Vorausschauende Fahrzeuglängsführung verbrennungsmotorisch und batterie-elektrisch betriebener Fahrzeuge

Predictive Longitudinal Vehicle Control of Internal Combustion Engine and Battery Electric Driven Vehicles

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christian Sohn

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jakob Lukas Andert

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss

Tag der mündlichen Prüfung: 11. September 2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Juniorprofessur für mechatronische Systeme am Verbrennungsmotor unter Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. Jakob Andert.

Herrn Professor Dr.-Ing. Jakob Andert gilt ein besonderer Dank für die Förderung dieser Arbeit sowie für sein stetiges Interesse und seine wertvolle Unterstützung.

Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Koreferates.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen der RWTH Aachen University, des VKA und der FEV Europe GmbH bedanken, die mich insbesondere beim Aufbau der Technik für die Versuchsfahrten unterstützt haben.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, meiner Schwester und meinem Bruder, die durch ihre Fürsorge und Unterstützung zum Erreichen dieses Ziels in besonderer Weise beigetragen haben.

Mein größter Dank gilt meinem Heiland Jesus Christus, der mir die Kraft, das Durchhaltevermögen und die Gedanken zum Verfassen dieser Arbeit geschenkt hat.

S.D.G.

Veröffentlichungen

C. Sohn and J. Andert, "The “Waterfilling Algorithm” – An Efficient Approach for Vehicle Velocity Planning With Varying Velocity Limits," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 10, pp. 10477-10490, Oct. 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3286029.

C. Sohn, J. Andert and D. Jolovic, "An Analysis of the Tradeoff Between Fuel Consumption and Ride Comfort for the Pulse and Glide Driving Strategy," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, pp. 7223-7233, July 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2994467.

C. Sohn, J. Andert and R. N. Nanfah Manfouo, "A Driveability Study on Automated Longitudinal Vehicle Control," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 8, pp. 3273-3280, Aug. 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2925193.

J. Andert, C. Sohn, S. Klein, A. Tönnesmann, J. Oesterdiekhoff, M. Becker, "Influence of sensor and communication setup on electric cam phaser control quality." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019;233(3):687-696. doi:10.1177/0954407017746296

J. Andert, M. Wick, B. Lehrheuer, C. Sohn, T. Albin, S. Pischinger, "Autoregressive modeling of cycle-to-cycle correlations in homogeneous charge compression ignition combustion." *International Journal of Engine Research*. 2018;19(7):790-802. doi:10.1177/1468087417731043

Kurzfassung

Ein automatisiertes Längsführungssystem nimmt dem menschlichen Fahrer die Aufgabe ab, die Fahrzeuggeschwindigkeit zu planen und einzuregeln. Geschicktes Anpassen der Geschwindigkeit an die zu fahrende Strecke, die anderen Verkehrsteilnehmer und die Ampelschaltzeiten kann zu Energieeinsparungen im zweistelligen Prozentbereich führen. Herausfordernd hierbei ist die recheneffiziente Geschwindigkeitsplanung über einen langen Zeithorizont. Bestehende Ansätze basierend auf der Diskreten Dynamischen Programmierung sind entweder rechenintensiv oder suboptimal. Eine weitere Herausforderung beim Längsführungsentwurf ist die gezielte Ausnutzung der Fahrzeugeigenschaften. Vor dem Hintergrund der steigenden Durchdringungsrate von Mildhybridfahrzeugen gewinnt insbesondere der Einsatz von Segeln und Rekuperieren an Bedeutung. Die Segelfunktion bleibt in den meisten Fällen unbenutzt, wenn sie in der Längsführung nicht explizit berücksichtigt wird. Die Mildhybridtechnologie ermöglicht ferner den kraftstoffsparenden Pulse und Glide (PnG) Betrieb, dessen Geschwindigkeitsprofil aus abwechselnden Beschleunigungs- und Segelphasen besteht. Die Kraftstoffersparnisse dieser Fahrstrategie sind bereits mehrfach untersucht worden, allerdings blieb der Aspekt der Kundenakzeptanz bislang unberücksichtigt.

Die Arbeit besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden Fahrkomfort und Kraftstoffersparnis der PnG Strategie eingehend untersucht. Im zweiten Teil wird ein vorausschauendes Längsführungssystem vorgestellt, das die obigen Stellhebel zur Reduktion des Energiebedarfs einschließlich der PnG Strategie berücksichtigt und durch Abschalten von Teilfunktionen sowohl für verbrennungsmotorisch als auch batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge eingesetzt werden kann. Für die Langzeitplanung (LZP) wird ein Algorithmus entwickelt, der den (hinsichtlich des Energiebedarfs am Rad) optimalen Geschwindigkeitsverlauf zum Erreichen der Zielgrünphase der nächsten Lichtsignalanlage mit geringem Rechenaufwand findet und zugleich frei von den aufgezeigten Schwächen der Diskreten Dynamischen Programmierung mit zweidimensionalem Suchraum ist. Der Algorithmus wird mit einer Technik, die das Verhältnis von Segeln zu Rekuperieren der Verzögerungsprofile an die Ampelschaltzeiten anpasst, und einer wirkungsgradgünstigen Anfahrtsplanung auf rote Lichtsignalanlagen kombiniert. Für die Kurzzeitplanung wird ein regelbasierter Ansatz verwendet, der die für die grundlegenden Fahrmanöver bereits bekannten verbrauchsoptimalen Verzögerungsprofile sowie den PnG Betrieb unter Berücksichtigung des Fahrkomforts recheneffizient implementiert.

Das Längsführungssystem wird in einer dynamischen Simulationsumgebung auf einem virtuellen Rundkurs in der Stadt Paderborn für verschiedene Verkehrsdichten validiert. Als Referenz dient ein als modellprädiktive Regelung (MPC) ausgeführtes Längsführungssystem, welches das Fahrzeug durch einen Lösungsraum hindurch navigiert und dabei Beschleunigungen, Verzögerungen und Abweichungen von der Höchstgeschwindigkeit des Zyklus durch eine Kostenfunktion bestraft.

Für das Mildhybridfahrzeug (P0-Hybrid) werden durch Aktivierung der LZP mittlere Kraftstoffersparnisse von ca. $20\,\%$ gegenüber der MPC erzielt, die mit steigender Verkehrsdichte abnehmen. Die hohen Ersparnisse liegen hauptsächlich an der gezielten Ausnutzung der Fahrzeugeigenschaften, insbesondere der Segelfunktion. Der PnG Betrieb in Verbindung mit durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation verbesserter Prädiktion erzielt zusätzliche Ersparnisse von bis zu $3{,}7\,\%$. Für das batterieelektrische Fahrzeug liegen die mittleren Energieersparnisse abhängig von der Verkehrsdichte zwischen $1\,\%$ und $3\,\%$. Der PnG Betrieb bietet hier keine Vorteile und wird deaktiviert. Die Fahrzeit erhöht sich für die betrachteten Fälle gegenüber der MPC um maximal $0{,}6\,\%$.

Abstract

Automated longitudinal control systems undertake the task of planning and adjusting vehicle velocity. Adapting vehicle velocity to route, other road users and switching times of traffic lights can lead to energy savings in the double-digit percentage range. The challenge here is the computationally efficient velocity planning over a long-term horizon. Existing approaches based on discrete dynamic programming are either computationally expensive or suboptimal. Another challenge is the dedicated exploitation of vehicle characteristics in velocity planning. Facing the increasing penetration rate of mild-hybrid electric vehicles, in particular the use of sailing and recuperation increase in importance. In most cases, the sailing function remains unused if not explicitly considered in the longitudinal control design. The mild-hybrid technology also enables the fuel-saving pulse and glide (PnG) strategy, consisting of alternating acceleration and deceleration phases. The fuel savings of this strategy have already been investigated several times; however, the aspect of customer acceptance has been neglected.

The thesis consists of two parts. In the first part, ride comfort and fuel savings of PnG are investigated in detail. The second part presents a predictive longitudinal control system that considers the above levers for reducing energy consumption, including the PnG strategy, and that can be used for both internal combustion engines and battery electric vehicles by switching off specific functions. For long-term planning (LTP), an algorithm is developed that finds the optimal velocity trajectory (in terms of energy demand at the wheels) to reach the target green phase of the next traffic light with little computational effort, and that does not suffer from the drawback of discrete dynamic programming with two-dimensional state space. The algorithm is combined with a technique that adapts the sailing-to-recuperation ratio of deceleration profiles to the switching times of traffic light and an efficient traffic light approach. For short-term planning, a rule-based approach is used that implements the deceleration profiles already known to be optimal for the basic driving maneuvers as well as a PnG operation explicitly considering ride comfort.

The longitudinal control system is evaluated by simulated round trips within the city Paderborn in dynamic traffic scenarios. Reference for evaluation is a longitudinal control system employing model-predictive control (MPC), which navigates the vehicle within a solution space, penalizing acceleration and deceleration maneuvers as well as deviations from a maximum velocity.

For the mild-hybrid vehicle (P0 hybrid), activating the LTP achieves average fuel savings of about $20\,\%$ compared to MPC. The fuel savings decrease with increasing traffic density. The high fuel savings are mainly due to the explicit consideration of vehicle characteristics, especially of the sailing function. PnG operation in combination with car-to-car communication and improved prediction capability achieves additional fuel savings of up to $3.7\,\%$. For the battery electric vehicle, the mean energy savings are between $1\,\%$ and $3\,\%$, depending on traffic density. PnG operation offers no benefits and is disabled. Compared to MPC, travel time increases by a maximum of $0{,}6\,\%$.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik 3

2.1 Einflussgrößen auf den Energiebedarf 3
2.2 Steuerung und Regelung vernetzter und automatisierter Fahrzeuge 5
2.3 Methoden der Geschwindigkeitsplanung 8
2.3.1 Bestehende Ansätze zur Langzeitplanung 9
2.3.2 Bestehende Ansätze zur Kurzzeitplanung 10
2.4 Pulse und Glide Strategie 12
2.5 Zielsetzung 14

3 Grundlagen 15

3.1 Mildhybridtechnologie 15
3.2 Gleichungen der Längsdynamik 16

4 Analyse des Fahrkomforts und Kraftstoffverbrauchs von PnG 17

4.1 Theoretische Herleitung des Verbrauchsvorteils von PnG 17
4.2 Aufbau der Fahrkomfortstudie 20
4.3 Ergebnisse der Fahrkomfortstudie 24
4.3.1 Bewertung der Beschleunigungsphase 24
4.3.2 Bewertung der Übergangsphasen 25
4.3.3 Bewertung der Verzögerungsphase 27
4.3.4 Bewertung des Übergangs von Konstantfahrt nach Beschleunigung 29
4.3.5 Zusammenfassung der Fahrkomfortparameter und Diskussion der Ergebnisse 29
4.4 Wechselbeziehung von Fahrkomfort und Kraftstoffverbrauch der PnG Strategie 31
4.4.1 Aufbau des Simulationsmodells 31
4.4.2 Simulationsergebnisse für das Mildhybridfahrzeug 33
4.4.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse 42

5 Das vorausschauende Längsführungssystem 43

5.1 Anforderungen an die Längsführung 43
5.2 Vorgaben der ISO 15622 44
5.2.1 Wahl von Beschleunigung und Ruck 44
5.2.2 Wahl des Zielabstands 46
5.2.3 Reaktionsfähigkeit der Längsführung 47
5.3 Funktionsarchitektur der Längsführung 48
5.4 Statische Geschwindigkeitsplanung 51

5.5 Langzeitplanung 53
5.5.1 Auswahl der Zielgrünphase 53
5.5.2 Alphaadaption 54
5.5.3 Waterfillingalgorithmus 56
5.5.4 Lichtsignalanlagen-Anfahrtsplanung 61
5.5.5 Waterfillingalgorithmus und Diskrete Dynamische Programmierung im Vergleich 61
5.6 Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung 66
5.6.1 Definition der Zeitlücken und des Abstandsbandes für PnG 68
5.6.2 Zustand Prädiktives ACC 69
5.6.3 Zustand Pulse 77

6 Validierung des Längsführungssystems 80

6.1 Aufbau der Simulationsumgebung 80
6.1.1 Verkehrssimulation in der Übersicht 80
6.1.2 Modellierung der anderen Verkehrsteilnehmer 81
6.1.3 Streckenmodelle des Egofahrzeugs 84
6.2 Beschreibung der Simulationsdurchläufe 86
6.3 Simulationsergebnisse für das Mildhybridfahrzeug 88
6.4 Simulationsergebnisse für das batterieelektrische Fahrzeug 94
6.5 Diskussion der Ergebnisse 98

7 Zusammenfassung und Ausblick 99

8 Anhang 101

8.1 Längsdynamik- und Antriebsstrangparameter 101
8.2 Optimale Parameter der Lv7 Kalibrierung 103
8.3 Sensitivitätsanalyse für den 2,0 l Motor 103
8.4 Herleitung der Zeitdauer für den Waterfillingalgorithmus 104
8.5 Zustände Glide und Rekuperation 106
8.5.1 Zustand Glide 106
8.5.2 Zustand Rekuperation 107
8.6 Schaltzeiten der Lichtsignalanlagen im Rundzyklus 109
8.7 Parameter der Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung 111
8.8 Kostenfunktion und Parameterwahl für das MPC-Längsführungssystem 111

Literaturverzeichnis 113

Abbildungsverzeichnis 123

Tabellenverzeichnis 128

Abkürzungen 129

Formelzeichen 130

1 Einleitung

Vorausschauende Längsführungs-Assistenzsysteme wirken sich positiv auf den Fahrkomfort aus, erhöhen die Sicherheit im Straßenverkehr und senken den zur Fortbewegung nötigen Energiebedarf [1]. Beispiele sind der „ECO Assistent“ von Mercedes Benz [2], der adaptive Fahrassistent von Audi [3] und das „InnoDrive“ System von Porsche [4]. Der „ECO Assistent“ von Mercedes-Benz ermittelt, ob das Fahrzeug beim Loslassen des Fahrpedals idealerweise mit möglichst geringen Fahrwiderständen weiterrollen und damit segeln sollte oder ob das Fahrzeug im Moment besser verzögt und dabei die Rekuperationsstärke anpasst. Der Antriebsstrang wird situationsgerecht geregelt, sobald der Fahrer dem optischen Hinweis „Fuß vom Fahrpedal“ im Kombiinstrument folgt. Der adaptive Fahrassistent von Audi greift auf prädiktive Streckendaten zu und verzögert beispielsweise vor Ortseinfahrten frühzeitig. Das „InnoDrive“ System von Porsche errechnet für die nächsten drei Kilometer die optimalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte sowie Gang- und Segelvorgaben. Fahrzeuge und Geschwindigkeitsbeschränkungen werden von der Radar- und Video-Sensorik erfasst und in die Regelung mit einbezogen.

Durch die Automatisierung der Längsführung wird der nicht unerhebliche Einfluss des menschlichen Fahrers auf den Kraftstoffverbrauch konventionell betriebener Fahrzeuge eliminiert [5–7] und die Nutzung von Vorausschauinformationen bei der Geschwindigkeitsplanung ermöglicht. Ein automatisiertes Längsführungssystem, das die Zufahrt auf Geschwindigkeitsreduktionen und Lichtsignalanlagen (LSA[1]) vorausschauend plant, lässt Kraftstoff- bzw. Energieersparnisse von über $15\,\%$ im realen Stadtverkehr erwarten [8–13]. Bei verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen, die über eine Segelfunktionalität verfügen, können bereits durch gezielten Einsatz von Segeln beim Annähern von Geschwindigkeitsreduktionen Kraftstoffersparnisse von bis zu $10\,\%$ erzielt werden [14, 15]. Vorausschauende Längsführungen bestehen i.d.R. aus einer Lang- und einer Kurzzeitplanung. Eine große Herausforderung bei der Langzeitplanung ist die Entwicklung recheneffizienter Algorithmen, die den energieminimalen Geschwindigkeitsverlauf finden. Eine häufig eingesetzte Lösungsmethode für dieses Optimierungsproblem ist die Diskrete Dynamische Programmierung. Sie findet das globale Optimum, benötigt jedoch inakzeptabel hohe Rechenzeiten für die in der Langzeitplanung verwendeten Zeithorizonte. Die Rechenzeit lässt sich durch Dimensionsreduktion des Suchraums verkürzen [16, 17]. Dies führt allerdings dazu, dass für Streckenabschnitte mit sich ändernder Geschwindigkeitsbeschränkung nur noch suboptimale Lösungen gefunden werden. Es existieren auch alternative regelbasierte Ansätze für die Langzeitplanung [18, 19]. Diese sind allerdings ebenfalls nur auf Streckenabschnitte mit konstanter Geschwindigkeitsbeschränkung anwendbar.

[1] Die Abkürzung LSA wird im Folgenden für Plural und Singular von „Lichtsignalanlage“ verwendet.

Ein weiteres Forschungsgebiet der automatisierten Fahrzeuglängsführung ist der kraftstoffsparende Pulse und Glide (PnG) Betrieb. Für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge, die über eine Segelfunktionalität verfügen, führt der aus aufeinanderfolgenden Beschleunigungs- und Verzögerungsabschnitten bestehende Fahrbetrieb verglichen mit einer Konstantfahrt bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit zu Kraftstoffersparnissen von über $20\,\%$ im städtischen Bereich [20–24]. Die Ersparnisse von PnG nehmen deshalb so hohe Werte an, weil der Fahrkomfort von PnG in den durchgeführten Studien unberücksichtigt blieb. Die verwendeten Beschleunigungsprofile weisen hohe Beschleunigungs- und Ruckwerte auf. Sie führen zwar zu hohen Einsparungen, sind jedoch in der Praxis aufgrund der negativen Auswirkung auf den Fahrkomfort nicht einsetzbar.

Ziel des ersten Teils der Arbeit ist deshalb, einen für den Kunden akzeptablen PnG Betrieb anhand von Probandenstudien zu ermitteln und die Kraftstoffersparnisse von PnG in Abhängigkeit vom Fahrkomfort zu untersuchen. Im zweiten Teil der Arbeit soll ein recheneffizienter Algorithmus für die Langzeitplanung entwickelt werden, der auch für variable Geschwindigkeitsbeschränkungen die gleiche (optimale) Lösung wie die Diskrete Dynamische Programmierung ohne Dimensionsreduzierung findet. In der Kurzzeitplanung soll schließlich neben regelbasierten Vorausschaufunktionen auch der kraftstoffsparende PnG Betrieb unter Berücksichtigung des Fahrkomforts und weiterer Kundenakzeptanzkriterien realisiert werden.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. Kapitel 2 beschreibt die Einflussgrößen auf den Energiebedarf, den Stand der Technik zu automatisierten Längsführungssystemen und die PnG Strategie. Kapitel 3 liefert Grundlagen zur Mildhybridtechnologie und die Gleichungen der Längsdynamik. Kapitel 4 beschreibt den theoretischen Verbrauchsvorteil von PnG, die Fahrkomfortstudie zu PnG und die simulative Analyse der Wechselbeziehung von Verbrauch und Fahrkomfort. Kapitel 5 entwickelt das aus Lang- und Kurzzeitplanung bestehende Längsführungssystem. Die Beschreibung der Verkehrssimulation und die Validierung der Längsführung erfolgen in Kapitel 6. Zusammenfassung und Ausblick liefert Kapitel 7.

2 Stand der Technik

2.1 Einflussgrößen auf den Energiebedarf

Der zur Fortbewegung des Fahrzeugs nötige Bedarf an Energie wird durch die in Abb. 2-1 aufgeführten Größen beeinflusst [25, 26]. Die Einflussgrößen werden im Folgenden erläutert. Auf das Fahrverhalten wird ausführlicher eingegangen.

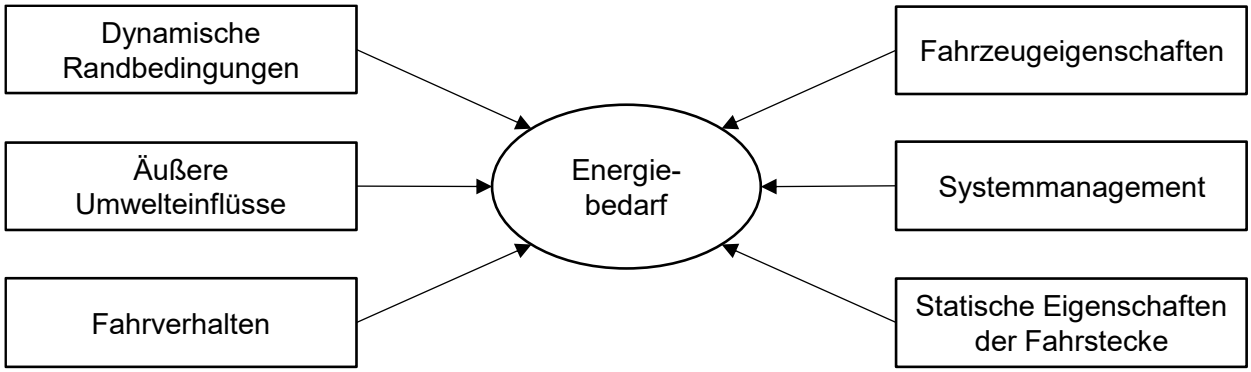


Abb. 2-1: Einflussgrößen auf den Energiebedarf

Die *Fahrzeugeigenschaften* werden durch folgende drei Größen beschrieben: 1) die Eigenschaften der Antriebsstrangkomponenten und deren Nebenaggregate, 2) die Eigenschaften der Bordnetzkomponenten 3) die Aerodynamik der Karosserie, die Bereifung und die Fahrzeugmasse bzw. die rotierenden Massen. Die unter drittens genannten Eigenschaften beeinflussen den Fahrwiderstand unmittelbar. Zu den Eigenschaften des Antriebsstrangs und des Bordnetzes gehören neben der Effizienz der Einzelkomponenten auch die Funktionen, die von Antriebsstrang und Bordnetz bereitgestellt werden, wie z.B. das Segeln mit abgeschaltetem Verbrennungsmotor oder die Möglichkeit der Energierückgewinnung durch Rekuperation.

Das *Systemmanagement* wird mit steigender Fahrzeugvernetzung und der Bereitstellung von prädiktiver Information stetig komplexer. Es umfasst das Antriebsstrangmanagement, insbesondere das Energie- und Thermomanagement [27, 28], des Weiteren den Betrieb der Komponenten der Abgasanlage (als Beispiel sei die vorausschauende Dieselpartikelfilterregeneration genannt [29]), das Management der Nebenaggregate und des Bordnetzes (z.B. des elektrischen Verdichters falls vorhanden) [30].

Die *statischen Eigenschaften der Fahrstrecke* beeinflussen Fahrgeschwindigkeit und Fahrwiderstände. Die Fahrgeschwindigkeit wird durch zulässige Höchstgeschwindigkeiten, Kurvenradien, Stoppschilder, Spurverengungen und Bremsschwellen begrenzt. Die Fahrwiderstände werden durch die Oberflächenbeschaffenheit der Straße und das Steigungsprofil beeinflusst.

Dynamische Randbedingungen sind durch die anderen Verkehrsteilnehmer (VT) bzw. den Verkehr und die Schaltzeiten der LSA gegeben. Auf das Einsparpotential, das bei Kenntnis der Schaltzeiten ausgeschöpft werden kann, wird bei den Ausführungen über das Fahrverhalten eingegangen.

Zu den *äußeren Umwelteinflüssen* zählen die Umgebungstemperatur und die Witterung. Die Umgebungstemperatur beeinflusst die Betriebstemperatur der Fahrzeugkomponenten und deren Wirkungsgrad. Die Wetterlage beeinflusst bei verschlechterten Sichtbedingungen oder Straßenverhältnissen (Eis, Schnee, Niederschlag) indirekt die Wahl der Fahrgeschwindigkeit und über die Straßenverhältnisse den Fahrwiderstand. Des Weiteren haben Umgebungstemperatur und Witterung Einfluss darauf, ob bestimmte Nebenaggregate und elektrische Verbraucher wie Heizung, Klimaanlage und Scheibenwischer aktiv sind [25].

Das *Fahrverhalten* des individuellen Fahrers hat erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf, wie die Probandenstudie von Rumbolz et al. aus dem Jahr 2010 zeigt [31]. Das Ziel der Studie war es, repräsentative, aussagekräftige Durchschnittswerte der internen Leistungsflüsse unter realistischen Bedingungen zu erhalten. Der mittlere Verbrauchseinfluss des Fahrers betrug hierbei $6{,}5\,\%$ bei einer Spannweite von $32\,\%$ bezogen auf den durchschnittlichen Streckenverbrauch. Die Ergebnisse wurden mit Hilfe eines repräsentativen Probandenkollektivs ermittelt. Als Versuchsfahrzeug diente ein ottomotorisch betriebenes Mittelklassefahrzeug, das auf einer repräsentativen Versuchsstrecke im realen Straßenbetrieb bewegt wurde. Die Zusammensetzung der Versuchsstrecke bildete bezüglich der Straßenarten das statistische Nutzungsverhalten in Deutschland ab.

Ob ein Fahrer eine verbrauchsgünstige Fahrweise wählt und wie effizient diese ist, hängt von dessen Wissen, Wollen und Können ab [32]. Zudem beeinflusst die Art des Antriebsstrangs, die Straßenart (Stadt, Überland, Autobahn), das Steigungsprofil und der Verkehr, welche Potentiale durch eine verbrauchsgünstige Fahrweise gehoben werden können. Das Einsparpotential verbrauchsgünstigen Fahrens weist bei rein verbrennungsmotorisch (mit einem Ottomotor) betriebenen Fahrzeugen eine Bandbreite von einigen bis fünfundzwanzig Prozent auf [33, 34]. Boriboonsomsin et al. zeigten, dass bei Umsetzung von qualitativen Ratschlägen wie früheres Schalten oder mäßiges Beschleunigen Kraftstoffersparnisse von bis zu $24\,\%$ erreicht werden können, die durchschnittlichen Ersparnisse jedoch in der Stadt bei $6\,\%$ liegen und bei freier Autobahnfahrt bei $1\,\%$ [33]. Barkenbus trägt mehrere vergangene Studien zusammen und kommt – ohne die Ersparnisse nach Straßenarten aufzuschlüsseln – auf eine durchschnittliche Ersparnis von $5\,\%$, wenn es keine weitere Unterstützung nach initialem Training gibt, und auf $10\,\%$ bei kontinuierlicher Rückmeldung durch den Trainer [34].

Staubach et al. bewerten anhand von Probandenstudien mit Hilfe eines Fahrsimulators die Einsparpotentiale eines Assistenzsystems für das Eco-Fahren, welches mit LSA kommuniziert,

Verkehrsschilder erkennt und daraufhin dem Fahrer Empfehlungen zu Gangwechseln und dem Beschleunigungs-/Verzögerungsverhalten gibt [35]. Die Autoren kommen im städtischen und überländlichen Bereich auf durchschnittliche Kraftstoffersparnisse von $15{,}9\,\%$ bis $18{,}4\,\%$ bei gleichzeitiger Verlängerung der Fahrzeit im städtischen Bereich um $5{,}4\,\%$. Vorangegangene Studien zeigten bereits, dass allein durch die Berücksichtigung der Schaltzeitpunkte von Lichtschaltanlagen und darauf abgestimmter Geschwindigkeitsplanung durchschnittliche Kraftstoffersparnisse von $12\,\%$ bis $14\,\%$ erzielt werden [11, 12].

Aus den vorangegangenen Betrachtungen zum Eco-Fahren lässt sich schlussfolgern, dass ein automatisiertes Längsführungssystem durchschnittliche Kraftstoffersparnisse von mehr als $15\,\%$ im städtischen und überländlichen Bereich erzielen kann, sofern diesem die notwendigen Informationen zur Vorausschau bereitgestellt werden. Mehrere Studien zum Einsparpotential automatisierter Fahrsysteme gehen von noch größeren Kraftstoffersparnissen aus [8–10].

2.2 Steuerung und Regelung vernetzter und automatisierter Fahrzeuge

Ein vernetztes und automatisiertes Fahrzeug (VAF) ist ein Fahrzeug, das die Fähigkeit des automatisierten Fahrens besitzt (Automatisierungsstufe drei und höher nach SAE[2] Standard J3016 [36]) und mit anderen Fahrzeugen und Straßennutzern, der Straßeninfrastruktur und der Cloud kommunizieren kann [37].

Abb. 2-2 stellt die Funktionsarchitektur vernetzter und automatisierter Fahrzeuge basierend auf [37, 38] dar. Die Architektur kategorisiert zwischen Funktionen, die vorzugsweise außerhalb des Fahrzeugs und solchen, die auf dem Fahrzeug gerechnet werden. Zur erst genannten Kategorie gehören die Eco-Streckenplanung, der Eco-Fahren- und Koordinationsblock und das für Hybridfahrzeuge und batterieelektrische Fahrzeuge relevante Planen des Batterieladezustands. Die Berechnungen werden über einen längeren Horizont durchgeführt, sind häufig rechenintensiv und unterliegen keinen strengen Echtzeitanforderungen [37].

Die *Eco-Streckenplanung* bestimmt die energieeffizienteste Route basierend auf den Nutzereingaben und den verfügbaren Karteninformationen wie Maximalgeschwindigkeiten, Steigungsverläufe, Verkehrsflussinformationen und Kreuzungspositionen. Die Position von Tankstellen oder Ladestationen kann auch berücksichtigt werden. Basierend auf den Informationen zu der gewählten Route und den verfügbaren Schaltzeiten der LSA berechnet der *Eco-Fahren- und Koordinationsblock* eine Referenztrajektorie für die Nutzung im Fahrzeug. Anforderungen an die Fahrzeit

[2] SAE ist die Abkürzung für Verband der Automobilingenieure, engl. Society of Automotive Engineers

können hier berücksichtigt werden. Historische Daten können dazu beitragen, die Geschwindigkeitsplanung zu verbessern[3].

