

Trajektorienplanung als dynamisches Optimalsteuerungsproblem und Interpretation des Lösungsraums für Fahrkomfort im automatisierten Fahren

Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik
Masterarbeit von Markus Amann
Tag der Einreichung: 4. Juli 2022

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Betreuer: Wi Mi M.Sc. Alexander Steinke
Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

REGELUNGSTECHNIK
UND MECHATRONIK

rtm

Fachbereich Elektrotechnik
und Informationstechnik

Trajektorienplanung als dynamisches Optimalsteuerungsproblem und Interpretation des Lösungsraums
für Fahrkomfort im automatisierten Fahren
Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik

Masterarbeit von Markus Amann

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Betreuer: Wi Mi M.Sc. Alexander Steinke

Tag der Einreichung: 4. Juli 2022

Darmstadt

Technische Universität Darmstadt
Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik
Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Aufgabenstellung

Die allgemeine Struktur eines Optimalsteuerungsproblems lautet

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}(\cdot)} \quad & J(\mathbf{u}) = V(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} l(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \\ \text{u.B.v.} \quad & \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}(t_f), t_f) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \leq \mathbf{0}. \end{aligned}$$

Häufig werden dynamische Optimierungsprobleme (OP) mithilfe direkter Verfahren numerisch gelöst. In diesem Fall wird das dynamische in ein statisches OP überführt und der endliche Lösungsvektor $\mathbf{u}_{\text{opt}} \in \mathcal{U} \subseteq \mathbb{R}^m$ berechnet. Direkte Verfahren haben den Vorteil, dass Zustandsbeschränkungen leichter berücksichtigt werden können und der Konvergenzbereich größer ist. Indirekte Verfahren hingegen liefern eine Einsicht in die Struktur der optimalen Lösung.


In der dynamischen Optimierung hingegen werden Funktionen $\mathbf{u}(t)$ einer unabhängigen Variable t gesucht. Mithilfe der Variationsrechnung können Optimalitätsbedingungen hergeleitet werden, die ein Randwertproblem formulieren. Die Lösung dieses Randwertproblems liefert in der Folge die optimale Steuertrajektorie $\mathbf{u}_{\text{opt}}(t)$. Jedoch ist das Lösen des Randwertproblems für nichtlineare Systeme häufig schwierig, weswegen auf numerische Verfahren zurückgegriffen werden muss.

Um im automatisierten Fahren (AD) gezielt Fahrprofile mittels einer optimalen Trajektorienplanung erstellen zu können, ist ein tieferes Verständnis der optimalen Lösung erforderlich. Mit einem direkten Verfahren ist die Interpretation der Lösung schwierig, da die Lösung aus reinen Zahlenwerten besteht. Zwar könnte ein gewünschtes Fahrverhalten in definierten Fahraufgaben durch zusätzliche Terme im Gütemaß und Anpassung der Gewichte erzielt werden, jedoch ist eine Übertragung auf andere Fahraufgaben fraglich. Eine parametrisierte Steuertrajektorie $\mathbf{u}_{\text{opt}}(t)$ würde die Interpretation erheblich vereinfachen.

Ziele dieser Arbeit sind folgende Punkte:

1. Übersicht für Lösungsverfahren dynamischer OPs und Einordnung des AD-Planungsproblems
2. Erstellen von dynamischen OPs, die durch Variationsrechnung lösbar sind und Lösen dieser
 - a) Geeignete Fahrscenarien (z.B. Geradeausfahrt, Kurve, Geraden-Kurven-Kombination, Spurwechsel)
 - b) Geeignete Komfortmerkmale (z.B. Beschleunigung, Ruck, Fahrdauer)
 - c) Berücksichtigung von Begrenzungen
3. Interpretation der Lösungenstrajektorien hinsichtlich des dargestellten Funktionenraums
4. Einordnung im Kontext Fahrkomfort

Die Ergebnisse sind geeignet zu visualisieren und zu dokumentieren. Die aktuelle Fassung der Richtlinien zur Anfertigung von Abschlussarbeiten ist zu beachten.



Beginn: 03. Januar 2022
Ende: 04. Juli 2022
Seminar: —

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß §22 Abs. 7 und §23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Markus Amann, die vorliegende Masterarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Fall eines Plagiats (§38 Abs. 2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß §23 Abs. 7 APB überein.

Bei einer Thesis des Fachbereichs Architektur entspricht die eingereichte elektronische Fassung dem vorgestellten Modell und den vorgelegten Plänen.

Darmstadt, 4. Juli 2022

Markus Amann

Kurzfassung

Zusammenfassung entsprechend der Dokumentensprache. In diesem Fall Deutsch.

