

# Literaturverzeichnis

- [Ada09] ADAMY, J.: *Nichtlineare Regelungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [ADA18] ADAC: *Fahrsicherheitstraining*. Allgemeiner Deutscher Automobil Club, URL: <https://www.adac.de/fahrsicherheitstraining/> (Abrufdatum: 12.06.2018), 2018
- [AM10] ABBINK, D. A. ; MULDER, M.: Neuromuscular Analysis as a Guideline in designing Shared Control. In: *Advances in haptics*. S. 499–516. Intech, 2010
- [AMB12] ABBINK, D. A. ; MULDER, M. ; BOER, E. R.: Haptic shared control: Smoothly shifting control authority? In: *Cognition, Technology & Work* 14, Nr. 1, S. 19–28, 2012
- [APPI10] ANDERSON, S. J. ; PETERS, S. C. ; PILUTTI, T. E. ; IAGNEMMA, K.: An optimal-control-based framework for trajectory planning, threat assessment, and semi-autonomous control of passenger vehicles in hazard avoidance scenarios. In: *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 8, Nr. 2–4, S. 190–216, 2010
- [Aut18] AUTODROM: *Autodrom Most*. Autodrom Most A.S., URL: <http://www.autodrom-most.cz/> (Abrufdatum: 21.05.2018), 2018
- [AvD18] AVD: *Fahrtrainings, Events und Fahrerausbildung*. Automobilclub von Deutschland Driving Academy, URL: <http://www.avd-driving-academy.de> (Abrufdatum: 22.06.2018), 2018
- [Bea11] BEAL, C. E.: *Applications of Model Predictive Control to Vehicle Dynamics For Active Safety*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2011
- [Ben08] BENDER, E.: *Handlungen und Subjektivurteile von Kraftfahrzeugführern bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines Unterstützungssystems zur Kollisionsvermeidung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Ergonomia-Verlag, 2008
- [Ben11] BENTLEY, R.: *Ultimate speed secrets: the complete guide to high-performance and race driving*. Motorbooks International, 2011
- [BFAM14] BALTZER, M. ; FLEMISCH, F. ; ALTENDORF, E. ; MEIER, S.: Mediating the interaction between human and automation during the arbitration processes in cooperative guidance and control of highly automated vehicles. In: *Proceedings of the 5th international conference on applied human factors and ergonomics AHFE*, S. 2107–2118, 2014

- [BFK<sup>+</sup>05] BORRELLI, F. ; FALCONE, P. ; KEVICZKY, T. ; ASGARI, J. ; HROVAT, D.: MPC-based approach to active steering for autonomous vehicle systems. In: *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 3, Nr. 2-4, S. 265–291, 2005
- [BRH<sup>+</sup>16] BARTELS, A. ; ROHLFS, M. ; HAMEL, S. ; SAUST, F. ; KLAUSKE, L. K.: Lateral Guidance Assistance. In: *Handbook of Driver Assistance Systems*. S. 1207–1233. Springer International Publishing, 2016
- [BZKHK11] BOSSDORF-ZIMMER, J. ; KOLLMER, H. ; HENZE, R. ; KÜCÜKAY, F.: Fingerprint des Fahrers zur Adaption von Assistenzsystemen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113, Nr. 3, S. 226–231, 2011
- [Cub58] CUBE, F. von: *Kybernetische Grundlagen des Lernens und Lehrens*. Klett-Cotta, 1958
- [DBE14] DIBA, F. ; BARARI, A. ; ESMAILZADEH, E.: Handling and safety enhancement of race cars using active aerodynamic systems. In: *Vehicle system dynamics* 52, Nr. 9, S. 1171–1190, 2014
- [Deu13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe*. 2013
- [Don12] DONGES, E.: Fahrerhaltensmodelle. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. S. 15–23. Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [Don16] DONGES, E.: Driver Behavior Models. In: *Handbook of Driver Assistance Systems*. S. 19–33. Springer International Publishing, 2016
- [Dud18] DUDENREDAKTION: „Mentor“ auf Duden online. URL: <https://www.duden.de/node/698559/revision/1658646/view> (Abrufdatum: 24.05.2018), 2018
- [ECE08] ECE: *Regelung Nr. 79 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage*. Beuth Verlag, Berlin, 2008
- [ECL<sup>+</sup>16] ERCAN, Z. ; CARVALHO, A. ; LEFEVRE, S. ; BORRELLI, F. ; TSENG, H. E. ; GOKASAN, M.: Torque-based steering assistance for collision avoidance during lane changes. In: *Advanced Vehicle Control: Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16)*, 2016
- [Erl15] ERLIEN, S. M.: *Shared vehicle control using safe driving envelopes for obstacle avoidance and stability*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2015
- [FAI<sup>+</sup>16] FLEMISCH, F. ; ABBINK, D. ; ITOH, M. ; PACAUX-LEMOINE, M.-P. ; WESSEL, G.: Shared control is the sharp end of cooperation: towards a common framework of joint action, shared control and human machine cooperation. In: *IFAC-PapersOnLine* 49, Nr. 19, S. 72–77, 2016