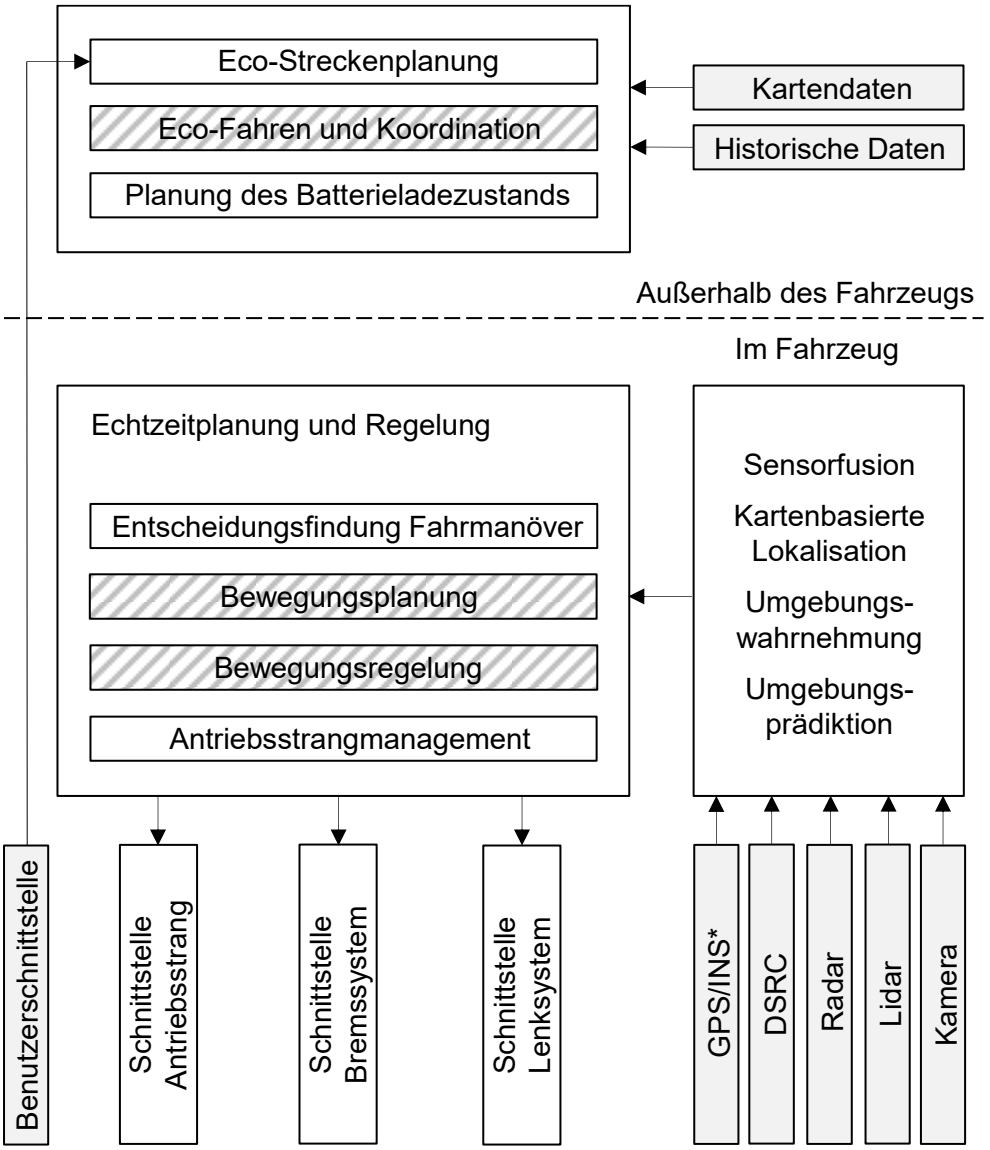


Abb. 2-2: Funktionsarchitektur vernetzter und automatisierter Fahrzeuge [37, 38]

Im Eco-Fahren und Koordinationsblock kann des Weiteren die Kooperation mit anderen VAFs wie beispielsweise die Koordination von Fahrzeugplatoons stattfinden. Basierend auf der Referenztrajektorie kann schließlich die *Planung des Batterieladezustands* durchgeführt werden. Dies ist für Hybridfahrzeuge relevant, um basierend auf der Streckeninformation die Aufteilung zwischen Kraftstoffeinsatz und elektrischer Energie über einen längeren Horizont zu optimieren. Für

[3] Historische Daten können beispielsweise zeigen, dass bestimmte LSA ab gewissen Verkehrsdichten nicht ohne Haltephasen überquert werden können.

batterieelektrische Fahrzeuge kann eine Reichweitenschätzung durchgeführt werden, um den Fahrer zu informieren bzw. alarmieren oder einen Zwischenstopp bei einer Ladestation zu planen. Anstelle der Planung des Batterieladezustands könnte hier für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge die Planung der Partikelfilterregeneration durchgeführt werden. Lösungen, die auf dem Fahrzeug berechnet werden, sind hierfür bereits verfügbar [39].

Zu den Funktionen, die auf dem Fahrzeug gerechnet werden, gehören Algorithmen zur Sensorfusion, Lokalisierung, Umgebungswahrnehmung und Umgebungsprädiktion. Die Ausgänge dieser Funktionen sind Eingänge für die Planung und Durchführung der automatisierten Fahrmanöver, realisiert durch die Blöcke Entscheidungsfindung, Bewegungsplanung, Bewegungsregelung und das Antriebsstrangmanagement. Der Block *Entscheidungsfindung* entscheidet über das durchzuführende Fahrmanöver (wie Spurfolgen, Spurwechseln, Abbiegen oder Einparken). Die Fahrmanöver können mithilfe eines Zustandsautomaten modelliert werden [37]. Die *Bewegungsplanung* berechnet daraufhin eine Trajektorie im Raum als Funktion der Zeit und wird in regelmäßigen Zeitabständen wiederholt (z.B. im $100\,\mathrm{ms}$ Takt [40]). Die *Bewegungsregelung* folgt der vorgegebenen Trajektorie durch Regelung der Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs. Ausgangsgrößen dieses Blocks sind die Antriebs- bzw. Bremskraft zur Regelung der Längsdynamik[4] und die Lenkwinkelposition zur Regelung der Querdynamik. Basierend auf der Antriebs- bzw. Bremskraft und der Fahrgeschwindigkeit berechnet das *Antriebsstrangmanagement* die Gangwahl des Getriebes, die Leistungsanforderung bzw. das Drehmoment für die Verbrennungskraftmaschine (VKM), die Elektromaschine (EM) und ggfs. den elektrischen Verdichter. Ferner wird über den Motor-Aus Betrieb entschieden und das Abgasnachbehandlungssystem möglichst vorausschauend angesteuert. Eine ausführliche Zusammenstellung zur optimalen Drehmomentaufteilung und der überlagerten Langzeitplanung des Batterieladezustands findet sich in [41–43]. Den systematischen Vergleich zwischen bestehenden Ansätzen zum Hybridmanagement führt [44, 45] durch. Auf die Besonderheiten bei der Modellbildung von $48\,\mathrm{V}$ Hybriden für modellprädiktive Regelungen geht [30] ein.

Das in dieser Arbeit entwickelte Längsführungssystem umfasst die in Abb. 2-2 schraffierten Blöcke: das Eco-Fahren, die Bewegungsplanung und die Bewegungsregelung. Die Trajektorie der Bewegungsplanung ist eindimensional (Position über Zeit bzw. Geschwindigkeit über Zeit)[5]. Die Bewegungsplanung kann daher als Geschwindigkeitsplanung und die Bewegungsregelung als Geschwindigkeitsregelung bezeichnet werden. Geschwindigkeitsplanung und -regelung werden in dieser Arbeit gemeinsam realisiert und unter dem Begriff Längsführungsregelung mit

[4] Als Schnittstelle kann alternativ die Beschleunigung verwendet werden. Der Block Antriebsstrangmanagement wird in diesem Fall erweitert und übernimmt die Aufteilung zwischen Antriebs- und Bremskraft.
[5] Der Einfluss der Querdynamik lässt sich im eindimensionalen Fall berücksichtigen, indem die Geschwindigkeit entsprechend der Krümmungsradien des Streckenverlaufs und einer aus Fahrkomfortgründen limitierten Querbeschleunigung begrenzt wird.

Kurzzeitplanung zusammengefasst. Das Eco-Fahren besteht in dieser Arbeit aus der statischen Geschwindigkeitsplanung und der Langzeitgeschwindigkeitsplanung (kurz Langzeitplanung), die in Kap. 5.4 und Kap. 5.5 beschrieben werden. Das Hybridmanagement des Mildhybridfahrzeugs wird regelbasiert ausgeführt; eine Langzeitplanung des Batterieladezustands wird nicht angewandt.

2.3 Methoden der Geschwindigkeitsplanung

Wie im letzten Abschnitt dargestellt, erfolgt die Planung der Fahrzeuggeschwindigkeit zunächst für einen längeren Zeithorizont (Langzeitplanung), wobei dessen Ergebnis in einem zweiten Planungsschritt für einen kürzeren Zeithorizont (Kurzzeitplanung) verwendet wird. Diese Zweiteilung ist nicht notwendig, bietet aber die Möglichkeit, die Langzeitplanung außerhalb des Fahrzeugs zu rechnen. Die Langzeitplanung berücksichtigt Kartendaten, Ampelschaltzeiten und Verkehrsdichteinformationen. Die Kurzzeitplanung berücksichtigt zusätzlich eine Prädiktion der vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer. Unabhängig davon, ob die Geschwindigkeitsplanung über einen langen oder kurzen Zeithorizont gerechnet wird, lässt sie sich durch die in Abb. 2-3 dargestellten Methoden realisieren.

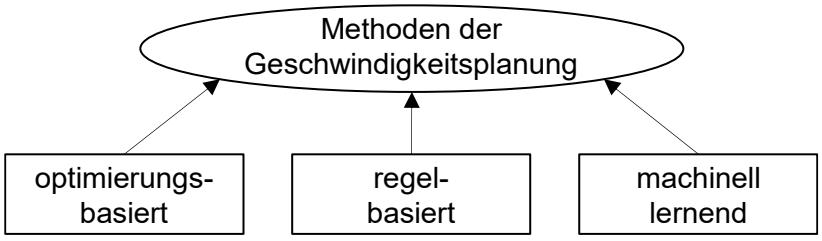


Abb. 2-3: Methoden der Geschwindigkeitsplanung

Optimierungsbasierte Methoden formulieren die Geschwindigkeitsplanung als Optimierungsproblem, bei der eine Kostenfunktion unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen minimiert wird. Als Lösungsverfahren kommen indirekte Verfahren, direkte Verfahren oder Dynamische Programmierung zum Einsatz [25]. *Regelbasierte Methoden* planen die Geschwindigkeit unter Berücksichtigung von vorher definierten Regeln, die bei geschickter Formulierung die gleichen oder ähnliche Geschwindigkeitsverläufe wie optimierungsbasierte Methoden liefern können. *Maschinell lernenden Systeme* vereinen Lang- und Kurzzeitplanung in einem neuronalen Netzwerk; sie werden in [46] genauer beschrieben. Lang- und Kurzzeitplanung müssen nicht mit der gleichen Methode durchgeführt werden. Beispielsweise kann die Langzeitplanung optimierungsbasiert gerechnet werden und die Kurzzeitplanung regelbasiert erfolgen.

Im Folgenden werden optimierungsbasierte und regelbasierte Methoden für die Langzeitplanung und regelbasierte Methoden für die Kurzzeitplanung im Detail vorgestellt.

2.3.1 Bestehende Ansätze zur Langzeitplanung

Die Aufgabe der Langzeitplanung (LZP) ist es, den energieminimalen Geschwindigkeitsverlauf zu finden, der zugleich voranliegende LSA mit möglichst geringem Zeitaufwand überquert.

Das häufig verwendete Lösungsverfahren der Diskreten Dynamischen Programmierung (DDP) findet diesen Geschwindigkeitsverlauf für einen beliebigen Strecken- und Zeitabschnitt. Allerdings müssen hierfür mindestens drei Dimensionen als Zustandsgrößen berücksichtigt werden (Zeit, Position und Geschwindigkeit) [47], was auf einem Arbeitsplatzrechner zu einer Rechenzeit von mehreren zehn Minuten führt. Mehrere Ansätze schlagen daher vor, auf die Dimension Zeit zu verzichten und diese in der Kostenfunktion zu berücksichtigen (siehe z.B. [16, 17]). Dies führt allerdings dazu, dass Optimalität nicht mehr gewährleistet wird, wenn die Maximalgeschwindigkeit im betrachteten Streckenabschnitt nicht konstant ist, was in Abschnitt 5.5.5 an einem Fallbeispiel gezeigt wird.

Wird als Kostenfunktion für das Optimierungsproblem der Energiebedarf am Rad verwendet, besteht der mit DDP berechnete optimale Geschwindigkeitsverlauf aus Abschnitten konstanter Geschwindigkeit, die über Verzögerungs- oder Beschleunigungsabschnitte miteinander verbunden sind. Dieses Wissen lässt sich in regelbasierten Methoden ausnutzen, wie an folgenden Beispielen gezeigt wird. Asadi und Vahidi berechnen in wenigen Schritten eine gemeinsame Geschwindigkeitskonstante, mit der möglichst viele bevorstehende LSA während ihrer frühestmöglich erreichbaren Grünphase überquert werden können [18]. Nunzio et. al. verwenden eine Mischform aus einem regel- und optimierungsbasierten Verfahren, bei dem die Fahrgeschwindigkeit auf dem Wegabschnitt zum Erreichen der nächsten LSA und zwischen zwei LSA als konstant angesetzt wird und die Ankunftszeiten, zu denen die voranliegenden LSA erreicht werden sollen, durch Lösung eines Optimierungsproblems berechnet werden [19]. Die konstante Fahrgeschwindigkeit jedes Abschnitts ist der Quotient aus Weg- zu Zeitdifferenz. Die Quotientenbildung ist allerdings nur valide, solange die Konstantfahrtabschnitte nicht durch Änderungen der Maximalgeschwindigkeit (bedingt durch Bremsschwellen, Kurvenradien oder Veränderungen der Höchstgeschwindigkeit) verformt werden, was in der genannten Studie auch nicht vorkommt, da die Maximalgeschwindigkeit als konstant betrachtet wird. Wenn sich die Maximalgeschwindigkeit über den Streckenverlauf ändert (siehe z.B. die Rundkursfahrt im Validierungsteil, Abb. 6-2), muss die Geschwindigkeitskonstante – wenn sie durch Absenkung der Maximalgeschwindigkeit reduziert wird – mit einer anderen Vorschrift berechnet werden als durch einfache Quotientenbildung.

Das bedeutet, dass sowohl die DDP mit Dimensionsreduzierung als auch alternative regelbasierte Ansätze nur suboptimale Lösungen finden, wenn sich die Maximalgeschwindigkeit im voranliegenden Streckenabschnitt verändert.

2.3.2 Bestehende Ansätze zur Kurzzeitplanung

Im Folgenden wird auf *regelbasierte* Längsführungsalgorithmen mit Kurzzeitplanung bzw. Vorausschaufunktion näher eingegangen. Ausführliche Zusammenstellungen über optimierungsbasierte Ansätze sind bei [25, 48, 49] zu finden.

Regelbasierte Ansätze stellen den Zielabstand bzw. die Zielgeschwindigkeit über einen konventionellen Regler[6] ein [50, 51]. Die Reglerkonstanten können für jede Fahrsituation (z.B. Einscher-/ Ausschervorgänge) individuell kalibriert werden. Der Regler wird um Vorausschaufunktionen erweitert, indem zum richtigen Zeitpunkt ein Schub-, Segel- oder Rekuperationsvorgang eingeleitet wird, sei es auf Grund von streckenbedingten Geschwindigkeitsreduktionen [15, 52, 53], vorausfahrenden Fahrzeugen geringerer Geschwindigkeit [54] oder roten LSA [52, 55]. Streckenbedingte Geschwindigkeitsreduktionen und Anhaltevorgänge vor einer roten LSA werden in der LZP vorab berechnet und Fehlberechnungen in der Kurzzeitplanung korrigiert. Vorausfahrende Fahrzeuge werden in der Kurzzeitplanung berücksichtigt.

Die Zufahrt auf Geschwindigkeitsreduktionen wird bereits in einigen Serienfahrzeugen (ohne Berücksichtigung von Ampelschaltzeiten) vorausschauend geplant und erfolgt mithilfe des Segel-Rekuperation-Profils, engl. coasting recuperation (CR) profile, bei dem zuerst gesegelt und dann rekuperiert wird [15, 53, 55]. Verglichen mit einem reinen Segelprofil stellt das CR-Profil einen Kompromiss zwischen Energieeinsparungen und Fahrzeiteinbußen dar, wobei die Aufteilung zwischen Segel- und Rekuperationsanteil vom Fahrmodus (Eco, Sport, ...) abhängt. Ein adaptiver Ansatz, der den Segelanteil an die Schaltzeiten der voranliegenden LSA anpasst, wird bislang nicht verwendet.

Annäherungsvorgänge an langsamer fahrende Vorderfahrzeuge werden, wenn möglich, als reine Segelvorgänge ausgeführt. Sind allerdings größere Verzögerungswerte erforderlich, weist die Rekuperation-Segel-Strategie, engl. recuperation coasting (RC) strategy, bei der zuerst rekuperiert und dann gesegelt wird, die höchste Energierückgewinnung auf. Dies wurde mit Diskreter Dynamischer Programmierung für einen elektrischen Antriebsstrang gezeigt [54], kann aber auch auf verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge mit Rekuperations- und Segelfunktion übertragen werden. Durch die erhöhte Geschwindigkeitsreduktion in Rekuperation und den darauf folgenden langgestreckten Segelvorgang maximiert die RC-Strategie die Wegstrecke, während der keine Antriebsleistung aufgebracht werden muss. Die CR-Strategie, bei der zuerst gesegelt und dann rekuperiert wird, erreicht den Zielabstand und die Zielgeschwindigkeit zu einem früheren Zeitpunkt als die RC-Strategie. Ab diesem Zeitpunkt muss positive Antriebsleistung aufgebracht werden, um dem Vorderfahrzeug (VF) zu folgen, während das Fahrzeug bei der RC-

[6] Dient die Beschleunigung als Stellgröße, wird zumeist ein P-Regler verwendet. Dient das Drehmoment als Stellgröße, fällt die Wahl auf einen PI-Regler.

Strategie noch segelt. Bei der vorangegangenen Betrachtung ist es nicht relevant, ob das VF aktuell langsamer fährt oder in Zukunft verzögern wird. Zur Einleitung vorausschauender Annäherungsvorgänge ist eine Prädiktion des VFs notwendig, bei der im einfachsten Fall angenommen wird, dass das VF mit konstanter Geschwindigkeit weiterfährt. Die Prädiktion des VF kann durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern verbessert werden [56].

Für einen Anhaltevorgang an einer roten LSA ist die RC-Strategie ebenfalls energieeffizienter als die CR-Strategie, jedoch ist der zeitlich langgestreckte Segelvorgang bei niedrigen Geschwindigkeiten aus Kundensicht nicht akzeptabel [52]. Der Verzögerungsassistent von Continental verwendet daher beim Annäherungsvorgang an eine rote LSA die CR-Strategie [55].

Die Betrachtungen zeigen, dass für die grundlegenden Fahrmanöver (Verzögern vor Geschwindigkeitsreduktionen, Annäherungsvorgänge an eine rote LSA und Annäherungsvorgänge an ein aktuell oder in Zukunft langsamer fahrendes VF) die unter Berücksichtigung des Energiebedarfs und der Kundenakzeptanz optimalen Verzögerungsprofile bekannt sind, sodass hierfür der Einsatz von Längsführungsregelungen, die den Geschwindigkeitsverlauf zur Laufzeit optimieren, nicht zwingend erforderlich ist.

Die Gründe für die Wahl eines regelbasierten Ansatzes für die Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung, bei dem ein konventioneller Abstandsregeltempomat, engl. Adaptive Cruise Control (ACC), um Vorausschaufunktionen erweitert wird, sind die Folgenden:

- Der energieoptimale Geschwindigkeitsverlauf für das Annähern an Geschwindigkeitsreduktionen und LSA wird bereits in der LZP berechnet. Der Längsführungsregler braucht diesem, sofern keine Hindernisse vorhanden sind, lediglich zu folgen.
- Die Form des energieoptimalen Verzögerungsverlaufs beim Annähern an bewegte Vorderobjekte ist bereits bekannt. Es muss nur noch der Zeitpunkt, zu dem ein Segel- oder Rekuperationsvorgang eingeleitet wird, und die Stärke der Rekuperation bestimmt werden.
- Beschleunigungsvorgänge bei schlechtem Wirkungsgrad können vermieden werden, indem die Sollbeschleunigung des konventionellen ACC Reglers entsprechend der Linie des besten Antriebsstrangwirkungsgrads begrenzt wird (vgl. dazu die Analyse zu optimalen Beschleunigungsverläufen von Hülsebusch [57], S.20).
- Der PnG Betrieb kann durch einen regelbasierten Ansatz unmittelbar integriert werden. Hierauf wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Zusätzlich zu den obigen Gründen und der Möglichkeit einer recheneffizienten Implementierung hat ein regelbasierter Ansatz den Vorteil, dass das Verhalten der Längsführung für den Kunden vorhersehbar bzw. nachvollziehbar ist. Man beachte, dass diese Vorgehensweise auch von großen Automobilherstellern verfolgt wird [15, 53, 55].

2.4 Pulse und Glide Strategie

Die optimale Fahrstrategie zur Minimierung des Energiebedarfs am Rad bei freier Fahrt ist das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit [58]. Soll hingegen der Kraftstoffverbrauch (KSV) verbrennungsmotorisch betriebener Fahrzeuge minimiert werden, so ist die optimale Fahrstrategie ein periodischer Geschwindigkeitsverlauf[7], der aus aufeinanderfolgenden Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen besteht (siehe Abb. 2-4), bezeichnet als Pulse und Glide in vorhergehenden Studien [20, 59]. Während der Pulsphase folgt das Fahrzeug einem vorgegebenen Beschleunigungsprofil, sodass die VKM und das Getriebe bei höheren Lasten und besseren Wirkungsgraden betrieben werden. Während der Glidephase verzögert das Fahrzeug entweder mit geschleppter oder entkoppelter VKM. Der entkoppelte Betrieb wird aus Komfort- und Verbrauchsgründen bevorzugt. Im entkoppelten Betrieb wird zwischen Segeln im Leerlauf (SLL) und Segeln mit abgeschaltetem Verbrennungsmotor (SAV) unterschieden, wobei der SAV Betrieb die Verbrauchseinsparungen von PnG erhöht.

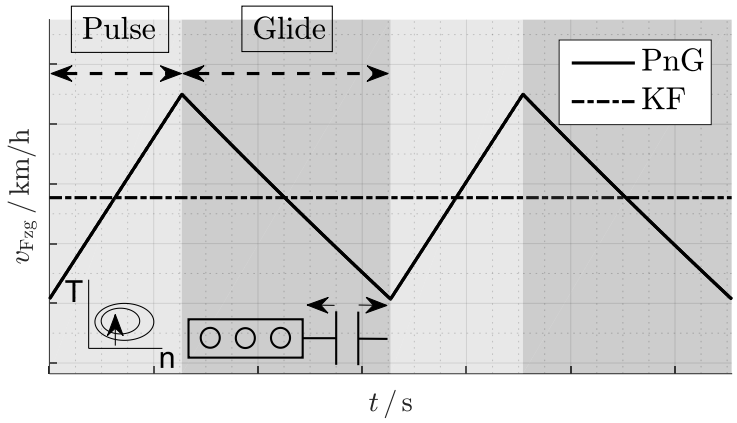


Abb. 2-4: Vergleich von PnG und Konstantfahrt (KF)

Vorhergehende Studien über PnG haben gemeinsam, dass die VKM während der Pulsphase entlang der Last-Drehzahlkurve des geringsten spezifischen Kraftstoffverbrauchs betrieben wird, sei es in Kombination mit einem stufenlosen Getriebe [20–22] oder mit einem Stufengetriebe [23, 24]. Allerdings ist diese Form des PnG Betriebs aufgrund der hohen Beschleunigungswerte und plötzlichen Beschleunigungswechsel und des damit verbundenen inakzeptablen Fahrkomforts in der Praxis nicht einsetzbar [60]. Der Aspekt des Fahrkomforts wurde in vorhergehenden Studien vernachlässigt, sodass sich die Frage stellt, wie das Beschleunigungsprofil zu wählen ist, um einen PnG Betrieb mit ausreichend hohem Fahrkomfort zu gewährleisten. Im nächsten Schritt ist zu klären, ob bei Einhaltung gewisser Fahrkomfortgrenzen weiterhin Kraftstoffersparnisse gegenüber KF erzielt werden.

[7] Dies gilt für einen weiten Geschwindigkeitsbereich, dessen obere Grenze den Wert $100\ \mathrm{km/h}$ je nach Fahrzeugeigenschaften übersteigen kann. Oberhalb dieses Bereichs ist Konstantfahrt wieder optimal.

Zur Bewertung des Fahrkomforts wird in Kap. 4 eine Probandenstudie zu PnG durchgeführt. Das Geschwindigkeitsprofil von PnG lässt sich durch einige wenige Parameter beschreiben. Auf Grundlage der Bewertungen werden Schwellwerte bestimmt, die die Parameter zur Einhaltung eines bestimmten Fahrkomforts nicht überschreiten dürfen. Die Schwellwerte werden anschließend verwendet, um die Wechselbeziehung von Fahrkomfort und Kraftstoffersparnissen von PnG simulativ zu bestimmen.

In vorangegangen Studien wurde PnG nebst freier Fahrt auch für Folgefahrten mit einem vorausfahrenden Fahrzeug eingesetzt [22, 24]. Die Implementierung in [24] beschränkt sich auf Folgefahrten ohne Bremsvorgänge. Es wird nach Glide (Pulse) gewechselt, wenn der prädizierte Abstandsverlauf bei einem Wechsel nach Glide (Pulse) den prädizierten Verlauf des Mindestabstands (Maximalabstands) zum VF unterschreitet (überschreitet) bzw. tangiert. Dieser Ansatz wird auch in [22] verwendet, jedoch wird zusätzlich die Reibungsbremse betätigt, wenn vorherzusehen ist, dass der Mindestabstand in Segeln moderat unterschritten wird. Die Ansätze werden in dieser Arbeit weiterverfolgt, um PnG auch für Folgefahrten zu realisieren.

Für die ganzheitliche Einbettung von PnG in die automatisierte Längsführung müssen weitere Anforderungen erfüllt werden:

- PnG muss durch das System oder den Fahrer deaktiviert werden können, ohne dabei gleichzeitig vorausschauende Segelvorgänge zu deaktivieren.
- PnG muss unterbunden werden, wenn während der Glidephase durch gegebene Randbedingungen / Beschränkungen nicht ausreichend lange gesegelt werden kann (weil z.B. das erlaubte Geschwindigkeitsband zu klein ist) oder das Fahrzeug aufgrund erhöhter Fahrwiderstände zu stark verzögert.
- PnG muss selbstständig eingeleitet werden, wenn die Bedingungen dazu erfüllt sind.
- PnG muss unterbunden werden, wenn aufgrund des PnG Betriebs die ausgewählte Grünphase nicht erreichbar ist (die mittlere Geschwindigkeit von PnG ist schließlich stets geringer als die zulässige Höchstgeschwindigkeit).
- Für die obere und untere Abstandsgrenze müssen Toleranzen eingeführt werden, um Prädiktions- oder Sensorungenauigkeiten entgegenzuwirken.
- Die Anforderungen an den Fahrkomfort müssen berücksichtigt werden.

Der PnG Betrieb kann durch einen regelbasierten Ansatz unmittelbar integriert werden, da die Bedingungen für den Wechsel von Pulse nach Glide und umgekehrt als Regeln vorliegen.

2.5 Zielsetzung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Forschungslücken im Bereich der Geschwindigkeitsplanung und der PnG Strategie aufgezeigt. Die Forschungslücken werden in dieser Arbeit durch folgende Zielsetzungen geschlossen (siehe Tab. 2-1).

Stand der Technik	Zielsetzung
Die DDP mit 3D Suchraum ist rechenintensiv. Die DDP mit 2D Suchraum ist suboptimal im Falle sich ändernder Maximalgeschwindigkeit. Alternative regelbasierte Ansätze sind nicht für sich ändernde Maximalgeschwindigkeit konzipiert.	Die Entwicklung eines echtzeitfähigen Algorithmus für die LZP, der auch bei Änderungen der Maximalgeschwindigkeit den Geschwindigkeitsverlauf findet, der die nächste LSA zu einem vorgegebenen Zeitpunkt erreicht und dabei den Energiebedarf am Rad minimiert. Anschließende Erweiterung des Algorithmus, um die Wirkungsgradeigenschaften der VKM zu berücksichtigen.
Die Zufahrt auf Geschwindigkeitsreduktionen erfolgt bei regelbasierten Ansätzen mit einem festen Verhältnis von Segeln zu Rekuperieren.	Entwicklung eines Algorithmus, der das Verhältnis von Segeln zu Rekuperieren an die Schaltzeiten der nächsten LSA anpasst.
Das Geschwindigkeitsprofil von PnG ist für einen kraftstoffminimalen Fahrbetrieb ausgelegt. Der Fahrkomfort von PnG wird vernachlässigt.	Identifizierung eines kundenorientierten PnG Betriebs. Untersuchung der Wechselbeziehung von Fahrkomfort und Kraftstoffverbrauch.
Es existieren rudimentäre Ansätze zur Automatisierung des PnG Betriebs.	Ganzheitliche Einbettung des PnG Betriebs in die Kurzzeitplanung.

Tab. 2-1: Stand der Technik und Zielsetzungen zum Schließen der Forschungslücken in der vorliegenden Arbeit

3 Grundlagen

3.1 Mildhybridtechnologie

Getrieben durch die immer strengeren gesetzlichen Vorgaben zur Emissionsreduzierung unternimmt die Automobilindustrie große Bemühungen, hocheffiziente und schadstoffarme Verbrennungskraftmaschinen zu entwickeln. Die getroffenen Maßnahmen umfassen Reibungsoptimierungen [61], Verbesserungen des Brennverfahrens [62], das Rightsizing [63, 64], und in einigen Fällen den Einsatz von Zylinderabschaltung [65], variabler Verdichtung [66] und elektrifizierter Aufladung [67]. Des Weiteren wird die Elektrifizierung von Nebenaggregaten wie der Wasserpumpe [68], des Klimakompressors [69] und vereinzelt auch des Nockenwellenverstellers [70–72] vorangetrieben.

Die Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren reichen allerdings nicht aus, um die gesetzlichen Zielvorgaben für die spezifischen CO_2 Emissionen für die Jahre ab 2021 zu erreichen, weshalb die Automobilindustrie u.a. die Elektrifizierung des Antriebsstrangs vorantreibt [73]. Das gute Kosten- zu Nutzenverhältnis der Mildhybridtechnologie [74] hat dazu geführt, dass die Mildhybridisierung des Antriebsstrangs und zwar überwiegend in Verbindung mit Ottomotoren den Weg in die Serie gefunden hat und im Produktportfolio der meisten großen Automobilhersteller zu finden ist. Hier seien beispielhaft die Veröffentlichungen von Mercedes Benz und Volvo genannt [65, 75]. Die verwendete Spannungslage von $48\,\mathrm{V}$ hat gegenüber Hochvolt (HV) den Vorteil, dass die kostspieligen HV-Sicherheitsvorkehrungen entfallen [76, 77]. Zunächst kommt maßgeblich ein riemengetriebener Startergenerator (RSG) in der P0 Topologie und für Fahrzeuge mit sechs und mehr Zylindern auch ein integrierter Startergenerator in der P1 Topologie zum Einsatz (siehe z.B. [65, 75]). In einem nächsten Schritt (insbesondere ab dem Jahr 2025) werden PX-Hybride mit $X > 1$ die Serienproduktion erreichen [73]. Die Parallelhybridtopologien unterscheiden sich hinsichtlich der Einbauposition der EM und sind in Abb. 3-1 dargestellt. Der 12V Starter wird zur Absicherung des Kaltstarts häufig mit verbaut. Für reine P3/P4 Topologien, die nicht mit P0/P1 kombiniert werden, ist er allerdings zwingend erforderlich, um die VKM auch im Stand starten zu können. Die ausgegraute Kupplung kommt bei P2 Topologien zum Einsatz, um die Batterie im Stand laden zu können.

Die Mildhybridtechnologie stellt die gleichen Funktionalitäten wie die Vollhybridtechnologie bereit: Lastpunktverschiebung, Rekuperieren, Boosten, SAV und bei PX-Hybriden mit $X > 1$ auch das elektrische Fahren [78, 79].

SAV wird bereits von Serienfahrzeugen mit einem $12\,\mathrm{V}$ Dual Bordnetz und riemengetriebenem Startergenerator [80] oder konventionellem Starter [81] bereitgestellt. Im Vergleich zur $12\,\mathrm{V}$ Technologie verkürzt die $48\,\mathrm{V}$ Hybridtechnolgie die Dauer eines Wiederstarts und erhöht dessen Fahrkomfort. Für eine weiterführende Betrachtung zu Mildhybridsystemen sei auf [79] verwiesen.