Abstract

Additional abstract in English.



Abkürzungsverzeichnis

ACC Adaptive Cruise Control. 5

FAS Fahrerassistenzsystem/-e. 5, 6

FSRA Full Speed Range Adaptive Cruise Control. 5

utc Coordinated Universal Time. 1, 6

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Fahrkomfort und Einordnung in den Kontext Autonomes Fahren	2
2.1	Fahrkomfort im Kontext Autonomes Fahren	2
2.1.1	Kinetose und ihre Bedeutung für das Autonome Fahren	3
2.2	Komfortgrenzen für Fahrzeugbeschleunigung und -ruck	4
2.2.1	Grenzwerte für die Längsdynamik	5
2.2.2	Grenzwerte für die Querdynamik	6
	Literatur	9



1 Einleitung

- kurze erklärung was fahrfremde Tätigkeit bedeutet und welche relevanz das für autonomes Fahren hat.
- kurz ein paar Worte zu Kinetose und Hinweis darauf, dass es später noch genauer erklärt wird

2 Fahrkomfort und Einordnung in den Kontext Autonomes Fahren

In diesem Kapitel soll der Begriff “Fahrkomfort” in den Kontext des Autonomen Fahrens eingeordnet werden. Dazu wird zunächst die Bedeutung des Begriffs genauer betrachtet und die Verbindung zwischen Fahrkomfort und Sicherheitsempfinden dargelegt. Anschließend werden verschiedene Einflussfaktoren auf die Komfortwahrnehmung während des Fahrens thematisiert. Dabei wird das Phänomen der Kinetose genauer erklärt und speziell auf dessen Bedeutsamkeit für die Entwicklung autonomer Fahrzeuge eingegangen. Abschließend werden mithilfe von Literaturwerten Grenzwerte für die als relevant erarbeiteten Einflüsse untersucht.

2.1 Fahrkomfort im Kontext Autonomes Fahren

Mit zunehmender Automatisierung von Fahraufgaben rückt auch der Fahrkomfort immer mehr in den Fokus. Es ist nicht davon auszugehen, dass FAS, die vom Fahrer als unkomfortabel empfunden werden, eine hohe Akzeptanz finden werden.

Damit sich überhaupt ein komfortables Gefühl während einer automatisierten Fahrt einstellen kann, muss beim Fahrer ein Gefühl von Sicherheit herrschen [1]. Nicht nur für unbeteiligte Dritte wie Fußgänger oder andere Autofahrer, sondern vor allem auch für den Fahrer spielt die Sicherheit bei autonomen Fahrzeugen daher eine zentrale Rolle. In [1] wird dabei der Unterschied zwischen subjektiver und objektiver Sicherheit dargelegt. Während das subjektive Sicherheitsempfinden lediglich wiedergibt, wie der Fahrer die Fahrt oder einzelne Situationen empfindet, lässt sich die objektive Sicherheit mithilfe von Größen wie reduzierten Unfallzahlen quantifizieren. Allerdings kann das subjektive Sicherheitsempfinden durchaus von der objektiven Sicherheit abweichen. Insbesondere bei FAS, die nach der SAE-Klassifizierung **SAE klassifizierung** Stufe 3 oder höher zugeordnet werden, und bei denen damit das Fahrzeug nicht nur die Längs- und Querverführung, sondern zusätzlich auch die Umfeldüberwachung übernimmt, kommt der in [2] als “*loss of controllability*” eingeführte Paradigmenwechsel von Fahrer zum Passagier zum Tragen. Dadurch, dass der Fahrer mehr und mehr die Fahrzeugführung und Überwachung aller Funktionen an das Fahrzeug abgibt, stellt sich möglicherweise ein Gefühl von Kontrollverlust ein, weshalb nicht nur die objektive Sicherheit neuartiger Systeme eine große Rolle bei der Bewertung der Systeme spielt, sondern auch das subjektive Sicherheitsempfinden, welches eng an den wahrgenommenen Komfort geknüpft ist. Neben dem Sicherheitsempfinden gibt es weitere wichtige Faktoren, die den Fahrkomfort beeinflussen. Großen Einfluss auf das Komfortempfinden hat dabei der Fahrstil. In verschiedenen Studien wurden unterschiedliche Fahrstile identifiziert und in verschiedene Klassen unterteilt **Abendroth, B.; Bruder, R in Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Bellem, Murphey**[3][4][5]. So variiert zwar die Anzahl und genaue Bezeichnung der einzelnen Klassen zwischen den verschiedenen Studien, jedoch erstreckt sich das Spektrum immer von “langsam” oder “komfortorientiert” bis hin zu “dynamisch/sportlich” oder sogar

“aggressiv”. In **Lange**[6] konnte gezeigt werden, dass der Wunsch nach höherem Komfort mit dem Grad der Automatisierung steigt. Ein Grund für diesen Zusammenhang ist unter anderem, dass das Bedürfnis nach Feedback durch die Straße über das Fahrzeug an den Fahrer mit zunehmender Automatisierung geringer wird. Daher liegt für autonome Fahrzeuge im Alltagsgebrauch ein komfortorientierter Fahrstil nahe.

