

# 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: 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: 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

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

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.



---

# Acronyms

---

- ACC** Adaptive Cruise Control. 5
- AD** Automatisiertes Fahren. 2, 4, 22, 28, 29
- DGL** Differentialgleichung. 13, 16–18, 22–29
- FAS** Fahrassistenzsysteme. 5, 7
- FSRA** Full Speed Range Adaptive Cruise Control. 5, 7, 11
- GNB** Gleichungsnebenbedingung. 13, 14, 21, 27, 29, 30
- LKS** Lane Keeping Support. 7, 11
- OP** Optimierungsproblem. 13, 14, 16–19, 21, 22, 27
- RKV** Runge-Kutter-Verfahren. 23, 26, 29
- UNB** Ungleichungsnebenbedingung. 13, 14, 27
- MPR** Mehr-Punkte-Randwertproblem. 27, 29, 30
- ZPR** Zwei-Punkte-Randwertproblem. 17, 18, 23, 24, 26, 29, 30



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fahrkomfort und Einordnung in den Kontext Automatisiertes Fahren</b>	<b>2</b>
2.1	Fahrkomfort im Kontext Automatisiertes Fahren . . . . .	2
2.1.1	Kinetose und ihre Bedeutung für das Autonome Fahren . . . . .	3
2.2	Komfortgrenzen für Fahrzeugbeschleunigung und -ruck . . . . .	5
2.2.1	Grenzwerte für die Längsdynamik . . . . .	5
2.2.2	Grenzwerte für die Querdynamik . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Fahrzeugmodellierung</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Optimierung - Mathematische Grundlagen und Methoden</b>	<b>13</b>
4.1	Statische Optimierung . . . . .	13
4.2	Dynamische Optimierung . . . . .	13
4.2.1	Variationsrechnung . . . . .	14
4.2.1.1	Optimalitätsbedingungen . . . . .	15
4.2.1.2	Singulärer Fall . . . . .	16
4.2.1.3	Allgemeine Endbedingungen . . . . .	17
4.2.2	Optimalitätsprinzip nach Bellman . . . . .	17
4.3	Zeittransformation für freie Endzeitpunkte . . . . .	18
4.4	Variationsprobleme mit internen Gleichungsnebenbedingungen . . . . .	20
4.5	Diskontinuierliche Systemdynamik . . . . .	21
4.6	Numerische Lösungsverfahren . . . . .	22
4.6.1	Indirekte Lösungsverfahren . . . . .	22
4.6.1.1	Indirekte Diskretisierungsverfahren . . . . .	23
4.6.1.2	Indirekte Schießverfahren . . . . .	23
4.6.1.3	Indirekte Gradientenverfahren . . . . .	24
4.6.1.4	Indirekte Kollokationsverfahren . . . . .	26
4.6.2	Direkte Lösungsverfahren . . . . .	27
4.6.3	Diskussion der Lösungsverfahren . . . . .	28
4.6.3.1	bvp4c-Solver . . . . .	29
	<b>Literatur</b>	<b>31</b>





---

# 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 Automatisiertes Fahren

---

In diesem Kapitel soll der Begriff “Fahrkomfort” in den Kontext Automatisiertes Fahren (AD) 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 automatisierter Fahrzeuge eingegangen. Abschließend werden mithilfe von Literaturwerten Grenzwerte für die als relevant erachteten Einflüsse untersucht.

---

### 2.1 Fahrkomfort im Kontext Automatisiertes Fahren

---

Mit zunehmender Automatisierung von Fahraufgaben rückt auch der Fahrkomfort immer mehr in den Fokus. Es ist nicht davon auszugehen, dass hochautomatisierte oder autonome Fahrzeuge, deren Fahrweise von Fahrer\_innen als unkomfortabel empfunden wird, eine hohe Akzeptanz finden werden. Damit sich überhaupt ein komfortables Gefühl während einer automatisierten Fahrt einstellen kann, muss bei den fahrzeugführenden Personen ein Gefühl von Sicherheit herrschen [1]. Nicht nur für unbeteiligte Dritte wie Fußgänger\_innen oder andere Autofahrer\_innen, sondern vor allem auch für die fahrende Person selbst spielt die Sicherheit bei automatisierten 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 oder die Fahrerin 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 [2] 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 [3] als “*loss of controllability*” eingeführte Paradigmenwechsel von Fahrer\_in zu Passagier\_in zum Tragen. Dadurch, dass Fahrzeugführende mehr und mehr die Fahrzeugführung und Überwachung aller Funktionen an das Fahrzeug abgeben, 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. Mit Umfeldüberwachung ist im Sinne der SAE-Klassifizierung die Detektion, Erkennung und Klassifizierung von Objekten im Straßenverkehr sowie Fahrsituationen und die Vorbereitung einer angemessenen Reaktion auf diese gemeint [2]. Bis einschließlich Level 2 liegt diese Aufgabe bei der fahrzeugführenden Person, während das Fahrzeug nur die eigentliche Quer- und Längsführung ausführt. Ab Level 3 fällt auch diese Aufgabe in den Bereich des Fahrzeugs, sodass das Fahrzeug die

---

dynamische Fahraufgabe vollständig selbst ausüben kann und die fahrzeugführende Person nur noch als Rückfallebene dient und die Fahrzeugführung in Not- oder Fehlersituationen nach Aufforderung durch das System sicher übernehmen kann [2].

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 [4]–[6]. 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 [7] 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 die fahrende Person mit zunehmender Automatisierung geringer wird. Daher liegt für automatisierte 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 [8] wurden in einer Fahrsimulatorstudie die Merkmale Sicherheitsabstand zum Vorderfahrzeug, das Bremsverhalten, die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie -beschleunigung, das Spurhalten, Lenken und die Blinkernutzung als die am häufigsten genannten Komfortkriterien identifiziert, wobei die drei ersten Merkmale von über der Hälfte der Teilnehmenden als relevant erachtet wurden. Neben den hier identifizierten Komfortmerkmalen lässt sich auch die Reisezeit als weiteres Kriterium angeben. Bereits in [9] wurde dargelegt, dass Passagier\_innen, die einer längeren Reisezeit ausgesetzt sind, ein höheres Maß an Komfort benötigen, als bei einer kürzeren Reisezeit. Jeder Passagier und jede Passagierin geht daher einen subjektiven Kompromiss zwischen der erwarteten Reisezeit und dem akzeptierten Niveau an Diskomfort ein. Aufgrund dessen hängen die von der fahrenden Person als komfortabel empfundenen biomechanischen Werte (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Ruck) auch von der Reisezeit ab [1].

Eine besondere Wichtigkeit bei der Trajektorienplanung bezüglich des Fahrkomforts kommt dem Beschleunigungsverhalten zu. In [5] 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 [3] ist der häufigste Ansatz zur Optimierung der Fahrzeugbewegungen, die auf die Fahrzeuginsassen 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 [10]. Hier konnte festgestellt werden, dass der Mensch bei lateralen Bewegungen insbesondere gegenüber Änderungen der Beschleunigung sehr sensitiv reagiert und diese besonders gut wahrnimmt. In [11] 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 [12]. Es existieren mehrere Theorien für die genauen

---

Ursachen von Kinetose [12]. Eine anerkannte und weit verbreitete Theorie liegt dabei in einem visuell-vestibulären Sensorkonflikt [13]–[15]. 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 [16]. Darüber hinaus hängt die Schwere der Kinetoseausprägung von der Frequenz ab, mit der die Beschleunigungen und Rucke auf den menschlichen Körper einwirken [17]. Vor allem niederfrequente Schwingungen im Bereich zwischen 0,1 Hz und 0,5 Hz begünstigen das Auftreten von Kinetose und sollten vermieden werden [17], [18]. Da der Fokus dieser Arbeit hinsichtlich der Interpretation von optimalen Trajektorien in Bezug auf den Fahrkomfort allerdings nicht auf der Frequenzanalyse der Trajektorien liegt, soll der Einfluss unterschiedlicher Frequenzen nicht weiter diskutiert werden und sei an dieser Stelle lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt.

Neben dem Einfluss des Sensorkonflikts auf die Ausprägung von Kinetose, konnte in [19] 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 Beifahrer\_innen bzw. Passagier\_innen, die das Fahrzeug nicht selbst führen, auftreten [13]. In [20] und [21] wurden mehrere Gründe für dieses Phänomen gefunden. Zum einen hat die fahrzeugführende Person, die Kontrolle über die Fahrzeugbewegungen und damit auch die Richtung, in die sich die Fahrzeuginsassen bewegen. Dies ist bei den Beifahrer\_innen nicht der Fall und die fehlende Kontrolle führt zu einer größeren Anfälligkeit für die Reisekrankheit. Außerdem kann fahrzeugführende Person durch die ihr gegebene Kontrolle über das Fahrzeug Bewegungen besser antizipieren. In [20] wird außerdem der bereits erwähnte visuell-vestibuläre Sensorkonflikt als Grund angeführt, da Beifahrer\_innen 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 [20] gab ein Großteil der über 3000 Befragten an, dass sie während der Fahrt andere Tätigkeiten als das Beobachten der Straße ausüben würden. Zudem wurde nach der Häufigkeit und Schwere von Kinetose bei Fahrten mit gewöhnlichen Fahrzeugen gefragt. Mithilfe dieser Angaben wurde eine Abschätzung für das Kinetoserisiko bei Fahrten mit selbst fahrenden Fahrzeugen vorgenommen. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass zwischen 4 und 14 Prozent der Erwachsenen (unter Berücksichtigung der Angaben in verschiedenen Ländern) in vollständig selbst fahrenden Autos wahrscheinlich oft bis immer ein gewisses Maß an Kinetose verspüren werden. Die Ausprägung moderater bis schwerer Kinetosesymptome tritt nach der Einschätzung der Autoren bei zwischen 4 und 17 Prozent der Personen auf. Diese Studie verdeutlicht die besondere Bedeutung, die der Reisekrankheit bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge zukommt.

Kinetose besitzt aus zwei Gründen eine ausdrückliche Relevanz für die Komfortwahrnehmung beim AD. 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 Beifahrer\_innen bzw. Passagier\_innen auf, wodurch bei der Fahrt mit einem automatisierten Fahrzeug erhöhtes Kinetoserisiko besteht, wenn sich die fahrzeugführende Person 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 bzw. zur Beifahrerin wird. Dementsprechend besteht die Gefahr, dass Kinetose beim AD vermehrt auftreten könnte, wodurch der Komfort drastisch reduziert wird. Es ist daher plausibel, dass den Ursachen von

---

Kinetose bei der Entwicklung automatisierter 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 für die verschiedenen Fahrscenarien 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 Fahrerassistenzsysteme (FAS) geworfen werden, die Fahrer\_innen in der Längsführung des Fahrzeugs unterstützen. Die Systeme Adaptive Cruise Control (ACC) sowie Full Speed Range Adaptive Cruise Control (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 [22]. In den ISO-Normen ISO 15622 [23] und ISO 22179 [24] werden die Funktionsgrenzen der beiden Systeme spezifiziert, welche auch in [22] nachgelesen werden können. Geht man davon aus, dass der Betrieb automatisierter 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 automatisierte 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.  $a_{\min} = -3,5 \text{ m/s}^2$  [22]. Im Bereich niedriger Geschwindigkeiten von  $v < 5 \text{ m/s}$  betragen die Funktionsgrenzen  $a_{\max} = 4 \text{ m/s}^2$  bzw.  $a_{\min} = -5 \text{ m/s}^2$  [22]. 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 [22]. 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 [22]. 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 [25] wird ein Modell zur Folgefahrt basierend auf dem Fahrer\_innen- bzw. Passagier\_innenkomfort 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 [26] wurde die mittlere Längsbeschleunigung eines „undynamischen“ und damit als komfortorientiert empfundenen Fahrstils auf Landstraßen experimentell als  $1 \text{ m/s}^2$  ermittelt. In [27] 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 beim Anfahren aus dem Stand von Geradeausfahrenden und Rechtsabbiegenden analysiert. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 2.1 dargestellt. 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 bei Abbiegevorgängen innerorts der Verkehr durch kreuzende Fußgänger\_innen oder Radfahrende beachtet werden muss [27].