- [Föll94] FÖLLINGER, O.: *Optimale Regelung und Steuerung: Mit 7 Tabellen und 16 Übungsaufgaben mit genauer Darstellung des Lösungsweges*. 3. Auflage. Oldenbourg, 1994
- [FWBB16] FLEMISCH, F. ; WINNER, H. ; BRUDER, R. ; BENGLER, K.: Cooperative Guidance, Control, and Automation. In: *Handbook of Driver Assistance Systems*. S. 1471–1481. Springer International Publishing, 2016
- [GK17] GUNDLACH, I. ; KONIGORSKI, U.: Eine modellbasierte Rundenzeitoptimierung für seriennahe Fahrzeuge. In: *8. VDI/VDE-Fachtagung AUTOREG 2017 - Automatisiertes Fahren und vernetzte Mobilität*, 223—234, 2017
- [GKMBS09] GERDTS, M. ; KARRENBERG, S. ; MÜLLER-BESSLER, B. ; STOCK, G.: Generating locally optimal trajectories for an automatically driven car. In: *Optimization and Engineering* 10, Nr. 4, S. 439, 2009
- [GLB<sup>+</sup>10] GAO, Y. ; LIN, T. ; BORRELLI, F. ; TSENG, E. ; HROVAT, D.: Predictive Control Of Autonomous Ground Vehicles With Obstacle Avoidance On Slippery Roads. In: *ASME Conference Proceedings, Dynamic Systems and Control Conference, Cambridge, MA*. S. 265–272. 2010
- [Har87] HAREL, D.: Statecharts: A visual formalism for complex systems. In: *Science of Computer Programming* 8, Nr. 3, S. 231–274, 1987
- [Har16] HARLEY, M.: *Volkswagen Autonomous Race Trainer Eliminates Driving Instructors*. Forbes Media LLC, url: <http://www.forbes.com/sites/michaelharley/2016/10/10/volkswagen-autonomous-race-trainer-eliminates-driving-instructors/> (Abrufdatum 21.05.2018), 2016
- [HBF<sup>+</sup>12] HAKULI, S. ; BRUDER, R. ; FLEMISCH, F. O. ; LÖPER, C. ; RAUSCH, H. ; SCHREIBER, M. ; WINNER, H.: Kooperative Automation. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. S. 641–650. Vieweg + Teubner, 2012
- [HEG11] HEISSING, B. ; ERSOY, M. ; GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- [Hin13] HINDIYEH, R. Y.: *Dynamics and Control of Drifting in Automobiles*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2013
- [Hoc13] HOCHREIN, P.: *Leistungsoptimale Regelung von Hochstromverbrauchern im Fahrwerk*. Dissertation, Universität Kassel, kassel university press, 2013
- [Hoe13] HOEDT, J.: *Fahrdynamikregelung für fehlertolerante X-by-Wire-Antriebsstopologien*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, epubli, 2013
- [Hsu09] HSU, Y.-H. J.: *Estimation And Control Of Lateral Tire Forces Using Steering Torque*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2009

- [IBB<sup>+</sup>09] ISERMANN, R. ; BENDER, E. ; BRUDER, R. ; DARMS, M. ; SCHORN, M. ; STÄHLIN, U. ; WINNER, H.: Antikollisionssystem PRORETA: Integrierte Lösung für ein unfallvermeidendes Fahrzeug. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. S. 632–646. Vieweg+Teubner, 2009
- [ISO17] ISO: *ISO 17361:2017 Intelligent transport systems - Lane departure warning systems - Performance requirements and test procedures*. Beuth Verlag, Berlin, 2017
- [KHG16] KEGELMAN, J. C. ; HARBOTT, L. K. ; GERDES, J. C.: Insights into vehicle trajectories at the handling limits: Analysing open data from race car drivers. In: *Vehicle System Dynamics* 55, Nr. 2, S. 191–207, 2016
- [KMHE13] KLEIN, M. ; MIHAILESCU, A. ; HESSE, L. ; ECKSTEIN, L.: Einzelradlenkung des Forschungsfahrzeugs Speed E. In: *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift* 115, Nr. 10, S. 782–787, 2013
- [Kri12] KRITAYAKIRANA, K.: *Autonomous vehicle control at the limits of handling*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2012
- [Kro08] KRON, F. W.: *Grundwissen Didaktik*. Ernst Reinhardt Verlag, 2008
- [Kru15] KRUMM, M.: *Driving On The Edge - The Art and Science of Race Driving - Revised and Updated Second Edition*. 2. Icon Publishing Limited, 2015
- [Küh10] KÜHNEL, W.: *Differentialgeometrie: Kurven - Flächen - Mannigfaltigkeiten*. 5., aktualisierte Aufl. Vieweg + Teubner, 2010
- [LMH<sup>+</sup>18] LUDWIG, J. ; MARTIN, M. ; HORNE, M. ; FLAD, M. ; VOIT, M. ; STIEFELHAGEN, R. ; HOHMANN, S.: Driver observation and shared vehicle control: supporting the driver on the way back into the control loop. In: *at-Automatisierungstechnik* 66, Nr. 2, S. 146–159, 2018
- [Lop01] LOPEZ, C.: *Going faster! Mastering the art of race driving*. Bentley Publishers, 2001
- [Lun10a] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1*. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Lun10b] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 2*. Springer Berlin Heidelberg, 2010
- [Mar86] MARTIAL, I. von: *Theorie allgemeindidaktischer Modelle*. Böhlau Verlag, 1986
- [MB11] MATTINGLEY, J. ; BOYD, S.: CVXGEN: a code generator for embedded convex optimization. In: *Optimization and Engineering* 13, Nr. 1, 1–27, 2011
- [Mit03] MITSCHKE, M.: *Dynamik von Kraftfahrzeugen*. 4. Auflage. Springer, 2003
- [MMK<sup>+</sup>08] MUKAI, M. ; MURATA, J. ; KAWABE, T. ; NISHIRA, H. ; TAKAGI, Y. ; DEGUCHI, Y.: Optimal Path Generation for Automotive Collision Avoidance Using Mixed Integer Programming. In: *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* Bd. 1, No. 3. S. 222–226. 2008