Um beurteilen zu können, ob ein Fahrstil als komfortabel oder unkomfortabel wahrgenommen wird, muss zunächst geklärt werden, welche Merkmale dabei besonders großen Einfluss auf das Komfortempfinden haben. In **scherer** wurden in einer Fahrsimulatorstudie die Merkmale Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug, Bremsen, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Spurhalten, Lenken und Blinkernutzung als die am häufigsten genannten Komfortkriterien identifiziert, wobei die drei ersten Merkmale von über der Hälfte der Teilnehmer als relevant erachtet wurden.

Neben den hier identifizierten Komfortmerkmalen lässt sich auch die Reisezeit als weiteres Kriterium angeben. Bereits in **oborne**[7] wurde dargelegt, dass Passagiere, die einer längeren Reisezeit ausgesetzt sind, ein höheres Maß an Komfort benötigen, als bei einer kürzeren Reisezeit. Jeder Passagier geht daher einen subjektiven Kompromiss zwischen der erwarteten Reisezeit und dem akzeptierten Niveau an Diskomfort ein. Aufgrund dessen hängen die vom Fahrer als komfortabel empfundenen biomechanischen Werte auch von der Reisezeit ab [1].

Eine besondere Wichtigkeit bei der Trajektorienplanung bezüglich des Fahrkomforts kommt dem Beschleunigungsverhalten zu. In **Bellem**[4] konnte in zwei Studien für verschiedene Fahrmanöver nachgewiesen werden, dass sich Merkmale wie Längs- und Querschleunigung sowie der Fahrzeugruck gut dazu eignen, einen komfortablen Fahrstil von anderen Fahrstilen abzugrenzen. Laut **elbanhawi**[2] ist der häufigste Ansatz zur Optimierung der Fahrzeugbewegungen, die auf den Passagier wirkenden Kräfte und Rucke zu minimieren. Dass bei der Betrachtung des Beschleunigungsverhaltens jedoch nicht nur die absoluten Werte der Beschleunigung relevant sind, zeigen die Untersuchungen in **gianna**[8]. Hier konnte festgestellt werden, dass der Mensch bei lateralen Bewegungen insbesondere gegenüber Änderungen der Beschleunigung sehr sensitiv reagiert und diese besonders gut wahrnimmt. In **dovgan** konnte ein Algorithmus entwickelt werden, der komfortable Fahrstrategien liefert, wobei als zusätzliches Komfortmerkmal der Ruck verwendet wurde. Dieser sollte dazu im Sinne des Fahrkomforts so gering wie möglich sein.

2.1.1 Kinetose und ihre Bedeutung für das Autonome Fahren

Kinetose, oftmals auch als Reise- oder Bewegungskrankheit bezeichnet (*engl.* Motion Sickness), beschreibt das Phänomen, dass man sich bei Reisen - vor allem im Auto, Flugzeug oder auf einem Schiff - plötzlich unwohl fühlt. Die Symptome reichen dabei von Blässe und leichter Übelkeit, über Schwindel und Kopfschmerzen, bis hin zum Erbrechen **money**[9]. Es existieren mehrere Theorien für die genauen Ursachen von Kinetose **money**[9]. Eine anerkannte und weit verbreitete Theorie für das Auftreten von Kinetose liegt dabei in einem visuell-vestibulären Sensorkonflikt **motion sickness golding**, **motion sickness reason**, **motion sickness benson**[10][11]. Dadurch, dass Sensorinformationen über Beschleunigungen, die über das Gleichgewichtsorgan aufgenommen werden, nicht zu den Informationen passen, die über den visuellen Informationskanal geliefert werden, können die zuvor genannten Symptome auftreten. Dabei können prinzipiell alle Menschen mit einem funktionsfähigen Vestibularapparat gleichermaßen von Kinetose betroffen sein **motion sickness lackner**[12].

Neben dem Einfluss des Sensorkonflikts auf die Ausprägung von Kinetose, konnte in **vogel motion sickness**[13] außerdem gezeigt werden, dass starke, periodische Längsbeschleunigungen, die vor allem beim Bremsen auftreten, ebenfalls das Auftreten der Reisekrankheit begünstigen.