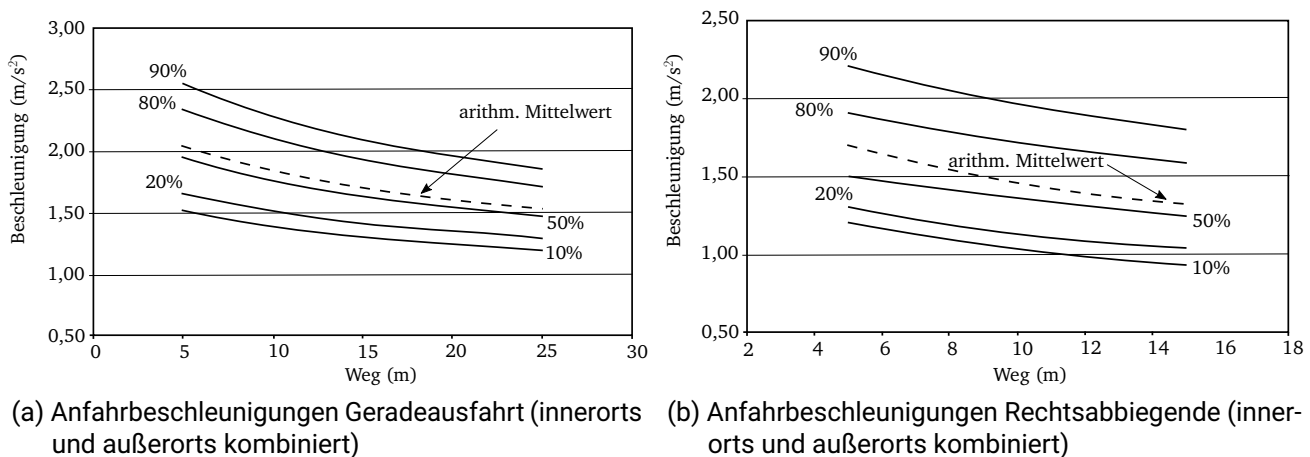


Abbildung 2.1: Anfahrbeschleunigungen für Geradeausfahrende und Rechtsabbiegende [27]

Diese Werte stimmen unter anderem mit den in [28] anhand von Beschleunigungssensoren im Alltagsverkehr gemessenen Ergebnissen überein. Zusätzlich zum Wert für die Längsbeschleunigung wird das 90. Perzentil für die Längsverzögerung von planbaren Anhaltenmanövern bei Alltagsfahrten (Zufahren auf eine rote Ampel) in [28] 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 [29] 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 [29]. 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 [29] und stimmen in etwa mit den zuvor angegebenen Werten für alltägliche Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Abbiegevorgänge überein, wobei in [29] auf eine geschwindigkeitsabhängige Betrachtung explizit verzichtet wurde.

Für den Längsruck gilt laut [30] 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 Komfort von Anwender\_innen, wobei der Wert sich dabei auf die Längsrichtung der Bewegung bezieht. Neben den absoluten Werten des Rucks konnte Hiroaki in einer Studie [31] (zitiert nach [32]) für das Railway Technical Research Institute in Japan zudem einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Ruck und der Beschleunigung bezüglich der Akzeptanz durch Nutzende feststellen. Demnach sinkt die Akzeptanz eines Fahrmanövers mit zunehmender Beschleunigung bei gleich bleibendem Ruck. Je größer der dabei erreichte Ruck, desto eher wird ein Manöver als unkomfortabel empfunden und von Nutzenden abgelehnt. Berücksichtigt man für die Auslegung eines FAS die in [30] angegebene Komfortgrenze von  $j_{\max} = 2 \text{ m/s}^3$ , so darf die Längsbeschleunigung nicht größer als  $1 \text{ m/s}^2$  sein, damit gemäß der Auswertungen in [31] weniger als 10% der Teilnehmenden ein Manöver ablehnen würden und somit ein hohes Akzeptanzniveau 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 Fahrer\_innen in der Querverführung des Fahrzeugs unterstützen, berücksichtigt werden. Dazu bietet sich die Betrachtung des Lane Keeping Support (LKS) an. Dieses inzwischen in vielen Fahrzeugen verbaute Assistenzsystem unterstützt die fahrzeugführende Person darin, bei höheren Geschwindigkeiten die Fahrspur zu halten und dem unerwünschten Verlassen des Fahrstreifens entgegen zu wirken [33]. 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 automatisierten 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 [33]. Dabei können Querbeschleunigungen von bis zu  $2 \text{ m/s}^2$  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 [34].

Analog zu den Ergebnissen für die Längsbeschleunigung wurde das Clusterzentrum für komfortable Fahrt auf Landstraßen in [26] als  $2,5 \text{ m/s}^2$  ermittelt. Der in [29] angegebene Maximalwert für Erreichen eines hohen Komfortniveaus liegt bei  $1,8 \text{ m/s}^2$  und weicht damit leicht vom Wert aus [26] ab. Allerdings wird in [29] 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 [26] in Einklang bringen.

Neben den absoluten Werten der Querbesehleunigung zeigen zahlreiche Untersuchungen eine signifikante Abhängigkeit der Querbesehleunigung von der Fahrgeehwindigkeit [35]–[38]. So werden in [35] typische Querbesehleunigungen, die von Normalfahrer\_innen 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 Querbesehleunigungen mit  $4,1 \text{ m/s}^2$  am höchsten und auf Autobahnen mit  $2 \text{ m/s}^2$  am niedrigsten sind. Zur Prädiktion des Fahrverhaltens in Kurven wurde in [36] mithilfe der maximal zulässigen Querbesehleunigung und anderer physikalischer Begrenzungen wie dem maximalen Lenkwinkel der nichtlineare Verlauf einer Einhüllenden für die Querbesehleunigung in Abhängigkeit der Fahrzeuggeehwindigkeit bestimmt. Zudem konnte in [37] mithilfe von Besehleunigungsmessungen bei Spurwechselmanövern festgestellt werden, dass bei höheren Geschwindigkeiten bereits niedrigere Querbesehleunigungen ausreichen, um das Gefühl eines scharfen Manövers zu verursachen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

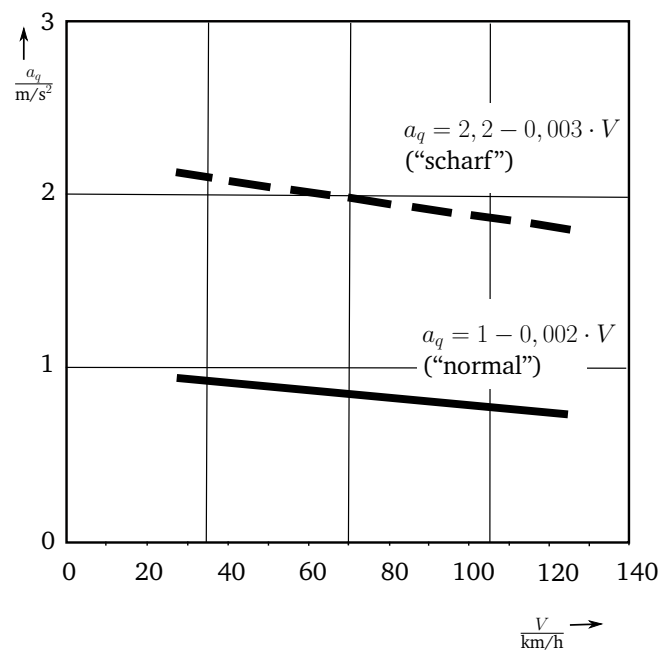


Abbildung 2.2: Zusammenhang zwischen der Querbesehleunigung und der Fahrzeuggeehwindigkeit für "scharfe" und "normale" Spurwechsel [37]

Zusätzlich zu der Geschwindigkeitsabhängigkeit zeigen Untersuchungen einen weiteren Zusammenhang zwischen der Querbesehleunigung und der durchfahrenen Krümmung und damit auch dem Fahrmanöver (beispielsweise Spurwechsel oder Kurvenfahrt) auf [28], [38]. Es lässt sich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Querbesehleunigung des Fahrzeugs und der durchfahrenen Krümmung feststellen, bei dem die Querbesehleunigung mit abnehmender Krümmung (wachsender Radius) ebenfalls abnimmt, obwohl die physikalischen Grenzen der Querbesehleunigung für große Kurvenradien genauso gelten wie für geringe Radien und theoretisch jede Kurve durch entsprechende Anpassung der Geschwindigkeit mit der gleichen maximalen Querbesehleunigung durchfahren werden könnte. Der Grund für diesen Zusammenhang liegt darin, dass Fahrer\_innen bei der Wahl der Kurvengeschwindigkeit automatisch einen Sicherheitsabstand zu den physikalischen Grenzwerten der

Beschleunigung einhalten [28]. Da größere Radien vor allem auf Autobahnen vorkommen, wo in aller Regel hohe Geschwindigkeiten herrschen und damit im Falle eines Unfalls durch Überschreiten der physikalischen Grenzen ein deutlich größeres Schadenspotential herrscht als im Stadtverkehr, wird der Sicherheitsabstand zu den physikalischen Grenzen von den meisten Personen bei großen Radien intuitiv größer gewählt als bei kleinen Kurvenradien [38]. In [39] wird der gleiche Zusammenhang zwischen abnehmender Querbeschleunigung und zunehmendem Kurvenradius angegeben - bei größeren Radien werden geringere Beschleunigungen akzeptiert. Allerdings wird hier nochmal zwischen den drei Fahrstilen “sportlich”, “normal” und “ruhig” unterschieden. Der qualitative Verlauf der Querbeschleunigung über dem Kurvenradius bleibt jedoch bei allen Fahrstilen gleich, lediglich das Gesamtniveau der akzeptierten Querbeschleunigung variiert zwischen den einzelnen Fahrstilen. In Abbildung 2.3 ist der gemessene Zusammenhang zwischen der Querbeschleunigung und dem Kurvenradius nach [28] dargestellt. Die beim Durchfahren der Kurven erreichten Geschwindigkeiten wurden von den Fahrer\_innen frei gewählt.

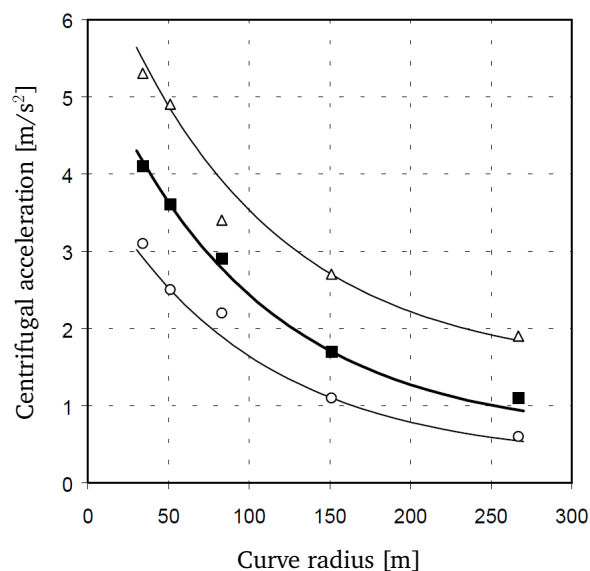


Abbildung 2.3: Zusammenhang zwischen der Querbeschleunigung und dem Kurvenradius bei selbst gewählten Geschwindigkeiten [28].

Legende:  $\triangle$ : 90. Perzentil,  $\blacksquare$ : 50. Perzentil,  $\circ$ : 10. Perzentil

Ein häufiges und wichtiges Verkehrsmannöver im Straßenverkehr ist der Spurwechsel zum Beispiel bei Überholvorgängen, weshalb dieses Manöver nochmal genauer betrachtet werden soll. In Fahrversuchen wurden selbstgewählte Querbeschleunigungen bei Fahrstreifenwechseln im Bereich von  $0,74 \text{ m/s}^2$  –  $1,01 \text{ m/s}^2$  gemessen [7]. Nahezu die selben Werte wurden auch in [37] für normale Spurwechselmanöver bei verschiedenen Geschwindigkeiten ermittelt, die in Abbildung 2.2 dargestellt sind. In [40] wurden vergleichbare Tests bei Spurwechseln durchgeführt. Allerdings wurden die Tests bezogen auf einen Referenzspurwechsel einmal mit geringerer und einmal mit höherer Querdynamik durchgeführt, wobei die geringere Querdynamik als deutlich komfortabler eingestuft wurde [40] und mit  $1,1 \text{ m/s}^2$  eine maximale Querbeschleunigung aufwies, die sehr ähnlich zu den in [37] und [7] ermittelten Werten liegt.

Als Komfortgrenze für den Querruck dient der in [40] ermittelte maximale Querruck bei Spurwechselmanövern. Dabei wurden Spurwechsel unterschiedlicher Dynamikausprägungen durchgeführt, die

---

anschließend von den Proband\_innen hinsichtlich des Fahrkomforts bewertet werden sollten. Die Ruckwerte der beiden unterschiedlichen Querdynamiken können im Hinblick auf den Fahrkomfort als komfortabel für die geringere Querdynamik und als weniger komfortabel für die höhere Querdynamik interpretiert werden. Der beim komfortableren Spurwechsel erreichte maximale Querruck beträgt  $1,8 \text{ m/s}^3$  [40]. Wie bereits dargelegt werden konnte, kommen zahlreiche wissenschaftliche Studien und Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass Beschleunigungsänderungen einen signifikanten Einfluss auf die Komfortwahrnehmung haben und daher eine wichtige Rolle bei der Bewertung des Fahrkomforts spielen. Allerdings ist es aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen und dem subjektiven Komfortempfinden ebenso schwierig, den Fahrzeugruck objektiv und allgemeingültig unter Berücksichtigung des Fahrkomforts zu quantifizieren. Aus diesem Grund können weitere Grenzwerte für den Fahrzeugruck, die über die bisher genannten Werte hinausgehen, im Rahmen dieser Recherche nicht angegeben werden.

Abschließend werden die verschiedenen Grenzwerte für die Längs- und Querdynamik der Übersichtlichkeit halber nochmals in tabellarischer Form zusammengefasst (siehe Tabelle 2.1).

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.

Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Grenz- und Richtwerte für die Längs- und Querdynamik

Größe	Beschreibung	Wert	Quelle
Längsbeschleunigung	Maximalwert für FSRA für $v > 20 \text{ km/h}$	$2 \text{ m/s}^2$	[22]
	Maximalwert für FSRA für $v < 5 \text{ km/h}$	$4 \text{ m/s}^2$	[22]
	Schwellwert zur Unterscheidung zwischen komfortabler und unkomfortabler Fahrt	$2 \text{ m/s}^2$	[25]
	Mittlere Beschleunigung eines undynamischen Fahrstils auf Landstraßen	$1 \text{ m/s}^2$	[26]
	Höchstwert des 90. Perzentils von Anfahrbeschleunigungen bei Geradeausfahrt	$2,56 \text{ m/s}^2$	[27]
	Höchstwert des 90. Perzentils von Anfahrbeschleunigungen beim Rechtsabbiegen	$2,2 \text{ m/s}^2$	[27]
	Wert des 90. Perzentils von Beschleunigungen bei Alltagsfahrten	$2,6 \text{ m/s}^2$	[28]
	Maximalwert der Beschleunigung bei hohem Komfortniveau	$2 \text{ m/s}^2$	[29]
Längsverzögerung	Maximalwert für FSRA für $v > 20 \text{ km/h}$	$-3,5 \text{ m/s}^2$	[22]
	Maximalwert für FSRA für $v < 5 \text{ km/h}$	$-5 \text{ m/s}^2$	[22]
	Wert des 90. Perzentils von Verzögerungen bei Alltagsfahrten	$-3,3 \text{ m/s}^2$	[28]
	Maximalwert der Verzögerung bei hohem Komfortniveau	$-2,5 \text{ m/s}^2$	[29]
Längsruck	Maximalwert für FSRA für $v > 20 \text{ km/h}$	$\pm 2,5 \text{ m/s}^3$	[22]
	Maximalwert für FSRA für $v < 5 \text{ km/h}$	$\pm 5 \text{ m/s}^3$	[22]
	Typischer Grenzwert zur Wahrung von Passagierkomfort	$\pm 2 \text{ m/s}^3$	[30]
Querb beschleunigung	Maximalwert für LKS für $60 \text{ km/h} < v < 180 \text{ km/h}$	$2 \text{ m/s}^2$	[33]
	Mittlere Beschleunigung eines undynamischen Fahrstils auf Landstraßen	$2,5 \text{ m/s}^2$	[26]
	Maximalwert der Beschleunigung bei hohem Komfortniveau	$1,8 \text{ m/s}^2$	[29]
	Maximalwert der Beschleunigung eines defensiven Fahrstils	$2,9 \text{ m/s}^2$	[29]
	Höchstwert typischer Beschleunigungen von Normalfahrer_innen in der Stadt	ca. $3,2 \text{ m/s}^2$	[35]
	Höchstwert typischer Beschleunigungen von Normalfahrer_innen auf Landstraßen	ca. $4,1 \text{ m/s}^2$	[35]
	Höchstwert typischer Beschleunigungen von Normalfahrer_innen auf Autobahnen	ca. $2 \text{ m/s}^2$	[35]
	Selbstgewählte Beschleunigungen bei Fahrstreifenwechseln	$0,74$ bis $1,01 \text{ m/s}^2$	[7]
	Selbstgewählte Beschleunigungen bei Fahrstreifenwechseln mit geringer Querdynamik	$1,1 \text{ m/s}^2$	[40]
Querruck	Selbstgewählter Ruck bei Fahrstreifenwechseln mit geringer Querdynamik	$\pm 1,8 \text{ m/s}^3$	[40]



---

## 3 Fahrzeugmodellierung

---

---

## 4 Optimierung - Mathematische Grundlagen und Methoden

---

In diesem Kapitel werden die notwendigen mathematischen Grundlagen beschrieben, die zur Formulierung eines Optimierungsproblem (OP) und zu dessen Lösung mithilfe der Variationsrechnung notwendig sind. Dazu wird zunächst der Unterschied zwischen *statischer* und *dynamischer* Optimierung erläutert und anschließend mit der *Variationsrechnung* eine Lösungsmethode eingeführt, mit der sich ein dynamisches OP in ein System nichtlinearer Differentialgleichung (DGL) 1. Ordnung überführen lässt. Dessen Lösung kann entweder analytisch oder numerisch bestimmt werden. Danach werden zusätzliche Methoden erläutert, mit deren Hilfe sich ein komplexes OP in mehrere miteinander verknüpfte Optimierungsaufgaben unterteilen lässt, deren Lösungen vergleichsweise einfach bestimmt werden können. Abschließend werden einige Lösungsverfahren zur numerischen Lösung dynamischer OP vorgestellt und diskutiert.

---

### 4.1 Statische Optimierung

---

Die allgemeine Standardformulierung eines statischen OP lautet [41]:

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} f(\mathbf{x}) \tag{4.1}$$

$$\text{u.B.v. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \tag{4.2}$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq 0 \tag{4.3}$$

Die Funktion  $f(\mathbf{x})$  wird dabei als Kosten- oder Gütefunktion bezeichnet und bezüglich der Optimierungsvariablen  $\mathbf{x}$  unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen  $\mathbf{g}$  und  $\mathbf{h}$  minimiert. Bei der statischen Optimierung sind die Variablen  $\mathbf{x}$  Elemente des Euklidischen Raums [41]. Für die Gleichungsnebenbedingung (GNB)  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  und die Ungleichungsnebenbedingung (UNB)  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  gilt  $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^p$  bzw.  $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^q$ , wobei  $p < n$  sein muss, da sich die Optimierungsvariablen  $\mathbf{x}$  ansonsten bei  $p = n$  unabhängigen Gleichungen direkt aus  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  bestimmen lassen [42]. Für die Anzahl der UNB hingegen gibt es keine maximal zulässige Anzahl [42].

---

### 4.2 Dynamische Optimierung

---

Im Unterschied zur statischen Optimierung sind die Optimierungsvariablen bei der dynamischen Optimierung selbst Funktionen einer unabhängigen Variable, welche in den meisten Fällen der Zeit  $t$  entspricht [41]. Das bedeutet, es werden die optimalen Zeitverläufe der Optimierungsvariablen gesucht.

Aufgrund dessen wird die Funktion  $f(\mathbf{x})$  zum Kosten- oder Gütefunktional  $J(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t)$ , welches bei der dynamischen Optimierung minimiert wird. Eine sehr häufige Anwendung der dynamischen Optimierung findet man bei dynamischen Systemen, für die eine optimale Eingangstrajektorie  $\mathbf{u}^*(t)$  gesucht wird [41]. Da es sich bei den Optimierungsvariablen um die Eingangs- bzw. Steuergrößen des Systems handelt, wird auch von einem *Optimalsteuerungsproblem* gesprochen [41]. Gleichzeitig liefert die Lösung des Problems die optimalen Zustandstrajektorien  $\mathbf{x}^*(t)$ , weshalb die Formulierung eines dynamischen OP einen geeigneten Ansatz zur Trajektorienplanung dynamischer Systeme darstellt. Die allgemeine Formulierung eines solchen Optimalsteuerungsproblems lautet [41]:

$$\min_{\mathbf{u}(t)} J(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t, t_f) = V(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} l(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \quad (4.4)$$

$$\text{u.B.v. } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (4.5)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}(t_f), t_f) = 0 \quad (4.6)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \leq 0 \quad (4.7)$$

Es gilt  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^p$  und  $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^q$ . Wie bereits bei der statischen Optimierung stellen die Gleichungen (4.6) und (4.7) GNB und UNB dar, wobei die UNB an dieser Stelle lediglich der Vollständigkeit halber in der allgemeinen Form mit angegeben sind. Für die weiteren Betrachtungen - die Anwendung der Variationsrechnung und die Ergebnisse dieser Arbeit - spielen die UNB keine Rolle, da die Berücksichtigung von UNB eine analytische Lösung des OP deutlich komplizierter macht. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass sich auch Optimalsteuerungsprobleme mit UNB mithilfe des Ansatzes der Variationsrechnung lösen lassen. Für weitere Informationen zum Umgang mit allgemeinen UNB für die Systemzustände und/oder Eingangsgrößen sei auf entsprechende Fachliteratur zum Thema Optimierung verwiesen (siehe [42], [43]). Gleichung (4.5) beschreibt die Systemdynamik mit der Eingangsgröße  $\mathbf{u}(t)$  und die Anfangszustände  $\mathbf{x}_0$  des Systems, die als Randbedingungen fungieren. Das Gütefunktional in Gleichung (4.4) wird in der dargestellten Form auch als *Bolza-Form* des Gütefunktionals bezeichnet und setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Der Integralanteil beschreibt die von der Zeit abhängigen laufenden Kosten und heißt *Lagrange-Form*. Der vor dem Integralanteil stehende Term  $V(\mathbf{x}(t_f), t_f)$  gibt die Bewertung des Endzustands (und der Endzeit), also die Endkosten, an. Dieser wird *Mayer-Form* genannt [41]. Für die Lagrange- und Bolza-Form gilt, dass sie sich immer in die Mayer-Form überführen lassen [41] (siehe auch [43]). Der Endzeitpunkt  $t_f$  kann festgelegt sein oder frei. Ist er frei, so muss  $t_f$  als zusätzliche Optimierungsvariable bei der Lösung des OP berücksichtigt werden [41].

#### 4.2.1 Variationsrechnung

Die Variationsrechnung bietet einen Ansatz, mit dem dynamische OP, wie im vorherigen Absatz vorgestellt, gelöst werden können. Dazu werden ausgehend von den optimalen Trajektorien  $\mathbf{x}^*(t)$  und  $\mathbf{u}^*(t)$  und dem optimalen Endzeitpunkt  $t_f^*$  (sofern  $t_f$  frei und damit Teil der Optimierung ist) Variationen zugelassen, sodass gilt [41]:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^*(t) + \epsilon \delta_{\mathbf{x}}(t) \quad (4.8)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \dot{\mathbf{x}}^*(t) + \epsilon \delta_{\dot{\mathbf{x}}}(t) \quad (4.9)$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}^*(t) + \epsilon \delta_{\mathbf{u}}(t) \quad (4.10)$$

$$t_f = t_f^* + \epsilon \delta_{t_f} \quad (4.11)$$

Die  $\delta$ -Variablen bezeichnen dabei die Variationen der einzelnen Größen und  $\epsilon$  ist der Parameter, mit dem die Variationen Einfluss auf die Trajektorien nehmen, wobei für  $\epsilon = 0$  offensichtlich  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^*(t)$ ,



$\dot{x}(t) = \dot{x}^*(t)$ ,  $u(t) = u^*(t)$  und  $t_f = t_f^*$  gilt. In Abbildung 4.1 ist ein solcher Verlauf einer möglichen optimalen Trajektorie  $x^*(t)$  und einer zulässigen Variation skizziert. Außerdem sind die Variation des Endzeitpunkts und des Endzustands  $x(t_f) = x^*(t_f^*) + \epsilon(\delta_x(t_f^*) + \dot{x}^*(t_f^*)\delta_{t_f})$  (falls,  $x(t_f)$  frei ist) dargestellt.

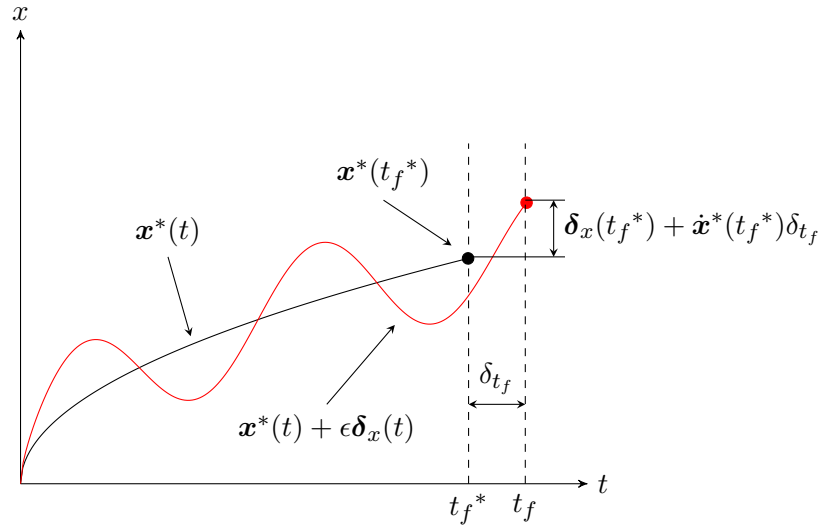


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der optimalen Trajektorie  $x^*(t)$  und eine mögliche, zulässige Variation  $x(t)$ .

Für die Anwendung der Variationsrechnung zur Optimierung dynamischer Systeme wird das folgende Gütefunktional definiert [41]:

$$J(x(t), \dot{x}(t), u(t), t, t_f) = V(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} l(x(t), u(t), t) + \lambda(t)^T (f(x(t), u(t), t) - \dot{x}(t)) dt \quad (4.12)$$

Im Vergleich zu (4.4) wurde das Gütefunktional um den Term  $\lambda(t)^T (f(x(t), u(t), t) - \dot{x}(t))$  erweitert, wobei dieser für  $\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$  zu null wird. Die Variablen  $\lambda \in \mathbb{R}^n$  stellen dabei die sogenannten *adjungierten Zustände* dar [41]. Werden die Variablen im Gütefunktional nun durch die Gleichungen (4.8)-(4.11) ersetzt, hängt das Gütefunktional nur noch von  $\epsilon$  ab. Da die Trajektorien  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  und  $u(t)$  wie bereits gezeigt nur für  $\epsilon = 0$  den optimalen Verläufen entsprechen können, lautet die notwendige Bedingung für das Verschwinden der Variation des Gütefunktionals  $\delta_J$  und damit für ein Minimum

$$\delta_J = \frac{dJ(x^*(t) + \epsilon\delta_x(t), \dot{x}^*(t) + \epsilon\delta_{\dot{x}}(t), u^*(t) + \epsilon\delta_u(t), t_f^* + \epsilon\delta_{t_f})}{d\epsilon} \Big|_{\epsilon=0} = 0. \quad (4.13)$$

Aus dieser Bedingung lassen sich die notwendigen Optimalitätsbedingungen für eine optimale Lösung herleiten. Auf die vollständige Herleitung der Gleichungen wird an dieser Stelle verzichtet und auf weiterführende Literatur verwiesen [41]–[43].