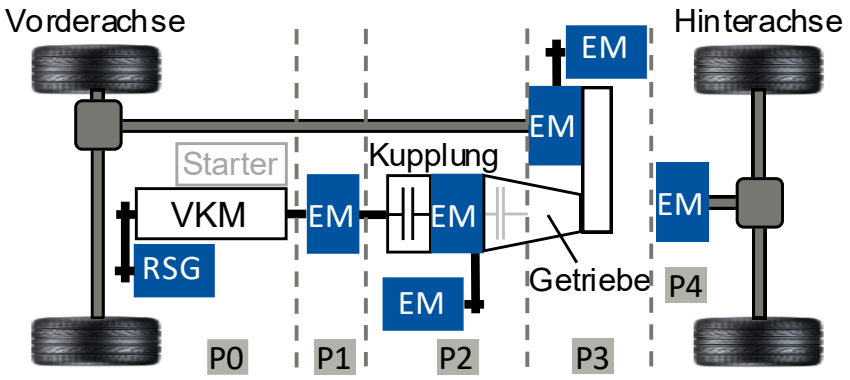


Abb. 3-1: Definition der Hybridtopologien P0-P4

3.2 Gleichungen der Längsdynamik

Die Längsdynamikgleichungen werden in der Arbeit wiederholt verwendet und im Folgenden wiedergegeben. Die Fahrzeugbeschleunigung berechnet sich für P0-P2 Hybride wie folgt:

$$a_{\mathrm{Fzg}} = \frac{1}{\lambda \cdot m_{\mathrm{Fzg}}} \cdot \left(-F_{\mathrm{W}} + \frac{\eta_{\mathrm{Getr}} \eta_{\mathrm{Diff}} i_{\mathrm{Diff}} i_{\mathrm{Getr}}}{r_{\mathrm{Rad}}} \cdot (M_{\mathrm{VKM}} + M_{\mathrm{EM}}) \right), \tag{1}$$

wobei m_{Fzg} die Fahrzeugmasse, λ den Massenfaktor nach Gl. (3), F_{W} die Fahrwiderstandskraft, η_{Getr} den Getriebewirkungsgrad, η_{Diff} den Differentialgetriebewirkungsgrad, i_{Getr} die Getriebeübersetzung, i_{Diff} die Differentialgetriebeübersetzung, r_{Rad} den dynamischen Radradius, M_{VKM} das Drehmoment der VKM und M_{EM} das Drehmoment der EM bezeichnen.

Fahrwiderstandskraft und Massenfaktor berechnen sich wie folgt:

$$F_{\mathrm{W}} = \left(\sin(\alpha) + \left(f_0 + v_{\mathrm{Fzg}} \cdot f_1\right) \cos(\alpha)\right) \cdot m_{\mathrm{Fzg}} \cdot g + \frac{1}{2} \cdot c_{\mathrm{W}} \cdot A_{\mathrm{Fzg}} \cdot \rho_{\mathrm{L}} \cdot v_{\mathrm{Fzg}}^2 \tag{2}$$

und

$$\lambda = 1 + 4 \cdot \frac{J_{\mathrm{äq}}}{r_{\mathrm{Rad}}^2 \cdot m_{\mathrm{Fzg}}}, \tag{3}$$

wobei α den Steigungswinkel der Straße, f_0 und f_1 die Faktoren des Rollwiderstands, g die Gravitationskonstante, c_{W} den Widerstandsbeiwert, A_{Fzg} die Stirnfläche des Fahrzeugs, ρ_{L} die Luftdichte, v_{Fzg} die Fahrzeuggeschwindigkeit und $J_{\mathrm{äq}}$ das auf das Rad bezogene äquivalente Trägheitsmoment der rotierenden Massen bezeichnen. Die Drehzahl der VKM berechnet sich wie folgt:

$$n_{\mathrm{VKM}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{\mathrm{Rad}}} \cdot i_{\mathrm{Getr}} i_{\mathrm{Diff}} \cdot v_{\mathrm{Fzg}}\,. \tag{4}$$

4 Analyse des Fahrkomforts und Kraftstoffverbrauchs von PnG

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst der Verbrauchsvorteil von PnG theoretisch hergeleitet. Anschließend wird der Fahrkomfort von PnG anhand einer Probandenstudie bewertet und abschließend die Wechselbeziehung von Kraftstoffverbrauch und Fahrkomfort simulativ ermittelt.

4.1 Theoretische Herleitung des Verbrauchsvorteils von PnG

Der Verbrauchsvorteil von PnG kann bei Vernachlässigung des Bordnetzverbrauchs wie folgt berechnet werden. Der Kraftstoffverbrauch pro gefahrene Strecke wird für die KF Strategie durch die Gleichung

$$\frac{m_{\mathrm{B,KF}}}{s_{\mathrm{KF}}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{B,KF}}}{v_{\mathrm{KF}}} = \frac{P_{\mathrm{Rad,KF}}}{v_{\mathrm{KF}} \cdot \eta_{\mathrm{VKM,KF}} \cdot \eta_{\mathrm{Getr,KF}} \cdot \eta_{\mathrm{Diff,KF}} \cdot H_{\mathrm{u}}} \tag{5}$$

beschrieben, wobei $\dot{m}_{\mathrm{B,KF}}$ den Kraftstoffmassenstrom, v_{KF} die konstante Geschwindigkeit, $P_{\mathrm{Rad,KF}}$ die Leistung am Rad, $\eta_{\mathrm{VKM,KF}}$, $\eta_{\mathrm{Getr,KF}}$ und $\eta_{\mathrm{Diff,KF}}$ den Wirkungsgrad der VKM, des Getriebes und des Differentialgetriebes und H_{u} den unteren Heizwert des Kraftstoffs bezeichnen. Die Leistung am Rad berechnet sich mit der Fahrwiderstandskraft F_{W} aus Gl. (2) durch die Gleichung

$$P_{\mathrm{Rad}} = \left(F_{\mathrm{W}} + \lambda \cdot m_{\mathrm{Fzg}} \cdot a\right) \cdot v. \tag{6}$$

Der Kraftstoffverbrauch der PnG Strategie pro gefahrene Strecke lautet wie folgt:

$$\frac{m_{\mathrm{B,PnG}}}{s_{\mathrm{PnG}}} = \frac{1}{\int_0^{t_{\mathrm{PnG}}} v \,\mathrm{d}t} \cdot \int_0^{t_{\mathrm{Puls}}} \frac{P_{\mathrm{Rad}}}{\eta_{\mathrm{VKM}} \cdot \eta_{\mathrm{Getr}} \cdot \eta_{\mathrm{Diff}} \cdot H_{\mathrm{u}}} \mathrm{d}t + \frac{m_{\mathrm{B,zus}}}{s_{\mathrm{PnG}}}, \tag{7}$$

wobei t_{PnG} das Ende eines vollständigen PnG Zyklus (der PnG Zyklus startet bei $0\,\mathrm{s}$ mit der Pulsphase), t_{Puls} das Ende der Pulsphase[8] und $\frac{m_{\mathrm{B,zus}}}{s_{\mathrm{PnG}}}$ die während der Glidephase aufgewendete Kraftstoffmasse pro während des PnG Zyklus zurückgelegte Distanz bezeichnen. Letztere berechnet sich wie folgt:

$$\frac{m_{\mathrm{B,zus}}}{s_{\mathrm{PnG}}} = \begin{cases} \dfrac{m_{\mathrm{B,Start}}}{\int_0^{t_{\mathrm{PnG}}} v \,\mathrm{d}t}, & \mathrm{SAV} \\ \dfrac{\dot{m}_{\mathrm{B,LL}} \cdot (t_{\mathrm{PnG}} - t_{\mathrm{Puls}})}{\int_0^{t_{\mathrm{PnG}}} v \,\mathrm{d}t}, & \mathrm{SLL} \end{cases}, \tag{8}$$

wobei $m_{\mathrm{B,Start}}$ die beim Wiederstart eingesetzte Kraftstoffmasse und $\dot{m}_{\mathrm{B,LL}}$ den Kraftstoffmassenstrom im Leerlauf bezeichnen. Werden die Wirkungsgrade der VKM, des Getriebes und des Differentialgetriebes während der Pulsphase durch ihre Mittelwerte

[8] Die Pulsphase schließt die Übergangsphasen mit ein.

$$\bar{\eta}_{\mathrm{VKM,PnG}} := \frac{1}{t_{\mathrm{Puls}}} \cdot \int_0^{t_{\mathrm{Puls}}} \eta_{\mathrm{VKM}}\, \mathrm{d}t\,, \tag{9}$$

$$\bar{\eta}_{\mathrm{Getr,PnG}} := \frac{1}{t_{\mathrm{Puls}}} \cdot \int_0^{t_{\mathrm{Puls}}} \eta_{\mathrm{Getr}}\, \mathrm{d}t \tag{10}$$

und

$$\bar{\eta}_{\mathrm{Diff,PnG}} := \frac{1}{t_{\mathrm{Puls}}} \cdot \int_0^{t_{\mathrm{Puls}}} \eta_{\mathrm{Diff}}\, \mathrm{d}t \tag{11}$$

angenähert, ergibt sich folgende Näherungsformel:

$$\frac{m_{\mathrm{B,PnG}}}{s_{\mathrm{PnG}}} \approx \frac{1}{\frac{1}{t_{\mathrm{PnG}}}\int_0^{t_{\mathrm{PnG}}} v\, \mathrm{d}t} \cdot \frac{1}{\bar{\eta}_{\mathrm{VKM,PnG}} \cdot \bar{\eta}_{\mathrm{Getr,PnG}} \cdot \bar{\eta}_{\mathrm{Diff,PnG}}\, H_{\mathrm{u}}} \cdot \left(\frac{1}{t_{\mathrm{PnG}}} \int_0^{t_{\mathrm{Puls}}} P_{\mathrm{Rad}}\, \mathrm{d}t\right) + \frac{m_{\mathrm{B,zus}}}{s_{\mathrm{PnG}}} \tag{12}$$

$$= \frac{1}{v_{\mathrm{m}} \cdot \bar{\eta}_{\mathrm{VKM,PnG}} \cdot \bar{\eta}_{\mathrm{Getr,PnG}} \cdot \bar{\eta}_{\mathrm{Diff,PnG}} \cdot H_{\mathrm{u}}} \cdot \bar{P}_{\mathrm{Rad,PnG}} + \frac{m_{\mathrm{B,zus}}}{s_{\mathrm{PnG}}}\,, \tag{13}$$

wobei v_{m} die mittlere Geschwindigkeit von PnG und $\bar{P}_{\mathrm{Rad,PnG}}$ die mittlere Leistung am Rad bezeichnen. Gleichung (13) gilt nur für den Fall, dass während der Glidephase gesegelt wird, da nur in diesem Fall die Leistung am Rad während der Glidephase verschwindet. Die Näherungsformel (12) ist umso zuverlässiger, je weniger die Wirkungsgradverläufe während der Pulsphase von ihrem Mittelwert abweichen. Die Näherung sollte daher nicht angewendet werden, wenn die Pulsphase langanhaltende Übergangsphasen zwischen Verzögerung und Beschleunigung aufweist. Wird nun die mittlere Geschwindigkeit von PnG gleich der von KF gesetzt, folgt mit Gl. (5) und (13) für das Verhältnis der Kraftstoffverbräuche die Beziehung

$$\frac{m_{\mathrm{B,PnG}}/s_{\mathrm{PnG}}}{m_{\mathrm{B,KF}}/s_{\mathrm{KF}}} \approx \left(\frac{\bar{P}_{\mathrm{Rad,PnG}}}{P_{\mathrm{Rad,KF}}}\right)\left(\frac{\eta_{\mathrm{VKM,KF}}}{\bar{\eta}_{\mathrm{VKM,PnG}}}\right)\left(\frac{\eta_{\mathrm{Getr,KF}}}{\bar{\eta}_{\mathrm{Getr,PnG}}}\right)\left(\frac{\eta_{\mathrm{Diff,KF}}}{\bar{\eta}_{\mathrm{Diff,PnG}}}\right) + \frac{m_{\mathrm{B,zus}}/s_{\mathrm{PnG}}}{m_{\mathrm{B,KF}}/s_{\mathrm{KF}}}. \tag{14}$$

Der Term $\bar{P}_{\mathrm{Rad,PnG}}/P_{\mathrm{Rad,KF}}$ ist stets größer oder gleich eins, da KF die optimale Lösung zur Minimierung des Energiebedarfs am Rad darstellt [58]. PnG ist nur dann vorteilhaft, wenn der Wirkungsgradanstieg des Antriebsstrangs den energetischen Nachteil von PnG gegenüber KF sowie den additiven Term in Gl. (14) überkompensiert. Der Leistungsbedarf am Rad der PnG Strategie hängt von dem Verlauf der Beschleunigungstrajektorie $a(t)$ und der mittleren Geschwindigkeit v_{m} ab. Wird die Beschleunigung während der Pulsphase als konstant angenommen, ist der Leistungsbedarf nur noch eine Funktion von v_{m} und der Differenz zwischen maximaler und minimaler Geschwindigkeit des PnG Profils Δv. Abb. 4-1 und Abb. 4-2 zeigen den Anstieg des Leistungsbedarfs von PnG gegenüber KF als Funktion von v_{m} und Δv. Während der Pulsphase ist die Beschleunigung konstant ($a_{\mathrm{Fzg}} = 0{,}3\,\mathrm{m/s^2}$), während der Glidephase wird gesegelt. Der Anstieg des Leistungsbedarfs konvergiert mit steigender mittlerer Geschwindigkeit gegen Null und steigt quadratisch mit der Differenzgeschwindigkeit an. Für $\Delta v \leq 15\,\mathrm{km/h}$ und $v_{\mathrm{m}} \geq 30\,\mathrm{km/h}$ ist der

Anstieg stets kleiner als 1,07 % (siehe Abb. 4-2). Zur Berechnung des Leistungsbedarfs wurden die in Tab. 8-1 aufgeführten Fahrzeugparameter verwendet.

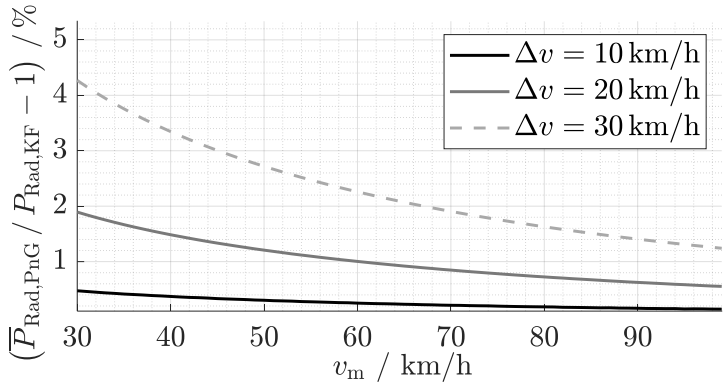


Abb. 4-1: Anstieg des Leistungsbedarfs am Rad von PnG gegenüber KF als Funktion der mittleren Geschwindigkeit

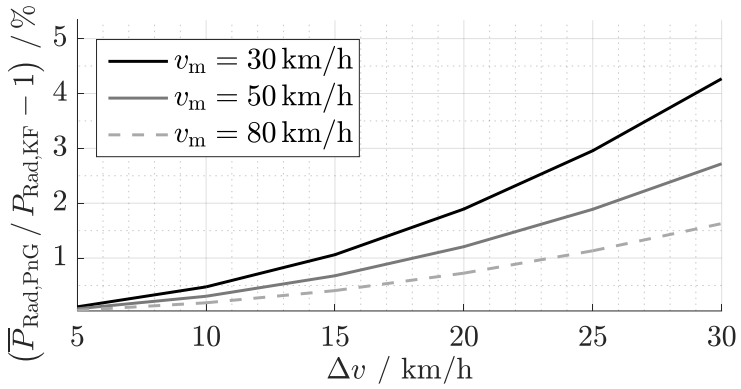


Abb. 4-2: Anstieg der Leistungsbedarfs am Rad von PnG gegenüber KF als Funktion der Differenzgeschwindigkeit

Abb. 4-3 und Abb. 4-4 zeigen die Verbesserungen des VKM- und des Getriebewirkungsgrads, wenn bei einer Fahrgeschwindigkeit von $30\,\mathrm{km/h}$ der Lastpunkt durch moderates Beschleunigen mit $a_{\mathrm{Fzg}} = 0{,}3\,\mathrm{m/s^2}$ gegenüber dem Lastpunkt von KF angehoben wird. In dem dargestellten Fall wird dadurch der Wirkungsgrad der VKM um $24\,\%$, der Wirkungsgrad des Getriebes um $21\,\%$ und der aus beiden Werten berechnete Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs um $40\,\%$ angehoben (das Differentialgetriebe wurde in der Betrachtung vernachlässigt). Erfolgt der Lastwechsel beim Übergang von Pulse nach Glide und umgekehrt instantan, nimmt die mittlere Wirkungsgradverbesserung, die in Gl. (14) eingeht, einen ähnlichen Wert an. Der Einbau von zeitlich ausgedehnten Übergangsphasen, die zur Verbesserung des Fahrkomforts erforderlich sind, führt dazu, dass bei den Lastwechseln Bereiche mit geringerem Wirkungsgrad durchfahren werden und folglich die Wirkungsgradverbesserung geringere Werte annimmt.

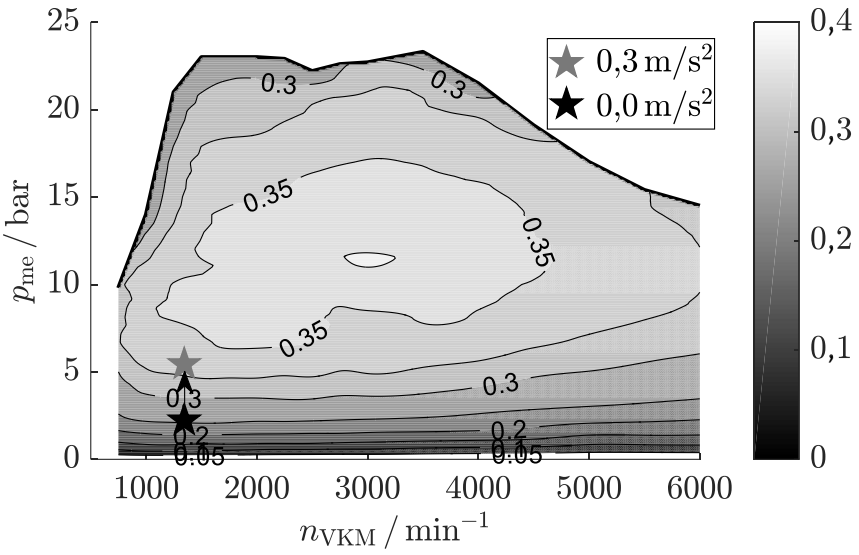


Abb. 4-3: Wirkungsgradkennfeld eines aufgeladenen Ottomotors mit $1{,}2\,\mathrm{l}$ *Hubvolumen. Die Betriebspunkte sind für zwei Beschleunigungswerte bei* $v_{\mathrm{Fzg}} = 30\,\mathrm{km/h}$ *im 4. Gang eingezeichnet.*

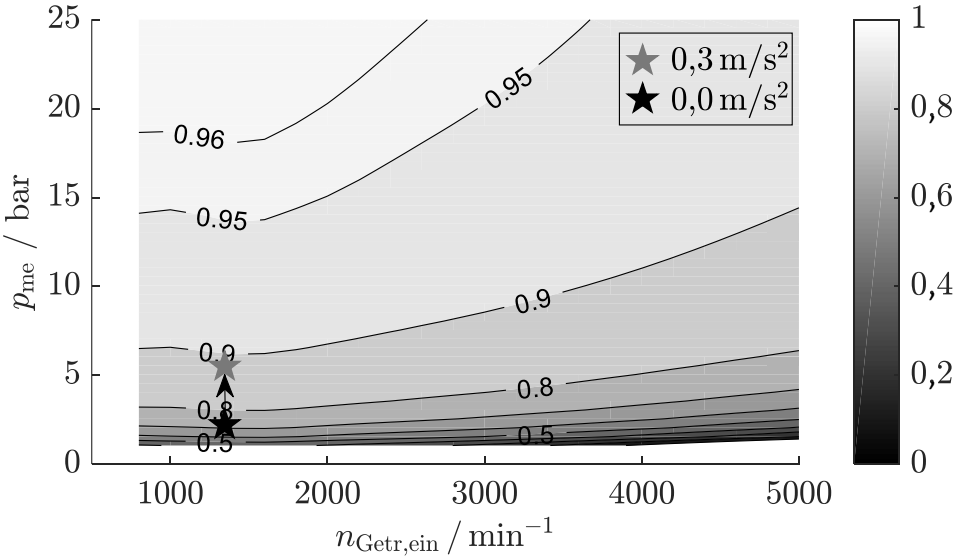


Abb. 4-4: Wirkungsgradkennfeld eines 8 Gang Automatikgetriebes im 4. Gang mit eingezeichneten Betriebspunkten für zwei Beschleunigungswerte bei $v_{\mathrm{Fzg}} = 30\,\mathrm{km/h}$

4.2 Aufbau der Fahrkomfortstudie

Die Zielsetzung dieses Abschnitts ist die Bewertung des Fahrkomforts von PnG anhand eines Notensystems von eins bis zehn (siehe Tab. 4-1). Es finden sich in der Literatur mehrere Notensysteme. Es seien hier die Notensysteme von eins bis fünf [82, 83], null bis zehn [84] und eins bis zehn [85, 86] genannt, wobei sich das Notensystem von eins bis zehn im SAE Standard j1441 etabliert hat [86].

Note	Erklärung
10	Nicht merkbar sogar für trainierte Evaluatoren
9	Merkbar nur für trainierte Evaluatoren
8	Merkbar nur für skeptische Kunden
7	Merkbar für alle Kunden
6	Störend für einige Kunden
5	Störend für alle Kunden
4	Bewertet als Fehlfunktion von allen Kunden
3	Beklagt als schwere Fehlfunktion von allen Kunden
2	Eingeschränkter Betrieb
1	Kein Betrieb möglich

Tab. 4-1: Notensystem für die Bewertung des Fahrkomforts

Anstelle der abrupten Wechsel, die in früheren Arbeiten zu PnG verwendet wurden [20–24, 60], werden nun zeitlich ausgedehnte Übergangsphasen zwischen Beschleunigung und Verzögerung und umgekehrt eingefügt (siehe die grau hinterlegten Bereiche in Abb. 4-5). Es entstehen vier Phasen: Beschleunigungsphase (1), Übergangsphase von Beschleunigung nach Verzögerung (2), Verzögerungsphase (3) und Übergangsphase von Verzögerung nach Beschleunigung (4).

Die Testfahrten wurden mit einem elektrischen Fahrzeug (BMW i3) durchgeführt, um den Einfluss der verbrennungsmotorisch induzierten Vibrationen auf die Fahrkomfortbewertung zu eliminieren. Ursprünglich wurde ein verbrennungsmotorisch betriebenes D-segment Fahrzeug (Audi A4) mit der Leerlaufsegelfunktion verwendet. Dieses Fahrzeug ermöglichte einen sanften PnG Betrieb und die Phasen (1)-(3) konnten mit vernachlässigbarem Einfluss der Motorvibrationen bewertet werden. Jedoch war die Gangwahl des Fahrzeugs nicht für den PnG Betrieb kalibriert, sodass der hohe Zielgang nach Austritt aus Segeln (initiiert durch leichte Betätigung des Gaspedals) zu merklichen Motorvibrationen führte und die Bewertung von Phase (4) beeinflusste. Motorvibrationen sollten allerdings nicht Gegenstand der Bewertung sein, sodass die Verwendung eines elektrischen Fahrzeugs notwendig war.

Der Fahrkomfort der einzelnen Phasen wurde von Versuchspersonen entsprechend dem Notensystem aus Tab. 4-1 bewertet. Die Mehrheit der zehn Testpersonen, die in der Studie teilnahmen, hatte keinen technischen Hintergrund. Pro Testfahrt saßen drei Testpersonen im Fahrzeug und bewerteten das gleiche Szenario (ohne Absprache) getrennt voneinander. Zur Bewertung des Szenarios wurde der Median der drei Bewertungen gebildet.

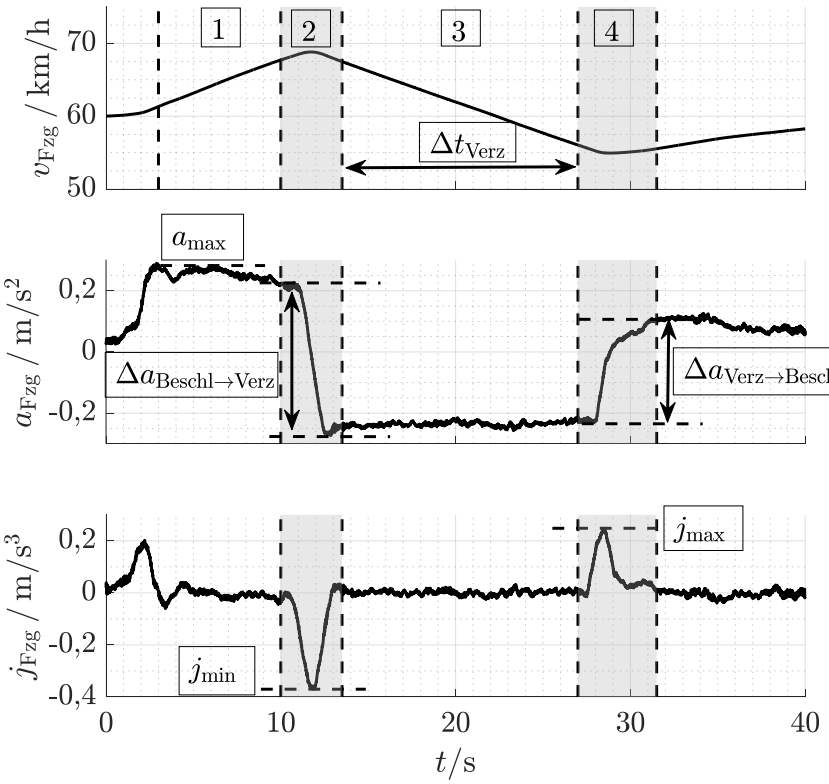


Abb. 4-5: Geschwindigkeitsprofil von PnG und seine Ableitungen Beschleunigung und Ruck

Die Längsbeschleunigung wurde mit einem Beschleunigungssensor von Kistler gemessen, der an der inneren Beifahrersitzschiene befestigt war. Abb. 4-6 zeigt die Messausrüstung. Der Ruck wird aus dem Beschleunigungssignal berechnet; die Geschwindigkeit wird separat erfasst.

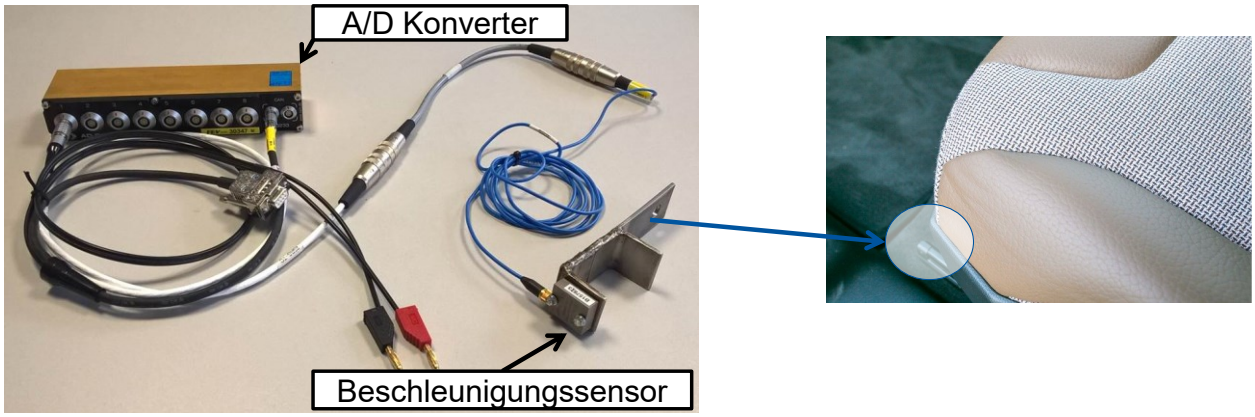


Abb. 4-6: Messausrüstung zur Erfassung der Fahrzeuglängsbeschleunigung

Die vier Phasen sind durch folgende Parameter charakterisiert (siehe Abb. 4-5):

- Maximale Beschleunigung $a_{\max}$ (Beschleunigungsphase)
- Dauer der Verzögerung Δt_{Verz} (Verzögerungsphase)
- Minimaler und maximaler Ruck, $j_{\min}$ und $j_{\max}$, und die Beschleunigungsdifferenz $\Delta a_{\mathrm{Beschl}\rightarrow\mathrm{Verz}}$ und $\Delta a_{\mathrm{Verz}\rightarrow\mathrm{Beschl}}$ (Übergangsphasen)

Die Größe $\Delta a_{\mathrm{Beschl}\rightarrow\mathrm{Verz}}$ ist die Differenz zwischen dem Beschleunigungswert am Ende und dem zu Beginn der Übergangsphase von Beschleunigung nach Verzögerung. Idealerweise ist die Beschleunigung zu Beginn der Übergangsphase identisch mit der maximalen Beschleunigung während der Beschleunigungsphase. Bei den Fahrversuchen unterscheiden sich die beiden Werte (siehe Abb. 4-5), da das Gaspedal manuell betätigt wird. Am Ende der Übergangsphase beginnt das Fahrzeug zu segeln. Die Verzögerung während der Segelphase ergibt sich aus den Fahrwiderständen des Fahrzeugs. Man beachte, dass die Dauer der Übergangsphase in obiger Parameterliste nicht enthalten ist, da sie mit dem Verhältnis von Beschleunigungsdifferenz zu minimalem / maximalem Ruck korreliert und daher keine zusätzliche Informationsquelle darstellt.

Die Person, welche die Testfahrten durchführt, variiert die genannten Parameter (durch manuelle Betätigung des Gaspedals). Es wird stets nur eine Phase pro Testszenario durchfahren und bewertet, um den Testprozess für die Probanden zu vereinfachen und den Fokus auf eine Phase zu erhöhen. Der Versuchsleiter erklärt den Probanden zunächst, was in der jeweiligen Phase zu beachten ist bzw. was sie wahrnehmen können. Beispielsweise können die Probanden während dem Wechsel von Verzögerung nach Beschleunigung in den Sitz gedrückt werden. Das Bewertungsschema (siehe Tab. 4-1) wird im Detail besprochen. Skeptische Kunden werden hierbei als solche definiert, die auf das Verhalten des automatisierten Systems fokussiert sind. Die Probanden wurden angehalten, die Note acht zu vergeben, wenn sie schließen, dass das Szenario nur von kritischen Kunden bemerkbar ist[9]. Die Wahl des Medians der Probandenbewertungen stellt sicher, dass das Szenario als eine Acht bewertet wird, wenn mindestens zwei der drei Probanden dafür stimmen. Zu Beginn des Tests werden die Probanden aufgefordert, die Augen zu schließen bis das Ende des Tests signalisiert wird. Anschließend notieren die Probanden ihre Bewertung, ohne miteinander zu reden.