Ein bekanntes Nebenphänomen der Reisekrankheit ist, dass sie überwiegend bei Beifahrern bzw. Passagieren, die nicht der Fahrer sind, auftreten **motion sickness reason**[11]. In **sivak motion sickness** und **rolnick**[14] wurden mehrere Gründe für dieses Phänomen gefunden. Zum einen hat der Fahrer, als die Person, die das Fahrzeug steuert, die Kontrolle über die Fahrzeugbewegungen und damit auch die Richtung, in die sich die Fahrzeuginsassen bewegen. Dies ist bei den Beifahrern nicht der Fall und die fehlende Kontrolle führt zu einer größeren Anfälligkeit für die Reisekrankheit. Außerdem kann der Fahrer durch die ihm gegebene Kontrolle über das Fahrzeug Bewegungen besser antizipieren. In **sivak motion sickness** wird außerdem der bereits erwähnte visuell-vestibuläre Sensorkonflikt als Grund angeführt, da Beifahrer die Möglichkeit haben sich fahrfremden Tätigkeiten zu widmen, wodurch der Sensorkonflikt verstärkt wird. Bei einer Umfrage zum Thema fahrfremder Tätigkeiten während der Fahrt mit einem vollständig selbst fahrenden Auto in **sivak motion sickness** gab ein Großteil der über 3000 Befragten an, während der Fahrt andere Tätigkeiten als das Beobachten der Straße auszuüben. Gleichzeitig gaben zwischen 4 und 14 Prozent der Erwachsenen an, dass sie in vollständig selbst fahrenden Autos wahrscheinlich oft bis immer ein gewisses Maß an Kinetose verspüren würden. Die Ausprägung moderater bis schwerer Symptome tritt nach eigener Einschätzung bei zwischen 4 und 17 Prozent der Befragten auf. Diese Studie verdeutlicht die besondere Bedeutung, die der Reisekrankheit bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge zukommt.

Kinetose besitzt aus zwei Gründen eine ausdrückliche Relevanz für die Komfortwahrnehmung beim Autonomen Fahren. Neben dem Einfluss von Beschleunigungen und Rucken, den diese bereits bei manueller, selbst gesteuerter Fahrt auf das Komfortempfinden haben, kommt nun noch dazu, dass auch das Risiko an Kinetose zu erkranken, maßgeblich vom Beschleunigungsverhalten abhängt. Des Weiteren tritt die Reisekrankheit überwiegend bei Beifahrern bzw. Passagieren auf, wodurch bei der Fahrt mit einem autonomen Fahrzeug erhöhtes Kinetoserisiko besteht, wenn sich der Fahrer nun anstelle der Fahraufgabe auf fahrfremde Tätigkeiten wie Zeitunglesen oder die Arbeit am Laptop oder Smartphone konzentrieren kann und dadurch immer mehr selbst zum Beifahrer wird. Dementsprechend besteht die Gefahr, dass Kinetose bei autonomen Fahrten vermehrt auftreten könnte, wodurch der Komfort drastisch reduziert wird. Es ist daher plausibel, dass den Ursachen von Kinetose bei der Entwicklung autonomer Fahrzeuge und der Planung der Fahrzeugbewegung durch entsprechende Maßnahmen entgegengewirkt werden sollte.

Nachdem der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf den Fahrkomfort - insbesondere unter Berücksichtigung von Kinetose - analysiert wurde, lässt sich feststellen, dass im Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs - sowohl in longitudinaler als auch in lateraler Richtung - die wichtigsten Merkmale für die Komfortbetrachtung bei der Trajektorienplanung enthalten sind. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit neben der Reisezeit ausschließlich die Kriterien Längs- und Querschleunigung sowie Längs- und Querruck in verschiedenen Kombinationen als Gütekriterien und zur Beurteilung des Fahrkomforts verwendet.

2.2 Komfortgrenzen für Fahrzeugbeschleunigung und -ruck

Für die Bewertung der Komfortkriterien hinsichtlich des Fahrkomforts ist es notwendig möglichst genaue Grenzwerte für diese anzugeben. Nachfolgend wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich Grenzen

der verwendeten Komfortkriterien Fahrzeugruck und -beschleunigung quantitativ bestimmen lassen. Die Grenzen werden anhand von Literaturwerten herausgearbeitet und getrennt nach Längs- und Querdynamik betrachtet.