#### 4.2.1.1 Optimalitätsbedingungen

Zunächst wird die *Hamilton-Funktion* als

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) = l(x(t), u(t), t) + \lambda(t)^T f(x(t), u(t), t) \quad (4.14)$$

definiert, mit deren Hilfe die Optimalitätsbedingungen angegeben werden können. Im Folgenden wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die explizite Nennung aller Argumente verzichtet, dort wo diese nicht unbedingt notwendig sind. Damit die notwendige Bedingung für ein Minimum (4.13) erfüllt sein kann, müssen die folgenden Optimalitätsbedingungen erfüllt sein [41].

$$\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} = f(x, u, t) \quad (4.15)$$

$$\dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x} \quad (4.16)$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial u} \quad (4.17)$$

Gleichung (4.15) beschreibt die Zustandsdifferentialgleichung, während Gleichung (4.16) die DGL für die adjungierten Zustände  $\lambda$  beschreibt und daher auch *adjungierte DGL* genannt wird [44]. Die beiden Gleichungen (4.15) und (4.16) werden auch als *kanonische DGL* bezeichnet und bilden gemeinsam mit der Steuerungsgleichung (4.17) die sogenannten *Hamiltongleichungen* [44]. Die kanonischen DGL lassen sich zu einer gemeinsamen Systemdynamik

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, u, t) \\ -\frac{\partial H}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

zusammenfassen. Die Randbedingungen für das OP ergeben sich zu [41]

$$x(t_0) = x_0 \quad (4.19)$$

$$x_i(t_f) = x_{f,i}, \quad i \in \mathcal{I}_f \quad (4.20)$$

$$\lambda_i(t_f) = \frac{\partial V}{\partial x_i}|_{t=t_f}, \quad i \notin \mathcal{I}_f \quad (4.21)$$

$$H(x, u, \lambda, t)|_{t=t_f} = -\frac{\partial V}{\partial t}|_{t=t_f}, \quad \text{falls } t_f \text{ frei ist.} \quad (4.22)$$

Die Gleichungen (4.19) und (4.20) geben die Randbedingungen für die Anfangs- und Endwerte der Zustände an.  $\mathcal{I}_f$  bezeichnet dabei die Menge aller Zustände, die explizit über Endbedingungen vorgegeben sind - eine Vorgabe der Endwerte ist dabei nicht zwingend notwendig. Für solche Zustände, deren Endwert nicht vorgegeben und damit frei ist, gilt Gleichung (4.21). Gleichung (4.22) gilt nur dann, falls  $t_f$  frei und damit eine Optimierungsvariable des Problems ist und gibt so die zusätzliche notwendige Gleichung zur Bestimmung der freien Endzeit an. Die Gleichungen (4.21) und (4.22) werden als *Transversalitätsbedingungen* bezeichnet [41].

#### 4.2.1.2 Singulärer Fall

In der Regel lässt sich die Eingangsgröße aus der Steuerungsgleichung (4.17) durch die Systemzustände und die adjungierten Zustände ausdrücken, wobei dies nicht immer der Fall sein muss [41]. Für OP, die ein eingangsaffines System optimieren und in denen  $l(x, u, t)$  unabhängig von  $u$  ist, gilt

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial(l(x, t) + \lambda^T(f_0(x) + f_1(x)u))}{\partial u} = \lambda^T f_1(x) = 0. \quad (4.23)$$

Die Darstellung  $f(x, u, t) = f_0(x) + f_1(x)u$  verdeutlicht dabei die Eingangsaffinität des dynamischen Systems. Aus Gleichung (4.23) ist direkt zu erkennen, dass sich die Steuergröße  $u(t)$  in diesem Fall nicht

durch die Zustände ausdrücken lässt, weshalb auch von einem *singulären* Problem gesprochen wird [41]. Der singuläre Fall kann allerdings in der Praxis leicht umgangen werden, indem die Stellgröße mithilfe von hinreichend kleinen Gewichtungen zum Gütefunktional hinzugefügt wird, sodass der Einfluss auf das Optimierungsergebnis vernachlässigbar gering ist, aber trotzdem  $\frac{\partial l(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} \neq 0$  gilt [41].

#### 4.2.1.3 Allgemeine Endbedingungen

Damit neben der Vorgabe einzelner Endzustände auch allgemeine Endbedingungen, wie in Gleichung (4.6) dargestellt, berücksichtigt werden können, wird das Gütefunktional in Gleichung (4.12) wie folgt erweitert. Das Funktional zur Betrachtung allgemeiner Endbedingungen lautet

$$J(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, t, t_f) = \underbrace{V(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \boldsymbol{\nu}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}(t_f), t_f)}_{\bar{V}(\mathbf{x}(t_f), t_f)} + \int_{t_0}^{t_f} l(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) - \dot{\mathbf{x}}) dt. \quad (4.24)$$

Über die *Lagrange-Multiplikatoren*  $\boldsymbol{\nu} \in \mathbb{R}^p$  wird dabei die Einhaltung der allgemeinen Endbedingungen gewährleistet. Diese sind im Gegensatz zu den adjungierten Zuständen konstant und keine zeitabhängigen Variablen. Die neuen Transversalitätsbedingungen lauten nun [41]

$$\boldsymbol{\lambda}(t_f) = \frac{\partial \bar{V}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{t=t_f} = \left( \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} + \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \boldsymbol{\nu} \right) \Big|_{t=t_f} \quad (4.25)$$

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t) \Big|_{t=t_f} = - \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} \Big|_{t=t_f} = - \left( \frac{\partial V}{\partial t} + \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} \right)^T \boldsymbol{\nu} \right) \Big|_{t=t_f}, \quad \text{falls } t_f \text{ frei ist.} \quad (4.26)$$

und anstelle von Gleichung (4.20) gilt Gleichung (4.6). Somit erhält man zusammen mit den Anfangswerten in Gleichung (4.19) insgesamt  $2n + p + 1$  Randbedingungen zur Bestimmung der  $2n + p + 1$  Unbekannten  $\mathbf{x}$ ,  $\boldsymbol{\lambda}$ ,  $\boldsymbol{\nu}$  und  $t_f$ . Werden anstatt allgemeiner Endbedingungen fixierte Endzustände betrachtet, so entfallen  $p$  Gleichungen und die  $p$  Unbekannten  $\boldsymbol{\nu}$  und es gilt nur  $\mathbf{x}$ ,  $\boldsymbol{\lambda}$  und  $t_f$  zu bestimmen.

Mithilfe der Variationsrechnung lässt sich das ursprüngliche dynamische OP (4.4) - (4.7) in ein Zwei-Punkte-Randwertproblem (ZPR) überführen, dessen Problematik nun darin besteht, die Lösung der kanonischen DGL zu bestimmen und das resultierende Randwertproblem zu lösen.

#### 4.2.2 Optimalitätsprinzip nach Bellman

Mitte der 1950er Jahre formulierte Richard Bellman das sogenannte *Optimalitätsprinzip* [45], welches bis heute bei der dynamischen Optimierung von großer Bedeutung ist und wichtige Erkenntnisse für die Kombination mehrerer OP liefert. Das Optimalitätsprinzip besagt, dass wenn  $\mathbf{u}^*(t)$  mit  $t \in [t_0, t_f]$  eine optimale Trajektorie ist und das System  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$  optimal vom Anfangszustand  $\mathbf{x}(t_0)$  in den Endzustand  $\mathbf{x}^*(t_f)$  überführt, dann ist  $\mathbf{u}^*(t)$  mit  $t \in [t_1, t_f]$ ,  $t_0 \leq t_1 \leq t_f$  diejenige optimale Trajektorie, die das System aus dem Zwischenzustand  $\mathbf{x}^*(t_1)$  in den optimalen Endzustand  $\mathbf{x}^*(t_f)$  überführt. Es lässt sich also sagen, dass wenn  $\mathbf{u}^*(t)$  ein System optimal von  $\mathbf{x}(t_0)$  nach  $\mathbf{x}^*(t_1)$  bringt, dann muss auch  $\mathbf{u}^*(t)$  das System optimal von  $\mathbf{x}^*(t_1)$  nach  $\mathbf{x}^*(t_f)$  bringen und es kann keine andere optimale Trajektorie als  $\mathbf{u}^*(t)$  selbst für diesen Abschnitt geben, sofern  $\mathbf{u}^*(t)$  auf dem gesamten Intervall  $t \in [t_0, t_f]$  optimal

ist. Dadurch ist sichergestellt, dass sich die Lösung eines dynamischen OP auf dem Intervall  $t \in [t_0, t_f]$  immer durch zwei (oder mehrere) Teillösungen

$$\min_{\mathbf{u}(t)} \int_{t_0}^{t_f} (\cdot) dt = \min_{\mathbf{u}(t)} \int_{t_0}^{t_1} (\cdot) dt + \min_{\mathbf{u}(t)} \int_{t_1}^{t_f} (\cdot) dt \quad (4.27)$$

angeben lässt. Diese Erkenntnis wird an späterer Stelle in dieser Arbeit (Kapitel ??) besonders wichtig, wenn es darum geht, die Gesamtlösung eines Verkehrsszenarios anzugeben, welches sich aus mehreren Teilszenarien zusammensetzt. So lässt sich beispielsweise ein Abbiegemanöver durch die Kombination einer vorangestellten Geraden, einer Kurve und anschließend einer zweiten Geraden beschreiben - dementsprechend setzt sich nach dem Optimalitätsprinzip die Gesamtlösung aus den einzelnen Teillösungen zusammen.

### 4.3 Zeittransformation für freie Endzeitpunkte

Wie bereits gezeigt wurde, kann der Endzeitpunkt  $t_f$  frei sein und wird damit ebenfalls zu einer Optimierungsvariable. Dadurch, dass  $t_f$  nicht festgelegt ist, ist auch die obere Integrationsgrenze des Gütefunktional nicht festgelegt. Bei der analytischen Lösung des resultierenden ZPR - sofern sich diese bestimmen lässt - ist dies nicht weiter kritisch, da  $t_f$  mithilfe der Randbedingungen (4.19) - (4.22) bestimmt werden kann. Bei der Lösung mittels numerischer Lösungsverfahren hingegen kann dies problematisch sein, da viele Lösungsverfahren ein fest definiertes Zeitintervall für die Berechnung der Lösung benötigen (siehe Abschnitt 4.6), sodass eine alternative Formulierung für die freie Endzeit  $t_f$  angegeben werden muss. Dazu bietet es sich an, eine Zeittransformation  $\mathcal{T}(\tau) : [\tau_0, \tau_f] \rightarrow [t_0, t_f]$  einzuführen, die ein festes Zeitintervall  $[\tau_0, \tau_f]$  auf die freien Intervallgrenzen  $[t_0, t_f]$  abbildet [43], wobei

$$\mathcal{T}(\tau_0) = t_0 = \tau_0 = 0 \quad \text{und} \quad (4.28)$$

$$\mathcal{T}(\tau_f) = t_f \quad (4.29)$$

gelten soll. Die festen Intervallgrenzen  $[\tau_0, \tau_f]$  können beliebig gewählt werden und eine Wahl von  $[\tau_0, \tau_f] = [0, 1]$  stellt dabei keine Einschränkung der Allgemeinheit dar. Eine geeignete Transformation, die diese Kriterien erfüllt lautet

$$\mathcal{T}(\tau) = \gamma \tau = t, \quad (4.30)$$

wobei der *Zeitstreckfaktor*  $\gamma$  die anstelle von  $t_f$  verwendete neue Optimierungsvariable darstellt [41]. Für die Zeittransformation gilt

$$\mathcal{T}'(\tau) = \frac{\partial \mathcal{T}(\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = \gamma. \quad (4.31)$$

Bei der Herleitung der Optimalitätsbedingungen unter Verwendung der Zeittransformation muss in den Gleichungen (4.12) - (4.14) die Substitution (4.30) angewendet werden. Außerdem gilt  $\partial t = \gamma \partial \tau$  bzw.  $dt = \gamma d\tau$ . Dadurch ergeben sich in der transformierten  $\tau$ -Domäne leicht geänderte Gleichungen. Für die kanonischen DGL gilt

$$\mathbf{x}'(\tau) = \mathcal{T}'(\tau) \frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathcal{T}'(\tau) \mathbf{f}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \tau) \quad (4.32)$$

$$\boldsymbol{\lambda}'(\tau) = -\mathcal{T}'(\tau) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}, \quad (4.33)$$

$$(4.34)$$

sodass sich die transformierte gemeinsame Systemdynamik aus Gleichung (4.18) zu

$$\mathbf{z}'(\tau) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}'(\tau) \\ \boldsymbol{\lambda}'(\tau) \end{bmatrix} = \mathcal{T}'(\tau) \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \tau) \\ -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{bmatrix} = \gamma \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \tau) \\ -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

ergibt. Die Randbedingungen bleiben bis auf die Substitution (4.30) unverändert. Für eine ausführliche Herleitung der Optimalitätsbedingungen unter Verwendung einer Zeittransformation sei auf [43] verwiesen.