- [Ngu16] NGUYEN, V.: *Volkswagen Race Trainer Self-Driving and Augmented Reality hands-on*. YouTube LLC, url: <https://youtu.be/5wPoGc8Z2q4> (Abrufdatum21.05.2018), 2016
- [NHL<sup>+</sup>16] NI, J. ; HU, J. ; LI, X. ; XU, B. ; ZHOU, J.: G-G Diagram Generation Based on Phase Plane Method and Experimental Validation for FSAE Race Car. In: *SAE Technical Paper 2016-01-0174*, SAE International, 2016
- [NWS15] NISHIMURA, R. ; WADA, T. ; SUGIYAMA, S.: Haptic Shared Control in Steering Operation Based on Cooperative Status Between a Driver and a Driver Assistance System. In: *Journal of Human-Robot Interaction* 4, Nr. 3, S. 19–37, 2015
- [Par18] PARKALGAR: *Motorsports Park Algarve*. Parkalgar Parques Tecnologicos e Desportivos S.A., URL: <https://autodromodoalgarve.com/> (Abrufdatum: 21.05.2018), 2018
- [PB12] PACEJKA, H. B. ; BESSELINK, I.: *Tire and vehicle dynamics*. 3rd edition. Butterworth-Heinemann, 2012
- [PFE<sup>+</sup>08] P. FALCONE ; F. BORELLI ; E. TSENG ; J. ASGARI ; D. HROVAT: Low Complexity MPC Schemes for Integrated Vehicle Dynamics Control Problems. In: *9th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. 2008
- [Pfe11] PFEFFER, P.: *Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. Morgan Kaufmann, 2011
- [PK18] PFEIFFER, J. ; KING, R.: Robust control of drag and lateral dynamic response for road vehicles exposed to cross-wind gusts. In: *Experiments in Fluids* 59:45, 2018
- [PL96] POST, J. W. ; LAW, E. H.: *Modeling, Characterization and Simulation of Automobile Power Steering Systems for the Prediction of On-Center Handling*. SAE International, 1996
- [Ras16] RASTE, T.: Vehicle Dynamics Control with Braking and Steering Intervention. In: *Handbook of Driver Assistance Systems*. S. 1007–1020. Springer International Publishing, 2016
- [RWM16] RATHGEBER, C. ; WINKLER, F. ; MÜLLER, S.: Kollisionsfreie Längs- und Quertrajektorienplanung unter Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Potenziale. In: *at - Automatisierungstechnik* 64, Nr. 1, 2016
- [SAE18] SAE: *SAE J3016 Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. Beuth Verlag, Berlin, 2018
- [Sch09] SCHMIDT, G.: *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, 2009

- [Sch17] SCHAARE, D.: *Identifikation und Konservierung eines markttypischen Lenkgefühls*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, 2017
- [SHHK19] SCHACHER, S. ; HANEBERG, J. ; HÖDT, J. ; KING, R.: Planungsadaptation und Aktivierungsschranken zur Abstimmung von vertikal kooperierenden Fahrerassistenzsystemen. In: *at-Automatisierungstechnik* 67, Nr. 7, S. 557–571, 2019
- [SHK18] SCHACHER, S. ; HÖDT, J. ; KING, R.: Fahrerspezifische Geschwindigkeitsprofile für die automatische oder die kooperative Fahrt. In: *at-Automatisierungstechnik* 66, Nr. 1, S. 53–65, 2018
- [SK18] SCHACHER, S. ; KING, R.: Konzept für Mentorensysteme – Neuartige Fahrerassistenzsysteme am Beispiel Race Trainer. In: *34. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren 2018*, S. 283–298, 2018
- [SP05] SKOGESTAD, S. ; POSTLETHWAITE, I.: *Multivariable Feedback Control: Analysis*. Wiley, 2005
- [The14] THEODOSIS, P. A.: *Path planning for an automated vehicle using professional racing techniques*. Ph.D. Thesis, Stanford University, 2014
- [TMN11] TOYOTA ; MINASE, Y. ; NAKAI, K.: *DE112011103460: Fahrerunterstützungssystem und Fahrerunterstützungsverfahren*. Patent, 2011
- [VE16] VAN ENDE, K.: *Fahrzeugbewertung im Lenkwinkel-Kleinsignalbereich*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Shaker Verlag, 2016
- [Vol84] VOLKSWAGEN AG: *Bericht über das Geschäftsjahr 1983*. 1984
- [Vol07] VOLKSWAGEN AG: *Selbststudienprogramm 399: Die elektro-mechanische Lenkung mit Achs-Parallelem Antrieb (APA)*. 2007
- [Vol18] VOLKSWAGEN AG: *Future Mobility Day in Ehra-Lessien*. URL: <https://www.discover-stf18.com/future-mobility-day/> (Abrufdatum: 17.07.2018), 2018
- [Vol19] VOLKSWAGEN AG: *Research Vehicle Race Trainer*. URL: <https://www.volkswagenag.com/en/group/research/research-vehicles.html> (Abrufdatum: 08.05.2019), 2019
- [Wal09] WALDMANN, P.: *Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems zum Erlernen der Ideallinie auf Rennstrecken*. Dissertation, Technische Universität Cottbus, Shaker Verlag, 2009
- [Wer10] WERLING, M.: *Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, 2010

- [WHL16] WINNER, H. ; HAKULI, S. ; LOTZ, F. ; SINGER, C.: *Handbook of driver assistance systems: Basic information, components and systems for active safety and comfort*. Springer International Publishing, 2016
- [Wie48] WIENER, N.: Cybernetics. In: *Scientific American* 179, Nr. 5, S. 14–19, 1948
- [WP05] WEGSCHEIDER, M. ; PROKOP, G.: Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrerassistenzsystemen. In: *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung* Bd. 1900, S. 17–36, VDI-Verlag, 2005
- [WST16] WADA, T. ; SONODA, K. ; TADA, S.: Simultaneous Achievement of Supporting Human Drivers and Improving Driving Skills by Shared and Cooperative Control. In: *IFAC-PapersOnLine* 49, Nr. 19, S. 90–95, 2016
- [WZKT10] WERLING, M. ; ZIEGLER, J. ; KAMMEL, S. ; THRUN, S.: Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a frenet frame. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on IEEE*, S. 987–993, 2010

# Anhang

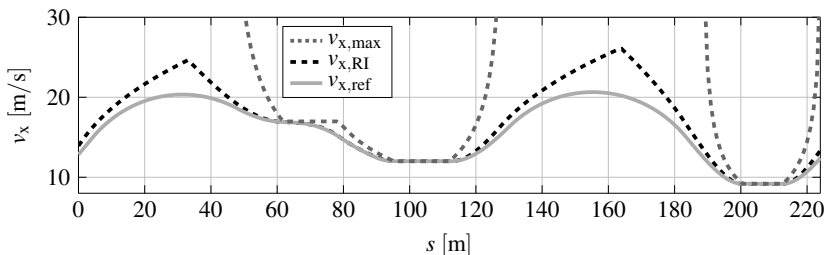
## A.1 Recheneffiziente Längsruckbegrenzung