2.2.1 Grenzwerte für die Längsdynamik

Für die Begrenzung der Längsdynamik des Fahrzeugs soll zunächst ein Blick auf bestehende FAS geworfen werden, die den Fahrer in der Längsführung des Fahrzeugs unterstützen. Die Systeme ACC sowie FSRA stellen dafür praxiserprobte Systeme dar, die als Orientierung verwendet werden können. Das FSRA ist eine Systemerweiterung des Standard ACC, dessen Funktionalität zusätzlich zum mittleren und hohen Geschwindigkeitsbereich auch den niedrigen Geschwindigkeitsbereich ($v < 5 \text{ m/s}$) abdeckt **Winner handbuch FAS acc**. In den ISO-Normen ISO 15622 **iso15622** und ISO 22179 **iso22179** werden die Funktionsgrenzen der beiden Systeme spezifiziert, welche auch in **Winner handbuch FAS acc** nachgelesen werden können. Geht man davon aus, dass der Betrieb autonomer Fahrzeuge im gesamten möglichen Geschwindigkeitsbereich vom Stillstand bis hin zu hohen Geschwindigkeiten möglich sein soll, so dienen die Funktionsgrenzen des FSRA als erste Anhaltspunkte für autonome Fahrzeuge.

Beim FSRA wird zwischen den einzelnen Geschwindigkeitsbereichen unterschieden. Bei hohen Geschwindigkeiten von $v > 20 \text{ m/s}$ betragen die Grenzwerte für die maximal zur Verfügung stehende Beschleunigung bzw. Verzögerung $a_{\max} = 2 \text{ m/s}^2$ bzw. $a_{\min} = -3,5 \text{ m/s}^2$ **Winner handbuch FAS acc**. Im Bereich niedriger Geschwindigkeiten von $v < 5 \text{ m/s}$ betragen die Funktionsgrenzen $a_{\max} = 4 \text{ m/s}^2$ bzw. $a_{\min} = -5 \text{ m/s}^2$ **Winner handbuch FAS acc**. Im dazwischen liegenden Geschwindigkeitsbereich dürfen die Höchstwerte für die Beschleunigung und Verzögerung abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit innerhalb der angegebenen Werte für hohe und niedrige Geschwindigkeiten liegen **Winner handbuch FAS acc**.

Der Grenzwert für den zulässigen Fahrzeugruck wird für hohe Geschwindigkeiten mit $j_{\max} = 2,5 \text{ m/s}^3$ und für niedrige Geschwindigkeiten mit $j_{\max} = 5 \text{ m/s}^3$ angegeben, wobei dieser Wert sowohl für positive als auch negative Beschleunigungen gilt **Winner handbuch FAS acc**. Auch hier darf der maximale Fahrzeugruck bei mittleren Geschwindigkeiten je nach tatsächlicher Geschwindigkeit innerhalb dieser Grenzen liegen.

Somit sind erste Werte für Funktionsgrenzen in Längsrichtung abgesteckt, wobei beachtet werden muss, dass diese Werte als absolute, zulässige Maximalwerte zu verstehen sind, bei denen der Fahrkomfort noch nicht berücksichtigt wurde [1]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Komfortgrenzen für FAS enger gefasst werden müssen als die reinen Funktionsgrenzen, weshalb die Grenzen unter Berücksichtigung des Komforts nun weiter eingeschränkt werden sollen.

In **liu und wu** wird ein Modell zur Folgefahrt basierend auf dem Fahrer- bzw. Passagierkomfort vorgestellt. Als Schwellwert der Längsbeschleunigung für die Unterscheidung zwischen einer komfortablen und einer unkomfortablen Fahrt wird dabei der Wert $a_c = 2 \text{ m/s}^2$ angegeben. In **radke** wurde die mittlere Längsbeschleunigung eines “undynamischen” und damit als komfortorientiert empfundenen Fahrstils auf Landstraßen experimentell als 1 m/s^2 ermittelt.

In **krause** konnten wichtige Erkenntnisse im alltäglich Straßenverkehr bezüglich des Beschleunigungsverhaltens bei Anfahrvorgängen gewonnen werden. Dafür wurden mithilfe von Bild- und Videokameras Messungen an Kreuzungen sowohl im innerstädtischen als auch außerstädtischen Bereich durchgeführt und das Beschleunigungsverhalten bei Anfahrvorgängen aus dem Stand von Geradeausfahrern und Rechtsabbiegern analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die gemessene Längsbeschleunigung allgemein mit der zurückgelegten Strecke abnimmt, wobei der Höchstwert des 90. Perzentils bei Geradeausfahrt bei $2,56 \text{ m/s}^2$ und beim Rechtsabbiegen bei $2,2 \text{ m/s}^2$ liegt. Die maximale Beschleunigung

