological*; 2010. p. 1115–1131. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261509001623>.
- [43] ISO International Organization for Standardization. ISO 15622:2010 (E). *Intelligent transport systems - Adaptive cruise control systems - Performance requirements and test procedures*. 2nd ed. Berlin: Beuth Verlag; 2010. Available from: <https://www.iso.org/standard/50024.html>.
- [44] ISO International Organization for Standardization. ISO 22179:2009 (E). *Intelligent transport systems - Full speed range adaptive cruise control systems - Performance requirements and test procedures*. 1st ed. Berlin: Beuth Verlag; 2009. Available from: <https://www.iso.org/standard/40753.html>.
- [45] Heribert Bürger, Wolfgang Pfeffer, Franz Rauchecker, Fritz Sacher, Bernhard Wielke. Teil 2 - Unfallaufklärung und Fahrzeugschaden. In: Robert Fucik, Franz Hartl, Horst Schlosser, editors. *Handbuch des Verkehrsunfalls*. Wien: MANZ Verlag; 2008. Available from: <https://www.manz.at/list.html?isbn=978-3-214-12904-0>.
- [46] Bernhard Friedrich. Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge. In: Markus Maurer, J Christian Gerdes, Barbara Lenz, Hermann Winner, editors. *Autonomes Fahren*. Vieweg, Berlin, Heidelberg: Springer; 2015. p. 336–339. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45854-9_16.
- [47] Paul Balzer. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Straßen durch vermehrten Einsatz von ACC; 2013. Online: Stand 07.07.2018. Available from: <http://www.cbcity.de/erhoehung-der-leistungsfahigkeit-von-strassen-durch-vermehrten-einsatz-von-acc>.
- [48] Jörg Kienzle. *Analyse von Einzelfahrzeugdaten : Verkehr verstehen*. Diplomarbeit. OPUS - Online Publikationen der Universität Stuttgart; 2001. p. 62–63. Available from: <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/165>.

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ATG	Adaptive-Time-Gap-Modell
AuG	Abstands- und Geschwindigkeitsregelanlage
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale
ESP	Infrastruktur Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FBA	Fehlerbaumanalyse
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FVDM	Full-Velocity-Difference-Modell
HIL	Hardware-in-the-Loop
IDM	Intelligent-Driver-Modell
KLZS	Konstante-Lichte-Zeitabstand-Strategie
Kfz	Kraftfahrzeuge
OVM	Optimal-Velocity-Modell
SIL	Software-in-the-Loop
StVO	Straßenverkehrs-Ordnung
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VDA	Verband der Automobilindustrie

Bilderverzeichnis

2.1	Automatisierungsgrade des automatisierten Fahrens nach VDA	5
2.2	Räumliche Abstände zwischen zwei Fahrzeugen mit der Fahrzeuglänge l	7
2.3	Zeitliche Abstände zwischen zwei Fahrzeugen	8
2.4	Makroskopische Variablen der Verkehrsflusstheorie	9
2.5	Darstellung realer Verkehrsdaten der Autobahn A5 bei Frankfurt im Fluss-Dichte-Diagramm (links) im Vergleich zum idealisierten Fundamental-Diagramm (rechts)	10
2.6	Idealisierte Trajektorien mit Variablen der Verkehrsflusstheorie	11
2.7	Auf einem Kreis simulierte Stop-and-Go-Welle	12
2.8	Klassische Elemente eines longitudinalen Fahrzeugfolgmodells	13
2.9	Abgrenzung der grundlegenden Begriffe der Sicherheitswissenschaft . .	14
2.10	Entwicklung der Unfallzahlen und Verkehrstoten in Deutschland von 1970 bis 2016	17
2.11	Makroskopisches V-Modell nach VDI 2206	19
2.12	Signalflussplan eines Regelkreises	21
2.13	Beispiel für ein dynamisches Systemverhalten	22
2.14	Beispiel für lineare und nichtlineare Systeme	23
2.15	Stabilitätslagen	24
3.1	Begrenzung der maximalen Beschleunigung bei Adaptive Cruise Control Systemen nach ISO 22179	36
3.2	Einfluss des lichten Zeitabstandes bei einer konstanten Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h und einer Fahrzeuglänge von 5,3 m	40
3.3	Einfluss der Geschwindigkeit auf den Verkehrsfluss bei einem konstanten lichten Zeitabstand von 2 s und einer Fahrzeuglänge von 5,3 m . . .	40
3.4	Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen auf einem Kreis mit der Länge von 214 m, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer Wunschgeschwindigkeit von 18 km/h, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell	41
3.5	Beschleunigung dreier Fahrzeuge während einer Simulation des Adaptive-Time-Gap-Modells	42
3.6	Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen auf einem Kreis der Länge von 1000 m, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell	43
3.7	Simulation der Maximalbeschleunigungen bei 120 km/h mit Erhöhung des lichten Zeitabstandes nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell	44
3.8	Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen mit Beschleunigungsbegrenzung auf einem Kreis der Länge von 1000 m, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell	45

3.9	Begrenzte Beschleunigung dreier Fahrzeuge während einer Simulation des Adaptive-Time-Gap-Modells	46
3.10	Begrenzte Beschleunigung dreier Fahrzeuge während einer Simulation des Adaptive-Time-Gap-Modells	46
3.11	Simulation einer Fahrzeugkolonne von 14 Fahrzeugen mit auf einem Kreis der Länge von 1000 m mit Störung der homogenen Abstände um ± 20 m, mit Fahrzeuglängen von 5,3 m, einer Wunschgeschwindigkeit von 120 km/h, einem lichten Zeitabstand von 2 s und einer Reaktionszeit von 1 s nach dem Adaptive-Time-Gap-Modell	47
3.12	Geschwindigkeiten (links) und Beschleunigungen (rechts) der 14 Fahrzeuge mit homogenisierten Startpositionen bei 120 km/h	48
3.13	Beschleunigungsverhalten von 14 Fahrzeugen bei Veränderung des Abstands zwischen zwei Fahrzeugen	49
3.14	Beschleunigungsverhalten des Folgefahrzeugs bei Verringerung des Abstands vom vorausfahrend Fahrzeug zum Führungsfahrzeug	51
3.15	Handlungsbedarf beim Beschleunigungsverhalten des Adaptive-Time-Gap-Modells bei hohen Geschwindigkeiten	52
3.16	Geschwindigkeit und Beschleunigung 14 simulierter Fahrzeuge mit veränderter Wunschgeschwindigkeit, angepasster Verkehrsdichte und einem minimalen lichten Zeitabstand von 1,8 s	55

Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter des Optimal-Velocity-Modells bei einer Fahrzeuglänge von 5 m mit beispielhaften Werten	28
3.2	Auflistung einiger longitudinaler Fahrzeugfolgemodelle	33

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit, erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit (Bachelor-Thesis) selbstständig verfasst und keine andere als die angegebene Quelle und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit durch Dritte eingesehen und unter Wahrung urheberrechtlicher Grundsätze zitiert werden darf.

Ort und Datum: Solingen, 22.08.2018

Unterschrift: 