Bisher wurde die Zeittransformation für ein einzelnes Zeitintervall betrachtet. Diese lässt sich auf  $k$  miteinander verknüpfte Intervalle erweitern. In Abbildung 4.2 ist eine solche Transformation mehrerer gekoppelter Intervalle dargestellt. Für die einzelnen Teilintervalle gelten dabei die dargestellten

$$\begin{array}{ccccccc} t_0 & \gamma_1 & t_1 & \gamma_2 & t_2 \dots t_{k-1} & \gamma_k & t_k = t_f \\ \tau_0 & t = \gamma_1 \tau & \tau_1 & t = \gamma_1 \tau_1 + \gamma_2(\tau - \tau_1) & \tau_2 \dots \tau_{k-1} & t = \gamma_1 \tau_1 + \gamma_2(\tau_2 - \tau_1) + \dots + \gamma_k(\tau - \tau_{k-1}) & \tau_k = \tau_f \\ & \tau \in [0, \tau_1] & & \tau \in [\tau_1, \tau_2] & & \tau \in [\tau_{k-1}, \tau_k] & \end{array}$$

Abbildung 4.2: Mehrere miteinander gekoppelte Zeitintervalle, die sich zu einem Gesamtintervall  $[\tau_0, \tau_f]$  zusammensetzen.

Zeittransformationen, sodass für das  $j$ -te Teilintervall

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \gamma_j, \quad \text{mit } j = 1, 2, \dots, k \quad (4.36)$$

und damit

$$\mathbf{z}'_j(\tau) = \gamma_j \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), \tau) \\ -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

gilt. Auch hier lassen sich die festen Intervallgrenzen ohne Einschränkung der Allgemeinheit zu

$$\tau_0 = 0, \quad \tau_j = j, \quad \text{mit } j = 1, 2, \dots, k \quad (4.38)$$

wählen, sodass für die freien Intervallgrenzen

$$t_0 = \tau_0 = 0 \quad (4.39)$$

$$t_1 = \gamma_1 \quad (4.40)$$

$$t_2 = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (4.41)$$

$$\vdots \quad (4.42)$$

$$t_f = t_k = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_k \quad (4.43)$$

gilt. Mithilfe dieser Erweiterung lassen sich beliebig viele Intervalle fester Intervallgrenzen auf Intervalle freier Grenzen transformieren. Eine Anwendung derartig verknüpfter Zeittransformationen kann nützlich sein, wenn mehrere OP, die jeweils für ein Teilintervall gelten, betrachtet werden und die Übergangsstellen  $t_j$  frei und damit Teil der Optimierung sein sollen. Dann lassen sich die entsprechenden Teilintervalle mit festen Grenzen definieren und wie dargestellt mithilfe der Transformationsvorschriften auf die gesuchten, freien Intervallgrenzen abbilden.

## 4.4 Variationsprobleme mit internen Gleichungsnebenbedingungen

Es kann durchaus von Interesse sein, neben den Randbedingungen an den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_f$  zusätzliche interne Randbedingungen der Form

$$\tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}(t_1), t_1) = 0 \quad (4.44)$$

zu formulieren, die die optimalen Trajektorien erfüllen sollen, wenn das dynamische System beispielsweise einen bestimmten Zustand zu einem gewissen Zeitpunkt  $t_1$  erreichen soll [42]. Dazu wird auch in diesem Fall das Gütefunktional in Gleichung (4.12) analog zur Betrachtung allgemeiner Endbedingungen erweitert und lautet

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{u}, t, t_f, t_1) = & \underbrace{V(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \boldsymbol{\nu}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \tilde{V}(\mathbf{x}(t_1), t_1) + \tilde{\boldsymbol{\nu}}^T \tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}(t_1), t_1)}_{\hat{V}(\mathbf{x}(t_f), \mathbf{x}(t_1), t_f, t_1)} + \dots \\ & \dots + \int_{t_0}^{t_f} l(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) - \dot{\mathbf{x}}) dt. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Allgemein können die Systemzustände und die adjungierten Zustände an der Stelle  $t_1$  unstetig sein [43], weshalb es zweckmäßig ist, die Zeitpunkte  $t_1^-$  und  $t_1^+$  als die Zeitpunkte unmittelbar vor und nach der Sprungstelle  $t_1$  zu definieren. Der Zeitpunkt  $t_1$  kann wie bereits der Endzeitpunkt  $t_f$  entweder festgelegt oder frei sein. An der Übergangsstelle  $t_1$  ergeben sich die Transversalitätsbedingungen [43]

$$\left( \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \mathbf{x}(t_1)} + \left( \frac{\partial \tilde{\mathbf{g}}}{\partial \mathbf{x}(t_1)} \right)^T \tilde{\boldsymbol{\nu}} - \boldsymbol{\lambda}(t_1) \right)_{|t=t_1^-} = 0 \quad (4.46)$$

$$\left( \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \mathbf{x}(t_1)} + \left( \frac{\partial \tilde{\mathbf{g}}}{\partial \mathbf{x}(t_1)} \right)^T \tilde{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{\lambda}(t_1) \right)_{|t=t_1^+} = 0 \quad (4.47)$$

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)_{|t=t_1^-} - H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)_{|t=t_1^+} + \left( \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} + \left( \frac{\partial \tilde{\mathbf{g}}}{\partial t} \right)^T \tilde{\boldsymbol{\nu}} \right)_{|t=t_1} = 0, \quad \text{falls } t_1 \text{ frei ist.} \quad (4.48)$$

Zwei Spezialfälle spielen für die Anwendung der zusätzlichen Transversalitätsbedingungen eine besondere Rolle und sollen an dieser Stelle hervorgehoben werden:

1. Wie bereits erwähnt können die Systemzustände  $\mathbf{x}(t)$  an der Übergangsstelle  $t_1$  allgemein unstetig sein und einen Sprung aufweisen. Bei der Behandlung dynamischer Systeme, die ein reales System repräsentieren, ist ein derartiges sprunghaftes Verhalten oftmals unerwünscht, da es einerseits nicht realisierbar ist und andererseits unkomfortable Trajektorien bedeutet. Daher sind häufig solche Lösungen von Interesse, bei denen zumindest die Systemzustände  $\mathbf{x}(t)$  in  $t_1$  stetig sind, also

$$\mathbf{x}(t_1^-) = \mathbf{x}(t_1^+) \quad (4.49)$$

gilt. Damit lassen sich die Randbedingungen (4.46) und (4.47) zur sogenannten *ersten Weierstrass-Erdmannschen-Eckenbedingung* zusammenfassen [43]:

$$2 \left( \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \mathbf{x}(t_1)} + \left( \frac{\partial \tilde{\mathbf{g}}}{\partial \mathbf{x}(t_1)} \right)^T \tilde{\boldsymbol{\nu}} \right) - \boldsymbol{\lambda}(t_1^-) + \boldsymbol{\lambda}(t_1^+) = 0. \quad (4.50)$$

Die adjungierten Zustände  $\boldsymbol{\lambda}(t)$  können dabei in  $t_1$  weiterhin sprunghaft sein, was allerdings nicht problematisch ist, da sie keine physikalischen Größen darstellen.

2. Der zweite Sonderfall ergibt sich, wenn  $t_1$  zwar frei ist, aber die Nebenbedingung (4.44) und die zusätzlichen Kosten  $\tilde{V}(\mathbf{x}(t_1), t_1)$  nicht explizit von  $t_1$  abhängen, also  $\tilde{\mathbf{g}}(\mathbf{x}(t_1)) = 0$  und  $\tilde{V}(\mathbf{x}(t_1))$  gilt. Gleichung (4.48) wird dann zur *zweiten Weierstrass-Erdmannschen-Eckenbedingung*, aus der die Stetigkeit der Hamilton-Funktion in  $t_1$  folgt [43]:

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)|_{t=t_1^-} = H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)|_{t=t_1^+}. \quad (4.51)$$

## 4.5 Diskontinuierliche Systemdynamik

Die Verwendung von diskontinuierlicher Systemdynamik liefert eine überaus nützliche Methode zur Betrachtung unterschiedlicher Zustandsgleichungen in einem OP. Mithilfe dieser Methode können verschiedene, in unterschiedlichen Bereichen geltende Systembeschreibungen in einem OP verwendet werden, sodass sich einzelne Szenarien miteinander zu einem Gesamtszenario kombinieren lassen. Diese Methode findet bspw. in dem in Abschnitt 4.2.2 skizzierten Abbiegeszenario Verwendung. Die drei Teilszenarien Gerade, Kurve und Gerade lassen sich mithilfe von Übergangsbedingungen verknüpfen und in den einzelnen Teilbereichen gilt jeweils die für das entsprechende Teilszenario formulierte Systemdynamik. Die Systemdynamik des Gesamtszenarios lässt sich aus  $k$  Teilszenarien wie folgt zusammensetzen [42]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \begin{cases} \mathbf{f}_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), & \text{falls} & \tilde{\mathbf{g}}_i(\mathbf{x}, t) \leq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, k-1 \\ \mathbf{f}_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), & \text{falls} & \tilde{\mathbf{g}}_{\hat{i}}(\mathbf{x}, t) > 0 \quad \forall \hat{i} = 1 \quad \text{und} \\ & & \tilde{\mathbf{g}}_i(\mathbf{x}, t) \leq 0 \quad \forall i = 2, \dots, k-1 \\ \vdots & & \\ \mathbf{f}_j(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), & \text{falls} & \tilde{\mathbf{g}}_{\hat{i}}(\mathbf{x}, t) > 0 \quad \forall \hat{i} = 1, 2, \dots, j-1 \quad \text{und} \\ & & \tilde{\mathbf{g}}_i(\mathbf{x}, t) \leq 0 \quad \forall i = j, \dots, k-1 \\ \vdots & & \\ \mathbf{f}_k(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), & \text{falls} & \tilde{\mathbf{g}}_{\hat{i}}(\mathbf{x}, t) > 0 \quad \forall \hat{i} = 1, 2, \dots, k-1 \end{cases} \quad (4.52)$$

Die Gleichungen  $\tilde{\mathbf{g}}_i(\mathbf{x}(t_i), t_i) = 0$  nehmen dabei die Funktion der  $k-1$  Übergangsbedingungen zu den Zeitpunkten  $t_i$  ein, zu denen von der einen Systemdynamik zur nächsten gewechselt wird, und werden analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.4 wie interne GNB behandelt. Für jeden der Übergangspunkte gelten die Transversalitätsbedingungen (4.46) - (4.48) bzw. (4.49) - (4.51), wobei insbesondere bei der zweiten Weierstrass-Erdmannschen-Eckenbedingung darauf geachtet werden muss, dass sich auch die Hamilton-Funktion aufgrund der wechselnden Systemdynamik gemäß

$$H_j(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t) = l(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{f}_j(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (4.53)$$

verändert. Damit lautet die zweite Weierstrass-Erdmannsche-Eckenbedingung in Gleichung (4.51) an der Übergangsstelle  $t_i$

$$H_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)|_{t=t_i^-} = H_{i+1}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\lambda}, t)|_{t=t_i^+}. \quad (4.54)$$

Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden liefern notwendigen Methoden, um dynamische OP mithilfe der Variationsrechnung zu lösen und die Problemstellung so zu formulieren, dass komplexe Fahrpläne durch geschickte Kombination mehrerer Teilszenarien vereinfacht und analytisch gelöst

---

werden können. Das Optimalitätsprinzip nach Bellmann (siehe Abschnitt 4.2.2) liefert die Grundlage dafür, dass sich mehrere Teilprobleme zur optimalen Lösung eines Gesamtproblems zusammensetzen lassen. Mithilfe von Zeittransformationen und unter Verwendung diskontinuierlicher Systemdynamik (Abschnitte 4.3 und 4.5) lassen sich auf frei wählbaren Zeitintervallen beliebig viele Teilsysteme unterschiedlicher Systemdynamik miteinander kombinieren, wobei sich mithilfe der Nebenbedingungen an den internen Übergangspunkten (siehe Abschnitt 4.4) Stetigkeit der Systemzustände erzielen lässt, während weiterhin die Optimalität der Lösung gewährleistet ist.

---

## 4.6 Numerische Lösungsverfahren

---

Dieser Abschnitt dient der Übersicht über unterschiedliche numerische Lösungsverfahren für dynamische OP. Dazu sollen einige Verfahren erläutert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile miteinander verglichen werden. Zunächst wird der Unterschied zwischen *indirekten* und *direkten* Lösungsverfahren erklärt und anschließend jeweils verschiedene Verfahren der beiden Verfahrensklassen vorgestellt.