Die Studie hat zum Ziel, Schwellwerte für eine Fahrkomfortkalibrierung zu ermitteln, dessen Fahrkomfort der Note acht entspricht, im Folgenden kurz als Niveau 8 (engl. level 8 (Lv8)) Kalibrierung

[9] Eine ähnliche Vorgehensweise bei der Bewertung wurde bei [84] angewandt, wo jeder Proband angeleitet war, leichte Fahrzeugoszillationen als solche zu bewerten, wenn er der Meinung ist, dass sie von einem signifikanten Anteil an Fahrern wahrgenommen werden. Anstelle eines signifikanten Anteils wird bei der Vergabe der Note acht nach einem geringen Anteil an Fahrern, nämlich skeptischen Kunden gefragt.

bezeichnet. Es wird sich aber im Nachhinein zeigen, dass die aufgestellte Datenbasis umfangreich genug ist, um auch Schwellwerte für eine Lv7 Kalibrierung anzugeben.

4.3 Ergebnisse der Fahrkomfortstudie

4.3.1 Bewertung der Beschleunigungsphase

Die Bewertung der Beschleunigungsphase wird für unterschiedliche Beschleunigungswerte $a_{\max}$ und Geschwindigkeiten v_{Fzg}, bei denen die Beschleunigungsphase startet, durchgeführt. Abb. 4-7 zeigt die getesteten Kombinationen $(a_{\max}, v_{\mathrm{Fzg}})$ zusammen mit ihren Bewertungen.

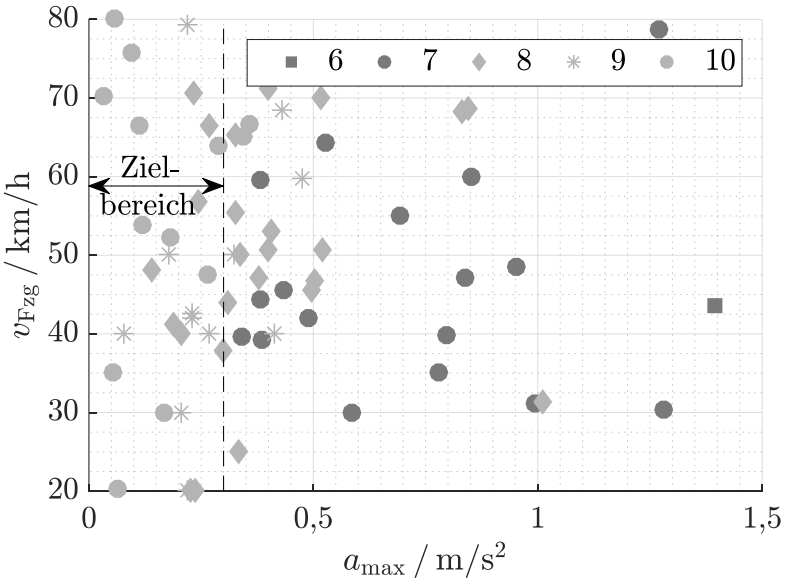


Abb. 4-7: Bewertung der Beschleunigungsphase für unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten und Beschleunigungen

Insgesamt wurden 73 Kombinationen getestet. Die Bewertungen reichen von Lv6, störend für einige Kunden, bis Lv10, nicht merkbar sogar für trainierte Evaluatoren. Wie durch die gestrichelte Linie angedeutet, wird unterhalb von $a_{\max} = 0{,}3\,\mathrm{m/s^2}$ keine Kombination als Lv7 oder schlechter bewertet. Folglich wird unterhalb dieses Schwellwerts eine Lv8 Kalibrierung erreicht. Ein Schwellwert für eine Lv7 Kalibrierung lässt sich nicht mit Bestimmtheit angeben, da der Parameterraum oberhalb von $a_{\max} = 1\,\mathrm{m/s^2}$ spärlich gefüllt ist. Allerdings kann festgehalten werden, dass es unterhalb von $a_{\max} = 1\,\mathrm{m/s^2}$ keine Kombination mit einer Lv6 Bewertung oder schlechter gibt und dass bei $a_{\max} = 1{,}4\,\mathrm{m/s^2}$ eine Kombination als Lv6 bewertet wurde. Die Schwelle für eine Lv7 Kalibrierung liegt folglich im Bereich $a_{\max} = 1\,\mathrm{m/s^2}$ bis $a_{\max} = 1{,}4\,\mathrm{m/s^2}$ und wird für nachfolgende Untersuchungen auf den konservativen Wert $a_{\max} = 1{,}0\,\mathrm{m/s^2}$ gelegt.

4.3.2 Bewertung der Übergangsphasen

Die Testszenarien für den Übergang von Beschleunigung nach Verzögerung und umgekehrt spannen einen dreidimensionalen Parameterraum mit den Achsen Geschwindigkeit, Beschleunigungsdifferenz und Ruck auf. Für die graphische Darstellung wird die Dimension der Geschwindigkeit auf die anderen beiden Dimensionen projiziert. Abb. 4-8 zeigt die getesteten Kombinationen für den Übergang von Beschleunigung nach Verzögerung.

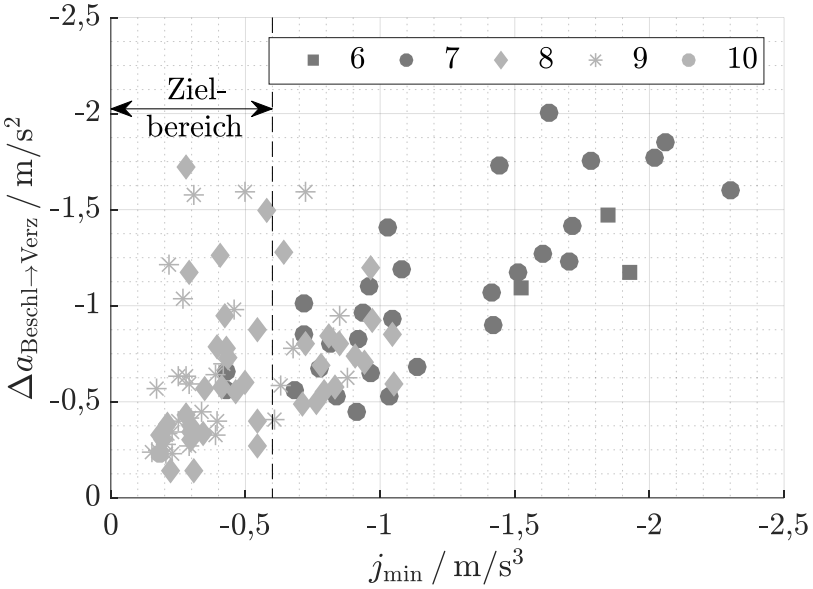


Abb. 4-8: Bewertung des Übergangs von Beschleunigung nach Verzögerung

Insgesamt wurden 109 Kombinationen getestet. Die Achsen stellen den minimalen Ruck und die Beschleunigungsdifferenz entsprechend Abb. 4-5 dar. Kombinationen mit geringem absolutem Ruck, $|j_{\min}| < 0{,}4\,\mathrm{m/s^3}$, werden als Lv8 oder besser bewertet – unabhängig von der Beschleunigungsdifferenz. Etwas unterhalb dieser Schwelle bei $(-0{,}425\,\mathrm{m/s^3}, -0{,}55\,\mathrm{m/s^2})$ und $(-0{,}425\,\mathrm{m/s^3}, -0{,}65\,\mathrm{m/s^2})$ treten zwei Lv7 Bewertungen auf, die als Ausreißer betrachtet werden können, da eine Vielzahl benachbarter Kombinationen als Lv8 oder Lv9 bewertet werden. Weitere Lv7 Bewertungen treten für Kombinationen mit absoluten Ruckwerten größer als $|j_{\min}| = 0{,}6\,\mathrm{m/s^3}$ auf. Werden die genannten zwei Kombinationen als Ausreißer betrachtet, dann wird eine Lv8 Kalibrierung erreicht, wenn der Absolutwert des Rucks unterhalb von $|j_{\min}| = 0{,}6\,\mathrm{m/s^3}$ bleibt. Eine Lv7 Kalibrierung wird für Absolutwerte kleiner als $|j_{\min}| = 1{,}5\,\mathrm{m/s^3}$ erreicht.

Von den 109 getesteten Kombinationen liegen 53 zwischen $v_{\mathrm{Fzg}} = 30\,\mathrm{km/h}$ und $v_{\mathrm{Fzg}} = 50\,\mathrm{km/h}$ und 56 zwischen $v_{\mathrm{Fzg}} = 50\,\mathrm{km/h}$ und $v_{\mathrm{Fzg}} = 95\,\mathrm{km/h}$. Um den Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit zu untersuchen, werden die Bewertungen dieser beiden Geschwindigkeitsbereiche in Abb. 4-9 getrennt dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit einen schwachen Einfluss auf den Schwellwert der Lv8 Kalibrierung hat, da die Differenz der Schwellwerte

nur $0{,}075\,\mathrm{m/s^3}$ beträgt. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit wird deshalb vernachlässigt und der oben identifizierte Schwellwert der Lv8 Kalibrierung von $j_{\min} = -0{,}6\,\mathrm{m/s^3}$ verwendet.

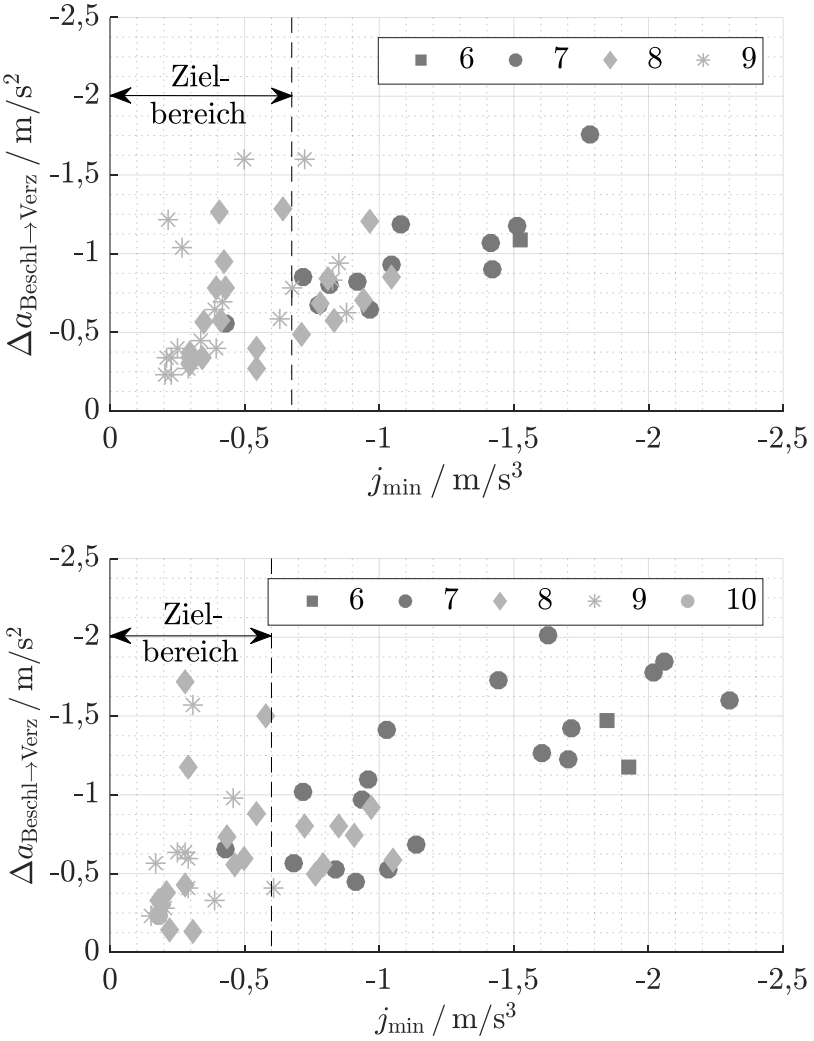


Abb. 4-9: Bewertung des Übergangs von Beschleunigung nach Verzögerung für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche: $30\,\mathrm{km/h} \leq v_{\mathrm{Fzg}} \leq 50\,\mathrm{km/h}$ *(oben);* $50\,\mathrm{km/h} \leq v_{\mathrm{Fzg}} \leq 95\,\mathrm{km/h}$ *(unten)*

Abb. 4-10 stellt die getesteten Kombinationen für den Übergang von Verzögerung nach Beschleunigung dar. Insgesamt wurden 55 Kombinationen bei verschiedenen Fahrzeuggeschwindigkeiten getestet. Lv7 Bewertungen beginnen oberhalb von $j_{\max} = 0{,}4\,\mathrm{m/s^3}$. Eine Lv7 Bewertung tritt auch bei $(0{,}3\,\mathrm{m/s^3}, 0{,}73\,\mathrm{m/s^2})$ auf, jedoch muss diese Kombination nicht betrachtet werden, da Beschleunigungsdifferenzen größer als $\Delta a_{\mathrm{Verz}\rightarrow\mathrm{Beschl}} = 0{,}6\,\mathrm{m/s^2}$ bei einer Lv8 Kalibrierung nicht vorkommen. Dies ergibt sich daraus, dass die Beschleunigung während der Beschleunigungsphase auf $a_{\max} = 0{,}3\,\mathrm{m/s^2}$ begrenzt wird (siehe Abschnitt 4.3.1) und der Geschwindigkeitsbereich des PnG Betriebs so festgelegt wird, dass die Beschleunigung während der Verzögerungsphase $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}3\,\mathrm{m/s^2}$ nicht unterschreitet. Letztere wird durch das Segelverhalten des Fahrzeugs bestimmt. Im Fall des Testfahrzeugs ist unter dieser Bedingung ein PnG Betrieb bis $v_{\mathrm{Fzg}} =$

$100\,\mathrm{km/h}$ möglich[10]. Eine Lv7 Kalibrierung wird erreicht, wenn der Ruck geringer als $j_{\max} = 0{,}6\,\mathrm{m/s^3}$ ist.

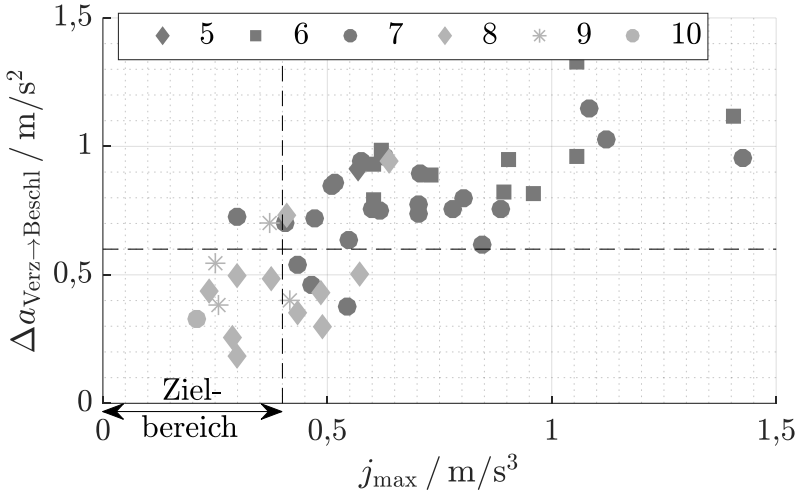


Abb. 4-10: Bewertung des Übergangs von Verzögerung nach Beschleunigung

4.3.3 Bewertung der Verzögerungsphase

Die Verzögerungsphase wird für unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten v_{Start}, bei denen die Verzögerungsphase beginnt, und unterschiedliche Zeitdauern Δt_{Verz} bewertet, wodurch ein zweidimensionaler Parameterraum aufgespannt wird. Insgesamt wurden 130 Kombinationen getestet. Die Dauer der Verzögerungsphase Δt_{Verz} ist in Abb. 4-5 definiert. Während der Verzögerungsphase befindet sich der Gangwahlhebel in der Stellung neutral, d.h. das Fahrzeug segelt. Wie eingangs erwähnt schließen die Probanden ihre Augen während der gesamten Phase.

Abb. 4-11 zeigt die Ergebnisse der Bewertungen. Für einige Kombinationen wurden Wiederholungsversuche durchgeführt, die bei abweichender Bewertung als solche erkennbar werden. Auf der x-Achse ist die Anfangsgeschwindigkeit aufgetragen; auf der y-Achse wird die Zeitdauer der Verzögerungsphase variiert. Wird die Zeitdauer konstant gehalten, dann wird die Verzögerungsphase umso besser bewertet, je höher die Anfangsgeschwindigkeit ist. Lang andauernde Verzögerungsphasen ($\Delta t_{\mathrm{Verz}} = 40\,\mathrm{s}$) werden bei geringen Anfangsgeschwindigkeiten als störend wahrgenommen. Um eine Lv8 Kalibrierung zu erreichen, muss die Zeitdauer unterhalb eines von der Anfangsgeschwindigkeit abhängigen Schwellwerts gehalten werden (siehe die gestrichelte Linie in Abb. 4-11). Hierbei wurde die Lv7 Bewertung bei $(40\,\mathrm{km/h}, 13\,\mathrm{s})$ als Ausreißer betrachtet, da die Kombinationen links und rechts davon als Lv8 bewertet werden. Die Begrenzungskurve für die Lv7 Kalibrierung lässt sich analog ermitteln, wobei für den oberen Geschwindigkeitsbereich

[10] Die Geschwindigkeitsangabe bezieht sich nicht auf die mittlere Geschwindigkeit, sondern auf die Geschwindigkeit bei Eintritt in Segeln; die mittlere Geschwindigkeit ist geringer als diese.

noch offen ist, ob auch länger als $\Delta t_{\mathrm{Verz}} = 30\,\mathrm{s}$ verzögert werden kann, da hierfür zu wenige Messpunkte vorliegen. Allerdings sind Verzögerungswerte größer als $\Delta t_{\mathrm{Verz}} = 30\,s$ für die praktische PnG Implementierung irrelevant, da die Differenzgeschwindigkeiten inakzeptabel groß werden.

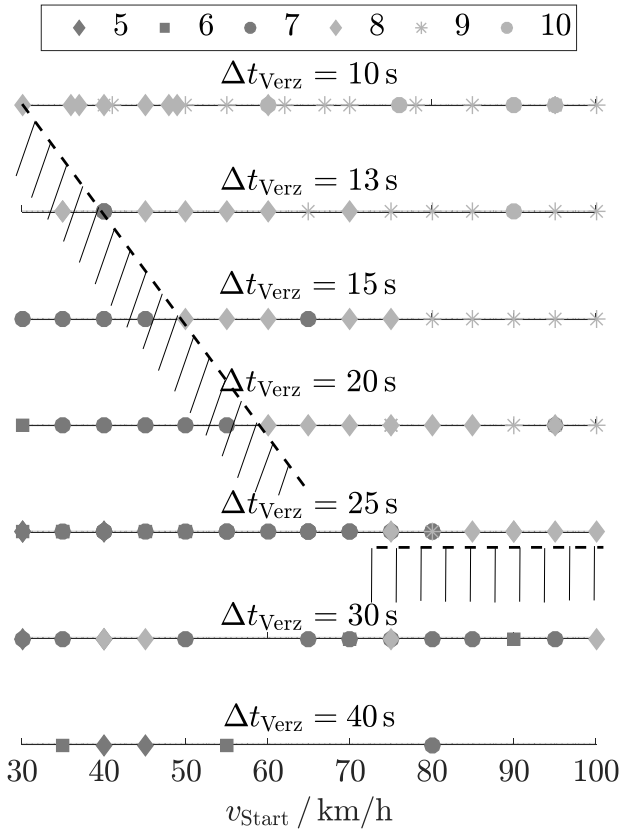


Abb. 4-11: Bewertung der Verzögerungsphase für unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten v_{Start}, bei denen die Verzögerungsphase beginnt, und Zeitdauern der Phase Δt_{Verz}

Die Begrenzungskurven sind in Abb. 4-12 zusammengefasst. Die Verzögerungsdauer ist unterhalb der Begrenzungen zu halten. Zur Begrenzungskurve der Lv7 Kalibrierung ist anzumerken, dass die Lv6 Bewertung bei $(90\,\mathrm{km/h}, 30\,\mathrm{s})$ als Ausreißer gewertet wurde. Die Kombination $(40\,\mathrm{km/h}, 25\,\mathrm{s})$ wurde als Lv7 und in einem Wiederholungsversuch als Lv5 bewertet, sodass bei $v_{\mathrm{Start}} = 40\,\mathrm{km/h}$ nicht mit $\Delta t_{\mathrm{Verz}} = 25\,\mathrm{s}$ verzögert werden sollte, was in der Lv7 Begrenzungskurve berücksichtigt wird.

Man beachte, dass die Bewertungen der Verzögerungsphase von der Ausrollkurve des Testfahrzeugs abhängen und nur für Fahrzeuge mit ähnlichem Segelverhalten gültig sind. Weicht die Ausrollkurve zu stark von der des Testfahrzeugs ab, sollten die Bewertungen wiederholt werden.

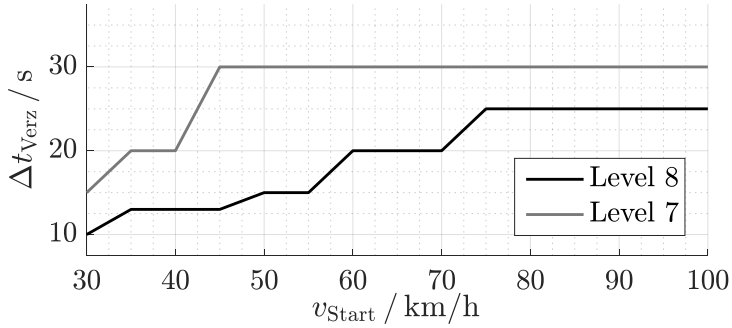


Abb. 4-12: Begrenzungskurven für eine Lv7 und Lv8 Kalibrierung

4.3.4 Bewertung des Übergangs von Konstantfahrt nach Beschleunigung

Der Übergang von Konstantfahrt nach Beschleunigung tritt auf, wenn die PnG Operation aus der Konstantfahrt heraus durch eine Pulsphase eingeleitet wird. Abb. 4-13 zeigt die Bewertungen dieses Übergangs. Insgesamt wurden 33 Kombinationen getestet. Eine Lv8 Kalibrierung wird erreicht, wenn der Ruck kleiner als $j_{\max} = 0{,}45\,\mathrm{m/s^3}$ bleibt. Dieses Ergebnis ähnelt dem Ergebnis des Übergangs von Verzögerung nach Beschleunigung, bei dem der Ruck einen Wert von $j_{\max} = 0{,}4\,\mathrm{m/s^3}$ nicht überschreiten darf.

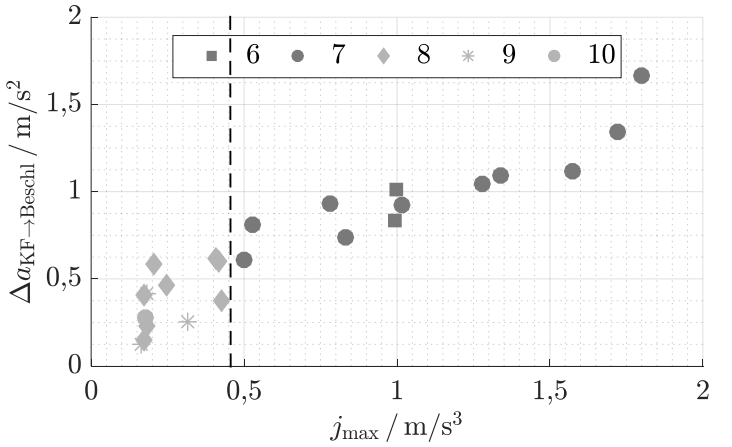


Abb. 4-13: Bewertung des Übergangs von Konstantfahrt nach Beschleunigung

4.3.5 Zusammenfassung der Fahrkomfortparameter und Diskussion der Ergebnisse

Die in den vorangegangen Abschnitten identifizierten Schwellwerte für eine Lv8 und Lv7 Kalibrierung werden in Tab. 4-2 zusammengefasst. Die neu eingeführte Größe $j_{\mathrm{total}} = j_{\max} - j_{\min}$ wird an späterer Stelle bei der Sensitvitätsanalyse des Kraftstoffverbrauchs benötigt (siehe Abschnitt 4.4.2.3). Die Begrenzungskurven für die Dauer der Verzögerungsphase sind durch Abb. 4-12 gegeben.

	$a_{\max}$ / $\mathrm{m/s^2}$	$j_{\min}$ / $\mathrm{m/s^3}$	$j_{\max}$ / $\mathrm{m/s^3}$	j_{total} / $\mathrm{m/s^3}$
Lv8 Kalibrierung	0,3	$-0{,}6$	0,4	1,0
Lv7 Kalibrierung	1	$-1{,}5$	0,6	2,1

Tab. 4-2: Zusammenfassung der Schwellwerte zum Erreichen einer Lv8 und Lv7 Kalibrierung

Bellem führte 2018 eine Probandenstudie zur Bewertung der Form von Beschleunigungsverläufen durch [87]. Dabei wurden drei Formen bewertet (siehe Abb. 4-14): 1. hoher Ruck zu Beginn und niedriger Ruck gegen Ende, 2. niedriger Ruck zu Beginn und hoher Ruck gegen Ende, 3. mittlerer Ruck zu Beginn und mittlerer Ruck gegen Ende. Die Studie ergab, dass der symmetrische Beschleunigungsverlauf (Form 3) gegenüber den anderen beiden Verläufen vorgezogen wird. Interessant ist nun, dass Form 2 der Form 1 vorgezogen wird. Der betraglich höhere Ruckwert ist in den Fällen 1 und 2 gleich groß, jedoch ist er in Fall 1 positiv und in Fall 2 negativ. Der hohe negative Ruck wird also eher toleriert als der hohe positive Ruck. Dies entspricht der Beobachtung, dass die Schwellwerte für den minimalen Ruck betragsmäßig größer sind als die für den maximalen Ruck (siehe Tab. 4-2).

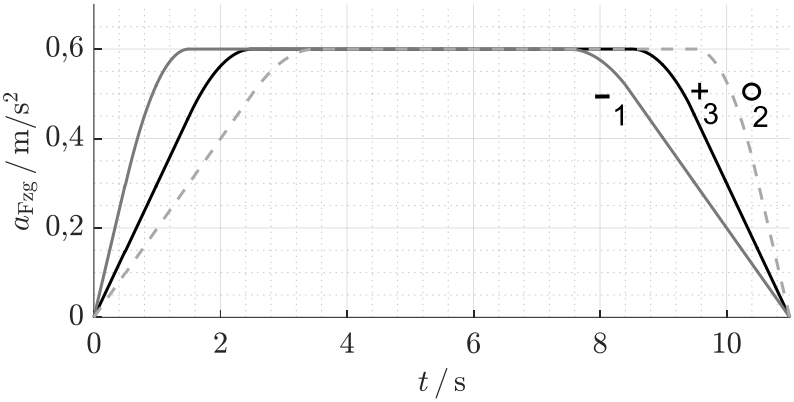


Abb. 4-14: Ergebnis der Bewertung von drei verschiedenen Beschleunigungsverläufen nach [87]. Die Bewertungen sind mit $-$, o und $+$ gekennzeichnet.

Hinsichtlich der ermittelten Schwellwerte für den maximalen Ruck aus Tab. 4-2 kann noch angemerkt werden, dass Graf und van Weperen für den Transport stehender Passagiere, die keine Möglichkeit haben sich festzuhalten, bereits 1997 zu dem Ergebnis kommen, dass die Beschleunigung bei Verzögerungsvorgängen den Wert $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}095\,g$ nicht unterschreiten und der Ruck beim Zurücknehmen der Verzögerung kurz vor dem Stillstand maximal $j_{\mathrm{Fzg}} = 0{,}06\,g\,\frac{1}{s} \approx 0{,}6\,\mathrm{m/s^3}$ betragen sollte[11], wobei $g = 9{,}81\,\mathrm{m/s^2}$ die Schwerebeschleunigung ist [88]. Auch wenn ein Versuch mit stehenden Probanden in öffentlichen Verkehrsmitteln nicht unmittelbar mit einem

[11] Der Ruck ist positiv, wenn die Verzögerung zurückgenommen wird.

Versuch mit sitzenden Probanden verglichen werden kann, ist dennoch bemerkenswert, dass der maximale Ruck beim Zurücknehmen der Verzögerung den in Abschnitt 4.3.2 ermittelten Schwellwerten für den maximalen Ruck von $j_{\max} = 0{,}6\,\mathrm{m/s^3}$ (Lv7) bzw. $j_{\max} = 0{,}4\,\mathrm{m/s^3}$ (Lv8) nahe kommt bzw. sogar identisch mit dem Lv7-Schwellwert ist.

Die in dieser Arbeit ermittelten Schwellwerte für Beschleunigung und Ruck sind nicht nur für den PnG Betrieb relevant, sondern werden auch als Richtwerte verwendet, um einen gewünschten Fahrkomfort im Längsführungsentwurf zu berücksichtigen.

4.4 Wechselbeziehung von Fahrkomfort und Kraftstoffverbrauch der PnG Strategie

4.4.1 Aufbau des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wird als Rückwärtssimulation aufgebaut. Drehmoment und Drehzahl der VKM werden anhand des Geschwindigkeitsprofils berechnet. Das Geschwindigkeitsprofil ist durch die Parameter mittlere Geschwindigkeit v_{m}, maximale Beschleunigung $a_{\max}$, maximaler Ruck $j_{\max}$, minimaler Ruck $j_{\min}$ und Dauer der Verzögerung Δt_{Verz} vollständig beschrieben (siehe Abb. 4-15). Der Verlauf des Rucks während der Übergangsphasen wird mit Hilfe einer Cosinusquadratfunktion angenähert.

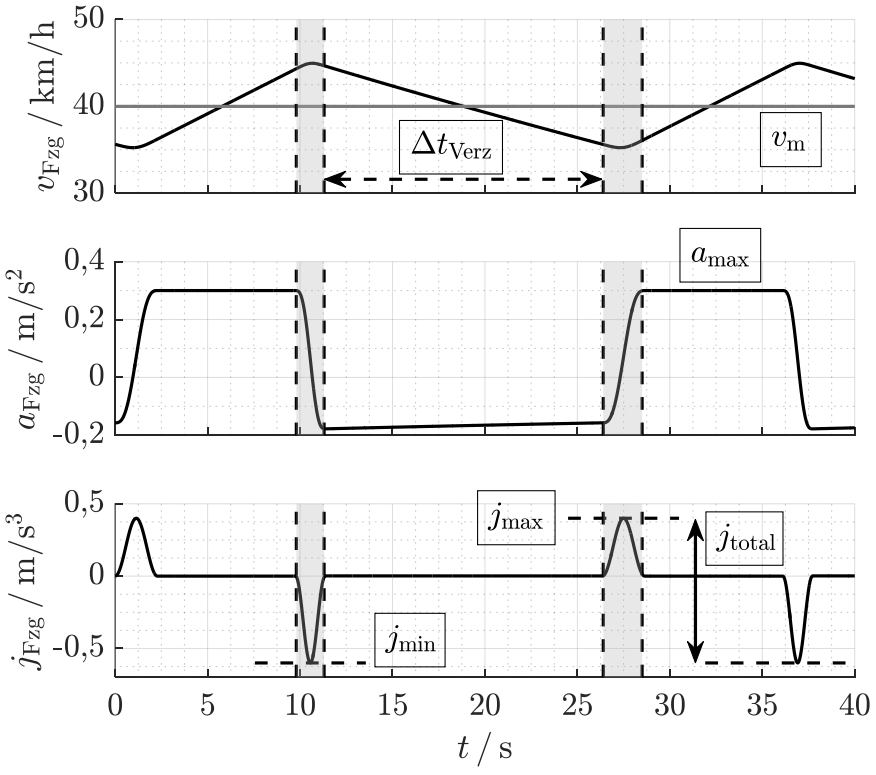


Abb. 4-15: Geschwindigkeitsprofil der PnG Strategie als Eingangsgröße des Simulationsmodells

Während der Pulsphase, die die Übergangsphasen einschließt, wird der Lastpunkt der VKM anhand der Gleichungen (1), (2), (3) und (4) für jeden Simulationszeitschritt (Schrittweite $1\,\mathrm{ms}$) berechnet und der zugehörige Kraftstoffmassenstrom über ein Verbrauchskennfeld bestimmt[12]. Der Wirkungsgrad des Getriebes, der in Gl. (1) benötigt wird, wird in Abhängigkeit von Gang, Drehzahl und Last über gemessene Kennfelder bestimmt. Der Wirkungsgrad des Differentialgetriebes wird als konstant angenommen.