Der Längsruck ist die Änderung der Längsbeschleunigung nach der Zeit und ist trägheitsbedingt limitiert. Die Begrenzung des Längsrucks  $\dot{a}_x$  ist sowohl aus technischen als auch aus didaktischen Gründen notwendig. Da kein abrupter Wechsel von Beschleunigung auf Verzögerung und umgekehrt möglich ist, müssen die technischen Limitationen des Fahrzeugs im Geschwindigkeitsprofil berücksichtigt werden. Es kann auch eine geringere Grenze für den Längsruck

$$\dot{a}_{x,\text{lim}} \leq \dot{a}_{x,\text{max}} \quad (1)$$

vorgegeben werden, um ein ruckärmeres Profil zu erhalten. Für den Lernprozess eines Anfängerfahrers ist es beispielsweise hilfreich, den Längsruck künstlich einzuschränken. Dadurch lässt das Referenzprofil mehr Zeit für den Wechsel von Gas- zu Bremspedal. Der Wert  $\dot{a}_{x,\text{lim}}(s)$  wird deswegen zusätzlich in den Parametersatz in Gleichung (4.17) aufgenommen.

Abbildung A.1 zeigt den gewünschten Effekt. Erneut ist  $v_{x,\text{max}}$  das stationäre Maximum und  $v_{x,\text{RI}}$  das Ergebnis der Vorwärts- und Rückwärtsintegration. Durch die Begrenzung des Längsrucks entsteht  $v_{x,\text{ref}}$ , welches hier mit einem reduzierten Ruck von  $\dot{a}_{x,\text{lim}} = 5\text{m/s}^3$  erzeugt wurde ( $\dot{a}_{x,\text{max}} \approx 7\text{m/s}^3$ ). Das bedeutet, dass es vier Sekunden benötigt, um von voller Beschleunigung auf volle Verzögerung zu wechseln. Dies fällt besonders bei den „abgeflachten“ Spitzen auf, die durch die Begrenzung des negativen Längsrucks entstehen. Aber auch der positive Längsruck in  $v_{x,\text{RI}}$  ist zu groß, da bei den Kurvenausgängen ( $s = 120\text{m}$  und  $s = 220\text{m}$ ) das Referenzprofil darunter liegt.



**Abbildung A.1:** Begrenzung des positiven und negativen Längsrucks mit  $\dot{a}_{x,\text{lim}} = 5\text{m/s}^3$ .

In Abschnitt 2.2.4 wurde erläutert, dass der Längsruck über eine nachgelagerte Prüfung beschränkt werden kann. Besonders für kleine  $\dot{a}_{x,\text{max}}$  kostet diese Prüfung viel Rechenzeit durch viele notwendige Iterationsschritte. Die Referenzgeschwindigkeit soll während der



Versuchsdurchführung an den Erfahrungsschatz des Fahrers angepasst werden. Dafür muss die Rechenzeit deutlich reduziert werden, was durch die Einführung von zwei neuen Berechnungsschritten möglich ist. Die Begrenzung des positiven Längsrucks wird, rechenzeitoptimal, direkt in die Berechnung des Referenzprofils integriert und der Rechenaufwand für die nachgelagerte Beschränkung des negativen Längsrucks wird reduziert. Letztere erfolgt über die Lösung eines numerischen Anfangswertproblems.

### A.1.1 Begrenzung des positiven Längsrucks

Für den Berechnungsalgorithmus kann die Beschränkung des Längsrucks in zwei Vorgänge aufgeteilt werden: den Wechsel vom Gaspedal zum Bremspedal nach Erreichen der Höchstgeschwindigkeit zwischen zwei Kurven und dem Reduzieren des Bremsdrucks mit Wechsel zur Beschleunigung am Kurvenscheitelpunkt. Letztere Begrenzung lässt sich direkt in den bisher vorgestellten Algorithmus integrieren und wird zuerst für die Vorwärtsintegration erläutert. Der Längsruck ist definiert als die Änderung der Beschleunigung nach der Zeit und kann durch

$$\dot{a}_x = \frac{a_x(s(t_i)) - a_x(s(t_{i-1}))}{\Delta t}$$

über einen Differenzenquotient angenähert werden. Für die Vorwärtsintegration ist somit durch

$$a_x(s(t_i)) = a_x(s(t_{i-1})) + \dot{a}_x \cdot \Delta t$$

die Veränderung der Beschleunigung zwischen zwei Iterationsschritten mit der noch zu ermittelnden Zeitschrittweite  $\Delta t$  festgelegt. Der Zeitschritt muss variiert werden, damit der nächste Bahnpunkt  $s_i$  genau erreicht wird, wobei  $s(t_{i-1})$  genau dem Punkt  $s_{i-1}$  entspricht. Der über

$$a_{x,\text{Ruck}}^*(s_i) = a_x(s_{i-1}) + \dot{a}_{x,\text{lim}} \cdot \Delta t_{v_x, a_x}(s_{i-1}) \quad (2)$$

berechnete, maximal erlaubte Beschleunigungskandidat wird als zusätzliche Limitierung an das, aus Gleichung (4.15) resultierende,  $a_x^*(s_i)$  gestellt. Mit

$$a_x^*(s_i) = \min(a_{x,\text{Ruck}}^*(s_i), a_x^*(s_i)) \quad (3)$$

kann bei der Vorwärtsintegration der Längsruck berücksichtigt werden. Der noch unbekannt Zeitschritt  $\Delta t$  kann aus dem vorherigen Berechnungsergebnis  $a_x(s_{i-1})$  und  $v_x(s_{i-1})$  und unter Zuhilfenahme der Weggleichung