### 4.6.1 Indirekte Lösungsverfahren

Bei den indirekten Lösungsverfahren wird mithilfe der Optimalitätsbedingungen (4.15)-(4.17) und der Randbedingungen (4.19)-(4.22) das entstehende Randwertproblem gelöst [42] - die indirekten Lösungsverfahren basieren also auf der Anwendung der Variationsrechnung. Die Lösung kann dabei entweder analytisch oder mithilfe numerischer Verfahren ermittelt werden [43]. Im Gegensatz zu den direkten Lösungsverfahren wird das dynamische OP bzw. Optimalsteuerungsproblem bei indirekten Verfahren nicht zunächst diskretisiert, sondern es werden direkt die Optimalitätsbedingungen für das entsprechende OP hergeleitet, weshalb bei den direkten Verfahren auch von einer “*first optimize, then discretize*”-Strategie gesprochen wird [42] - dies trifft insbesondere auf indirekte Diskretisierungsverfahren zu (siehe Abschnitt 4.6.1.1). Dadurch, dass das dynamische OP bei indirekten Verfahren nicht zuerst in ein statisches Ersatzproblem umgewandelt, sondern stattdessen mithilfe der Variationsrechnung ein Randwertproblem gelöst wird, besitzen sie den großen Vorteil, dass sie zum einen Informationen über die Struktur der optimalen Lösung liefern und sich zum anderen eine sehr hohe Lösungsgenauigkeit erzielen lässt [41]. Selbst wenn das Randwertproblem nicht analytisch gelöst werden kann, so lassen sich trotzdem aus der Lösung der kanonischen DGL Erkenntnisse gewinnen, die vor allem für die Interpretation der optimalen Trajektorien sehr wertvoll sein können. Ein weiterer Vorteil indirekter Lösungsverfahren ist, dass die adjungierten Zustände zur Sensitivitätsanalyse des Gütefunktionalen gegenüber Änderungen der Anfangszustände  $x_0$  verwendet werden können [41]. Indirekte Lösungsverfahren haben den Nachteil, dass die Lösbarkeit eines dynamischen OP mittels eines indirekten Verfahrens von der Struktur des OP selbst abhängt. Das bedeutet, dass die Herleitung der kanonischen DGL und die Frage, ob überhaupt eine Lösung angegeben werden kann, sowie die Lösbarkeit des resultierenden Randwertproblems von der Problemstellung selbst abhängen. Die Optimalitätsbedingungen und die Randbedingungen aufzustellen kann für komplizierte Systeme sehr aufwendig sein [42]. Außerdem benötigen indirekte Lösungsverfahren häufig Startschätzungen für die adjungierten Zustände. Die Schätzung dieser Initialwerte beeinflusst die Qualität der Lösung bzw. ob das Verfahren überhaupt konvergiert, sodass der Konvergenzbereich indirekter Verfahren oftmals nicht sehr groß ist [42]. Nachfolgend werden einige indirekte Lösungsverfahren vorgestellt und hinsichtlich des AD-Planungsproblems diskutiert.



#### 4.6.1.1 Indirekte Diskretisierungsverfahren

Der “*first optimize, then discretize*”-Ansatz für indirekte Lösungsverfahren trifft vor allem auf indirekte Diskretisierungsverfahren zu. Wie bei allen indirekten Lösungsverfahren werden entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 4.2 die DGL (4.18) über den Ansatz der Variationsrechnung hergeleitet. Gemeinsam mit den Randbedingungen (4.19)-(4.22) ergibt sich ein ZPR, welches auf dem Gesamtintervall  $[t_0, t_f]$  an  $N + 1$  Stützstellen diskretisiert wird [41] - das Problem wird also zuerst optimiert und anschließend diskretisiert. Dieses Randwertproblem wird unter Berücksichtigung der Randbedingungen mithilfe eines numerischen Integrationsverfahrens gelöst, wie zum Beispiel dem Verfahren von Heun, bei dem ein Trapez zur Approximation des Integrals verwendet wird [41] (siehe auch [46] für Informationen zu weiteren Verfahren). Da die zu lösenden DGL bei der numerischen Integration durch Differenzenquotienten ersetzt werden, werden Diskretisierungsverfahren auch als Differenzenverfahren bezeichnet [47].

Vorteile:

- Numerische Robustheit aufgrund simultaner Berücksichtigung der kanonischen DGL und Randbedingungen [41].
- Erhöhung der Genauigkeit durch Steigerung der Anzahl der Diskretisierungsstellen [41].
- Durch Anwendung von Runge-Kutter-Verfahren (RKV) mit höherer Verfahrensordnung lässt sich die Genauigkeit der Integralapproximation verbessern [47].

Nachteile:

- Steuergröße  $u$  muss explizit nach  $x$  und  $\lambda$  auflösbar sein [41].
- Gute Initialschätzung für  $\lambda(t_0)$  notwendig [41].
- Größere Anzahl an Diskretisierungsstellen steigert den Rechenaufwand [41].

#### 4.6.1.2 Indirekte Schießverfahren

Im Gegensatz zu den indirekten Diskretisierungsverfahren wird beim Einfachschießverfahren die Lösung ausgehend von einem Anfangswertproblem berechnet [42], anstatt ausgehend vom ZPR. Dazu wird aus den Anfangswerten  $x_0$  und einer Initialschätzung  $\lambda_0^{(0)}$  für die adjungierten Zustände der Startvektor  $z_0 = \begin{bmatrix} x_0^T & \lambda_0^{(0)T} \end{bmatrix}^T$  gebildet. Von diesem Startvektor ausgehend werden die DGL anschließend bis  $t_f$  numerisch vorwärts integriert. Nach Abschluss der Integration erhält man ein Ergebnis für  $\lambda(t_f)^{(0)}$ , welches mit den Randbedingungen (4.21) verglichen wird. Die Abweichungen in den Randbedingungen lassen sich durch den Fehlervektor  $e^{(l)} = \lambda(t_f) - \lambda(t_f)^{(l)}$  ausdrücken, der durch Verbesserung der Startschätzung  $\lambda_0^{(l)}$  so lange verringert wird, bis eine gewünschte Fehlertoleranz nicht mehr überschritten wird und damit das Ergebnis einer vorgegebenen Güte entspricht [42]. Der hochgestellte Index  $(l)$  gibt dabei die  $l$ -te Iteration der Integration an. Der Startwert  $\lambda_0^{(l+1)}$  der nächsten Iteration kann zum Beispiel durch Anwendung des Newton-Verfahrens aktualisiert werden [42]. Auch freie Endzeiten  $t_f$  können bei den Schießverfahren berücksichtigt werden. Dazu wird analog zu den adjungierten Anfangszuständen eine Initialschätzung  $t_f^0$  vorgegeben und der Fehlervektor um die Transversalitätsbedingung für freie Endzeit (4.22) erweitert [42].

#### Vorteile:

- “Einfache” Methode mit geringem Implementierungsaufwand [48].
- Mehrfachschießverfahren bieten die Möglichkeit der Parallelisierung [49].

#### Nachteile:

- Die Steuergröße  $u$  muss explizit nach  $x$  und  $\lambda$  auflösbar sein [42].
- Instabile Anfangswertprobleme führen dazu, dass das Einfachschießverfahren instabil wird [48], wobei gezeigt werden kann, dass die kanonischen DGL im linearen Fall immer an der imaginär Achse gespiegelte Eigenwerte und damit instabile Eigenmoden besitzen, selbst wenn das lineare System stabil ist [41].
- Empfindlichkeit gegenüber schlechten Startschätzungen für  $\lambda_0^{(0)}$ , sodass unter Umständen keine Lösung auf dem gesamten Integrationsintervall  $[t_0, t_f]$  gefunden werden kann [48].
- Eingeschränkte Anwendbarkeit aufgrund der numerischen Berechnungsschwierigkeiten - vor allem für kleine Probleme geeignet [42].

Dem Problem der numerischen Stabilität und dem Umstand, dass das Anfangswertproblem ggf. nicht bis zur rechten Intervallgrenze integriert werden kann, kann mit dem Mehrfachschießverfahren begegnet werden. Ähnlich zu den Diskretisierungsverfahren wird das Integrationsintervall beim Mehrfachschießverfahren ebenfalls in  $N$  Subintervalle aufgeteilt. Auf jedem der Subintervalle wird das Anfangswertproblem (4.18) mit  $z(t_j) = \begin{bmatrix} x_j^T & \lambda_j^T \end{bmatrix}^T$  und  $t \in [t_j, t_{j+1})$ ,  $j = 0, 1, \dots, N-1$  mittels Einfachschießverfahren gelöst [43]. Damit die Lösung der einzelnen Anfangswertprobleme auf den Subintervallen tatsächlich eine Lösung des ursprünglichen ZPR ist, müssen neben den Randbedingungen, die sich über die Formulierung der Optimalitätsbedingungen ergeben, zusätzlich noch die Stetigkeitsbedingungen

$$\begin{bmatrix} z_0(t_1, \begin{bmatrix} x_0^T & \lambda_0^T \end{bmatrix}^T) - \begin{bmatrix} x_1^T & \lambda_1^T \end{bmatrix}^T \\ z_1(t_2, \begin{bmatrix} x_1^T & \lambda_1^T \end{bmatrix}^T) - \begin{bmatrix} x_2^T & \lambda_2^T \end{bmatrix}^T \\ \vdots \\ z_{N-2}(t_{N-1}, \begin{bmatrix} x_{N-2}^T & \lambda_{N-2}^T \end{bmatrix}^T) - \begin{bmatrix} x_{N-1}^T & \lambda_{N-1}^T \end{bmatrix}^T \end{bmatrix} = 0 \quad (4.55)$$

zwischen den einzelnen Subintervallen erfüllt sein [43]. Das Ergebnis des Anfangswertproblems am Intervallende des  $j$ -ten Subintervalls muss also dem Anfangswert der Lösung auf dem  $j+1$ -ten Intervall entsprechen. Mit dieser Erweiterung auf das Mehrfachschießverfahren lässt sich die Robustheit der numerischen Integration auf Kosten des Rechenaufwands steigern, da der Rechenaufwand durch die Intervallunterteilung ansteigt [49].

#### 4.6.1.3 Indirekte Gradientenverfahren

Indirekte Gradientenverfahren nutzen die Eigenschaft der Randbedingungen (4.19)-(4.21) aus, dass diese an den Randpunkten  $t_0$  und  $t_f$  voneinander entkoppelt sind, wenn die Endzustände  $x(t_f)$  frei

sind und die Endzeit  $t_f$  fest ist [41]. In diesem Fall lauten die Randbedingungen  $x(t_0) = x_0$  und  $\lambda(t_f) = \frac{\partial V(x(t_f), t_f)}{\partial x}$ . Dadurch ergeben sich  $n$  Anfangsbedingungen für die Systemzustände und  $n$  Endbedingungen für die adjungierten Zustände. Wird nun eine Steuertrajektorie  $u$  durch Initialisierung als gegeben angenommen, dann lassen sich die Systemgleichungen (4.15) ausgehend von  $x_0$  durch Vorwärtsintegration von  $t_0$  bis  $t_f$  lösen. Analog dazu lassen sich die DGL der adjungierten Zustände (4.16) ausgehend von  $\lambda(t_f)$  durch Rückwärtsintegration von  $t_f$  bis  $t_0$  bestimmen. Dadurch hängt der Wert des Gütefunktional nur noch von  $u$  ab [42]. Aus dieser Eigenschaft lässt sich der Gradient des Gütefunktional bezüglich der Steuertrajektorie als

$$\frac{\partial J}{\partial u} = \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial l(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, t) dt}{\partial u} = \int_{t_0}^{t_f} \frac{\partial H(x, u, \lambda, t) dt}{\partial u} \quad (4.56)$$

bestimmen, der angibt, wie sich der Wert des Gütefunktional bei Änderungen der Steuertrajektorie verhält [42]. Da die Eingangstrajektorie  $u$  während des Gradientenverfahrens iterativ verbessert wird und dadurch der optimalen Lösung  $u^*$  mit jeder Iteration näher kommt, wird die Steuerungsgleichung (4.17) im Allgemeinen nicht erfüllt sein, sodass dieser Gradient ungleich null wird [41]. Gilt für den Gradienten  $\frac{\partial J}{\partial u} = 0$ , so ist offensichtlich auch die Optimalitätsbedingung (4.17) erfüllt und  $u$  entspricht der optimalen Lösung  $u^*$ . Dieser Gradient kann genutzt werden, um mithilfe einer Schrittweite  $\alpha^{(l)}$  die Steuertrajektorie entsprechend der Richtung des Gradienten anzupassen, sodass

$$u(t)^{(l+1)} = u(t)^{(l)} - \alpha^{(l)} \left( \frac{\partial J}{\partial u} \right)^{(l)} \quad (4.57)$$

gilt [41]. Die Schrittweite  $\alpha^{(l)}$  kann entweder fest sein oder über ein Liniensuchverfahren bestimmt werden [42]. Der hochgestellte Index  $l$  gibt auch hier die Iteration des Algorithmus an. Mithilfe der aktualisierten Steuertrajektorie  $u^{(l+1)}$  kann wieder von vorne verfahren werden und es können erneut die Lösungen für  $x$  und  $\lambda$  durch Vorwärts- bzw. Rückwärtsintegration mit der neuen Steuertrajektorie berechnet werden [42]. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis der Gradient klein genug ist und ein entsprechendes Abbruchkriterium erfüllt ist. Dann ist  $u$  nah genug an der optimalen Lösung [42].

Vorteile:

- Dadurch, dass der Gradient  $\frac{\partial H}{\partial u}$  explizit für das Auffinden der optimalen Steuertrajektorie verwendet wird, bieten sich Gradientenverfahren für Systeme an, bei denen sich  $u$  nicht explizit durch  $x$  und  $\lambda$  ausdrücken lässt [41].
- Effiziente Lösung für Problemstellungen mit fester Endzeit und entkoppelten Randbedingungen [42].
- Stellgrößenbeschränkungen können bei der Suche nach der zulässigen Richtung im Algorithmus berücksichtigt werden [42].
- Numerisch robuste Lösung, da die adjungierten DGL anstelle der numerisch instabilen Vorwärtsrichtung in Rückwärtsrichtung integriert werden [41].

Nachteile:

- Berücksichtigung zusätzlicher Beschränkungen bereitet konzeptuelle Schwierigkeiten [42].
- Erweiterung auf allgemeine Randbedingungen und freie Endzeit zwar möglich, allerdings auf Kosten schlechterer Konvergenzeigenschaften und Robustheit [41].
- Oftmals langsames Konvergenzverhalten in der Nähe des Optimums [41].