Während der Pulsphase werden Gangwechsel nicht zugelassen, da sie den Fahrkomfort verringern. Der Gang wird für die gesamte Pulsphase fixiert und der KSV für jede erlaubte Gangposition simuliert. Anschließend wird der Gang ausgewählt, der den geringsten KSV erzielt. Eine Gangposition ist erlaubt, wenn die Motordrehzahl während der Pulsphase innerhalb der zugelassenen Grenzen von $n_{\mathrm{VKM.min}} = 1250\,\mathrm{min}^{-1}$ bis $n_{\mathrm{VKM,max}} = 5000\,\mathrm{min}^{-1}$ liegt. Die untere Drehzahl dient der Begrenzung der Fahrzeugvibrationen bei geringen Motordrehzahlen. Die obere Drehzahl schließt Gänge aus, die aufgrund zu hoher Drehzahlen per se nicht in Frage kommen. Die obere Grenze kann zur Begrenzung des Motorgeräuschs weiter herabgesetzt werden. Es zeigt sich allerdings, dass dies nicht nötig ist, da die optimalen Betriebspunkte bei niedrigen bis mittleren Drehzahlen liegen. Für die Simulation des KF Betriebs wird die untere Motordrehzahl auf $n_{\mathrm{VKM,min}} = 1100\,\mathrm{min}^{-1}$ herabgesetzt.

Während der Glidephase wird der KSV gemäß Gl. (8) ermittelt. Der Brennstoffvolumenstrom im Motor-Leerlauf wird anhand der empirischen Formel

$$\dot{V}_{\mathrm{B,LL}} = 0{,}8 \cdot \frac{V_{\mathrm{Hub}}}{2} \cdot \frac{1}{\mathrm{Stunde}} \tag{15}$$

berechnet, d.h. das Kraftstoffvolumen pro Stunde ist geringfügig kleiner als das halbe Hubvolumen (multipliziert mit 1/Stunde). Die Formel resultiert aus Leerlaufmessungen von Ottomotoren unterschiedlichen Hubvolumens, die im Rahmen der Fremdmotoranalyse der FEV Europe GmbH durchgeführt wurden. Für den Fall, dass die VKM während der Glidephase abgeschaltet wird, werden Motorstarts durch die Kraftstoffmasse $m_{\mathrm{B,Start}}$ berücksichtigt (siehe Tab. 8-2).

Die Simulationen werden für ein D-Segment Fahrzeug (siehe Tab. 8-1) und zwei verschiedene turboaufgeladene Ottomotoren (siehe Tab. 8-2) durchgeführt. Für beide Motoren wird dasselbe 8 Gang Automatikgetriebe verwendet. Das Kennfeld für den ersten Ottomotor wurde in Abb. 4-3 bereits abgebildet, der Wirkungsgradverlauf des Automatikgetriebes im 4. Gang wurde in Abb. 4-4 verwendet. Die Berechnungen werden für eine Fahrt auf horizontaler Strecke durchgeführt; der Steigungswiderstand verschwindet.

[12] Der elektrische Pfad wird nicht modelliert, d.h. der Stromverbrauch des Bordnetzes wird vernachlässigt und das Drehmoment der EM zu $0\,\mathrm{Nm}$ gesetzt.

4.4.2 Simulationsergebnisse für das Mildhybridfahrzeug

Zuerst werden die Simulationsergebnisse für die Lv8 Kalibrierung von PnG dargestellt. Darauf folgen die Ergebnisse der Lv7 Kalibrierung. Abschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durch Variation der maximalen Beschleunigung und des kombinierten Rucks j_{total} (vgl. Abb. 4-15) durchgeführt.

4.4.2.1 Simulationsergebnisse der Lv8 Kalibrierung

Die Parameterbeschränkungen zum Erreichen einer Lv8 Kalibrierung werden Tab. 4-2 und Abb. 4-12 entnommen. Für jede simulierte mittlere Geschwindigkeit wird der optimale KSV der Lv8 Kalibrierung durch Parametervariation gewonnen. Die maximale Beschleunigung wird mit einer Schrittweite von $\Delta a = 0{,}05\,\mathrm{m/s^2}$ und die Verzögerungsdauer mit einer Schrittweite von $\Delta t = 0{,}5\,\mathrm{s}$ innerhalb der Lv8 Grenzen variiert, d.h. der Fahrkomfort der simulierten Parameterkombinationen würde als Lv8 oder besser bewertet werden. Die Kombination, die den geringsten KSV erzielt, wird als optimale Parameterkombination bezeichnet. Der Ruck wird nicht variiert, da der KSV umso geringer ist, je größer der Absolutwert des Rucks ist, d.h. $j_{\mathrm{min,opt}} = -0{,}6\,\mathrm{m/s^3}$ und $j_{\mathrm{max,opt}} = 0{,}4\,\mathrm{m/s^3}$. Zuerst werden die Ergebnisse für den $1{,}2\mathrm{l}$ Motor dargestellt. Wenn nicht anders erwähnt, befindet sich das Fahrzeug während der Glidephase in SAV.

Die Verbrauchserhöhung von PnG gegenüber KF berechnet sich wie folgt:

$$r_{\mathrm{V_B}} = \left(\frac{V_{\mathrm{B,PnG}}}{s_{\mathrm{PnG}}}\right) / \left(\frac{V_{\mathrm{B,KF}}}{s_{\mathrm{KF}}}\right) - 1, \tag{16}$$

wobei $V_{\mathrm{B,PnG}}/s_{\mathrm{PnG}}$ und $V_{\mathrm{B,KF}}/s_{\mathrm{KF}}$ die Verbräuche an Brennstoffvolumen von PnG bzw. KF pro Strecke bezeichnen. Die Kraftstoffersparnis ist gleich dem negativen Wert von $r_{\mathrm{V_B}}$.

Abb. 4-16 zeigt den optimalen KSV der Lv8 Kalibrierung und die Verbrauchserhöhung. Die höchsten Kraftstoffersparnisse sind bei geringen Geschwindigkeiten zu verzeichnen und nehmen mit steigender Geschwindigkeit allmählich ab. Die plötzlichen Sprünge im KSV der KF Strategie spiegeln sich auch in der Verbrauchserhöhung wieder und treten auf, wenn bei KF ein höherer Gang gewählt wird (gekennzeichnet durch die gestrichelten vertikalen Linien).

Abb. 4-17 stellt die Parameterwerte dar, die den geringsten KSV von PnG erzielen. Die optimale Beschleunigung ist fast immer gleich der für Lv8 maximal erlaubten Beschleunigung (obere Grafik). Die optimale Verzögerungsdauer (mittlere Grafik) ist bei vielen Geschwindigkeiten gleich der Lv8-Grenze.

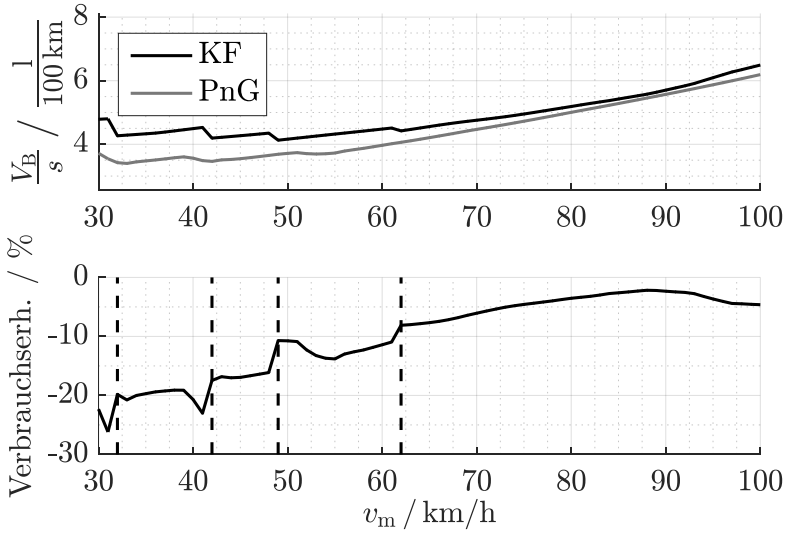


Abb. 4-16: Lv8 Kalibrierung: Verbrauch pro Strecke (oben) und Verbrauchserhöhung (unten) als Funktion der mittleren Geschwindigkeit

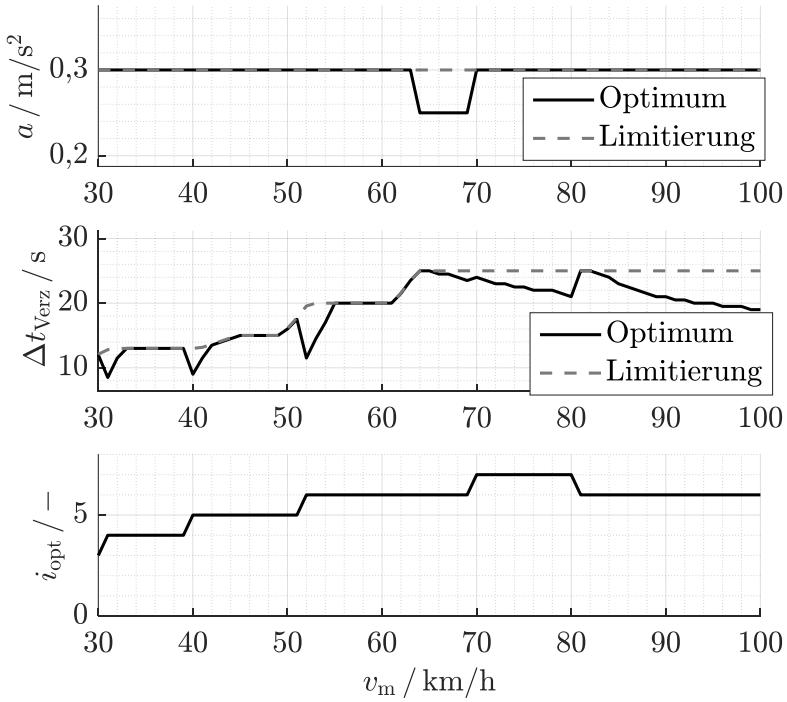


Abb. 4-17: Lv8 Kalibrierung: Optimale Beschleunigung, Verzögerungsdauer und Gangposition als Funktion der mittleren Geschwindigkeit

Bei einigen Geschwindigkeiten ($31\,km/h$, $40\,km/h$ und $52\,km/h$) kann durch Verkürzen der Verzögerungsdauer während der Pulsphase ein verbrauchsgünstigerer (höherer) Gang gewählt

werden (untere Grafik).[13] Es sollte noch angemerkt werden, dass die Lv8-Grenze für die Verzögerungsdauer nicht identisch mit dem Verlauf aus Abb. 4-12 ist, sondern aus diesem berechnet wird, da die x-Achsen verschieden sind.

Abb. 4-18 zeigt die Verbrauchserhöhung als Funktion der Verzögerungsdauer. Da im dargestellten Bereich keine Gangwechsel liegen, treten keine Sprünge im KSV auf. Der KSV von PnG sinkt bei Erhöhen der Verzögerungsdauer bis zum Optimum ab und steigt danach wieder an. Durch das Erhöhen der Verzögerungsdauer wird der Zeitanteil der Übergangsphasen, während der die VKM geringe Lastpunkte und schlechte Wirkungsgradbereiche durchläuft, bezogen auf den Zeitanteil des gesamten PnG Zyklus verringert, was dazu führt, dass der mittlere Wirkungsgrad ansteigt. Allerdings werden gleichzeitig das Geschwindigkeitsdelta und folglich der mittlere Energiebedarf am Rad größer (siehe Abb. 4-2). Die Überlagerung dieser beiden Effekte führt dazu, dass es eine optimale Verzögerungsdauer gibt, welche den KSV minimiert.

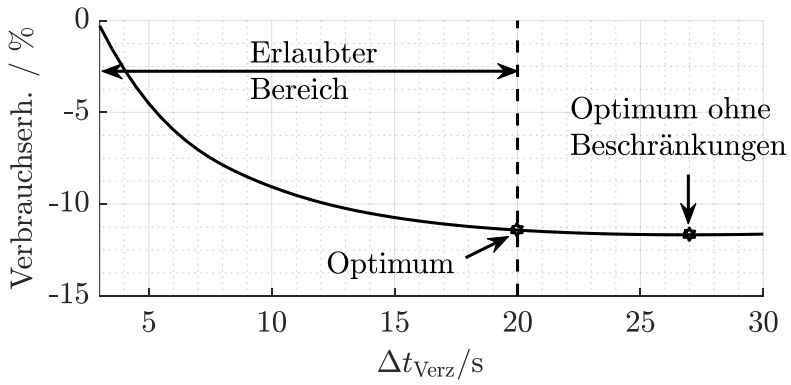


Abb. 4-18: Lv8 Kalibrierung: Verbrauchserhöhung als Funktion der Verzögerungsdauer für $v_{\mathrm{m}} = 60\,\mathrm{km/h}$ *und* $a_{\mathrm{opt}} = 0{,}3\,\mathrm{m/s^2}$

Die Verzögerungsdauer wurde bislang nur durch den Zielwert für den Fahrkomfort begrenzt. Um den Verkehrsfluss zu erhöhen und die nachfolgenden Verkehrsteilnehmer nicht zu verärgern, sollte das Geschwindigkeitsdelta von PnG begrenzt werden. Abb. 4-19 zeigt, wie Geschwindigkeitsdelta, Verzögerungsdauer und mittlere Geschwindigkeit zusammenhängen. Die Abbildung zeigt, dass die optimale Verzögerungsdauer (durchgezogene Linie mit erhöhter Strichstärke) durch die Beschränkung der Differenzgeschwindigkeit ab einer bestimmten mittleren Geschwindigkeit ($v_{\mathrm{m}} = 55\,\mathrm{km/h}$ für $\Delta v = 15\,\mathrm{km/h}$) der neu eingeführten Begrenzung (d.h. der gestrichelten Linie in Abb. 4-19) folgen muss. Die damit verbundenen Einbußen hinsichtlich des KSVs belaufen sich für die Lv8 Kalibrierung mit $\Delta v = 15\,\mathrm{km/h}$ auf weniger als ein Prozent, was an späterer Stelle aus der Sensitivitätsanalyse hervorgeht (vgl. die Einsparungen der Lv8 Kalibrierung von oberer

[13] Durch Verkleinern der Verzögerungsdauer und damit des Geschwindigkeitsdeltas wird die kleinste Motordrehzahl, die während der Pulsphase auftritt, angehoben. Anheben der Motordrehzahl ermöglicht das Wählen höherer Gänge, was den Motorbetriebspunkt ggfs. zu besseren Wirkungsgraden verschiebt.

und unterer Grafik von Abb. 4-26 miteinander). Je kleiner Δv gewählt wird, desto größer sind die Einbußen.

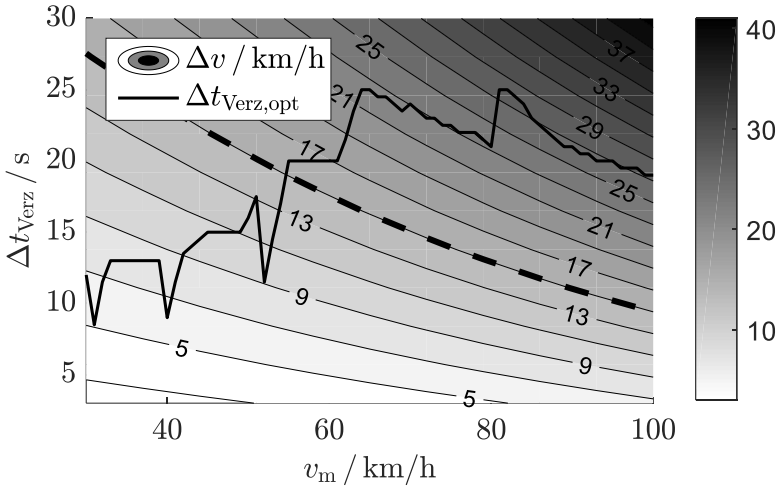


Abb. 4-19: Lv8 Kalibrierung: Geschwindigkeitsdelta als Funktion der mittleren Geschwindigkeit und der Verzögerungsdauer

Im Folgenden soll die Anzahl an VKM Startvorgängen pro Kilometer untersucht werden. Eine VKM ist für eine bestimmte Anzahl an Startvorgängen ausgelegt. Die von Startvorgängen besonders beanspruchten Kurbelwellenlager werden für Hybridanwendungen auf $1{,}2$ Millionen Startvorgänge ausgelegt [89]. Bei einer Lebensdauer des Fahrzeugs von $300.000\,\mathrm{km}$ entspricht dies vier Startvorgängen pro km. Abb. 4-20 zeigt die Beziehung zwischen der Anzahl an VKM Startvorgängen pro km, der mittleren Geschwindigkeit und der Verzögerungsdauer. Die optimale Verzögerungszeit von Abb. 4-17 ist auch eingezeichnet.

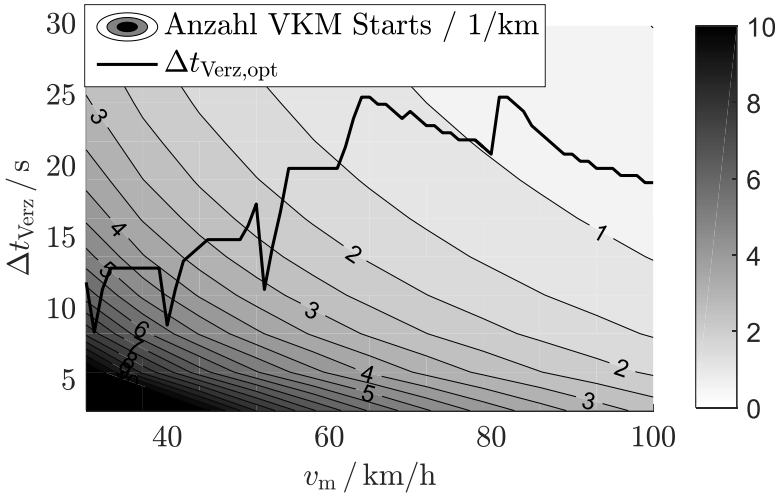


Abb. 4-20: Lv8 Kalibrierung: Anzahl an VKM Startvorgängen pro km als Funktion der mittleren Geschwindigkeit und Verzögerungsdauer

Bei niedrigen Geschwindigkeiten übersteigt der PnG Betrieb die Anzahl von vier Startvorgängen pro km. Im Mittel liegt die Anzahl an Startvorgängen jedoch unter diesem Wert. Wird eine Gleichverteilung der mittleren Geschwindigkeiten zwischen $30\,\mathrm{km/h}$ und $100\,\mathrm{km/h}$ angenommen, führt der PnG Betrieb im Mittel zu $2{,}02$ Startvorgängen pro km.

Sollte dem Automobilhersteller die durch PnG eingeführte Anzahl an Startvorgängen zu hoch sein, kann die Anzahl reduziert werden, indem die Verzögerungsdauer innerhalb der Grenzen angehoben oder zwischen SAV und SLL gewechselt wird. In letzterem Fall könnten zum Beispiel zwei von drei PnG Zyklen mit SAV betrieben werden und der verbleibende Zyklus mit SLL. Die Verbrauchserhöhung $r_{\mathrm{V_B,komb}}$ vergrößert sich dabei wie folgt:

$$r_{\mathrm{V_B,komb}} = \alpha_{\mathrm{SAV}} \cdot r_{\mathrm{V_B,SAV}} + (1 - \alpha_{\mathrm{SAV}}) \cdot r_{\mathrm{V_B,SLL}}, \tag{17}$$

wobei α_{SAV} das Verhältnis von SAV Vorgängen zur Gesamtzahl an Segelvorgängen (im genannten Beispiel wäre $\alpha_{\mathrm{SAV}} = 2/3$), $r_{\mathrm{V_B,SAV}}$ die Verbrauchserhöhung von SAV und $r_{\mathrm{V_B,SLL}}$ die Verbrauchserhöhung von SLL bezeichnen. Abb. 4-21 zeigt, dass SLL die Kraftstoffersparnisse deutlich (bei den meisten Geschwindigkeiten um mehr als die Hälfte) verringert. Im überländlichen Geschwindigkeitsbereich (d.h. im Bereich von $60\,\mathrm{km/h}$ bis $100\,\mathrm{km/h}$) treten sogar positive Verbrauchserhöhungen auf, d.h. es kommt zu Verschlechterungen gegenüber KF. Die zu SLL gehörigen optimalen Parameter wurden separat bestimmt, d.h. es wurden nicht die gleichen wie für SAV verwendet.

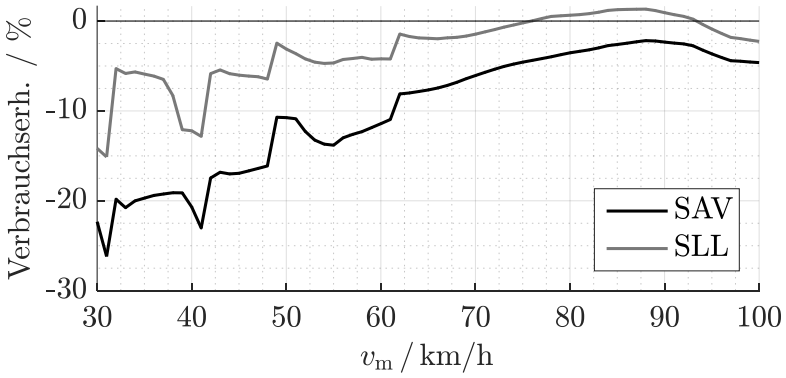


Abb. 4-21: Lv8 Kalibrierung: Verbrauchserhöhung über mittlerer Geschwindigkeit für SAV und SLL

Nun soll der Einfluss der Motorgröße untersucht werden (siehe Abb. 4-22). Die Ergebnisse für den $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motor wurden aus Abb. 4-16 übernommen. Erwartungsgemäß weist der $2{,}0\,\mathrm{l}$ Motor im unteren Geschwindigkeitsbereich größere Ersparnisse als der $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motor auf, da der großvolumige Motor bei KF bei geringeren Lasten betrieben wird und der Wirkungsgrad bei Lastpunktanhebung stärker ansteigt. Die optimalen Parameter des $2{,}0\,\mathrm{l}$ Motors sind in Abb. 4-23 dargestellt. Die Verzögerungsdauer ist im oberen Geschwindigkeitsbereich von der des $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motors

verschieden, da bei $61\,\mathrm{km/h}$ und $77\,\mathrm{km/h}$ durch Herabsetzen der Verzögerungsdauer ein verbrauchsgünstigerer (höherer) Gang gewählt werden kann.

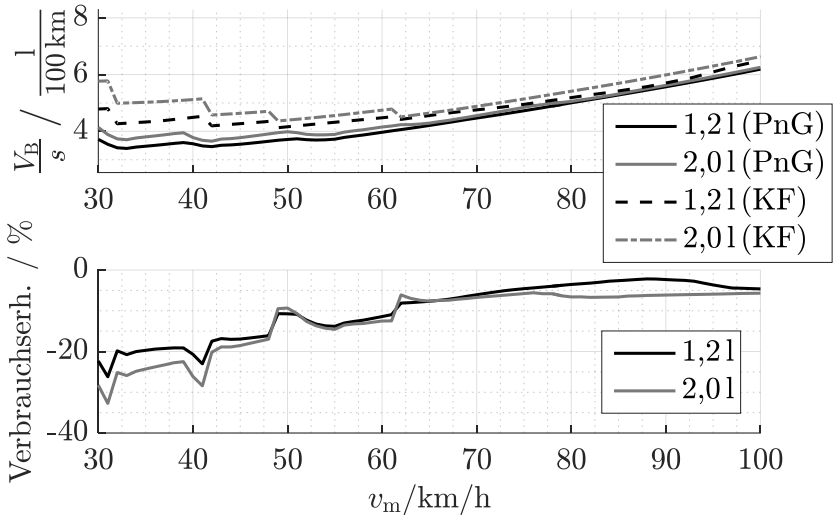


Abb. 4-22: Lv8 Kalibrierung: Vergleich des KSV für zwei verschiedene Motorgrößen: $1{,}2\,\mathrm{l}$ *und* $2{,}0\,\mathrm{l}$

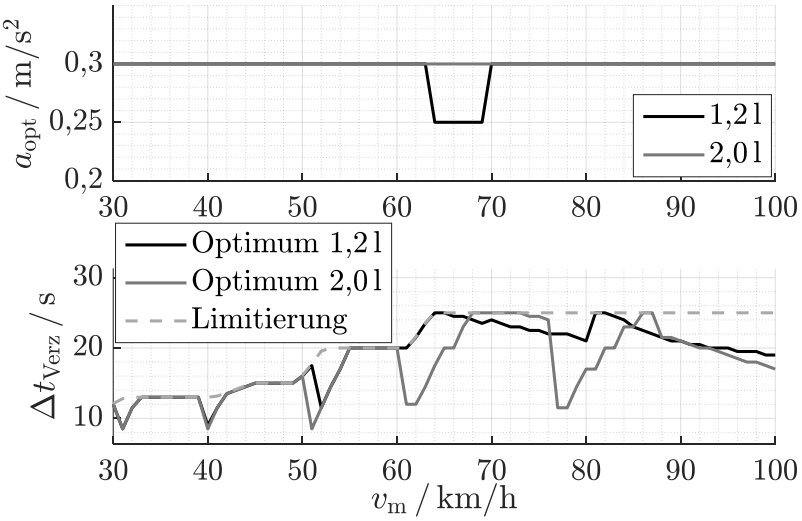


Abb. 4-23: Lv8 Kalibrierung: Vergleich der optimalen Parameter für den $1{,}2\,\mathrm{l}$ *und den* $2{,}0\,\mathrm{l}$ *Motor*

4.4.2.2 Simulationsergebnisse der Lv7 Kalibrierung

Die Parameterbeschränkungen zum Erreichen einer Lv7 Kalibrierung werden Tab. 4-2 und Abb. 4-12 entnommen. Die maximale Beschleunigung und die Verzögerungsdauer werden innerhalb der Lv7 Grenzen wie im vorangegangenen Abschnitt variiert und für jede mittlere Geschwindigkeit die Kombination ausgewählt, die den geringsten KSV erzielt. Für den Ruck werden die Lv7 Werte aus Tab. 4-2 verwendet. Die folgenden Analysen werden für den $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motor durchgeführt.

Abb. 4-24 stellt die Verbrauchserhöhung der Lv8 und Lv7 Kalibrierung gegenüber. Die Lv7 Kalibrierung erzielt zusätzliche Ersparnisse von $15{,}1\,\%$ bei $30\,\mathrm{km/h}$, $7{,}2\,\%$ bei $50\,\mathrm{km/h}$, $2{,}8\,\%$ bei

$70\,\mathrm{km/h}$ und $1{,}7\,\%$ bei $90\,\mathrm{km/h}$. Die optimalen Parameter der Lv7 Kalibrierung werden im Anhang 8.2 zur Verfügung gestellt.

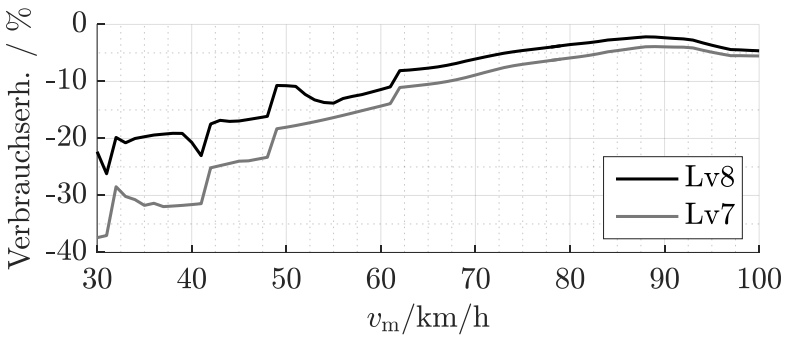
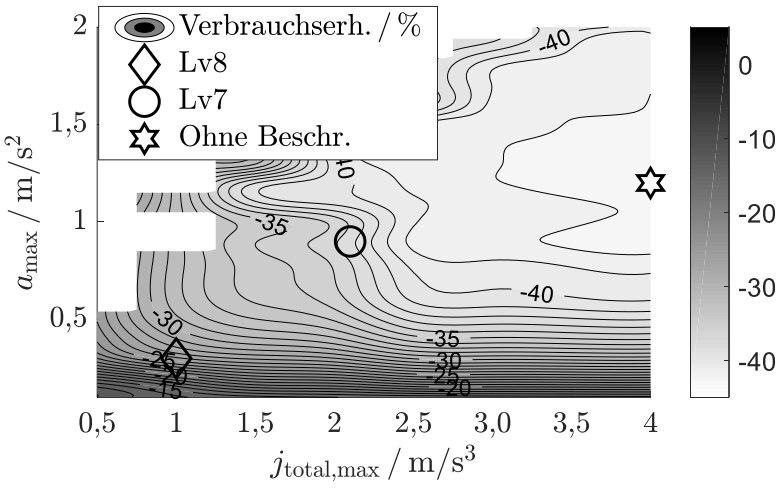


Abb. 4-24: Vergleich von Lv8 und Lv7 Kalibrierung: Verbrauchserhöhung über mittlerer Geschwindigkeit

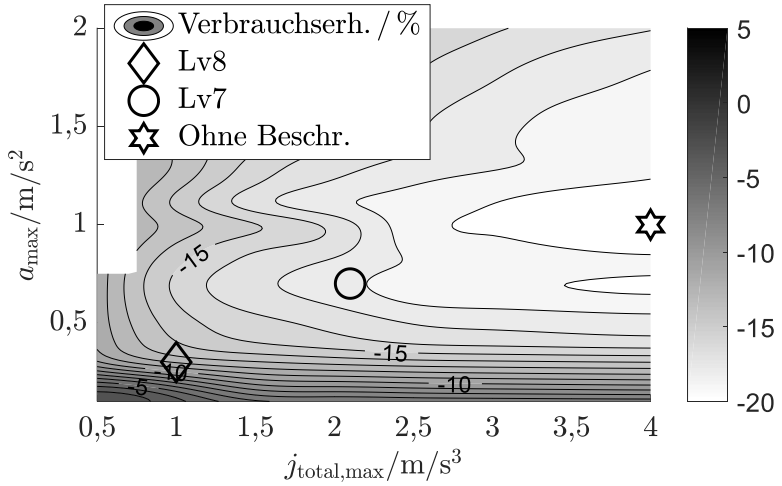
4.4.2.3 Sensitivitätsanalyse

Eine Kalibrierung, die einen geringeren Fahrkomfort als Lv7 aufweist, kann eine zusätzliche Kraftstoffersparnis erreichen, indem die Absolutwerte für den Ruck, bei niedrigen Geschwindigkeiten die Beschleunigung und ggfs. auch die Verzögerungsdauer angehoben werden. Die Analyse dieses Potentials beantwortet die Frage, wie weit die Lv7 Kalibrierung vom maximal möglichen Einsparpotential von PnG entfernt ist. Die Limitierung der Fahrkomfortparameter wird daher im Folgenden aufgehoben. Das Verbot des Gangwechsels während der Pulsphase und die Begrenzung der Motordrehzahl nach unten hin bleiben weiterhin bestehen. Die Simulationen werden für den $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motor durchgeführt.