$$s(t) = 0.5 \cdot a_x(s(t)) \cdot t^2 + v_x(s(t)) \cdot t + s_0$$

ermittelt werden. Wie bisher wird angenommen, dass die Beschleunigung stückweise konstant ist, um die folgenden Gleichungen zu vereinfachen. Dies widerspricht zwar der Forderung nach einem geglätteten Längsruck, der dadurch eingeführte Berechnungsfehler ist aber

vernachlässigbar und wird nicht von der Fahrzeugdynamik aufgegriffen. So kann die Weggleichung für den Anfangs- und den Endpunkt vereinfacht und nach dem Weginkrement

$$\begin{aligned}\Delta s &= s(t_i) - s(t_{i-1}) \\ \Leftrightarrow \Delta s &= 0.5 \cdot a_x(s_{i-1}) \cdot \Delta t^2 + v_x(s_{i-1}) \cdot \Delta t\end{aligned}\quad (4)$$

aufgestellt werden. Die Umformung nach  $\Delta t$  führt zu einer quadratischen Gleichung die über eine Fallunterscheidung nach  $a_x$

$$\Delta t_{v_x, a_x}(s_j) = \begin{cases} \frac{\Delta s}{v_x(s_j)} & , \quad a_x = 0 \\ -\frac{v_x(s_j)}{a_x(s_j)} + \sqrt{\frac{v_x(s_j)^2}{a_x(s_j)^2} + \frac{2 \cdot \Delta s}{a_x(s_j)}} & , \quad a_x > 0 \\ -\frac{v_x(s_j)}{a_x(s_j)} - \sqrt{\frac{v_x(s_j)^2}{a_x(s_j)^2} + \frac{2 \cdot \Delta s}{a_x(s_j)}} & , \quad a_x < 0 \end{cases}\quad (5)$$

gelöst wird. Für die Rückwärtsintegration kann die Zeitdifferenz nicht genau ermittelt werden, da die dafür benötigten  $a_x(s_{i-1})$  und  $v_x(s_{i-1})$  erst durch die Rückwärtsiteration berechnet werden. Es steht, als nächste Näherung, nur die Zeit auf dem Teilstück  $\Delta s = s_{i+1} - s_i$  zur Verfügung. Dadurch entsteht ein Berechnungsfehler, der für geringe Geschwindigkeiten bei hoher Beschleunigung am größten wird. Die Beschleunigung muss durch

$$\begin{aligned}a_{x, \text{Ruck}}^*(s_{i-1}) &= a_x(s_i) - \dot{a}_{x, \text{lim}} \cdot \Delta t_{v_x, a_x}(s_i) \\ a_x^*(s_{i-1}) &= \max(a_{x, \text{Ruck}}^*(s_{i-1}), a_x^*(s_{i-1}))\end{aligned}\quad (6)$$

$$\quad (7)$$

beschränkt werden, damit  $a_x^*$  sich nicht zu schnell ändert.

### A.1.2 Begrenzung des negativen Längsrucks

Die Geschwindigkeitsverläufe zeigen ohne Beschränkung des Längsrucks beim Wechsel von Beschleunigen zu Verzögern spitz zulaufende Schnittpunkte wie in Abbildung 2.17 (a). Gewünscht sind rundliche Übergänge wie in Abbildung 2.17 (b). Die Berücksichtigung des negativen Längsrucks lässt sich nicht direkt in den Algorithmus einbringen, da zu Beginn der Berechnung nicht bekannt ist, ab wann von Beschleunigen zu Verzögern gewechselt werden muss. Zusätzlich erschwert der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Weg und der benötigten Zeit die Ruckbegrenzung. Wird ein Teilstück langsamer durchfahren, erhöht sich die Zeit in diesem Segment. Da der Längsruck als Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit definiert ist, kann bei langsameren Geschwindigkeiten ein größerer Unterschied zwischen der Anfangs- und der Endbeschleunigung im Teilstück resultieren. Das in Abschnitt 2.2.4 skizzierte Verfahren berücksichtigt deswegen nur benachbarte Punkte und muss mehrfach über alle Punkte iterieren. Das folgend vorgestellte „Shooting“-Verfahren berücksichtigt durch die numerische Lösung eines Anfangswertproblems ebenfalls nur benachbarte Punkte, aber es reicht eine einzige Iteration über das Geschwindigkeitsprofil. Dadurch lässt sich die Rechenzeit nach oben begrenzt abschätzen.

Die Berechnung wird auf die Lösung eines Anfangswertproblems überführt, um den Beginn eines Längsruckwechsels zu ermitteln. Ab jedem Punkt  $s_i$  mit  $i \in [0, 1, \dots, n]$  des Originalprofils wird numerisch der mögliche zukünftige Geschwindigkeitsverlauf  $v_x^*(s_{i+k})$  mit  $k \in [0, 1, \dots, n]$  berechnet, der, unter Berücksichtigung des Rucks, immer stärker verzögert und dadurch wie ein Schlauch abknickt. Überbrückt man dabei zwei, zuvor eckig verbundene Punkte des Geschwindigkeitsprofils, ist der Anfangspunkt gefunden. Bei Überschreiten des Endpunkts muss wieder der Anfang der Strecke referenziert werden. Der dafür geeignete Modulo-Operator wird in der folgenden Schreibweise vernachlässigt, es gilt  $s_{i+k} = s_{\text{mod}(i+k,n)}$ . Mit den Anfangsbedingungen

$$a_x^*(s_{i+k}) = a_x(s_i), \quad k = 0 \quad (8)$$

$$v_x^*(s_{i+k}) = v_x(s_i), \quad k = 0 \quad (9)$$

und der Berechnungsformel der durch den maximal erlaubten negativen Längsruck  $-\dot{a}_{x,\max}$  bestimmten Beschleunigung für  $k > 0$

$$a_x^*(s_{i+k}) = a_x^*(s_{i+k-1}) - \dot{a}_{x,\text{lim}} \cdot \Delta t_{v_x^*, a_x^*}(s_{i+k-1}) \quad (10)$$