#### 4.6.1.4 Indirekte Kollokationsverfahren

Zuletzt werden hier die indirekten Kollokationsverfahren erklärt. Wie bereits bei den indirekten Diskretisierungsverfahren wird auch bei den Kollokationsverfahren das Gesamtintervall  $[t_0, t_f]$  zunächst in  $N$  äquidistante Subintervalle unterteilt. Der Ansatz der Kollokationsverfahren besteht nun darin, dass die Lösung auf jedem der  $N$  Subintervalle  $[t_i, t_{i+1}]$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$  durch stückweise definierte Polynome  $S(t)$  approximiert wird [43] - dies gilt sowohl für die Systemzustände als auch für die adjungierten Zustände. Dazu werden zusätzlich zu den Randpunkten der Subintervalle sogenannte Kollokationsstellen  $t_{ij} \in [t_i, t_{i+1}]$ ,  $j = 1, \dots, k$  definiert, an denen durch die Kollokationsbedingungen

$$\dot{S}(t_{ij}) = f(t_{ij}, S(t_{ij})) \quad (4.58)$$

ein Übereinstimmen der Approximation und der kanonischen DGL erzwungen wird [43]. Damit an den Intervallübergängen Stetigkeit gewährleistet ist, müssen die Approximationspolynome die Stetigkeitsbedingungen (4.59) zwischen zwei Subintervallen erfüllen. Dazu werden die zwei benachbarten Intervalle  $[t_i, t_{i+1}]$  und  $[t_{i+1}, t_{i+2}]$  betrachtet mit den dazugehörigen Polynomen  $S_r(t)$  und  $S_{r+1}(t)$ ,  $r = 1, 2, \dots, N$ . Diese müssen die Bedingung

$$S_r(t_{i+1}) = S_{r+1}(t_{i+1}) \quad (4.59)$$

erfüllen. Zusätzlich müssen auch die Randbedingungen (4.19)-(4.21) durch die Polynome erfüllt sein [43]. Es existieren verschiedene Möglichkeiten zur Wahl der Kollokationspunkte innerhalb eines Subintervalls (Lobatto-, Radau-, Gauss-Kollokation [50]), wobei die Lobatto-Kollokation die effizienteste Wahl darstellt [50]. Dafür werden insgesamt drei Kollokationspunkte gewählt: der Intervallanfang, die Intervallmitte und das Intervallende, womit

$$t_{ij} = t_{i+\frac{j-1}{2}}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad j = 1, \dots, 3 \quad (4.60)$$

gilt [42]. Unter der Annahme, dass die Endzeit  $t_f$  fest sei, ergibt sich ein  $N \cdot (k+1) \cdot 2n$ -dimensionales nichtlineares Gleichungssystem, welches aus den  $N \cdot k \cdot 2n$  Kollokationsbedingungen (4.58), den  $(N-1) \cdot 2n$  Stetigkeitsbedingungen (4.59) der Approximationspolynome an den Intervallgrenzen  $t_i$  und den  $2n$  Randbedingungen (4.19)-(4.21) besteht [43]. Mithilfe dieses Gleichungssystems lassen sich die unbekannten Polynomkoeffizienten bestimmen [43]. Für  $N$  Intervalle mit je  $2n$  Gleichungen dürfen pro Polynom maximal  $k+1$  Koeffizienten auftreten damit das Gleichungssystem eindeutig lösbar ist. Unter Berücksichtigung der allgemeinen Struktur eines Polynoms von Grad  $\rho$

$$P(x) = a_{\rho+1}x^\rho + a_\rho x^{\rho-1} + \dots + a_1 x + a_0, \quad (4.61)$$

lässt sich feststellen, dass dabei  $\rho+1$  Koeffizienten auftreten. In [47] konnte gezeigt werden, dass sich Kollokationsverfahren mit stückweise definierten Polynomen zur Lösung von ZPR durch ein äquivalentes implizites RKV ausdrücken lassen. Dabei gilt, dass bei Verwendung von  $k$  Kollokationsstellen Polynome von (höchstens) Grad  $k$  auftreten und sich ein äquivalentes  $k$ -stufiges RKV ergibt [47]. Die Berücksichtigung freier Endzeiten bei Kollokationsverfahren lässt sich wie in 4.3 beschrieben umsetzen.

#### Vorteile:

- Effektiv anwendbar zur Lösung von Mehr-Punkte-Randwertproblem (MPR), die speziell bei der Optimierung von Trajektorien auftauchen [49].
- Vergleichsweise geringer Rechenaufwand, insbesondere wenn die Randbedingungen entkoppelt sind [51].
- Es lassen sich Ergebnisse mit hoher Genauigkeit erzielen bei überschaubarem Rechenaufwand [51].

#### Nachteile:

- Übereinstimmung der DGL mit der Approximation nur an den Kollokationsstellen [49].
- Wie bei allen indirekten Lösungsverfahren müssen die Optimalitätsbedingungen (4.15)-(4.17) und die dazugehörigen Randbedingungen (4.19)-(4.22) hergeleitet werden [49].

### 4.6.2 Direkte Lösungsverfahren

Unabhängig davon, wie genau ein allgemeines dynamisches OP ((4.4)- (4.7)) durch ein bestimmtes direktes Lösungsverfahren gelöst wird, haben alle direkten Verfahren eines gemeinsam: Das dynamische OP wird mittels Diskretisierung in ein statisches Ersatzproblem überführt, wobei die Steuertrajektorie  $u(t)$  an  $N$  Stützstellen diskretisiert wird [41]. Dadurch wird aus dem dynamischen OP ein endlich dimensionales statisches OP, welches in der allgemeinen Form (4.1)-(4.3) geschrieben werden kann und bezüglich der Optimierungsvariablen  $u_i$  mit  $i = 0, 1, \dots, N - 1$  optimiert wird. Ein wesentlicher Unterschied zwischen direkten und indirekten Verfahren liegt darin, dass die Optimalitätsbedingungen aus der Variationsrechnung bei direkten Verfahren nicht explizit berücksichtigt werden müssen [52]. Diese Eigenschaft macht direkte Lösungsverfahren besonders attraktiv für komplizierte Anwendungen [49]. Aufgrund dieser Vorgehensweise werden direkte Verfahren auch als *“first discretize, then optimize”*-Strategie bezeichnet [42]. Ungeachtet der Komplexität der Lösung lässt sich das dynamische OP mithilfe der Diskretisierung immer auf ein statisches Ersatzproblem zurückführen, wodurch sich direkte Methoden robust anwenden lassen und sich vielseitige Anwendungsbereiche ergeben [49]. Weitere Vorteile direkter Lösungsverfahren liegen zum einen darin, dass sich aufgrund der Diskretisierung der Trajektorien Zustandsbeschränkungen sowohl in Form von GNB als auch UNB leicht berücksichtigen lassen [41]. Zum anderen hängt die Qualität der Lösung nicht von Startschätzungen für die adjungierten Zustände ab, die bei indirekten Verfahren angegeben werden müssen, weshalb sich oftmals größere Konvergenzbereiche für direkte Verfahren ergeben [41]. Ein Nachteil von direkten Lösungsverfahren liegt darin, dass die Optimierungsvariablen das optimale Systemverhalten nur an den diskretisierten Stützstellen wiedergeben, weshalb direkte Verfahren ggf. nicht die gewünschte Lösungsgenauigkeit erreichen [42]. Außerdem liefert die Lösung keine Erkenntnisse über die analytische Struktur der optimalen Verläufe. Mithilfe einer höherfrequenten Diskretisierung in engeren Schritten lässt sich die Übereinstimmung der direkten Lösung mit dem analytischen Verlauf der optimalen Lösung und damit die Qualität der direkten Lösung verbessern, allerdings bedeutet dies eine Zunahme der Dimension des Problems. Gerade Systeme hoher Ordnung können auf diese Weise schnell in eine Größenordnung anwachsen, sodass sie sich nicht mehr oder nur sehr langsam lösen lassen, abhängig davon, wie viel Rechenleistung und Speicherkapazität zur Verfügung stehen [42]. Dies war lange Zeit ein maßgeblich beschränkender Faktor in der Anwendung direkter Lösungsverfahren, der mittlerweile aufgrund des heutigen Fortschritts bei der Entwicklung leistungsfähiger Rechner immer mehr in den Hintergrund gerückt ist [42].

---

Für die Klasse der direkten Lösungsverfahren lässt sich zu jedem der in dieser Arbeit vorgestellten indirekten Lösungsverfahren ein direktes Verfahren angeben, welches sehr eng mit der indirekten Lösungsvariante verwandt ist (direkte Voll-/Teildiskretisierungsverfahren, direkte Einfach-/Mehrfachschießverfahren, direkte Kollokationsverfahren, direkte Gradientenverfahren). Das Ziel dieser Arbeit besteht jedoch darin, den großen Vorteil indirekter Lösungsverfahren auszunutzen und durch den Lösungsweg über die Variationsrechnung Informationen über die Struktur der optimalen Trajektorien zu erhalten. Aus diesem Grund werden die direkten Lösungsverfahren nicht weiter vertieft und es sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen [41]–[43], [47]–[49], [53].

#### 4.6.3 Diskussion der Lösungsverfahren

Nachdem nun einige Lösungsverfahren vorgestellt und der Unterschied zwischen indirekten und direkten Verfahren zur numerischen Lösung von Randwertproblemen dargelegt wurde, sollen die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte diskutiert und in den Kontext des AD-Planungsproblems eingeordnet werden - die direkten Lösungsverfahren werden dabei aus den o.g. Gründen nicht weiter berücksichtigt.

Jedes der beschriebenen indirekten Lösungsverfahren hat seine Vor- und Nachteile und ist daher für gewisse Systemklassen mehr oder weniger geeignet. Wie in Kapitel 3 beschrieben ergeben sich für das AD-Planungsproblem je nach Fahrscenario und Detaillierungsgrad Systeme unterschiedlicher Ordnung. Wird die Stellgröße des Systems quadratisch bestraft, sodass das Gütefunktional immer einen energieoptimalen Anteil enthält [41], lässt sich die Stellgröße immer in Abhängigkeit von  $x$  und  $\lambda$  ausdrücken, sodass dieser Nachteil bei allen indirekten Verfahren zu vernachlässigen ist. Der in Abschnitt 4.2.1.2 beschriebene singuläre Fall tritt bei dieser Art von Gütefunktionalen nicht auf. In allen betrachteten Szenarien besitzt das Gesamtsystem bestehend aus den Systemzuständen und den adjungierten Zuständen immer an der Imaginärachse gespiegelte Eigenwerte und ist damit instabil, weshalb eine Vorwärtsintegration der adjungierten Zustände problematisch ist - insbesondere deshalb, weil eine gute Startschätzung der adjungierten Zustände ohne vorherige Kenntnis der Lösungstrajektorien nicht möglich ist. Aus diesem Grund ist das wohl einfachste Verfahren - das indirekte Einfachschießverfahren - nicht für die Lösung komplizierterer Systeme geeignet. Zwar lässt sich die numerische Stabilität mithilfe des Mehrfachschießverfahrens verbessern, allerdings steigt dadurch der Rechenaufwand, weshalb auch dieses Verfahren als ungeeignet bewertet wird.

Das indirekte Diskretisierungsverfahren ist gegenüber den Schießverfahren numerisch deutlich robuster, da anstelle eines Anfangswertproblems ein Randwertproblem gelöst wird und dadurch die kompletten Randbedingungen immer berücksichtigt werden. Allerdings muss die Diskretisierungsschrittweite für eine genaue Lösung möglichst klein gewählt werden, wodurch der Rechenaufwand stark ansteigt. Dies zeigt sich vor allem dann, wenn die optimalen Trajektorien für ein großes Zeitintervall bestimmt werden sollen. Werden beispielsweise die kanonischen DGL für ein dreistufiges Integratorsystem hergeleitet, ergibt sich ein Gesamtsystem 6. Ordnung. Soll für dieses System das Randwertproblem mithilfe des indirekten Diskretisierungsverfahrens mit einer Schrittweite von  $T_s = 0.1s$  gelöst werden, steigt die Anzahl der Optimierungsvariablen um 60 zusätzliche Variablen pro Sekunde des Optimierungsintervalls. Zusätzlich hat auch in diesem Fall die Startlösung der adjungierten Zustände Einfluss darauf, ob und wie schnell eine Lösung der optimalen Trajektorien gefunden werden kann - je weiter der Startwert von der optimalen Lösung entfernt liegt, desto länger dauert die Optimierung. Aus diesen Gründen wird auch das Diskretisierungsverfahren nicht als bevorzugtes Lösungsverfahren herangezogen.

Das Gradientenverfahren stellt eine effiziente Lösungsmethode dar, die zudem aufgrund der sequenziellen Vorwärts- und Rückwärtsintegration nicht mit den instabilen Eigenmoden zu kämpfen hat und



daher numerisch robust ist. Allerdings hat das Gradientenverfahren in der zuvor vorgestellten Variante einen entscheidenden Nachteil für die Anwendung auf das AD-Planungsproblem: Die robuste und effiziente Umsetzung ist nur für entkoppelte Randbedingungen möglich. Diese Eigenschaft hätte zur Folge, dass alle Endzustände  $x(t_f)$  frei bleiben müssten, damit die adjungierten Endzustände  $\lambda(t_f)$  durch die Transversalitätsbedingung (4.21) festgelegt wären. In vielen Szenarien im Kontext des AD ist dies allerdings nicht möglich, da beispielsweise Endzustände wie die zurückzulegende Strecke oder die Endgeschwindigkeit als Randbedingung vorgegeben werden müssen. Für solche Szenarien stellt das Gradientenverfahren keine geeignete Lösungsmethode dar.