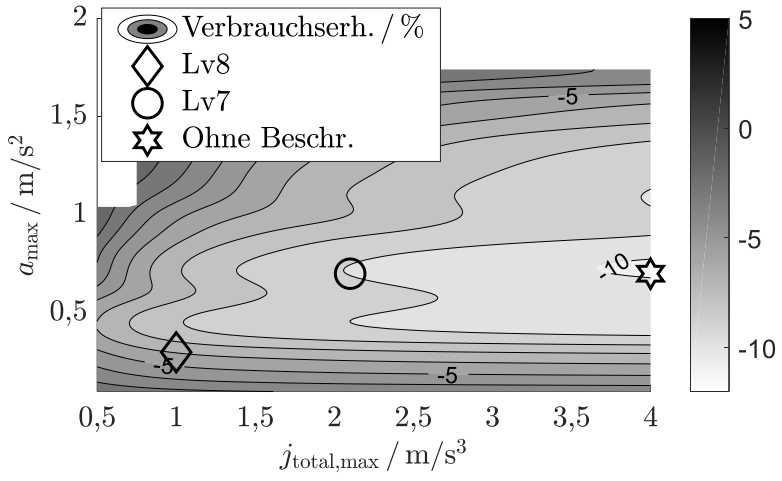
Die Werte für die maximale Beschleunigung und den totalen Ruck ($j_\mathrm{total} = j_\mathrm{max} - j_\mathrm{min}$) werden variiert und der KSV in der dritten Dimension dargestellt. Der totale Ruck wird wie folgt aufgeteilt: $|j_\mathrm{max}| = |j_\mathrm{min}| = j_\mathrm{total}/2$. In der vorherigen Analyse war $|j_\mathrm{min}|$ größer als j_max. Jedoch ist die genaue Aufteilung von j_total auf j_min und j_max nicht relevant bzw. der Einfluss der Aufteilung auf den KSV vernachlässigbar. Für jede Kombination $(a_\mathrm{max}, j_\mathrm{total})$ wird die Verzögerungsdauer innerhalb der vorgegebenen Grenzen variiert und die Dauer ausgewählt, die den geringsten KSV erzielt. Als Begrenzungslinie für die Verzögerungsdauer wird die Limitierung der Lv8 Kalibrierung verwendet (siehe Abb. 4-12), wenn $a_\mathrm{max} \leq 0{,}3\,\mathrm{m/s^2}$ und $j_\mathrm{total} \leq 1\,\mathrm{m/s^3}$, und die der Lv7 Kalibrierung, wenn $a_\mathrm{max} \leq 1\,\mathrm{m/s^2}$ und $j_\mathrm{total} \leq 2{,}1\,\mathrm{m/s^3}$. Trifft keine der beiden Bedingungen zu, wird die Verzögerungsdauer nicht begrenzt bzw. als Grenze ein ausreichend hoher Wert angesetzt. Abb. 4-25 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für vier verschiedene mittlere Geschwindigkeiten. Die Kalibrierung ohne Parameterbeschränkungen erzielt gegenüber der Lv7 Kalibrierung Ersparnisse um weitere $5{,}4\,\%$ bei $30\,\mathrm{km/h}$, $1{,}7\,\%$ bei $50\,\mathrm{km/h}$, $1{,}2\,\%$ bei $70\,\mathrm{km/h}$ und $1{,}1\,\%$ bei $90\,\mathrm{km/h}$. Sie werden hauptsächlich durch Vergrößerung des Rucks erzielt. Der größte Sprung in den Kraftstoffersparnissen findet beim Übergang von Lv8 nach Lv7 statt.



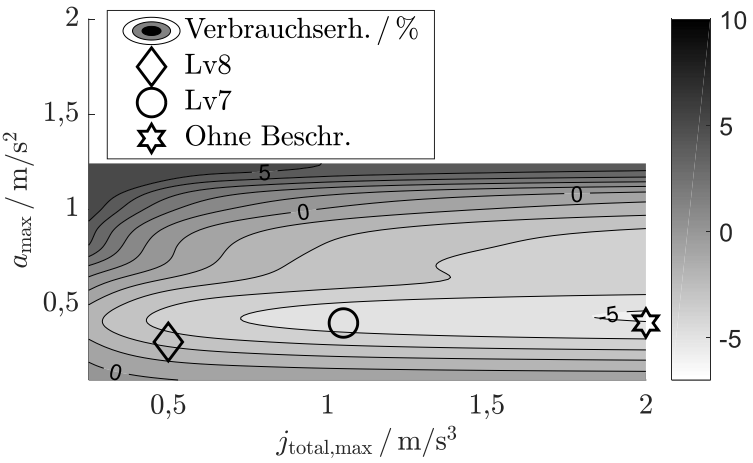
(a) $v_{\text{m}} = 30\,\text{km/h}$



(b) $v_{\text{m}} = 50\,\text{km/h}$



(c) $v_{\text{m}} = 70\,\text{km/h}$



(d) $v_{\text{m}} = 90\,\text{km/h}$

Abb. 4-25: Verbrauchserhöhung als Funktion des totalen Rucks und der maximalen Beschleunigung für verschiedene mittlere Geschwindigkeiten

Abb. 4-26 (untere Grafik) fasst die Entwicklung der Kraftstoffersparnisse zusammen. Wird das Geschwindigkeitsdelta auf $\Delta v = 15\,\text{km/h}$ begrenzt (eine Begrenzung ist für den realen Fahrbetrieb erforderlich), verringern sich die Einsparungen im ungünstigsten Fall um 2,3 % (vergleiche

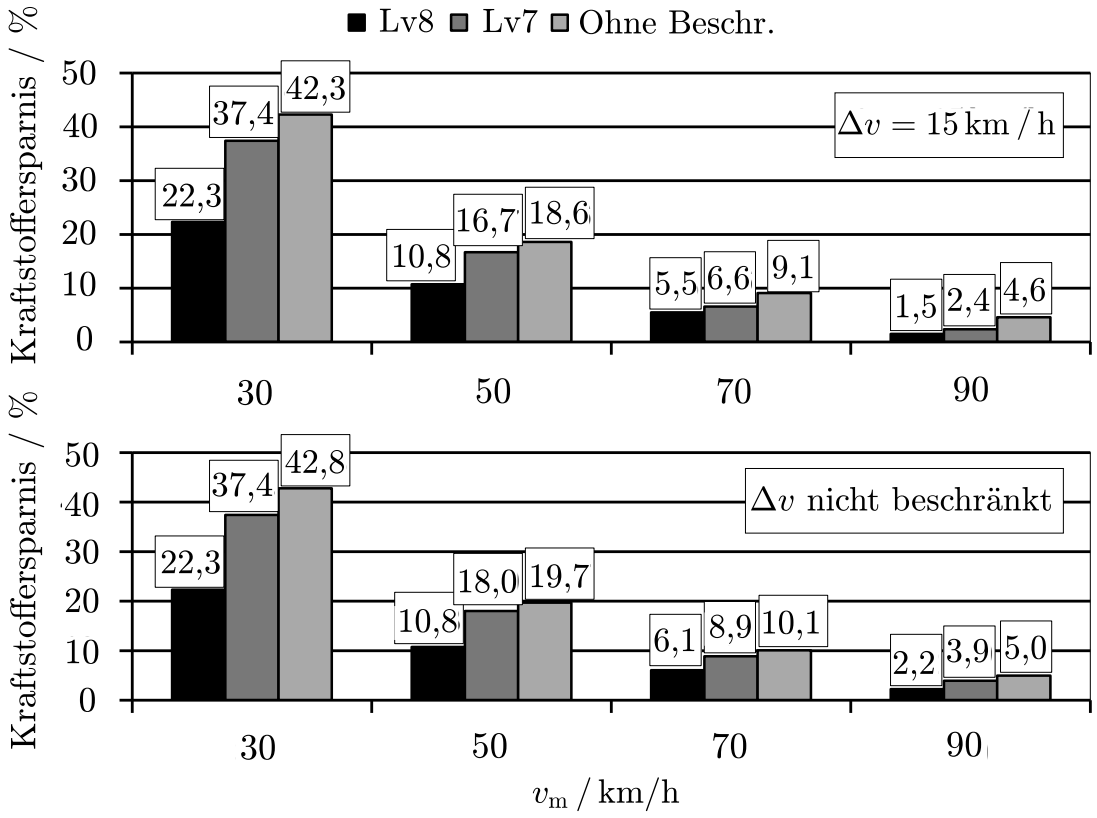


Abb. 4-26: Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse für den 1,2l *Motor*

die obere mit der unteren Grafik von Abb. 4-26 für die Lv7 Kalibrierung und $v_{\mathrm{m}} = 70\,\mathrm{km/h}$). Die bisherigen Ergebnisse wurden mit dem $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motor erzeugt. Die Entwicklung der Kraftstoffersparnisse wird für den $2{,}0\,\mathrm{l}$ Motor im Anhang 8.3 zusammengefasst.

4.4.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Aus den vorherigen Betrachtungen können für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge folgende Beobachtungen festgehalten werden:

- Die Kraftstoffersparnisse von PnG sinken mit steigender mittlerer Geschwindigkeit.
- Die Ersparnisse sind bei großvolumigen Motoren tendenziell größer.
- Bei einem gleichverteilten PnG Betrieb zwischen $v_{\mathrm{m}} = 30\,\mathrm{km/h}$ und $v_{\mathrm{m}} = 100\,\mathrm{km/h}$ finden etwa zwei Wiederstarts pro Kilometer statt (Lv8 Kalibrierung). Verschiebt sich die Häufigkeitsverteilung zu niedrigen Geschwindigkeiten, steigt die Anzahl an Wiederstarts an. Es existieren Maßnahmen unter Ersparniseinbußen, um die Anzahl an Wiederstarts zu begrenzen.
- Im realen Fahrbetrieb sollte das Geschwindigkeitsdelta beschränkt werden. Bei einer Beschränkung von $\Delta v = 15\,\mathrm{km/h}$ lassen sich hinsichtlich der Kraftstoffersparnisse von PnG folgende Beobachtungen festhalten:
  - Die Lv8 Kalibrierung erzielt Ersparnisse von $22\,\%$ bei $30\,\mathrm{km/h}$, $11\,\%$ bei $50\,\mathrm{km/h}$, $5{,}5\,\%$ bei $70\,\mathrm{km/h}$ und $1{,}5\,\%$ bei $90\,\mathrm{km/h}$ mit einem für ein D-Segment Fahrzeug vergleichsweise kleinen $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motor.
  - Der Wechsel von Lv8 zu Lv7 führt bei niedrigen Geschwindigkeiten zu einem zusätzlichen Anstieg der Ersparnisse von $15\,\%$ bei $30\,\mathrm{km/h}$, $6\,\%$ bei $50\,\mathrm{km/h}$ und $1\,\%$ bei $70\,\mathrm{km/h}$ und $90\,\mathrm{km/h}$.
  - Die Lv7 Kalibrierung ist nur einige Prozent von einer kraftstoffoptimalen Kalibrierung, die den Fahrkomfort unberücksichtigt lässt, entfernt.

Da die Kraftstoffersparnisse mit steigender Geschwindigkeit abnehmen und die Verzögerungswerte während der Segelphase zunehmen (einhergehend mit sinkendem Fahrkomfort), sollte PnG bei Autobahnfahrten mit Geschwindigkeiten größer oder gleich $v_{\mathrm{m}} = 100\,\mathrm{km/h}$ deaktiviert werden, es sei denn, dass eine Bergabfahrt wieder einen günstigen Betrieb ermöglicht.

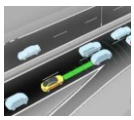
5 Das vorausschauende Längsführungssystem

Das vorausschauende Längsführungssystem wird in Anlehnung an Abb. 2-2 entwickelt. Kapitel 5.1 liefert die Anforderungen an die Längsführung, Kapitel 5.2 die Vorgaben der ISO 15622, Kapitel 5.3 beschreibt die Funktionsarchitektur der Längsführung, Kapitel 5.4 die statische Geschwindigkeitsplanung, Kapitel 5.5 die Langzeitplanung und Kapitel 5.6 die Kurzzeitplanung.

5.1 Anforderungen an die Längsführung

Beim Längsführungsentwurf sind neben den gesetzlichen Anforderungen wie dem Einhalten von Geschwindigkeitsbegrenzungen und dem Verbot des Überquerens roter LSA (Straßenverkehrsordnung) auch internationale Standards zu beachten [90, 91]. Darüber hinaus stellt der Kunde Anforderungen an das System und erwartet eine geringe Fahrzeit bei angemessenem Fahrkomfort und geringem Kraftstoffverbrauch. Damit die Längsführungsfunktion im Fahrzeug ausführbar ist, muss sie zudem echtzeitfähig sein. Tab. 5-1 fasst die genannten Anforderungen und die zum Erreichen der Anforderungen notwendigen Maßnahmen zusammen. In der Anforderung „Einhalten von internationalen Standards“ ist das Gewährleisten von Kollisionssicherheit miteingeschlossen (siehe Kap. 5.2.3).

Der Einsatz des Längsführungssystems soll nicht auf Mildhybridfahrzeuge beschränkt sein, sondern durch geeignete Parametrierung bzw. Deaktivierung von Teilfunktionen (wie z.B. des PnG Betriebs) auch für rein verbrennungsmotorisch oder batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge vorgesehen sein.

	Anforderungen		Maßnahmen
1	Einhalten von Geschwindigkeitsbegrenzungen		Berücksichtigen der Geschwindigkeitsbegrenzungen in der Lang- und Kurzzeitplanung
2	Begrenzen des Platzbedarfs auf der Straße (effiziente Verkehrsraumnutzung)		Einführen eines Abstandsbandes bei Folgefahrten
3	Effiziente Anfahrt auf die vorausliegende LSA		Berücksichtigen der Ampelschaltzeiten in der Lang- und Kurzzeitplanung
4	Erreichen eines gewünschten Fahrkomforts		Begrenzen von Beschleunigung und Ruck

5	Schnelles Erreichen des Endziels		Verwenden der Höchstgeschwindigkeit als Sollvorgabe, wenn die Route, der Verkehr und die LSA Schaltung es zulassen Einführen eines fahrzeitorientierten PnG Betriebs
6	Erreichen eines geringen Kraftstoffverbrauchs bzw. elektrischen Energiebedarfs		Berücksichtigen der nächsten LSA in der LZP; Vorausschauendes Segeln und Rekuperieren bei Folgefahrten und Geschwindigkeitsreduktionen; Einsatz von PnG; Beschränken der Beschleunigung mit Hilfe des Motorkennfelds;
7	Erreichen von Echtzeitfähigkeit		Entwickeln einer recheneffizienten Langzeit- und regelbasierten Kurzzeitplanung
8	Einhalten von internationalen Standards		Einhalten der Anforderungen der ISO 15622 für „Fullspeed Range Adaptive Cruise Control Systems“

Tab. 5-1: Anforderungen an die Längsführung und Maßnahmen zum Erreichen der Anforderungen

5.2 Vorgaben der ISO 15622

Im Folgenden werden die für den Längsführungsentwurf relevanten Angaben der ISO 15622 für „Fullspeed Range Adaptive Cruise Control Systems“ zusammengefasst. Andere Angaben wie bspw. die Fähigkeit des Verfolgens vorausfahrender Fahrzeuge während Kurvenfahrten werden nicht genannt. Bei der Wahl von Beschleunigung und Ruck werden zur Bestimmung von Komfortwerten weitere Quellen herangezogen, die über die Angaben der ISO 15622 hinausgehen.

5.2.1 Wahl von Beschleunigung und Ruck

Die ISO 15622:2018 begrenzt Beschleunigung und Ruck (Mittelwerte über 2s) von ACC Systemen [91], die über den gesamten Geschwindigkeitsbereich hinweg operieren (siehe Abb. 5-1). Für den positiven Ruck wird kein Grenzwert angegeben. Die Norm schreibt lediglich vor, dass die Bremskraft nicht schlagartig zurückgenommen werden soll, wenn beispielsweise ein Zielobjekt verschwindet oder das System aufgrund eines Fehlers abgeschaltet wird. Der fehlende Grenzwert kann der ISO 20035 für kooperative ACC Systeme entnommen werden, in welcher der

positive Ruck für Folgefahrten im Nah-Folge Modus, engl. Close-Follow (CF) Mode[14], auf $j_{\max,\mathrm{CF}} = 2{,}2\,\mathrm{m/s^3}$ begrenzt wird [92].

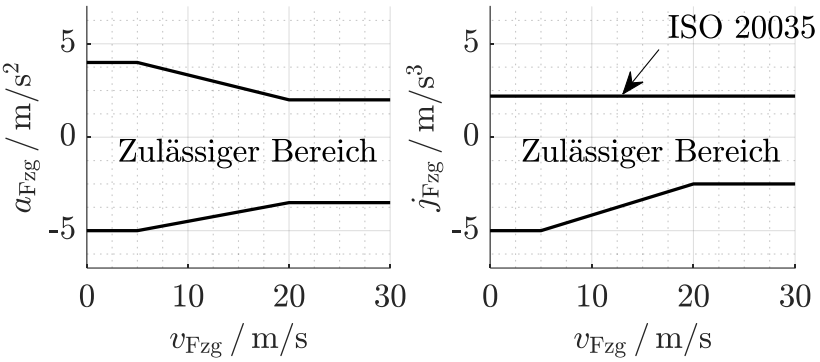


Abb. 5-1: Darstellung der Begrenzungen für Beschleunigung und Ruck von ACC Systemen nach ISO 15622

Die Grenzwerte sind noch keine Empfehlung für Komfortwerte. Allerdings kann hierfür auf die Probandenstudie von Abschnitt 4.3 zurückgegriffen werden. Zur Einstellung einer gewünschten Sollgeschwindigkeit ist es naheliegend, die Ruckwerte der Lv8 Kalibrierung als Komfortwerte zu verwenden (siehe Tab. 4-2). Bei Folgefahrtszenarien hingegen geht Sicherheit vor Fahrkomfort und der Ruck ergibt sich aus der Berechnungsvorschrift des ACC Reglers (siehe Abschnitt 5.6.2).

Für die positive Beschleunigung wird kein fester Komfortwert angesetzt, da hier entsprechend der Fahrweise des menschlichen Fahrers die Beschleunigung an die zu überwindende Geschwindigkeitsdifferenz angepasst wird [56]. Die Berechnungsvorschrift des ACC Reglers, bei der die Sollbeschleunigung mit der Geschwindigkeitsdifferenz skaliert, bringt diese Eigenschaft bereits mit sich (siehe Abschnitt 5.6.2).

Die Komfortverzögerung für den vorausschauenden Rekuperationsvorgang wird auf Grundlage folgender Diskussion auf $a_{\mathrm{Fzg}} = 1\,\mathrm{m/s^2}$ bemessen. Im öffentlichen Verkehrssektor wurden Studien mit stehenden Probanden durchgeführt. [93] fasst die Ergebnisse mehrerer Studien zusammen und identifiziert für Verzögerungsvorgänge einen akzeptablen Bereich von $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}12\,g$ bis $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}15\,g$. [88] kommt zu dem Ergebnis, dass ein Beschleunigungswert von $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}095\,g \approx -0{,}93\,\mathrm{m/s^2}$ nicht unterschritten werden soll, damit breitbeinig stehende Probanden das Gleichgewicht halten können, ohne sich festhalten zu müssen. Von Menschen geführte Personenkraftwagen weisen situationsbedingt deutlich höhere Verzögerungswerte als die genannten

[14] Im Close-Follow Modus müssen Vorderfahrzeug und längsgeführtes Fahrzeug über Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation miteinander verbunden sein. Die Grenzen für Ruck und Beschleunigung sind in diesem Fall von der Geschwindigkeit unabhängig. Die maximale Verzögerung beträgt $b_{\max,\mathrm{CF}} = 5\,\mathrm{m/s^2}$, die maximale Beschleunigung $a_{\max,\mathrm{CF}} = 2{,}75\,\mathrm{m/s^2}$; der Ruck darf $j_{\min,\mathrm{CF}} = -3{,}5\,\mathrm{m/s^3}$ nicht unterschreiten und $j_{\max,\mathrm{CF}} = 2{,}2\,\mathrm{m/s^3}$ nicht überschreiten.

auf. Nach einer Studie von [94] ist die Beschleunigung bei $50\,\%$ aller Verzögerungsvorgänge größer als $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}12\,g$, bei $20\,\%$ ist sie kleiner als $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}2\,g$ und nur bei $2{,}5\,\%$ kleiner als $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}3\,g$. Das zeigt, dass auch Fahrer von Personenkraftwagen Beschleunigungswerte größer als $a_{\mathrm{Fzg}} = -0{,}12\,g$ für Verzögerungsvorgänge präferieren (sofern die Situation es zulässt). Das in [15] vorgestellte Längsführungssystem von Volkswagen verwendet $a_{\mathrm{Fzg}} = -1\,\mathrm{m/s^2} \approx -0{,}1\,g$ als Komfortwert, um Verzögerungsvorgänge vor statischen Geschwindigkeitsreduktionen durchzuführen. Die aufgeführten Komfortwerte liegen also alle nahe $a_{\mathrm{Fzg}} = -1\,\mathrm{m/s^2}$. Für Verzögerungs- bzw. Rekuperationsvorgänge wird daher ein Beschleunigungswert von $a_{\mathrm{Fzg}} = -1\,\mathrm{m/s^2}$ verwendet. Wenn es die Situation erfordert, wird das Rekuperationsmoment erhöht bzw. falls nötig zusätzlich die Reibungsbremse betätigt.

Für einen sanften Anhaltevorgang muss die Komfortverzögerung kurz vor Erreichen des Stillstands rechtzeitig zurückgenommen werden. Sei $j_{\max}$ der maximal erlaubte Ruck während des Anhaltevorgangs (der Ruck ist bei Rücknahme der Verzögerung positiv) und a_{Fzg} die aktuelle Beschleunigung. Dann muss die Beschleunigung bei Unterschreiten der Geschwindigkeit $v_{\mathrm{Fzg,0}} = a_{\mathrm{Fzg}}^2/(2 \cdot j_{\max})$ mit dem Ruck $j_{\max}$ zurückgenommen werden, um zum Zeitpunkt des Fahrzeugstillstands $a_{\mathrm{Fzg}} = 0\,\mathrm{m/s^2}$ zu erreichen. Für die Beispielwerte $j_{\max} = 1{,}5\,\mathrm{m/s^3}$ und $a_{\mathrm{Fzg}} = -1\,\mathrm{m/s^2}$ muss die Verzögerung unterhalb von $v_{\mathrm{Fzg,0}} = 0,\overline{3}\,\mathrm{m/s}$ zurückgenommen werden. Soll mit geringerem Ruck angehalten werden, ist $v_{\mathrm{Fzg,0}}$ größer.

5.2.2 Wahl des Zielabstands

Die ISO 15622:2018 macht über die Zeitlücke bzw. den Abstand zum VF folgende für diese Arbeit relevante Angaben [91]:

1. Die minimal einstellbare Zeitlücke $\tau_{\min}$ soll größer oder gleich $\tau = 0{,}8\,\mathrm{s}$ sein.
2. Es soll mindestens eine Zeitlücke im Bereich $\tau = 1{,}5\,\mathrm{s}$ bis $\tau = 2{,}2\,\mathrm{s}$ einstellbar sein.
3. Wenn das System dem Fahrer erlaubt, die Zeitlücke einzustellen und wenn das System nicht die zuletzt eingestellte Zeitlücke beibehält, soll ein vordefinierter Wert größer oder gleich $\tau = 1{,}5\,\mathrm{s}$ eingestellt werden.
4. In der Vorgängernorm ISO 22179:2009 wird vorgeschrieben, dass der konstante, von der Geschwindigkeit unabhängige Abstandswert d_0 größer oder gleich $d_{0,\min}$ sein soll mit $d_{0,\min} = 2\,\mathrm{m}$ [95]. Diese Vorgabe entfällt in der Revision, stellt jedoch einen guten Anhaltspunkt für die Wahl von d_0 dar.
5. Im stationären Zustand soll der minimale Abstand $d_{\min} = \max\left(d_{0,\min}, \tau_{\min} \cdot v_{\mathrm{Fzg}}\right)$ betragen.

6. Unter transienten Bedingungen darf der Abstand unter den minimalen Abstand fallen. Wenn diese Situation auftritt, soll das System den Abstand anpassen, um den Zielabstand einzustellen.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die ISO 20035:2019 für kooperative ACC Systeme im CF Modus eine minimale Zeitlücke von $\tau_{\mathrm{CF}} = 0{,}5\,\mathrm{s}$ erlaubt [92]. Der minimale Abstand beträgt hier nicht $d_{\min} = \max\left(d_{0,\min}, \tau_{\min} \cdot v_{\mathrm{Fzg}}\right)$, sondern $d_{\min} = d_{\mathrm{CF}} + \tau_{\mathrm{CF}} \cdot v_{\mathrm{Fzg}}$ mit dem Summanden d_{CF}, der unterhalb von $v_{\mathrm{Fzg}} = 5\,\mathrm{m/s}$ den Wert $d_{\mathrm{CF}} = 2\,\mathrm{m}$ annimmt, dann linear mit steigender Geschwindigkeit verringert wird und ab $v_{\mathrm{Fzg}} = 9\,\mathrm{m/s}$ auf $d_{\mathrm{CF}} = 0\,\mathrm{m}$ sinkt[15]. Diese Regel führt zu beachtlich geringen Abstandswerten: Bei einer Zeitlücke von $\tau_{\mathrm{CF}} = 0{,}5\,\mathrm{s}$ $(0{,}8\,\mathrm{s})$ und einer Geschwindigkeit von $v_{\mathrm{Fzg}} = 108\,\mathrm{km/h}$ beträgt der Mindestabstand $d_{\min} = 15\,\mathrm{m}$ $(24\,\mathrm{m})$ – Werte, die die Faustregel aus der Fahrschule „Abstand = halber Tacho“ um mehr als die Hälfte unterschreiten.

Aus den Angaben werden nun folgende Anforderungen für den ACC Entwurf abgeleitet. Angaben 1-3 geben Auskunft über Mindestzeitlücke und Hinweise für Voreinstellungen: $\tau_{\min} = 0{,}8\,\mathrm{s}$ und $\tau_{\mathrm{Vorein}} \geq 1{,}5\,\mathrm{s}$. Angabe 4 gibt einen Anhaltspunkt für die Wahl von d_0, z.B. $d_0 = 2\,\mathrm{m}$. Angabe 5 macht deutlich, dass die Zielabstandswahl $d_{\mathrm{soll}} = d_0 + \tau \cdot v_{\mathrm{Fzg}}$ mit $d_0 \geq d_{0,\min}$ und $\tau \geq \tau_{\min}$ die Anforderung an den minimalen Abstand $d_{\min} = \max\left(d_{0,\min}, \tau_{\min} \cdot v_{\mathrm{Fzg}}\right)$ erfüllt. Angabe 6 erlaubt das Unterschreiten des minimalen Abstands und kann für die Längsführung verwendet werden, um möglichst energieeffizient (keine/geringe Betätigung der Reibungsbremse) verzögern zu können.

5.2.3 Reaktionsfähigkeit der Längsführung

Das längsgeführte Fahrzeug wird im Folgenden als Egofahrzeug bezeichnet. Das Längsführungssystem muss das Egofahrzeug unter folgenden Randbedingungen kollisionsfrei zum Stillstand bringen: 1) das Egofahrzeug befindet sich in einer stationären Folgefahrt mit minimaler Zeitlückeneinstellung und 2) das mit $v_{\mathrm{VF}} = 10\,\mathrm{m/s}$ vorausfahrende Fahrzeug verzögert mit $a_{\mathrm{VF}} = -2{,}5\,\mathrm{m/s^2}$ bis zum Stillstand. Es sei darauf hingewiesen, dass die Forderung nach Kollisionsfreiheit umso leichter zu erfüllen ist, je größer die Geschwindigkeit des VFs ist, da dann der initiale Abstand umso größer ist. Der ACC Regler wird in der vorliegenden Arbeit so parametriert, dass die Vorgabe der ISO 15622 bei einer minimalen Zeitlücke von $\tau_{\min} = 1\,\mathrm{s}$ erfüllt wird.

[15] $d_{\mathrm{CF}} = \begin{cases} 2, & 0\,\mathrm{m/s} < v_{\mathrm{Fzg}} < 5\,\mathrm{m/s} \\ 2 - 0{,}5 \cdot \left(v_{\mathrm{Fzg}} - 5\right), & 5\,\mathrm{m/s} \leq v_{\mathrm{Fzg}} < 9\,\mathrm{m/s} \\ 0, & v_{\mathrm{Fzg}} \geq 9\,\mathrm{m/s} \end{cases}$

5.3 Funktionsarchitektur der Längsführung

Die Längsführung umfasst die in Abb. 5-2 dargestellten Funktionen. Die statische Geschwindigkeitsplanung und die LZP realisieren den in Abb. 2-2 dargestellten Eco-Fahren Block, die Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung fasst Bewegungsplanung und -regelung zusammen.

Auf die in Abb. 5-2 dargestellten Blöcke wird im Folgenden kurz eingegangen. Die darauffolgenden Unterkapitel liefern die Details.