wird unmittelbar nach Beginn des Beschleunigungsvorgangs (nach 5 m) erreicht. Anschließend nimmt die Beschleunigung rapide ab und bereits nach 15 m beträgt der Höchstwert des 90. Perzentils für Geradeausfahrt nur noch $2,1 \text{ m/s}^2$, respektive $1,8 \text{ m/s}^2$ für das Abbiegemanöver. Zudem wurde festgestellt, dass das Beschleunigungsniveau bei Abbiegevorgängen - sowohl innerorts, als auch außerorts - insgesamt geringer ist, als bei Anfahrvorgängen zur Geradeausfahrt. Als dritte wichtige Erkenntnis wurde schließlich festgestellt, dass es einen Unterschied im Beschleunigungsverhalten zwischen Abbiegevorgängen innerhalb von Ortschaften und außerorts gibt. Die Beschleunigungen innerorts sind dabei geringer. Dies wird damit begründet, dass zum einen innerorts geringere Kurvenradien durchfahren werden müssen als außerorts, welche wiederum einen Einfluss auf die Querschleunigung haben. Zum anderen wird als Grund für das niedrigere Beschleunigungsniveau der zu beachtende Verkehr durch kreuzende Fußgänger oder Radfahrer angeführt **krause**.

Diese Werte stimmen unter anderem mit den in **hugemann, nickel** anhand von Beschleunigungssensoren im Alltagsverkehr gemessenen Ergebnissen überein. Zusätzlich zum Wert für die Längsbeschleunigung wird das 90. Perzentil für die Längsverzögerung von planbaren Anhaltemanövern bei Alltagsfahrten (Zufahren auf eine rote Ampel) in **hugemann, nickel** mit $-3,3 \text{ m/s}^2$ angegeben. Die zuvor genannten Werte wurden anhand von Alltagsfahrten ermittelt und in Perzentilen angegeben, die eine möglichst große Menge der analysierten Ergebnisse (90. Perzentil) umfassen. Auch wenn bei der Analyse des alltäglichen Fahrverhaltens davon ausgegangen werden kann, dass ein gewisses Maß an Fahrkomfort erreicht wurde, kann es sein, dass die Höchstwerte der Perzentile mit weniger komfortablen Manövern erreicht wurden. In **Schwab** wird der Blick bei der Angabe von Grenzwerten speziell nochmal auf den Fahrkomfort gerichtet. Hier wird ein hohes Maß an Fahrkomfort mit einer defensiven Fahrweise in Verbindung gebracht **Schwab**. Die Höchstwerte der Beschleunigung und Verzögerung in longitudinaler Richtung für eine komfortable Fahrweise werden mit $2,0 \text{ m/s}^2$ beziehungsweise $-2,5 \text{ m/s}^2$ angegeben **Schwab** und stimmen in etwa mit den zuvor angegebenen Werten für alltägliche Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Abbiegevorgänge überein, wobei in **Schwab** auf eine geschwindigkeitsabhängige Betrachtung explizit verzichtet wurde.

Für den Längsruck gilt laut **Fun-to-Drive by Feedback** typischerweise für die Entwicklung vieler Anwendungen wie den Entwurf von Zugstrecken oder Personenaufzügen ein Grenzwert von $j_{\max} = \pm 2 \text{ m/s}^3$ zur Wahrung des Passagierkomforts. Neben den absoluten Werten des Rucks konnte Hiroaki in einer Studie für das Railway Technical Research Institute in Japan zudem einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Ruck und der Beschleunigung bezüglich der Nutzerakzeptanz feststellen **hiroaki** (zitiert nach **powell**). Demnach sinkt die Akzeptanz eines Fahrmanövers mit zunehmender Beschleunigung bei gleich bleibendem Ruck. Je größer der dabei erreichte Ruck, desto eher (bezogen auf die Beschleunigung) wird ein Manöver als unkomfortabel empfunden und vom Nutzer abgelehnt. Berücksichtigt man für die Auslegung eines FAS die in **Fun-to-Drive by Feedback** angegebene Komfortgrenze von $j_{\max} = 2 \text{ m/s}^3$, so darf die Längsbeschleunigung nicht größer als 1 m/s^2 sein, damit gemäß der Auswertungen in **hiroaki** weniger als 10% der Teilnehmer ein Manöver ablehnen würden und somit eine hohe Nutzerakzeptanz erreicht werden kann.