lässt sich der Geschwindigkeitsverlauf durch

$$v_x^*(s_{i+k+1}) = v_x^*(s_{i+k}) + a_x^*(s_{i+k}) \cdot \Delta t_{v_x^*, a_x^*}(s_{i+k}) \quad (11)$$

ermitteln. Die Laufvariable  $k$  wird so lange inkrementiert, bis das originale Geschwindigkeitsprofil durch den abknickenden, neuen Verlauf getroffen oder überschritten wird

$$v_x^*(s_{i+k}) \geq v_x(s_{i+k}), \quad k > 1, \quad (12)$$

oder die Abbruchkriterien

$$k \geq n \quad (13)$$

$$v_x^*(s_{i+k}) \leq 0 \text{ m/s}, \quad k > 0 \quad (14)$$

$$a_x^*(s_{i+k}) < -1g = -9.81 \text{ m/s}^2, \quad k > 0 \quad (15)$$

erreicht werden. Über die Gleichungen (13), (15) und (14) wird gewährleistet, dass die numerische Berechnung aufhört, wenn der Ausgangspunkt erreicht ist oder die Geschwindigkeit und Beschleunigung zu niedrig werden. In diesen Fällen kann das unbeschränkte Profil nicht mehr gekreuzt werden und die Berechnung wird mit einem inkrementierten Startindex  $i = i + 1$  neu gestartet. Treten die nach Bedingung (12) gewünschten Überschneidungen mit dem unbeschränkten Geschwindigkeitsprofil auf, ist die grobe Position vom Anfangspunkt der Ruckbegrenzung identifiziert. Da in der Regel die Zielgeschwindigkeit nicht genau getroffen wird, ist nur bekannt, dass der Anfangspunkt im Teilintervall  $s \in s_{i-1} \dots s_i$  liegen muss.

Eine Variation des Anfangspunktes ist im vorgestellten Algorithmus nicht direkt möglich, der Effekt kann aber durch eine Veränderung der Anfangsbeschleunigung reproduziert werden. In dem man die Anfangswertsuche mit einem modifizierten

$$a_x^*(s_{i+k}) = \tilde{a}_x(s_i), \quad k = 0 \quad (16)$$

startet, kann der negative Beschleunigungswechsel effektiv schon im Abtastpunkt davor beginnen. Die Anfangsbeschleunigung wird dafür zwischen dem ursprünglichen Wert und einer unteren Grenze  $\tilde{a}_{x,\min}(s_i)$  variiert. Die untere Grenze der Anfangsbeschleunigung ist wieder durch die längsruckbegrenzte Beschleunigungsänderung zum vorherigen Abtastpunkt festgelegt. Mit

$$\tilde{a}_{x,\min}(s_i) = a_x(s_{i-1}) - \dot{a}_{x,\text{lim}} \cdot \Delta t_{v_x, a_x}(s_{i-1}) \quad (17)$$

kann ein mathematisches Suchverfahren nun die Anfangsbeschleunigung im Bereich

$$\tilde{a}_x(s_i) \in a_x(s_i) \dots \tilde{a}_{x,\min}(s_i) \quad (18)$$

variieren und die Lösung des Anfangswertproblems mit der modifizierten Nebenbedingung (16) berechnen. Die Anfangsbeschleunigung ist gefunden, wenn die Endgeschwindigkeit genau getroffen wird. Wenn mit dem angepassten Startwert  $a_x^*(s_{i+0}) = \tilde{a}_x(s_i)$  die Gleichung

$$v_x^*(s_{i+k} | \tilde{a}_x(s_i)) = v_x(s_{i+k}), \quad k > 1 \quad (19)$$

erfüllt ist, kann davon ausgegangen werden, dass auf dem Streckenintervall  $s \in s_i \dots s_{i+k}$  der Längsruck eingehalten wird. Die für die Lösung des Anfangswertproblems bereits berechneten Werte von  $v_x^*$  und  $a_x^*$  können direkt übernommen werden.

$$\begin{aligned} v_{x,\text{ref}}(s_j) &= v_x^*(s_j), \quad \forall j \in i \dots i+k \\ a_{x,\text{ref}}(s_j) &= a_x^*(s_j), \quad \forall j \in i \dots i+k \end{aligned}$$

Der Startindex  $i$  kann anschließend direkt zum Index  $i = i + k$  inkrementiert werden.

Abbildung A.2 zeigt eine erfolgreich abgeschlossene Anfangswertsuche für die Ruckbegrenzung  $\dot{a}_{x,\text{max}} = 7 \text{ m/s}^3$ . In allen drei Diagrammen sind die Werte vor der Begrenzung des Rucks gestrichelt und die Verläufe nach der Ruckbegrenzung durchgezogen gezeichnet. In den oberen zwei Diagrammen sind die Zwischenergebnisse der Anfangswertberechnung gepunktet dargestellt. Im oberen Diagramm wird die unbeschränkte Referenzgeschwindigkeit mit dem berechneten Verlauf von  $v_x^*$  überbrückt. Im mittleren Diagramm zeigt  $a_x^*$  eine Verbindung der Anfangs- und Endbeschleunigung, welche die notwendige Ruckbegrenzung berücksichtigt. Dies ist anhand der unteren Darstellung des Längsrucks im original und im modifizierten Geschwindigkeitsprofil überprüfbar. Der resultierende Ruck trifft exakt den geforderten Wert und liegt am letzten Abtastpunkt innerhalb der geforderten Beschränkung. Am Ruck des ersten Berechnungspunktes sieht man das Ergebnis der Anfangswertsuche, denn dieser ist ebenfalls kleiner als die maximal zugelassene Begrenzung und  $a_x^*(s_i)$  damit innerhalb des erlaubten Intervalls.