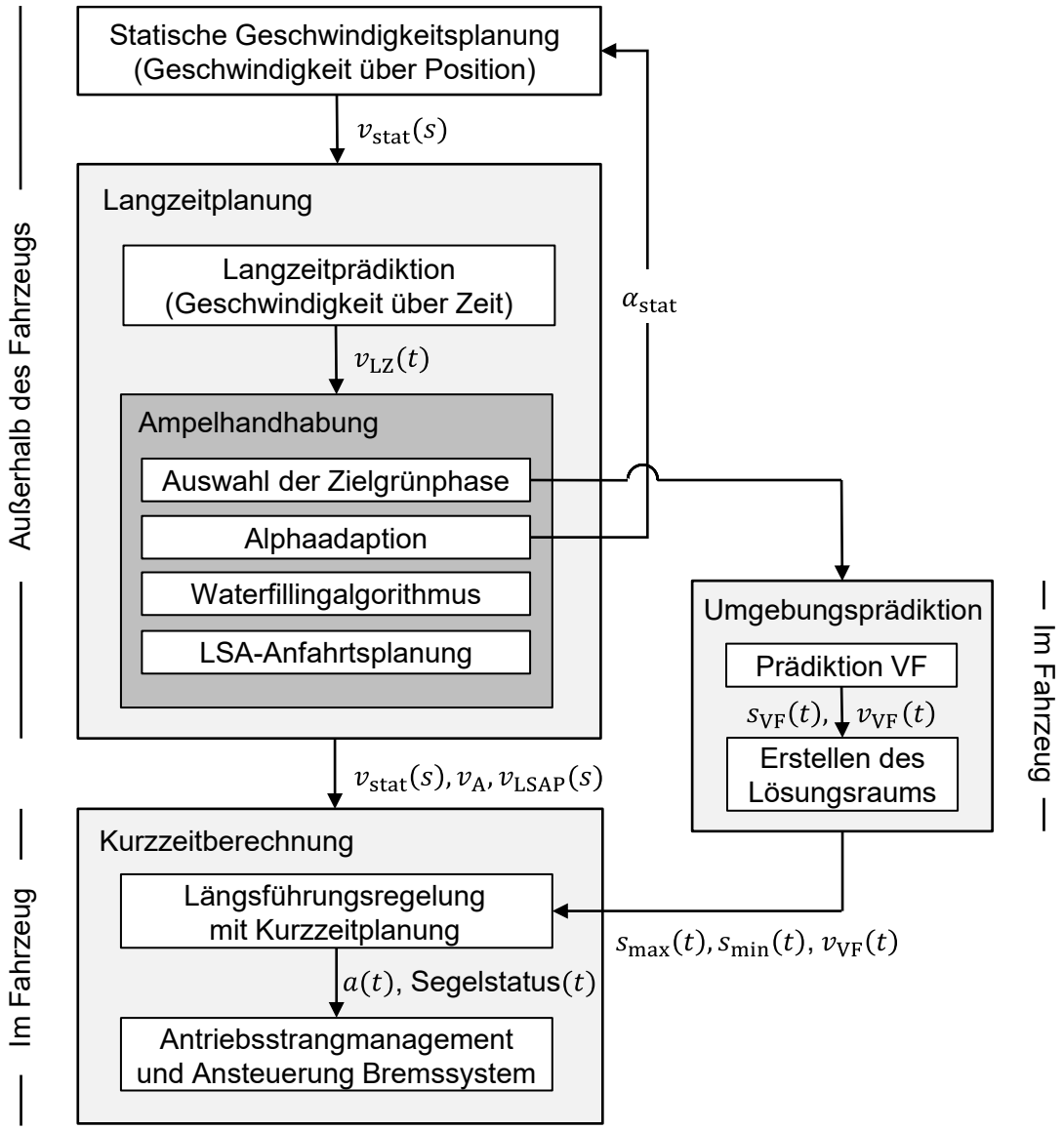


Abb. 5-2: Funktionsarchitektur der Fahrzeuglängsführung

Die Eingangsgrößen (nicht dargestellt) sind die Position und die Schaltzeiten der nächsten LSA, die statischen Routeninformationen, der Abstand und die Relativgeschwindigkeit zum VF und ggfs. die Positionen und Geschwindigkeiten weiterer VT sowie die Anzahl bzw. Dichte an Verkehrsteilnehmern zwischen dem Egofahrzeug und der nächsten LSA.

Die *statische Geschwindigkeitsplanung* erzeugt einen Geschwindigkeitsverlauf als Funktion des Ortes. Zunächst wird eine Maximalgeschwindigkeit berechnet, die sich aus der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, Stoppschildern, Kurvenradien und Bremsschwellen ergibt. Anschließend werden für die Zufahrt auf Geschwindigkeitsreduktionen Geschwindigkeitsverläufe als Funktion des Ortes entsprechend der CR-Strategie berechnet. Das Minimum aus den Verzögerungsverläufen und der berechneten Maximalgeschwindigkeit ergibt den statischen Geschwindigkeitsverlauf als Funktion des Ortes.

Die *Langzeitprädiktion* erzeugt einen Geschwindigkeitsverlauf als Funktion der Zeit, indem der statische Geschwindigkeitsverlauf mit dem in Abschnitt 5.6.2 beschriebenen ACC Regler nachgefahren wird. Geschwindigkeitserhöhungen erfolgen dadurch nicht instantan, sondern mit der Beschleunigung des ACC Reglers. Der ACC Regler wird dabei dahingehend modifiziert, dass den CR-Verläufen zum Anfahren der Geschwindigkeitsreduktionen ohne Abweichung gefolgt wird.

Im Block *Ampelhandhabung* wird die nächstmögliche Grünphase der voranliegenden LSA ausgewählt, die mit dem Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion erreicht werden kann. Wird innerhalb des Zeithorizonts der Langzeitprädiktion die LSA bei grün erreicht, ist diese Grünphase die Zielgrünphase, ansonsten die darauffolgende. Wird die Zielgrünphase bei Rot erreicht, werden die Segelanteile der CR-Abschnitte der statischen Geschwindigkeitsplanung erhöht, um die mittlere Geschwindigkeit zu verringern und damit die voranliegende LSA später zu erreichen. Das Erhöhen der Segelanteile wird durch iteratives Vergrößern von α_{stat} erreicht (α_{stat} beschreibt den Segelanteil) und wird von nun an als *Alphaadaption* bezeichnet. Bei der Auswahl der Zielgrünphase kann auch der Verkehr berücksichtigt werden, worauf in Abschnitt 5.5.1 eingegangen wird.

Der *Waterfillingalgorithmus* berechnet aus den Schaltzeiten der ausgewählten Grünphase, der Position der LSA und dem Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion einen im Sinne der Energieminimierung am Rad optimalen Geschwindigkeitsverlauf, der die Grünphase zu einem bestimmten Zeitpunkt (hier: zu Beginn der Grünphase) erreicht. Aufgrund der Form der energieoptimalen Lösung kann der Geschwindigkeitsverlauf durch eine einzige Geschwindigkeitskonstante v_{A} beschrieben werden, vorausgesetzt der statische Geschwindigkeitsverlauf $v_{\mathrm{stat}}(s)$ wird der unterlagerten Längsführungsregelung ebenfalls bereitgestellt.

Die *Lichtsignalanlagen-Anfahrtsplanung* (LSAP) wird für Mildhybridfahrzeuge eingesetzt und erweitert den Waterfillingalgorithmus um eine wirkungsgradgünstige LSA Anfahrt, bei der eine Mindestgeschwindigkeitsbegrenzung eingeführt wird und die Zufahrt auf rote LSA mit CR-Profilen erfolgt.

Die *Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung* (KZP) berechnet einen Sollbeschleunigungsverlauf und einen Verlauf des Segelstatus für einen im Vergleich zum Horizont der Langzeitprädiktion kurzen Zeithorizont $\mathfrak{P}_{\mathrm{A}}$. Der Segelstatus gibt an, zu welchen Zeitpunkten sich das Fahrzeug im

Zustand Segeln befindet. Der Zeithorizont $\mathfrak{P}_\mathrm{A}$ ist maximal so lang wie der in der KZP verwendete Prädiktionshorizont $\mathfrak{P}_\mathrm{H} = [0, t_\mathrm{H}], t_\mathrm{H} \in \mathbb{R}$. Das in dieser Arbeit verwendete Antriebsstrangmanagement ist regelbasiert ausgeführt und benötigt die Sollbeschleunigung und den Segelstatus für den nächsten Zeitschritt[16]. Eingangsgrößen der Längsführungsregelung mit KZP sind der statische Geschwindigkeitsverlauf v_stat, die Konstante v_A, der Geschwindigkeitsverlauf der LSAP v_LSAP, und der prädizierte Lösungsraum für den Prädiktionshorizont $\mathfrak{P}_\mathrm{H}$. Der Lösungsraum besteht aus den zwei Funktionen s_max und s_min zur Positionsbegrenzung und dem prädizierten Geschwindigkeitsverlauf des VFs v_VF. Die obere Positionsgrenze s_max wird aus der prädizierten Position des VFs und den Daten der ausgewählten Grünphase (Position und Schaltzeiten der LSA) berechnet: $\mathrm{s_{max}} = \min(\mathrm{s_{max,VF}}, \mathrm{s_{max,LSA}})$. Die untere Positionsgrenze s_min wird nur aus den Daten der ausgewählten Grünphase berechnet: $\mathrm{s_{min}} = \mathrm{s_{min,LSA}}$. Abb. 5-3 stellt die Positionsgrenzen beispielhaft dar. Die Grünphase der LSA erstreckt sich von Sekunde 5 bis 15.

Die Positionsgrenzen $s_\mathrm{max,LSA}(t)$ und $s_\mathrm{min,LSA}(t)$ können auch verwendet werden, um das Überqueren einer Kreuzung, die über keine LSA verfügt, zu ermöglichen, indem der Querverkehr als virtuelle LSA modelliert wird [56]. Die virtuelle LSA erlaubt bzw. verbietet die Kreuzungsüberfahrt für bestimmte Zeitintervalle.

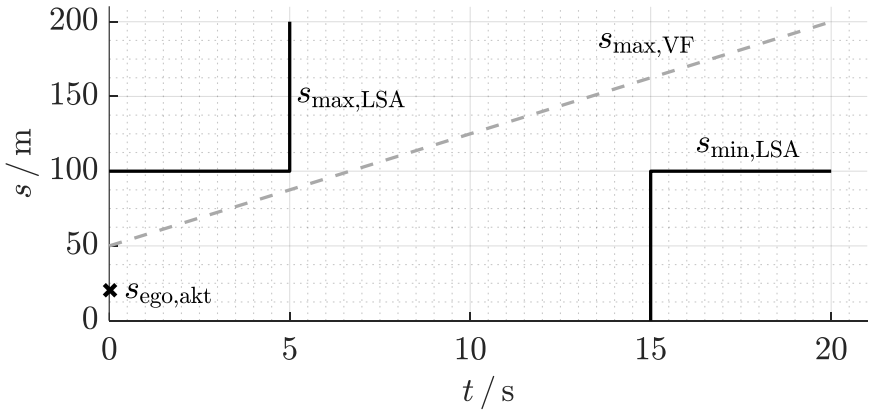


Abb. 5-3: Positionsgrenzen, die das Egofahrzeug nicht überschreiten bzw. unterschreiten darf

Für die Prädiktion des VFs wird im einfachsten Fall eine konstante Geschwindigkeitsextrapolation verwendet. Hierfür reicht die Erfassung der aktuellen Relativdistanz und -geschwindigkeit mit Abstandssensoren aus. Falls eine Kommunikation mit den Vorderfahrzeugen des VFs möglich ist, kann die Geschwindigkeit jedes Fahrzeugs in der erfassten Fahrzeugkette bis hin zum

[16] Die Längsführungsregelung mit KZP setzt den Segelstatus für den nächsten Zeitschritt nur dann auf Eins, wenn eine Mindestsegeldauer von einigen Sekunden prädiziert wird. Ohne diesen Vorverarbeitungsschritt ist es vorteilhaft, im Antriebsstrangmanagement den vollen Verlauf des Segelstatus zu verwenden, um anhand der prädizierten Segellänge über Motor-Aus bzw. Motor-LL entscheiden zu können.

unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeug durch ein Fahrermodell prädiziert werden[17], sodass z.B. ein in der Zukunft liegender Verzögerungsvorgang des VFs prädiziert werden kann, wenn sich das erste Fahrzeug in der Kette mit langsamerer Geschwindigkeit fortbewegt. Dies ermöglicht das frühzeitige Einleiten von Verzögerungsvorgängen für das Egofahrzeug. Abschnitt 6.1.2.4 geht auf die Prädiktion näher ein.

Das *Antriebsstrangmanagement* verwendet den Sollbeschleunigungs- und Segelstatusverlauf der Längsführungsregelung zum Ansteuern der Antriebsaggregate im nächsten Zeitintervall. Dies umfasst im Hybridfall die Aufteilung der Drehmomente zwischen VKM und EM, das Öffnen der Kupplung und das Starten und Abstellen der VKM. Im Fall des batterieelektrischen Fahrzeugs wird aus dem Sollbeschleunigungsverlauf das Drehmoment für die EM berechnet. Auf das Antriebsstrangmanagement für das Mildhybridfahrzeug wird in Abschnitt 6.1.3.1 konkret eingegangen. Sofern negative Sollbeschleunigungswerte nicht mehr durch das Antriebssystem bereitgestellt werden können, wird die Reibungsbremse angesteuert.

Die statische Geschwindigkeitsplanung und die LZP können außerhalb des Fahrzeugs durchgeführt werden. Die Auswirkung von Änderungen der Verkehrssituation auf die Langzeitberechnungen sind weniger sicherheitskritisch als die Auswirkung von Änderungen auf die Kurzzeitberechnungen – wie beispielsweise durch einen unerwarteten Bremsvorgang des VFs hervorgerufen – weshalb die Taktfrequenz der Langzeitberechnungen vergleichsweise niedrig gewählt werden kann (z.B. $f = 1\ \mathrm{Hz}$). Die Ergebnisse der Kurzzeitberechnungen hingegen müssen hochfrequenter berechnet werden (z.B. mit $f = 100\ \mathrm{Hz}$).

Die statische Geschwindigkeitsplanung, die LZP und die Längsführungsregelung mit KZP werden in den folgenden Kapiteln im Detail vorgestellt.

5.4 Statische Geschwindigkeitsplanung

Die statische Geschwindigkeitsplanung berechnet einen ortsabhängigen Geschwindigkeitsverlauf, der nur von statischen Routeninformationen (Kurvenradien, Kreisverkehren, Bremsschwellen und der gesetzlichen Höchstgeschwindigkeit) abhängt. Zunächst wird aus den statischen Routeninformationen eine Maximalgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Position ermittelt [56]:

$$v_{\mathrm{max}} = \min\left(v_{\mathrm{max,lim,}} v_{\mathrm{max,K}}, v_{\mathrm{max,Stop}}, v_{\mathrm{max,Bs}}\right) \text{ und} \tag{18}$$

$$v_{\mathrm{max,K}} = \sqrt{a_{\mathrm{max,quer}} \cdot r_{\mathrm{K}}}, \tag{19}$$

[17] Für das Fahrzeug zu Beginn der Kette wird wieder eine konstante Geschwindigkeitsprädiktion zu Grunde gelegt.

wobei $v_{\mathrm{max,lim}}$ die gesetzliche Höchstgeschwindigkeitsbegrenzung, $v_{\mathrm{max,K}}$ die Maximalgeschwindigkeit bei Kurvenfahrten, $v_{\mathrm{max,Stop}}$ die Maximalgeschwindigkeit zur Berücksichtigung von Stoppschildern[18], $v_{\mathrm{max,Bs}}$ die Maximalgeschwindigkeit beim Überqueren einer Bremsschwelle[19], $a_{\mathrm{max,quer}}$ die aus Komfortgründen maximal erlaubte Querbeschleunigung und r_{K} den ortsabhängigen Kurvenradius bezeichnen. Die Terme $v_{\mathrm{max,Stop}}$ und $v_{\mathrm{max,Bs}}$ kommen im Validierungsteil nicht vor, da sich weder Stoppschilder noch Bremsschwellen auf der simulierten Route befinden.

Im nächsten Schritt wird der Geschwindigkeitsverlauf (als Funktion der Position) für die Zufahrt auf Geschwindigkeitsreduktionen ermittelt. Die Geschwindigkeit wird dabei zunächst um $\alpha_{\mathrm{stat}} \cdot \Delta v_{\mathrm{Red}}$ durch Segeln reduziert und die verbleibende Differenz $(1-\alpha_{\mathrm{stat}}) \cdot \Delta v_{\mathrm{Red}}$ rekuperiert, wobei $\alpha_{\mathrm{stat}} \in [0{,}1]$ den Segelanteil und Δv_{Red} den Betrag der Geschwindigkeitsreduktion bezeichnen. Abb. 5-4 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf für zwei Geschwindigkeitsreduktionen und drei verschiedene Werte von α_{stat}.

Der Geschwindigkeitsverlauf des Verzögerungsprofils muss rückwärts, d.h. ausgehend von der Position der Geschwindigkeitsreduktion, über folgende Rekursion berechnet werden:

$$v_{\mathrm{Verz}}(s-\Delta s_{\mathrm{Verz}}) = \sqrt{v_{\mathrm{Verz}}(s)^2 - 2\Delta s_{\mathrm{Verz}} \cdot a(v_{\mathrm{Verz}}(s))}, \tag{20}$$

wobei Δs_{Verz} die Wegschrittweite und s die Position bezeichnen. Die Position $s \in \{s_{\mathrm{Red}}, s_{\mathrm{Red}} - \Delta s_{\mathrm{Verz}}, s_{\mathrm{Red}} - 2 \cdot \Delta s_{\mathrm{Verz}}, \dots\}$, wobei s_{Red} die Position der Geschwindigkeitsreduktion ist.

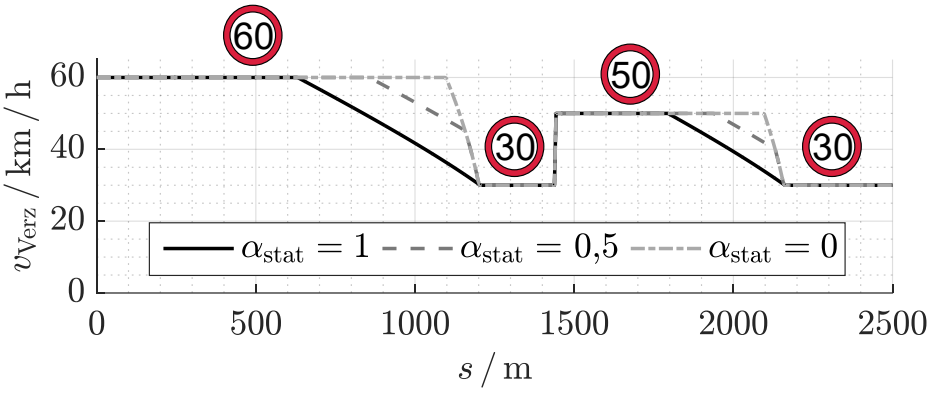


Abb. 5-4: Geschwindigkeitsverlauf der statischen Geschwindigkeitsplanung für drei Verzögerungsstrategien: ausschließlich segeln $(\alpha_{\mathrm{stat}} = 1)$*, ausschließlich rekuperieren* $(\alpha_{\mathrm{stat}} = 0)$ *und zuerst segeln, dann rekuperieren* $(\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5)$

Im Rekuperationsfall wird in Gl. (20) folgender Beschleunigungswert verwendet:

$$a_{\mathrm{R}} = \max\left(a_{\mathrm{Verz,Komf}}, a_{\mathrm{Reku,min}}\right), \tag{21}$$

[18] $v_{\mathrm{max,Stop}}$ beträgt $0\,\mathrm{km/h}$ bei der Position des Stoppschilds und $250\,\mathrm{km/h}$ (d.h. ein hoher Wert) sonst.
[19] Die Messungen aus [56] zeigen, dass die von menschlichen Fahrern gewählte Geschwindigkeit beim Überqueren der Bremsschwelle nahezu konstant ist mit $v_{\mathrm{max,Bs}} = 18\,\mathrm{km/h}$.

wobei $a_{\mathrm{Verz,Komf}}$ die Komfortbeschleunigung für einen Verzögerungsvorgang und $a_{\mathrm{Reku,min}}$ die durch Rekuperation minimal erzielbare Beschleunigung darstellen. Letztere berechnet sich für P0 bis P2 Hybride mit Gl. (1):

$$a_{\mathrm{Reku,min}} = \frac{1}{\lambda \cdot m_{\mathrm{Fzg}}} \cdot \left(-F_{\mathrm{W}} + \frac{\eta_{\mathrm{Getr}} \eta_{\mathrm{Diff}} i_{\mathrm{Getr}} i_{\mathrm{Diff}}}{r_{\mathrm{Rad}}} \cdot \left(M_{\mathrm{VKM,Schub}} + (-M_{\mathrm{max,Reku}}) \right) \right). \tag{22}$$

Das (vom Vorzeichen her negative) Schubmoment[20] der VKM, $M_{\mathrm{VKM,Schub}}$, und das maximale Rekuperationsmoment der EM, $M_{\mathrm{max,Reku}}$, sind abhängig von der Drehzahl der VKM (Gl. (4)) und werden durch Tabelleninterpolation berechnet. Die Übersetzung i_{Getr} ergibt sich aus $v_{\mathrm{Verz}}(s)$ und den Geschwindigkeitswerten, bei denen während eines Schubvorgangs der Gang gewechselt wird.

Für den Segelvorgang wird in Gl. (20) die Beschleunigung

$$a_{\mathrm{S}} = -\frac{1}{\lambda \cdot m_{\mathrm{Fzg}}} \cdot F_{\mathrm{W}} \tag{23}$$

verwendet. Die Größen F_{W} und λ berechnen sich mit Gl. (2) und (3).

Der Zielwert für α_{stat} ist an den vom Fahrer gewählten Fahrmodus anzupassen [55], [53]. Der adaptive Tempomat von BMW beispielsweise erlaubt Segeln nur im Eco-Modus und verwendet eine reine Brems- bzw. Rekuperationsstrategie ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$) nur im Sport-Modus [53]. Die Zielkalibrierung wird bei der in dieser Arbeit vorgestellten Alphaadaption zeitweise auf einen geringeren Wert herabgesetzt, wenn die nächste LSA nur auf diese Weise während der Grünphase mit ausreichend zeitlichem Abstand zur folgenden Rotphase erreicht wird.

Das Minimum aus v_{max} und v_{Verz} ergibt den Verlauf der statischen Geschwindigkeitsplanung:

$$v_{\mathrm{stat}} = \min(v_{\mathrm{max}}, v_{\mathrm{Verz}}). \tag{24}$$

5.5 Langzeitplanung

5.5.1 Auswahl der Zielgrünphase

Die Langzeitprädiktion berechnet den Geschwindigkeitsverlauf über Zeit, $v_{\mathrm{LZ}}(t)$, für ein vorgegebenes Langzeitintervall, indem dem in Abschnitt 5.6.2 beschriebenen ACC Regler der statische Geschwindigkeitsverlauf als Sollgeschwindigkeit vorgegeben wird. Durch anschließende Integration lässt sich die Zeitdauer Δt_{ist} bestimmen, die bis zum Erreichen der nächsten LSA vergeht. Um die frühestmögliche Grünphase auszuwählen, wird der statische Geschwindigkeitsverlauf für die Zufahrt auf eine neu aufkommende LSA zunächst mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$ berechnet. Wird die LSA bei

[20] Im P2 Fall verschwindet das Schubmoment bei geöffneter Kupplung.

Grün erreicht, ist diese Grünphase die Zielgrünphase. Wird die LSA bei Rot erreicht (wie in Abb. 5-5), ist es die darauffolgende. Die Zielgrünphase ist gekennzeichnet durch die Distanz zur LSA Δs_{LSA} und die beiden Zeitdauern Δt_{A} und Δt_{E} zum Erreichen des Anfangs und Endes der Grünphase. In die Geschwindigkeitsplanung wird nur die nächste LSA einbezogen, um nachfolgende VT, die möglicherweise an der nächsten Kreuzung abbiegen möchten, nicht zu behindern, was der Fall wäre, wenn auf die nächste Kreuzung langsam zugefahren wird, weil die übernächste LSA eine lange Rotphase besitzt.

Muss eine gewisse Anzahl an Vorderfahrzeugen zuerst die LSA überqueren, kommt es vor, dass das Egofahrzeug die LSA nicht während der ausgewählten Zielgrünphase überqueren kann. Dies kann frühzeitig erkannt werden, wenn dem Egofahrzeug die Verkehrsdichte bzw. die Anzahl an Verkehrsteilnehmern, die sich zwischen dem Egofahrzeug und der nächsten LSA befinden, zur Verfügung gestellt wird.[21] Das Produkt aus der Anzahl an Verkehrsteilnehmern zwischen Egofahrzeug und nächster LSA, $N_{\mathrm{VT}\rightarrow\mathrm{LSA}}$, und einer mittleren Zeitlücke $\bar{\tau}_{\mathrm{VT}}$ (z.B. $\bar{\tau}_{\mathrm{VT}} = 2\,\mathrm{s}$) ergibt die Dauer $\Delta t_{\mathrm{block,min}}$, für die die Grünphasen der nächsten LSA mindestens blockiert sind, weil zunächst die VT passieren müssen, bevor das Egofahrzeug die LSA überqueren kann. Anhand von $\Delta t_{\mathrm{block,min}}$ wird geprüft, ob die vorläufig ausgewählte Zielgrünphase blockiert ist, um in diesem Fall die nächstmögliche nicht blockierte Grünphase auszuwählen. Die Dauer $\Delta t_{\mathrm{block,min}}$ ist ein Mindestwert und entspricht in den wenigsten Fällen der Dauer $\Delta t_{\mathrm{block}}$, für die die LSA tatsächlich blockiert ist.[22] Insbesondere bei geringen Fahrzeugdichten und bei bereits ohne Verkehr knappem Erreichen der Zielgrünphase wird bei Verwendung von $\Delta t_{\mathrm{block,min}}$ tendenziell später erkannt, dass die Zielgrünphase blockiert ist, als bei Verwendung des tatsächlichen Wertes $\Delta t_{\mathrm{block}}$, der ohne Kenntnis der Position der VT allerdings nicht näher berechnet werden kann.

5.5.2 Alphaadaption

Wenn die nächste LSA mit dem mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$ berechneten Langzeitverlauf bei Rot erreicht wird, muss der Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion herabgesetzt werden. Dazu wird zunächst der Rekuperationsanteil der CR-Verzögerungsprofile iterativ verringert, d.h. α_{stat} wird in jedem Zeitschritt um $\Delta\alpha_{\mathrm{stat}}$ erhöht (z.B. $\Delta\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}1$). In jedem Zeitschritt wird die neue Zeitdauer zum Erreichen der LSA berechnet. Die Adaption wird beendet, wenn

1. alle CR-Profile durch reine Segelprofile ersetzt worden sind ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 1$) und die LSA weiterhin bei Rot erreicht wird oder

[21] Steht nur die mittlere Geschwindigkeit als Information zur Verfügung, kann (ab einer bestimmten Verkehrsdichte) die Verkehrsdichte über ein für den Streckenabschnitt repräsentatives Fundamentaldiagramm näherungsweise berechnet werden.

[22] Betrachten wir z.B. den Fall, dass die nächste LSA aktuell auf grün steht. In diesem Fall entspricht die Dauer $\Delta t_{\mathrm{block,min}}$ nur dann dem tatsächlichen Wert, wenn alle VT in einer Kolonne fahren und das vorderste Glied dieser Kolonne von der LSA genau $\bar{\tau}_{\mathrm{VT}} \cdot v_{\text{vorderstes Glied}}$ entfernt ist.

2. die LSA während der ausgewählten Zielgrünphase erreicht wird und der Wert für α_{stat} größer oder gleich dem für den entsprechenden Fahrmodus kalibrierten Zielwert ist oder
3. die LSA während der Zielgrünphase erreicht wird, aber α_{stat} nicht weiter Richtung Zielwert angehoben werden darf, damit nicht eine Mindestdauer zwischen der Ankunftszeit an der LSA und dem Beginn der folgenden Rotphase unterschritten wird.

Abb. 5-5 stellt die Alphaadaption anhand eines Beispiels dar. Die in $\Delta s_{\mathrm{LSA}} = 2100\,\mathrm{m}$ befindliche LSA wird während der Rotphase erreicht. Durch die Alphaadaption verschiebt sich die Ankunftszeit an der LSA in Richtung des Endes der Rotphase. Das erste Abbruchkriterium ist erfüllt.

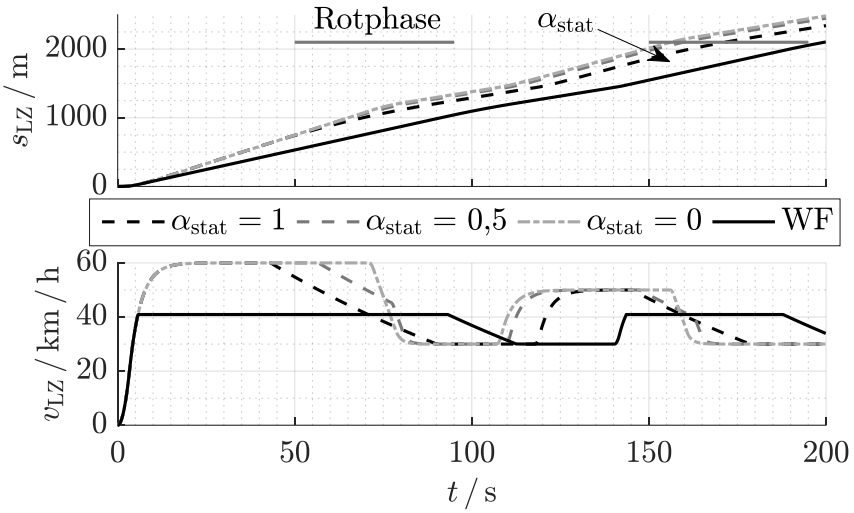


Abb. 5-5: Positions- und Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion über Zeit für drei verschiedene Werte von α_{stat} (entsprechend Abb. 5-4). Der nach drei Iterationen generierte Verlauf des Waterfillingalgorithmus (siehe $v_{\mathrm{LZ,neu,3}}$ aus Abb. 5-9) ist ebenfalls eingezeichnet (gekennzeichnet mit WF).

Die Adaption wird auch durchgeführt, wenn die LSA mit dem mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$ berechneten Langzeitverlauf bei Grün erreicht wird. In diesem Fall sind nur die Abbruchkriterien 2 und 3 relevant. Die im dritten Abbruchkriterium genannte Mindestdauer sorgt dafür, dass noch einige Fahrzeuge hinter dem Egofahrzeug die LSA bei grün überqueren können (bei einer Mindestdauer von $20\,s$ und einer durchschnittlichen Zeitlücke von $2\,s$ können noch etwa 10 Fahrzeuge bei grün passieren). Trifft das erste Abbruchkriterium zu (die LSA wird mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 1$ bei Rot erreicht), muss der mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 1$ berechnete Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ weiter herabgesetzt werden, um die LSA bei grün zu erreichen. Dieses Problem lässt sich allgemein so formulieren:

Sei Δt_{ist} die mit $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ berechnete Zeitdauer zum Erreichen der LSA und Δt_{soll} mit $\Delta t_{\mathrm{soll}} > \Delta t_{\mathrm{ist}}$ die vorgegebene Zieldauer. Gesucht ist der Geschwindigkeitsverlauf $v_{\mathrm{opt}}(t)$, der den Energiebedarf am Rad minimiert und die LSA in der Entfernung Δs_{LSA} zur vorgegebenen Zieldauer erreicht.

Da ohne das Vorhandensein von Geschwindigkeitsbegrenzungen ein konstanter Geschwindigkeitsverlauf den Energiebedarf am Rad minimiert [58], wird das Problem dadurch gelöst, dass alle Werte des zu $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ korrespondierenden *ortsabhängigen* Geschwindigkeitsverlaufs, die größer als v_{konst} sind, auf v_{konst} herabgesetzt werden, wobei $v_{\mathrm{konst}} \in \mathbb{R}$ so zu wählen ist, dass $\Delta t_{\mathrm{ist}} = \Delta t_{\mathrm{soll}}$.

Der im Folgenden vorgestellte Waterfillingalgorithmus findet diese Konstante innerhalb weniger Iterationen mit ausreichender Genauigkeit.

5.5.3 Waterfillingalgorithmus

Seien Δt_{soll} die vorgegebene Zieldauer zum Erreichen der LSA, Δs_{LSA} die Distanz zur LSA, $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ der Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion, t_{akt} die aktuelle Zeit und $\tilde{v}_0 := \frac{\Delta s_{\mathrm{LSA}}}{\Delta t_{\mathrm{soll}}}$.