2.2.2 Grenzwerte für die Querdynamik

Wie bereits in 2.2.1 sollen auch in diesem Abschnitt zunächst die Funktionsgrenzen bereits bestehender FAS, die den Fahrer in der Querverführung des Fahrzeugs unterstützen, berücksichtigt werden. Dazu bietet sich die Betrachtung des LKS an. Dieses inzwischen in vielen Fahrzeugen verbaute Assistenzsystem unterstützt den Fahrer darin, bei höheren Geschwindigkeiten die Fahrspur zu halten und dem unerwünschten Verlassen des Fahrstreifens entgegen zu wirken **gayko**. Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen FSRA

ist das LKS in seinen Funktionsbereichen deutlich stärker restringiert. Während das FSRA über einen sehr breiten Geschwindigkeitsbereich mit vergleichsweise hohen Beschleunigungs- und Ruckwerten, die weit über die Grenzen eines komfortablen Fahrstils hinausgehen, betriebsfähig ist und somit der Funktionalität eines autonomen Fahrzeugs sehr nahe kommt, ist der Einsatzbereich des herkömmlichen LKS stärker beschränkt.

Der Geschwindigkeitsbereich, in dem das LKS zur Verfügung steht, liegt bei $65 \text{ km/h} < v < 180 \text{ km/h}$ und der minimale Kurvenradius, der durchfahren werden kann beträgt 230 m, bei einem maximalen Lenkmoment von 3 Nm **gayko**. Dabei können Querschleunigungen von bis zu 2 m/s^2 erreicht werden. Durch diese Funktionsgrenzen wird das System in seiner Anwendung auf den Betrieb im Autobahnverkehr beschränkt. Mittlerweile existieren auch Erweiterungen des LKS, die einen Betrieb im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich bis 60 km/h ermöglichen und somit als Ergänzung für Stausituationen dienen **oschlies**.

Analog zu den Ergebnissen für die Längsbeschleunigung wurde das Clusterzentrum für komfortable Fahrt auf Landstraßen in **radke** als $2,5 \text{ m/s}^2$ ermittelt. Der in **Schwab** angegebene Maximalwert für Erreichen eines hohen Komfortniveaus liegt bei $1,8 \text{ m/s}^2$ und weicht damit leicht vom Wert aus **radke** ab. Allerdings wird in **Schwab** neben der Unterscheidung verschiedener Komfortstufen noch zwischen den einzelnen Fahrstilen differenziert. Für einen defensiven Fahrstil wird der Bereich lateraler Beschleunigungen mit $1,5 \text{ m/s}^2 - 2,9 \text{ m/s}^2$ beziffert. Geht man davon aus, dass eine defensive Fahrweise allgemein einen hohen Fahrkomfort bietet, so lässt sich dieser Wertebereich auch mit dem Clusterzentrum für komfortable Landstraßenüberfahrten aus **radke** in Einklang bringen.

Neben den absoluten Werten der Querschleunigung zeigen zahlreiche Untersuchung eine signifikante Abhängigkeit der Querschleunigung von der Fahrgeschwindigkeit **schimmelpfennig_nackenhorstdragonreym**. So werden in **dragon** typische Querschleunigungen, die von Normalfahrern erreicht werden, für die Geschwindigkeitsbereiche Stadt ($v < 50 \text{ km/h}$), Landstraße ($50 \text{ km/h} < v < 100 \text{ km/h}$) und Autobahn ($100 \text{ km/h} < v < 250 \text{ km/h}$) angegeben, wobei die auf Landstraßen typischerweise erreichten Querschleunigungen mit $4,1 \text{ m/s}^2$ am höchsten und auf Autobahnen mit 2 m/s^2 am niedrigsten sind. Zudem konnte in **schimmelpfennig_nackenhorst** mithilfe von Beschleunigungsmessungen bei scharfen und normalen Spurwechselmanövern festgestellt werden, dass bei höheren Geschwindigkeiten bereits niedrigere Querschleunigungen ausreichen, um das Gefühl eines scharfen Manövers zu verursachen. Zusätzlich zu der Geschwindigkeitsabhängigkeit zeigen einige Experimente einen weiteren Zusammenhang zwischen der Querschleunigung und der durchfahrenen Krümmung und damit auch dem Fahrmanöver (beispielsweise Spurwechsel oder Kurvenfahrt) auf.

Die Ergebnisse in diesem Kapitel machen die Schwierigkeit bei der objektiven Bestimmung von Grenzwerten für den Fahrkomfort deutlich. Die Komfortwahrnehmung wird von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren beeinflusst. Erst deren Gesamtwirken lässt sich je nach Situation und Fahrmanöver bezüglich des Fahrkomforts bewerten. Dazu kommt, dass das Komfortempfinden auch von subjektiven Eindrücken wie dem persönlichen Sicherheitsempfinden oder eigenen Fahrgewohnheiten geprägt wird. Allgemeingültige Werte, die als "harte" Komfortgrenzen verstanden werden können, können deshalb ohne zusätzliche Annahmen und Vereinfachungen nicht getroffen werden. Die in diesem Kapitel erarbeiteten Grenzwerte für die komfortrelevanten Größen Fahrzeugruck und -beschleunigung in longitudinaler und lateraler Richtung dienen daher eher als Orientierung für die qualitative Bewertung des Fahrkomforts.