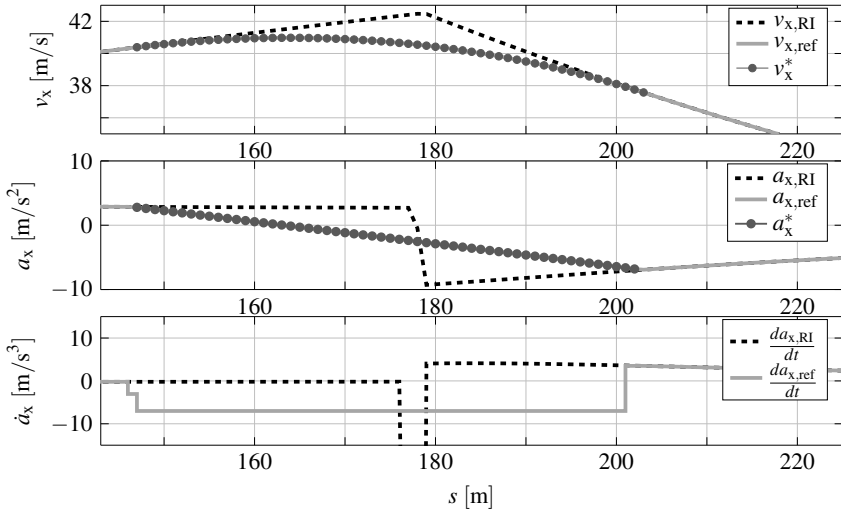


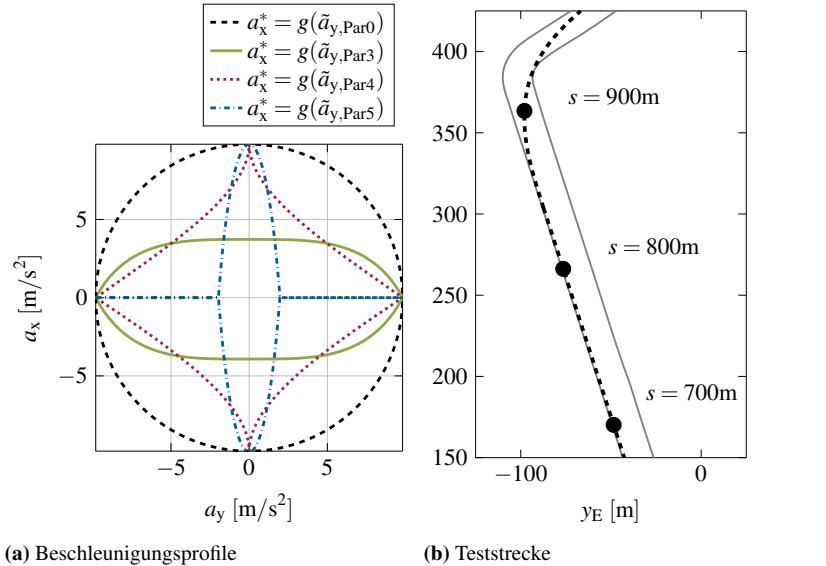
Abbildung A.2: Lösung des Anfangswertproblems für  $\dot{a}_{x,max} = 7\text{m/s}^3$ .

## A.2 Potenzieller Effekt eines Fahrertrainings auf die Verkehrssicherheit

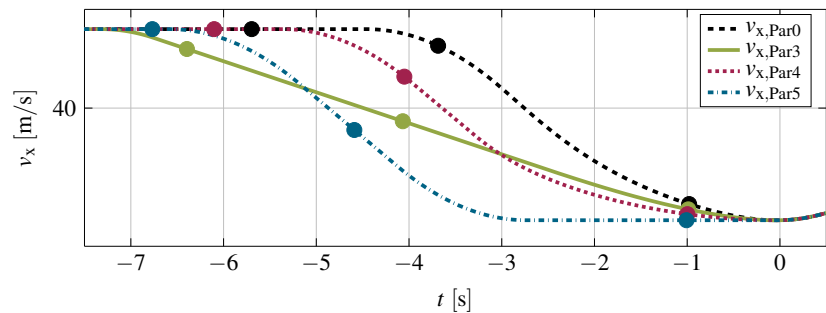
Bei einem Rennstreckentraining kann sich der Fahrer Fahrtechniken aneignen, die sich insbesondere in der Ausnutzung des Gesamtbeschleunigungspotentials des Fahrzeug zeigen. Die in Kapitel 4 vorgestellte Planung von fahrerindividuellen Geschwindigkeitsprofilen kann den gewünschten Effekt visualisieren. Abbildung A.3 (a) zeigt vier mögliche „g-g“-Profile, die unterschiedliche Bremsstile nachbilden. Für die Erläuterung wurden daraus vier Geschwindigkeitsprofile auf dem in Abbildung A.3 (b) gezeigten Abschnitt einer Rennstrecke mit einer Geschwindigkeitsgrenze von  $50\text{m/s} = 180\text{km/h}$  und einem Längsruck von  $6\text{m/s}^3$  berechnet.

Das bereits in Kapitel 4.2.2 gezeigte, schwarz gestrichelte Profil Par0 in Abbildung A.3 (a) entspricht erneut dem Können eines Rennfahrers. Das grün eingezeichnete Profil Par3 entspricht einer Fahrweise, bei der vom Probanden nicht besonders kräftig, dafür aber weit in die Kurve hinein mit unverändertem Bremsdruck gebremst wird. Mit dem rot punktiert dargestellten Par4 wird ein konkaves Bremsprofil gezeigt, das in dieser Arbeit als Zwischenschritt zur Fahrweise eines Profis diskutiert wurde und einem Lernziel des Assistenzsystems entspricht. Mit der zusätzlich blau punktiert gestrichelt eingezeichneten Parametrierung Par5 wird ein, von Automobilclubs oft im Lehrplan eines Sondertrainings gelehrt, extrem spitzes Bremsverhalten nachgebildet. Dem Schüler wird dort teilweise empfohlen seine Geschwindigkeit mit einem kräftigen Bremsmanöver auf gerader Strecke zu verringern und die Bremse komplett zu lösen sobald in die Kurve eingelenkt wird. Damit bleibt das Fahrzeug beherrschbarer, aber es muss sehr früh gebremst werden, wie Abbildung A.4

zeigt. Zur Illustration des Zeitgewinns bei perfektem Bremsverhalten sind alle vier Profile nicht über dem Weg, sondern über der Zeit dargestellt, wobei für alle der Zeitpunkt null am Kurvenscheitelpunkt festgelegt wurde. Die farbigen Punkte markieren die Zeitpunkte, an denen die Profile die in Abbildung A.3 (b) gezeigten Streckenmeter erreichen. Die bei Sekunde  $-1$  nahezu übereinanderliegenden Punkte gehören dementsprechend zu der 900-m-Marke, die zwischen Sekunde  $-5$  und  $-3$  streuenden Punkte zu der 800-m-Marke.