Letztlich bleibt noch das indirekte Kollokationsverfahren, das effiziente und genaue Lösungen für das AD-Planungsproblem liefert. Das Kollokationsverfahren hat den Vorteil, dass es aufgrund der stückweisen Approximation der Lösungstrajektorien nicht den negativen Einflüssen der instabilen Eigenmoden unterliegt. Außerdem kann das Verfahren unter Berücksichtigung allgemeiner Randbedingungen und freier Endzeiten für eine große Klasse von Systemen angewendet werden, weshalb es sich für verschiedene Problemstellungen des AD und Fahrszenarien als besonders geeignet herausstellt. Eine besonders recheneffiziente MATLAB-Implementierung mit integrierter Wahl der Gitter- bzw. Kollokationspunkte, die neben den DGL zusätzlich die Berücksichtigung von unbekannten Parametern (freie Endzeit) zulässt und die Erweiterung auf MPR (interne GNB) ermöglicht, ist mit der Funktion `bvp4c` gegeben, die nachfolgend kurz erläutert werden soll.

#### 4.6.3.1 bvp4c-Solver

Die Eigenschaft, dass sich Kollokationsverfahren mit stückweise definierten Polynomen durch RKV ausdrücken lassen, machen sich Kierzenka und Shampine bei der Entwicklung des `bvp4c`-Solvers zu Nutze [54]. Auf den  $N$  Subintervallen wird die Lösung des ZPR unter Verwendung der Lobatto-Kollokation (siehe 4.6.1.4) durch kubische Polynome approximiert, die neben den Randbedingungen (4.19)-(4.22) noch die Kollokationsbedingungen (4.58) an den Kollokationsstellen und die Stetigkeitsbedingungen (4.59) an den Intervallgrenzen erfüllen [54]. Mit (4.58) und (4.59) erhält man so auf dem Gesamtintervall glatte Funktionen, die die Eigenschaft  $S(t) \in \mathcal{C}^1[t_0, t_f]$  besitzen [54]. Die Verwendung der Lobatto-Kollokation mit  $k = 3$  führt dabei auf ein 3-stufiges RKV, welches mit der Schrittweite  $h = t_{i+1} - t_i$  und

$$k_1 = f(t_i, x_i) \tag{4.62}$$

$$k_2 = f\left(t_{i+\frac{1}{2}}, x_i + \frac{h}{24}(5k_1 + 8k_2 - k_3)\right) \tag{4.63}$$

$$k_3 = f\left(t_{i+1}, x_i + \frac{h}{6}(k_1 + 4k_2 + k_3)\right) = f(t_{i+1}, x_{i+1}) \tag{4.64}$$

auf das als *Simpsonregel* bekannte implizite RKV

$$x_{i+1} - x_i = \frac{h}{6}(k_1 + 4k_2 + k_3) \tag{4.65}$$

führt [51], dessen Fehlerordnung mit  $\mathcal{O}(h^4)$  angegeben werden kann [54]. Mithilfe dieser Formulierung lässt sich eine hohe Lösungsgenauigkeit erzielen [54]. Eine residuengesteuerte Gitteranpassung, die den Fehler der Schätzung auf jedem Subintervall auswertet, trägt dazu bei, dass auch bei schlechter Gitterwahl akkurate Lösungen gefunden werden können [54]. Zusätzlich lassen sich unbekannte Parameter (z.B. ein freier Endzeitpunkt) und allgemeine Randbedingungen berücksichtigen, wodurch die

---

Funktion flexibel für verschiedene Problemstellungen angewendet werden kann. Darüber hinaus können auch interne GNB berücksichtigt und so neben ZPR auch allgemeine MPR gelöst werden. Damit stellt dieser Solver eine effiziente und genaue Lösungsmethode für eine breite Klasse von Randwertproblemen dar.



---

# 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] On-Road Automated Driving (ORAD) committee, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States. DOI: 10.4271/j3016{\textunderscore}201806.
- [3] 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.
- [4] 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 Verlag, 2012, S. 4–14, ISBN: 978-3-8348-1457-9. DOI: 10.1007/978-3-8348-8619-4{\textunderscore}2.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] S. Scherer, A. Dettmann, F. Hartwich, T. Pech, A. Bullinger-Hoffmann und G. Wanielik, „How the driver wants to be driven -Modelling driving styles in highly automated driving“, in *7. Tagung Fahrerassistenz*, TÜV SÜD, Hrsg., 2015.
- [9] 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.
- [10] 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.

- 
- [11] E. Dovgan, M. Javorski, T. Tušar, M. Gams und B. Filipič, „Comparing a multiobjective optimization algorithm for discovering driving strategies with humans“, *Expert Systems with Applications*, Jg. 40, Nr. 7, S. 2687–2695, 2013, ISSN: 09574174. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.11.006.
- [12] 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.
- [13] J. T. Reason, J. T. Reason und J. J. Brand, *Motion sickness*. London: Acad. Pr, 1975, ISBN: 9780125840507.
- [14] 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.
- [15] A. J. Benson, „Motion Sickness“, in *Medical Aspects of Harsh Environments Volume 2*, Washington, DC, 20307, 2002, S. 1048–1083.
- [16] 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.
- [17] J. O’Hanlon und M. McCauley, „Motion Sickness Incidence as a Function of Vertical Sinusoidal Motion“, *Aerospace medicine*, Jg. 45, S. 366–369, 1974.
- [18] Technical Committee : ISO/TC 108/SC 4 Human exposure to mechanical vibration and shock, *ISO 2631-1:1997: Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements*, 1997-05.
- [19] 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.
- [20] M. Sivak und B. Schoettle, *Motion Sickness in Self-Driving Vehicles*, 2015.
- [21] 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.
- [22] H. Winner, B. Danner und J. Steinle, „Adaptive Cruise Control“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 478–521, ISBN: 978-3-8348-1457-9. DOI: 10.1007/978-3-8348-8619-4{\textunderscore}33.
- [23] Technical Committee : ISO/TC 204 Intelligent transport systems, *ISO 15622:2018: Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures*, 2018-09.
- [24] —, *ISO 22179:2009: Intelligent transport systems — Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems — Performance requirements and test procedures*, 2009-09.
- [25] Y. Liu und Z. Wu, „Comfortable Driver Behavior Modeling for Car Following of Pervasive Computing Environment“, in *Computational Science – ICCS 2005*, Ser. Lecture Notes in Computer Science, D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler u. a., Hrsg., Bd. 3516, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 1068–1071, ISBN: 978-3-540-26044-8. DOI: 10.1007/11428862{\textunderscore}174.
- [26] T. Radke, *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien*. Erscheinungsort nicht ermittelbar: KIT Scientific Publishing, 2013, ISBN: 978-3-7315-0069-8. Adresse: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/46364>.

- 
- [27] R. Krause, „Anfahrbeschleunigungen im alltäglichen Straßenverkehr“, *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 40, Nr. 4, S. 105–108, 2002.
- [28] Hugemann, Wolfgang and Nickel, Markus, „Longitudinal and lateral accelerations in normal day driving“, in *6th International Conference on Accident Investigation, Reconstruction, Interpretation and Law, Stratford-upon-Avon, 26-29 September 2003 / Institute of Traffic Accident Investigators.*, Institute of Traffic Accident Investigators International Conference, Hrsg., 2003.
- [29] A. Schwab, „Eine Methode zur Auswahl kritischer Fahrszenarien für automatisierte Fahrzeuge anhand einer objektiven Charakterisierung des Fahrverhaltens“, Masterthesis, Technische Universität München, München, 2019.
- [30] C. Canudas-de-Wit, „Fun-To-Drive By Feedback“, in *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, 12-15 Dec. 2005, S. 13, ISBN: 0-7803-9567-0. DOI: 10.1109/CDC.2005.1582110.
- [31] S. Hiroaki, „Ability to withstand sudden braking“, in *Railw Res Rev*, Bd. 52, 1995, S. 18–21.
- [32] J. P. Powell und R. Palacín, „Passenger Stability Within Moving Railway Vehicles: Limits on Maximum Longitudinal Acceleration“, *Urban Rail Transit*, Jg. 1, Nr. 2, S. 95–103, 2015, ISSN: 2199-6687. DOI: 10.1007/s40864-015-0012-y.
- [33] J. Gayko, „Lane Keeping Support“, in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 554–561, ISBN: 978-3-8348-1457-9. DOI: 10.1007/978-3-8348-8619-4{\textunderscore}36.
- [34] H. Oeschies, *Komfortorientierte Regelung für die automatisierte Fahrzeugquerführung*, Ser. AutoUni - Schriftenreihe Ser. Wiesbaden, Germany: Springer, 2019, Bd. v.136, ISBN: 978-3-658-25235-9. Adresse: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5640099>.
- [35] L. Dragon, „Fahrzeugdynamik: Wohin fahren wir?“, in *Forschung für das Auto von Morgen*, Ser. SpringerLink Bücher, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 239–260, ISBN: 978-3-540-74150-3.
- [36] G. Reymond, A. Kemeny, J. Droulez und A. Berthoz, „Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator“, *Human factors*, Jg. 43, Nr. 3, S. 483–495, 2001, ISSN: 0018-7208. DOI: 10.1518/001872001775898188.
- [37] K.-H. Schimmelpfennig und U. Nackenhorst, „Bedeutung der Querbesehleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers“, *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 23, Nr. 4, S. 94–96, 1985.
- [38] J. Xu, K. Yang, Y. Shao und G. Lu, „An Experimental Study on Lateral Acceleration of Cars in Different Environments in Sichuan, Southwest China“, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Jg. 2015, Nr. 6, S. 1–16, 2015, ISSN: 1026-0226. DOI: 10.1155/2015/494130.
- [39] A. Schulz und R. Fröming, „Analyse des Fahrerhaltens zur Darstellung adaptiver Eingriffsstrategien von Assistenzsystemen“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 110, Nr. 12, S. 1124–1131, 2008, ISSN: 0001-2785. DOI: 10.1007/BF03222040.
- [40] M. Festner, A. Eicher und D. Schramm, „Beeinflussung der Komfort- und Sicherheitswahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren durch fahrfremde Tätigkeiten und Spurwechseldynamik“, in *11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und Automatisiertes Fahren*, K. Bengler, Hrsg., Darmstadt: Uni-DAS e.V, 2017, S. 63–73, ISBN: 978-3-00-055656-2.

- 
- [41] Knut Graichen, *Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung: Skript - Wintersemester 2012/2013*. 2012.
- [42] M. Papageorgiou, M. Leibold und M. Buss, *Optimierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-540-34012-6. DOI: 10.1007/978-3-540-34013-3.
- [43] M. Gerdt, *Optimale Steuerung: Skript - Wintersemester 2009/2010*. 2010.
- [44] U. Konigorski, *Mehrgrößenreglerentwurf im Zustandsraum: Skript - Wintersemester 2019/2020*. 2019.
- [45] R. Bellman, *Dynamic programming*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Pr, 1984, ISBN: 0-691-07951-X.
- [46] J. Adamy, *Nichtlineare Regelungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, ISBN: 978-3-642-00793-4. DOI: 10.1007/978-3-642-00794-1.
- [47] U. M. Ascher, R. M. M. Mattheij und R. D. Russell, „5. Finite Difference Methods“, in *Numerical Solution of Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations*, U. M. Ascher, R. M. M. Mattheij und R. D. Russell, Hrsg., Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995, S. 185–274, ISBN: 978-0-89871-354-1. DOI: 10.1137/1.9781611971231.ch5.
- [48] —, „4. Initial Value Methods“, in *Numerical Solution of Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations*, U. M. Ascher, R. M. M. Mattheij und R. D. Russell, Hrsg., Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995, S. 132–184, ISBN: 978-0-89871-354-1. DOI: 10.1137/1.9781611971231.ch4.
- [49] J. T. Betts, „Survey of Numerical Methods for Trajectory Optimization“, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Jg. 21, Nr. 2, S. 193–207, 1998, ISSN: 0731-5090. DOI: 10.2514/2.4231.
- [50] R. Weiss, „The application of implicit Runge-Kutta and collection methods to boundary-value problems“, *Mathematics of Computation*, Jg. 28, Nr. 126, S. 449–464, 1974, ISSN: 0901-246X. DOI: 10.1090/S0025-5718-1974-0341881-2.
- [51] J. R. Cash und D. R. Moore, „A high order method for the numerical solution of two-point boundary value problems“, *BIT*, Jg. 20, Nr. 1, S. 44–52, 1980, ISSN: 0006-3835. DOI: 10.1007/BF01933584.
- [52] C. Rathgeber, *Trajektorienplanung und -folgeregelung für assistiertes bis hochautomatisiertes Fahren*, 2016. DOI: 10.14279/depositonce-5506.
- [53] A. Cervantes und L. T. Biegler, „Optimization Strategies for Dynamic Systems“, in *Encyclopedia of Optimization*, C. A. Floudas und P. M. Pardalos, Hrsg., Boston, MA: Springer US, 2009, S. 2847–2858, ISBN: 978-0-387-74758-3. DOI: 10.1007/978-0-387-74759-0\textunderscore 488.
- [54] J. Kierzenka und L. F. Shampine, „A BVP solver based on residual control and the Matlab PSE“, *ACM Transactions on Mathematical Software*, Jg. 27, Nr. 3, S. 299–316, 2001, ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/502800.502801.