Literatur

- [1] M. Festner, „Objektivierte Bewertung des Fahrstils auf Basis der Komfortwahrnehmung bei hochautomatisiertem Fahren in Abhängigkeit fahrfremder Tätigkeiten: Grundlegende Zusammenhänge zur komfortorientierten Auslegung eines hochautomatisierten Fahrstils“, Diss., DuEPublico: Duisburg-Essen Publications online, University of Duisburg-Essen, Germany, 2019. DOI: 10.17185/duepublico/70681.
- [2] M. Elbanhawi, M. Simic und R. Jazar, „In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars“, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Jg. 7, Nr. 3, S. 4–17, 2015, ISSN: 1939-1390. DOI: 10.1109/MITS.2015.2405571.
- [3] B. Abendroth und R. Bruder, „Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, Hrsg., Bd. 32, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009, S. 4–14, ISBN: 978-3-8348-0287-3. DOI: 10.1007/978-3-8348-9977-4\textunderscore2.
- [4] H. Bellem, T. Schönenberg, J. F. Krems und M. Schrauf, „Objective metrics of comfort: Developing a driving style for highly automated vehicles“, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Jg. 41, Nr. 6, S. 45–54, 2016, ISSN: 13698478. DOI: 10.1016/j.trf.2016.05.005.
- [5] Y. L. Murphey, R. Milton und L. Kiliaris, „Driver’s style classification using jerk analysis“, in *2009 IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems*, IEEE, 30.03.2009 - 02.04.2009, S. 23–28, ISBN: 978-1-4244-2770-3. DOI: 10.1109/CIVVS.2009.4938719.
- [6] A. Lange, M. Maas, M. Albert, K.-H. Siedersberger und K. Bengler, „Automatisiertes Fahren - So komfortabel wie möglich, so dynamisch wie nötig“, in *30. VDI/VW-Gemeinschaftstagung. Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*, Ser. VDI-Berichte, Düsseldorf: VDI-Verl., 2014, S. 215–228, ISBN: 978-3-18-092223-2.
- [7] D. J. Osborne, „Passenger comfort — an overview“, *Applied Ergonomics*, Jg. 9, Nr. 3, S. 131–136, 1978, ISSN: 00036870. DOI: 10.1016/0003-6870(78)90002-9.
- [8] C. Gianna, S. Heimbrand und M. Gresty, „Thresholds for detection of motion direction during passive lateral whole-body acceleration in normal subjects and patients with bilateral loss of labyrinthine function“, *Brain Research Bulletin*, Jg. 40, Nr. 5-6, S. 443–447, 1996, ISSN: 03619230. DOI: 10.1016/0361-9230(96)00140-2.
- [9] K. E. Money, „Motion sickness“, *Physiological reviews*, Jg. 50, Nr. 1, S. 1–39, 1970, ISSN: 0031-9333. DOI: 10.1152/physrev.1970.50.1.1.
- [10] J. F. Golding, „Motion sickness susceptibility“, *Autonomic neuroscience : basic & clinical*, Jg. 129, Nr. 1-2, S. 67–76, 2006, ISSN: 1566-0702. DOI: 10.1016/j.autneu.2006.07.019.
- [11] J. T. Reason, J. T. Reason und J. J. Brand, *Motion sickness*. London: Acad. Pr, 1975, ISBN: 9780125840507.

-
- [12] J. R. Lackner, „Motion sickness: more than nausea and vomiting“, *Experimental brain research*, Jg. 232, Nr. 8, S. 2493–2510, 2014. DOI: 10.1007/s00221-014-4008-8.
- [13] H. Vogel, R. Kohlhaas und R. J. von Baumgarten, „Dependence of motion sickness in automobiles on the direction of linear acceleration“, *European journal of applied physiology and occupational physiology*, Jg. 48, Nr. 3, S. 399–405, 1982, ISSN: 0301-5548. DOI: 10.1007/BF00430230.
- [14] A. Rolnick und R. E. Lubow, „Why is the driver rarely motion sick? The role of controllability in motion sickness“, *Ergonomics*, Jg. 34, Nr. 7, S. 867–879, 1991, ISSN: 0014-0139. DOI: 10.1080/00140139108964831.
- [15] H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, Hrsg., *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009, ISBN: 978-3-8348-0287-3. DOI: 10.1007/978-3-8348-9977-4.