**Abbildung A.3:** Unterschiedliche Beschleunigungstypen und zur Evaluation genutzte Teststrecke



**Abbildung A.4:** Bremszeit bei unterschiedlichen Ausnutzungen des Kamm'schen Kreises

Es kann abgelesen werden, wie viele Sekunden vor Erreichen des Scheitelpunkts die Bremsung einzuleiten ist. Zwischen den vier Profilen liegen dreieinhalb Sekunden, wobei das Profil Par3 den längsten Bremsweg aufweist. Gleichzeitig hat es kurz vor dem Scheitelpunkt die zweithöchste Geschwindigkeit und damit eine geringe fahrdynamische Reserve. Es ist damit in diesem Vergleich das schlechteste Bremsverhalten. Das spitze Profil Par5 hat zwar einen sehr kurzen Bremsweg, dafür aber den zweit frühesten Bremsbeginn. Das Rennfahrerprofil Par0 zeigt das zeitliche Optimum für diese Kurve, stellt aber insgesamt hohe Anforderungen an den Fahrer. Das, den Lehrinhalten dieser Arbeit entsprechende, Profil Par4 hat ähnliche positive Eigenschaften wie das Rennfahrerprofil, ist aber durch die reduzierte Kombination aus Längs- und Querschleunigungen weiter von der Grenze der Fahrstabilität entfernt und dadurch einfacher zu beherrschen. Gegenüber dem ungeübten oder vorsichtigen (Automobilclub-) Profil kann bei dieser Fahrweise der Bremsvorgang beinahe zwei Sekunden später beginnen. Bezieht man dies zurück auf den Straßenverkehr sollte sich das gesteigerte Verständnis der Fahrzeugbeherrschung positiv auf die Verkehrssicherheit auswirken, da der Fahrer eine zusätzliche Zeitreserve beim Reagieren auf kritische Situationen hat.

### **A.3 Indirekte Unterstützungsmöglichkeiten und Sicherheitskonzept**

Die Forschungen zu optisch-akustischen Unterstützungsmaßnahmen wurden nicht vom Autor durchgeführt und zählen deswegen nicht zum Inhalt dieser Ausarbeitung, sie sollen aber trotzdem in Kürze illustriert werden. Das „Heads-Up-Display“ ermöglicht es, den zukünftigen Verlauf der Ideallinie im Sichtfeld des Fahrers einzublenden, welches dadurch wie in einem Videospiele direkt auf den Asphalt liegend erscheint, siehe Abbildung A.5. Akustische Einspielungen können sowohl Hinweise zur allgemeinen oder aktuellen Fahrweise geben und informieren den Fahrer durch eindeutige Basstöne über bevorstehende Bremszonen. Durch die Aufzeichnung der gesamten Fahrt kann nach dem Training eine detaillierte Auswertung seiner Trainingsperformance gegeben werden. Abbildung A.6 zeigt diese Analyse. Ebenso eignet sie sich dazu, die Eingriffe des Assistenzsystems zu visualisieren und so ein größeres Verständnis für die Gründe und den Effekt der Lenk- und Bremsingriffe zu erzeugen. Weiße Dreiecke neben dem Fahrzeug illustrieren, wie stark das Mentorensystem in der Lenkung unterstützt hat. Rote Dreiecke hinter dem Fahrzeug zeigen Bremsingriffe. In der dargestellten Situation hat der Fahrer beispielsweise zu früh eingelenkt, erkennbar an der weiß gestrichelten Linie, und wird deswegen mit leichtem Eingriff auf die Ideallinie gebracht, den der Fahrer auch als Momente am Lenkrad spürt.

Da es sich bei dem Versuchsträger um ein modifiziertes Fahrzeug mit prototypischem Forschungssystem handelt, sind zusätzliche Vorsichtsmaßnahmen zu treffen. Bei jedem Einsatz des Mentorensystems ist ein erfahrener Versuchingenieur im Fahrzeug. Bei Schulungen erhält der zu trainierende Fahrer vorab eine Aufklärung über Fahrzeugmodifikationen, Trainingsablauf und die zu erwartenden Eindrücke. Um die Schulung mit aktiven Eingriffen zu initiieren, muss eine Startprozedur absolviert werden und das System ist nur so lange aktiv, wie der Versuchingenieur einen Totmannschalter gedrückt hält. Lässt er diesen los, werden jegliche Ansteuerungen von Lenkrad und Gaspedal abgeschaltet und über das Bremssystem

wird mit moderater Verzögerung das Fahrzeug zum Stehen gebracht. Alle Teilsysteme können bei Fehlfunktion vom Versuchsingenieur abgeschaltet werden, um das Fahrzeug sofort in einen seriennahen Zustand zu bringen. Damit dies nicht nötig ist, wird die Ansteuerung von Lenkung und Bremse über einen Zusatzrechner überwacht, der die Kommunikation und damit Eingriffe in die Fahrdynamik unterbinden kann. Damit die Fahrzeuginsassen das Ein- und Ausschalten der Aktoriksteuerung mitbekommen, spielen die Fahrzeuglautsprecher in diesen Fällen eindeutige Sprachausgaben in den Innenraum ein.



Abbildung A.5: Einblendung einer Ideallinie in den Sichtbereich des Fahrers



Abbildung A.6: Visualisierung von Fahrverlauf und erfolgter Fahrunterstützung