Falls $\tilde{v}_0 \leq v_{\mathrm{LZ}}(t)$ für alle $t \in \mathcal{L}$ mit $\mathcal{L} = [t_{\mathrm{akt}}, t_{\mathrm{akt}} + \Delta t_{\mathrm{soll}}]$, dann ist der konstante Geschwindigkeitsverlauf $v_{\mathrm{opt}}(t) = \tilde{v}_0$, $t \in \mathcal{L}$, der Verlauf, der den Energiebedarf am Rad minimiert.

Existiert ein $t \in \mathcal{L}$ sodass $\tilde{v}_0 > v_{\mathrm{LZ}}(t)$, dann berechnet sich der ***zeitabhängige*** Verlauf $v_{\mathrm{opt}}(t)$ dadurch, dass

1) die Bereiche von $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ mit höherer Geschwindigkeit als v_{konst} auf den einheitlichen Wert v_{konst} herabgesetzt werden, wobei $v_{\mathrm{konst}} \in \mathbb{R}$ so zu wählen ist, dass die LSA nach der Zieldauer Δt_{soll} erreicht wird (Schritte A1 bis A7, Tab. 5-2), und
2) die herabgesetzten Bereiche zeitlich verlängert werden, da bevorstehende Geschwindigkeitsreduktionen und auch die LSA durch das Herabsetzen der Geschwindigkeit zu einem späteren Zeitpunkt erreicht werden.

Der Langzeitverlauf $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ muss also in Höhe *und* Dauer angepasst werden, was in den Schritten B1 bis B3 aus Tab. 5-3 erfolgt. Die Schritte A1 bis B4, die im Folgenden als Waterfillingalgorithmus bezeichnet werden, lösen das Problem iterativ. Abb. 5-6 zeigt den Algorithmus in der Übersicht; Tab. 5-2 und Tab. 5-3 liefern die Details. Der äußere Iterationsschleifenindex p wird zur Verbesserung der Lesbarkeit in den Tabellen weggelassen.

Abb. 5-7 zeigt die Zwischenergebnisse von zwei Iterationen der inneren Iterationsschleife (Schritte A1 bis A7) anhand eines Beispielverlaufs. Der Langzeitverlauf $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ ist identisch dem Langzeitverlauf aus Abb. 5-5 für $\alpha_{\mathrm{stat}} = 1$. Die in $2{,}1\,\mathrm{km}$ befindliche LSA soll in $200\,s$ erreicht werden. Die Geschwindigkeitskonstante wird so berechnet, dass die Summe der dunkelgrauen Flächen gleich der Summe der hellgrauen Flächen ist. Die dunkelgrauen Flächen zwischen $\tilde{v}_2$ und $\tilde{v}_1$ (siehe untere Grafik) können aufgrund der geringen Differenz zwischen $\tilde{v}_2$ und $\tilde{v}_1$ nur angedeutet werden. Nach der zweiten Iteration ist v_{konst} mit $v_{\mathrm{konst}} = \tilde{v}_2$ bereits ausreichend genau berechnet (die Differenz zwischen $\tilde{v}_2$ und $\tilde{v}_1$ ist kleiner als $1\,\mathrm{km/h}$).

Abb. 5-8 zeigt das Anpassen des Langzeitverlaufs in Höhe und Dauer (Schritte B1 bis B3) für die erste Iteration der äußeren Iterationsschleife. Die Zeitdauern Δt_1 und Δt_2 sind so bemessen, dass ${A_1}' = A_1$ und ${A_2}' = A_2$. Der Wert v_{konst} ist identisch mit $\tilde{v}_2$ aus Abb. 5-7. Es resultiert ein neuer Langzeitverlauf $v_{\mathrm{LZ,neu}(,1)}(t)$.

Die Schritte A1 bis B4 werden so lange durchlaufen, bis die festgelegte Anzahl p_{End} an äußeren Iterationen erreicht ist. Der nach jeder äußeren Iteration p neu berechnete Geschwindigkeitsverlauf $v_{\mathrm{LZ,neu},p}(t)$ ist in Abb. 5-9 dargestellt. Die vertikalen Linien markieren, nach welcher Zeit die LSA erreicht wird. Für das verwendete Beispiel genügen zwei bis drei äußere Iterationen des Waterfillingalgorithmus, um die in $2{,}1\,\mathrm{km}$ befindliche LSA in $200\,s$ zu erreichen: Ohne Anwendung des Waterfillingalgorithmus wird die LSA in $171{,}4\,\mathrm{s}$ erreicht, mit Waterfilling nach der ersten äußeren Iterationsschleife in $191{,}3\,\mathrm{s}$, nach der zweiten in $197{,}9\,\mathrm{s}$ und nach der dritten in $199{,}6\,\mathrm{s}$. Die Abweichung von der Sollankunftszeit ist für das verwendete Beispiel nach drei Iterationen kleiner als $1\,\mathrm{s}$. Eine gemeinsame Darstellung der Ergebnisse der Alphaadaption und des Waterfillingalgorithmus (nach der dritten Iteration) liefert Abb. 5-5.

Der Name Waterfilling wurde gewählt, da das Ergebnis der inneren Iterationsschleife mit dem Befüllen eines Wasserbehälters verglichen werden kann. Wird $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ in den Schritten A1 bis A7 als obere Berandung eines Behälters angesehen, welcher von unten mit der Wassermenge Δs_{LSA} gefüllt wird[23], stellt sich ein Wasserpegel konstanter Höhe ein und dort, wo die Berandung unterhalb des Pegels liegt, passt sich das Wasser an die Form der Berandung an.

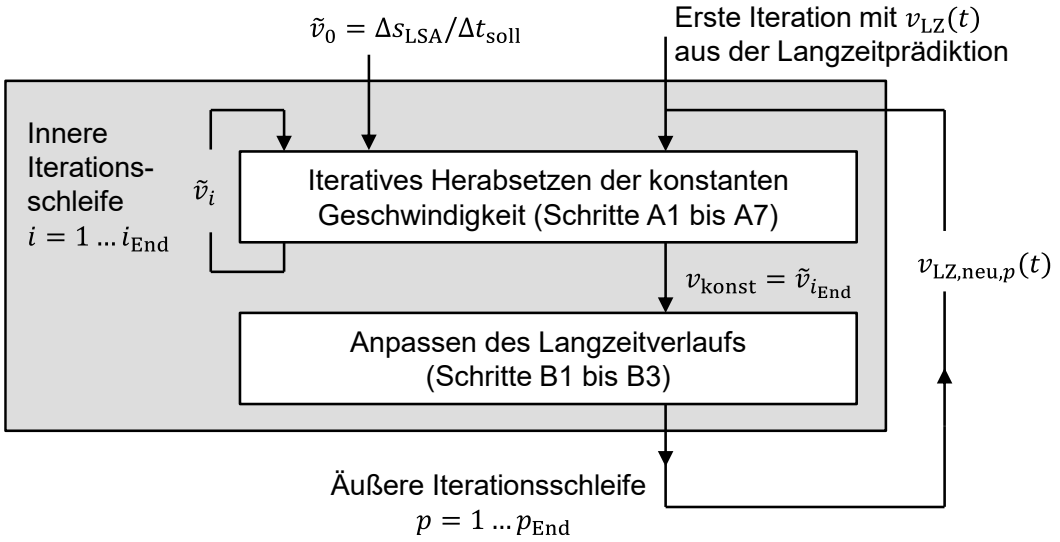


Abb. 5-6: Der Waterfillingalgorithmus in der Übersicht

[23] Die Einheiten der Achsen und Größen sind vorher zu normieren, damit der Vergleich valide ist.

A1	Starte mit der Initialisierung $i = 0$, $\tilde{v}_0 = \frac{\Delta s_{\mathrm{LSA}}}{\Delta t_{\mathrm{soll}}}$ und $\mathcal{M}_0 = \{t \in \mathcal{L} \mid \tilde{v}_0 > v_{\mathrm{LZ}}(t)\}$.
A2	Berechne $\Delta s_i = \int_{\mathcal{M}_i} \left(\tilde{v}_i - v_{\mathrm{LZ}}(t)\right) \mathrm{d}t$.
A3	Setze $\tilde{v}_{i+1} = \tilde{v}_i + \Delta s_i / \lvert\mathcal{H}_i\rvert$, wobei $\lvert\mathcal{H}_i\rvert$ die Mächtigkeit der Menge $\mathcal{H}_i$ bezeichnet, $\mathcal{H}_i = \mathcal{L} \setminus \bigcup_{j=0}^{i} \mathcal{M}_j$ und $\mathcal{L} = [t_{\mathrm{akt}}, t_{\mathrm{akt}} + \Delta t_{\mathrm{soll}}]$.
A4	Setze $\mathcal{M}_{i+1} = \{t \in \mathcal{L} \mid \tilde{v}_{i+1} > v_{\mathrm{LZ}}(t)\} \setminus \bigcup_{j=0}^{i} \mathcal{M}_j$.
A5	Setze $i = i + 1$.
A6	Fahre mit Schritt 2 fort, bis die festgelegte Anzahl i_{End} an Iterationen erreicht ist.
A7	Setze $v_{\mathrm{konst}} = \tilde{v}_{i_{\mathrm{End}}}$ und fahre mit Schritt B1 fort.

Tab. 5-2: Iteratives Herabsetzen der konstanten Geschwindigkeit (innere Iterationsschleife)

B1	Berechne $\mathcal{N}_{\mathrm{fallend}} = \left\{t \in \mathcal{L} \mid v_{\mathrm{konst}} = v_{\mathrm{LZ}}(t) \wedge \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} v_{\mathrm{LZ}}(t) < 0\right\}$ und $\mathcal{N}_{\mathrm{steigend}} = \left\{t \in \mathcal{L} \mid v_{\mathrm{konst}} = v_{\mathrm{LZ}}(t) \wedge \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} v_{\mathrm{LZ}}(t) > 0\right\}$. Falls $\min(\mathcal{N}_{\mathrm{fallend}}) < \min(\mathcal{N}_{\mathrm{steigend}})$, füge t_{akt} zur Menge $\mathcal{N}_{\mathrm{steigend}}$ hinzu. Falls $\max(\mathcal{N}_{\mathrm{fallend}}) < \max(\mathcal{N}_{\mathrm{steigend}})$, füge $t_{\mathrm{akt}} + \Delta t_{\mathrm{soll}}$ der Menge $\mathcal{N}_{\mathrm{fallend}}$ hinzu. Sortiere die Elemente von $\mathcal{N}_{\mathrm{fallend}}$ und $\mathcal{N}_{\mathrm{steigend}}$ in aufsteigender Ordnung: $\mathcal{N}_{\mathrm{fallend}} = \{t_{\mathrm{f},1}, t_{\mathrm{f},2}, \dots, t_{\mathrm{f},N}\}$ und $\mathcal{N}_{\mathrm{steigend}} = \{t_{\mathrm{st},1}, t_{\mathrm{st},2}, \dots, t_{\mathrm{st},N}\}$.
B2	Berechne die Flächen $A_l = \int_{t_{\mathrm{st},l}}^{t_{\mathrm{f},l}} (v_{\mathrm{LZ}}(t) - v_{\mathrm{konst}}) \, \mathrm{d}t$, $l = 1, \dots, N$.
B3	Füge zu den Zeitpunkten $\tilde{t}_{\mathrm{f},l}$ einen konstanten Geschwindigkeitsverlauf der Höhe v_{konst} und Dauer $\Delta t_l = \frac{A_l}{v_{\mathrm{konst}}}$ ein, beschrieben durch folgende Rekursion: $$v_{\mathrm{LZ},l}(t) = \begin{cases} v_{\mathrm{LZ},l-1}(t), & t < \tilde{t}_{\mathrm{st},l} \\ v_{\mathrm{konst}}, & \tilde{t}_{\mathrm{st},l} \le t < \tilde{t}_{\mathrm{f},l} + \Delta t_l \\ v_{\mathrm{LZ},l-1}(t - \Delta t_l), & \tilde{t}_{\mathrm{f},l} + \Delta t_l \le t \end{cases}$$ mit $t \in \mathcal{L}$, $v_{\mathrm{LZ},0}(t) = v_{\mathrm{LZ}}(t)$, $\tilde{t}_{\mathrm{st},l} = t_{\mathrm{st},l} + \sum_{k=1}^{l-1} \Delta t_k$ und $\tilde{t}_{\mathrm{f},l} = t_{\mathrm{f},l} + \sum_{k=1}^{l-1} \Delta t_k$, $l = 1, \dots, N$. Durch Auflösen der Rekursion ergibt sich

$$v_{\mathrm{LZ,neu}}(t) := v_{\mathrm{LZ},N}(t) = \begin{cases} v_{\mathrm{LZ}}(t) & t < t_{\mathrm{st},1} \\ v_{\mathrm{konst}} & t_{\mathrm{st},1} \le t < t_{\mathrm{f},1} + \Delta\tilde{t}_1 \\ v_{\mathrm{LZ}}(t - \Delta\tilde{t}_1) & t_{\mathrm{f},1} + \Delta\tilde{t}_1 \le t < t_{\mathrm{st},2} + \Delta\tilde{t}_1 \\ v_{\mathrm{konst}} & t_{\mathrm{st},2} + \Delta\tilde{t}_1 \le t < t_{\mathrm{f},2} + \Delta\tilde{t}_2 \\ v_{\mathrm{LZ}}(t - \Delta\tilde{t}_2) & t_{\mathrm{f},2} + \Delta\tilde{t}_2 \le t < t_{\mathrm{st},3} + \Delta\tilde{t}_2 \\ \dots & \dots \\ v_{\mathrm{konst}} & t_{\mathrm{st},N} + \Delta\tilde{t}_{N-1} \le t < t_{\mathrm{f},N} + \Delta\tilde{t}_N \\ v_{\mathrm{LZ}}(t - \Delta\tilde{t}_N) & t_{\mathrm{f},N} + \Delta\tilde{t}_N \le t \end{cases}$$

mit $t \in \mathcal{L}$ und $\Delta\tilde{t}_l = \sum_{k=1}^{l} \Delta t_k$, $l = 1, \dots, N$.

B4 Führe die Schritte A1 bis B3 mit dem in B3 berechneten Geschwindigkeitsverlauf $v_{\mathrm{LZ,neu}}(t)$ erneut durch (ersetze dabei stets $v_{\mathrm{LZ}}(t)$ durch $v_{\mathrm{LZ,neu}}(t)$).

Tab. 5-3: Anpassen des Langzeitverlaufs und Aufruf der äußeren Iterationsschleife

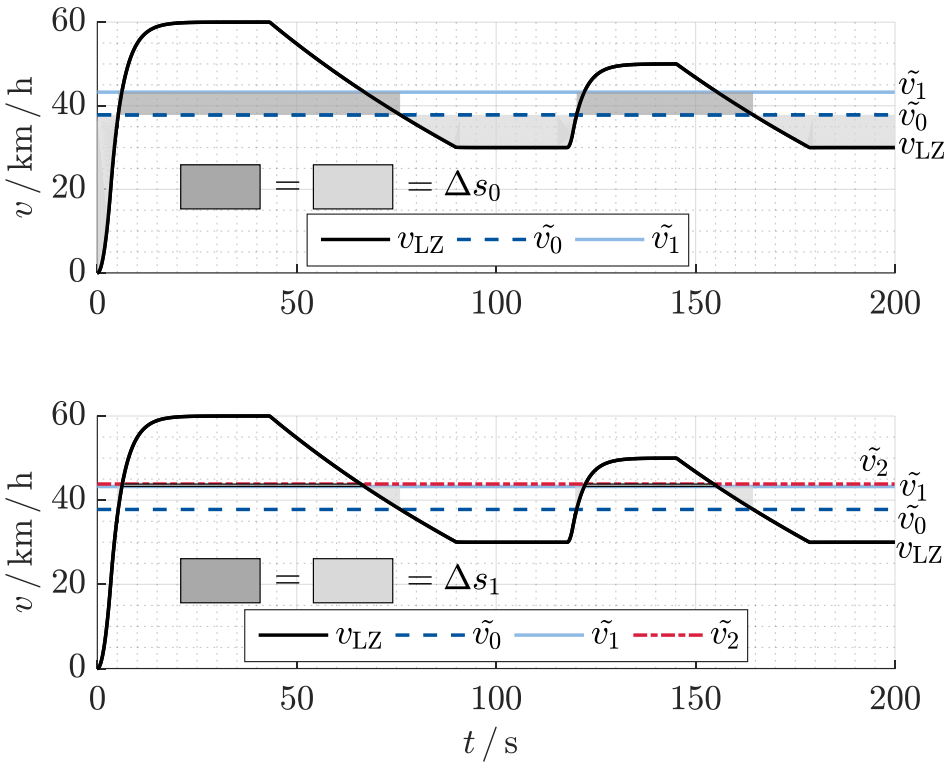


Abb. 5-7: Die konstante Geschwindigkeit (Ergebnis der Schritte A1 bis A7) nach der ersten Iteration (obere Grafik) und der zweiten Iteration (untere Grafik)

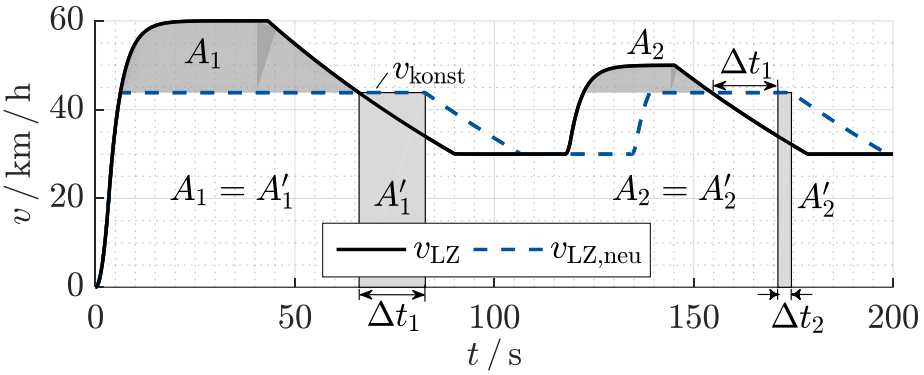


Abb. 5-8: Berechnung eines neuen Langzeitverlaufs mit herabgesetzter Geschwindigkeit (Ergebnis der Schritte B1 bis B3)

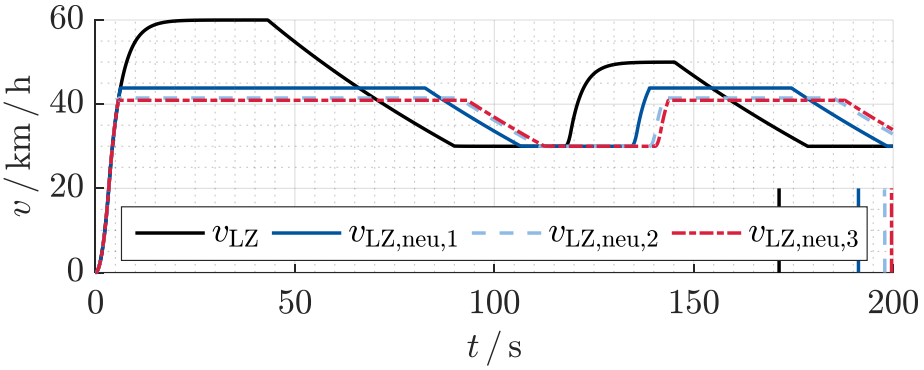


Abb. 5-9: Veränderung des Langzeitverlaufs (Schritte A1 bis B3) nach drei Iterationen

Wird für Δt_{soll} die Zeitdauer Δt_{A} zum Erreichen des Beginns der Grünphase eingesetzt, ergibt sich der energieoptimale Geschwindigkeitsverlauf zum Erreichen des Beginns der Grünphase, im Fall von Δt_{E} der zum Erreichen des Endes der Grünphase. Der Geschwindigkeitsverlauf muss für nachfolgende Berechnungen nicht gespeichert werden. Es genügt, den in A7 mit der Zeitdauer Δt_{A} berechneten Wert $v_{\text{konst,A}}$ zu speichern (kurz als v_{A} bezeichnet) und zum aktuellen Zeitpunkt stets das Minimum aus v_{A} und dem Geschwindigkeitswert der statischen Geschwindigkeitsplanung, v_{stat}, zu verwenden. In Abschnitt 5.6.2.2 wird präzisiert, dass zur Berechnung von v_{A} eine etwas größere Zeitdauer als Δt_{A} verwendet wird, d.h. die LSA wird bewusst nicht exakt zum Beginn der Grünphase erreicht, sondern etwas später. Dies ist für die Praxis sinnvoll, da die Mehrzahl der Fahrer nicht billigt, wenn das Egofahrzeug mit einer nicht notwendigerweise geringen Geschwindigkeit v_{A} auf eine noch rote LSA zufährt, um diese dann exakt zum Zeitpunkt des Umschaltens auf grün zu überqueren. Die Konstante $v_{\text{konst,E}}$ bzw. v_{E} korrespondiert zur Zeitdauer Δt_{E} und wird für die Längsführung nicht benötigt. Sie ist nur für den Vergleich von Waterfillingalgorithmus und DDP relevant (siehe Abschnitt 5.5.5).

5.5.4 Lichtsignalanlagen-Anfahrtsplanung

Aufgrund des geringen Wirkungsgrads der VKM bei niedrigen Geschwindigkeiten kann es verbrauchsgünstiger sein, die Sollgeschwindigkeit v_{A} durch einen Mindestwert $v_{\mathrm{min,LSA}}$ nach unten zu begrenzen und das Fahrzeug für den Fall $v_{\mathrm{A}} < v_{\mathrm{min,LSA}}$ vor der nunmehr nur bei Rot erreichbaren LSA mit der CR-Strategie zum Stehen zu bringen. Diese Vorgehensweise wird als Lichtsignalanlagen-Anfahrtsplanung bezeichnet. Die Berechnung des CR-Profils erfolgt entsprechend Gl. (20) ausgehend von der Geschwindigkeit $0\ \mathrm{km/h}$ und der Position der LSA. Der Geschwindigkeitshub Δv_{Red}, der durch α_{stat} in einen Segel- und Rekuperationsanteil aufgeteilt wird, ist gleich $v_{\mathrm{min,LSA}}$. Für α_{stat} wird der für den Fahrmodus kalibrierte Wert verwendet – eine Adaption von α_{stat} ist nicht nötig. Wenn die Routenführung und die Positionen aller LSA auf der Route im Vorfeld bekannt sind, kann das CR-Profil zu Beginn der Route einmalig berechnet und als Funktion des Ortes abgespeichert werden, da die Mindestgeschwindigkeit $v_{\mathrm{min,LSA}}$ konstant ist. Ansonsten wird das CR-Profil berechnet, sobald die Information über die nächste LSA zur Verfügung steht. Der Geschwindigkeitsverlauf der LSAP $v_{\mathrm{LSAP}}(s)$ nimmt bis zum Beginn des CR-Profils den Wert $v_{\mathrm{min,LSA}}$ an und fällt dann entsprechend dem CR-Profil auf $0\ \mathrm{km/h}$ ab (siehe Abb. 5-10). Der Mindestwert $v_{\mathrm{min,LSA}}$, der den Kraftstoffverbrauch im Zyklus minimiert, wird in Abschnitt 5.3 simulativ ermittelt.

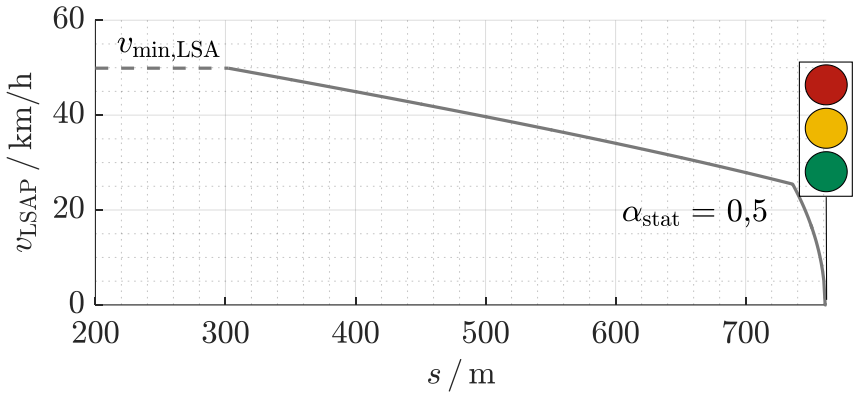


Abb. 5-10: Geschwindigkeitsverlauf der LSAP

Der Geschwindigkeitsverlauf der statischen Geschwindigkeitsplanung, der LSAP und die Konstante des Waterfillingalgorithmus werden in der unterlagerten Längsführungsregelung kombiniert, indem dem ACC Regler die Sollgeschwindigkeit

$$v_{\mathrm{soll}} = \min(v_{\mathrm{stat}}(s), \max(v_{\mathrm{LSAP}}(s), v_{\mathrm{A}})) \tag{25}$$

vorgegeben wird.

5.5.5 Waterfillingalgorithmus und Diskrete Dynamische Programmierung im Vergleich

Der Waterfillingalgorithmus stellt eine Alternative zur DDP dar, die ebenfalls eingesetzt werden kann, um den Energiebedarf am Rad zu minimieren (zumeist in Verbindung mit einem Kostenterm

für die Fahrzeit und evtl. für die Beschleunigung). Um den optimalen Geschwindigkeitsverlauf mit DDP zu finden, muss ein dreidimensionaler Zustandsraum mit den Dimensionen Geschwindigkeit, Position und Zeit verwendet und die Geschwindigkeitsbegrenzungen und Schaltzeiten bzw. Positionen der LSA berücksichtigt werden [47]. Die Ankunftszeiten an den LSA ergeben sich aus der Minimierung der Kostenfunktion.

Um die Rechenkomplexität dieses Verfahrens zu reduzieren, verwendet [17] nur zwei Dimensionen (Geschwindigkeit und Position) und berücksichtigt die akkumulierte Zeit in der Kostenfunktion. Bei dieser Methode kommt zwangsläufig eine Vorwärtssuche zum Einsatz. Eine Rückwärtssuche kann nur verwendet werden, wenn die Ankunftszeit vorher bekannt ist. In [17] wird angemerkt, dass die Verwendung eines zweidimensionalen Zustandsraums zu suboptimalen Lösungen führen kann. Allerdings wird nicht beschrieben, unter welchen Randbedingungen dies der Fall ist.

Ye et. al. erweitern die Vorgehensweise von [17], indem zur Reduktion der Rechenkomplexität das Gitter der Wegstützstellen an die Fahrstrecke angepasst wird, sodass bei erwarteten Konstantfahrtabschnitten ein grobmaschiges Gitter und vor und nach Geschwindigkeitsreduktionen oder LSA ein feinmaschiges Gitter verwendet wird [16]. Dies ändert allerdings nichts an der Tatsache, dass durch die Verwendung eines zweidimensionalen Zustandsraums suboptimale Lösungen gefunden werden.

Da mehrere Autoren den Ansatz der DDP mit zweidimensionalem Geschwindigkeit-Position-Zustandsraum verfolgen [16, 17, 96–99] und Hinweise zu dessen Suboptimalität zurückhaltend gebrauchen, wird die Suboptimalität dieses Ansatzes an einem Beispiel verdeutlicht. Das Ergebnis des Waterfillingalgorithmus wird ebenfalls dargestellt.

Zunächst wird der Fall einer freien Wegstrecke ohne Hindernisse und ohne Geschwindigkeitsreduktionen betrachtet; die Maximalgeschwindigkeit betrage auf der gesamten Fahrstrecke $v_{\mathrm{max.lim}} = 60\,\mathrm{km/h}$. In der Entfernung $\Delta s_{\mathrm{LSA}} = 2500\,\mathrm{m}$ befinde sich eine LSA, die nur zwei Grünphasen besitze. In den Zeiträumen $\mathrm{T_{G1}} = [220\,\mathrm{s}, 280\,\mathrm{s}]$ und $\mathrm{T_{G2}} = [330\,\mathrm{s}, 390\,\mathrm{s}]$ sei die LSA grün, ansonsten sei sie rot. Das Fahrzeug muss die LSA folglich während einer der beiden Grünphasen überqueren. Zur Optimierung mit DDP wird die in [16] vorgestellte Kostenfunktion bestehend aus je einem Term zur Berücksichtigung der Fahrzeit, des Energiebedarfs am Rad und des Absolutwerts der Beschleunigung verwendet. Bei der Einstellung der Gewichtungsfaktoren erhält der Term für die Fahrzeit ein größeres Gewicht als die anderen beiden Terme. Zusätzlich werden Zustandsübergänge mit einem hohen Kostenwert bestraft, wenn sie zu größeren Beschleunigungen als $a_{\mathrm{max}} = 3\,\mathrm{m/s^2}$ führen. Die Fahrzeuggeschwindigkeit betrage zu Beginn der Fahrstrecke $v_{\mathrm{Fzg}} = 0\,\mathrm{km/h}$. Abb. 5-11 zeigt die optimalen Pfade für jeden Geschwindigkeitsknoten kurz vor dem Erreichen der LSA. Nach anfänglichen Beschleunigungsvorgängen stellen sich konstante Geschwindigkeitsverläufe ein.

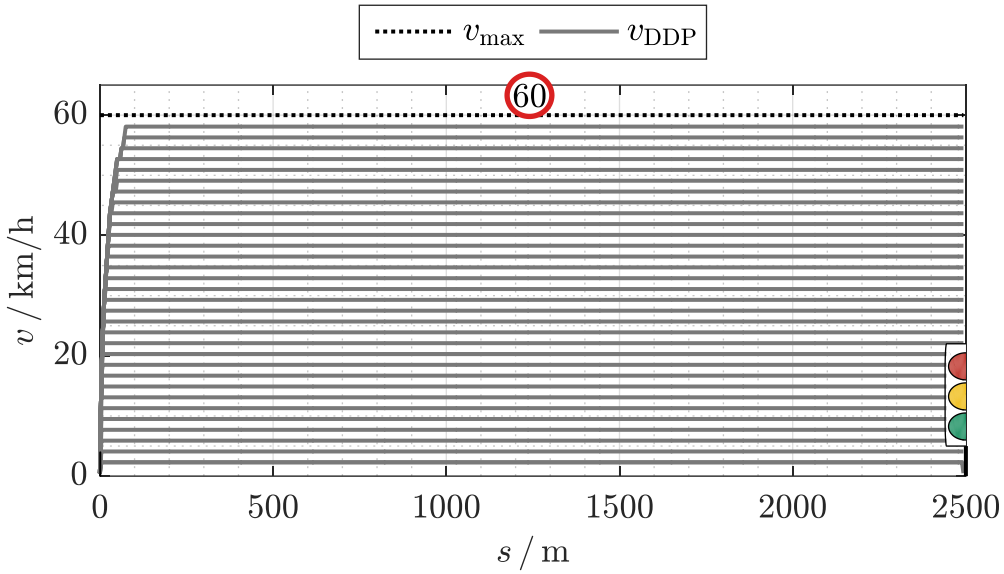


Abb. 5-11: Optimale Geschwindigkeitspfade für jeden Geschwindigkeitsknoten der DDP kurz vor dem Erreichen der LSA

Wird nun das Zwischenergebnis der vorwärtssuchenden DDP beim bzw. kurz hinter dem Erreichen der LSA betrachtet (siehe Abb. 5-12), wird deutlich, dass einige Pfade verworfen werden, weil sie die LSA während der Rotphase kreuzen.

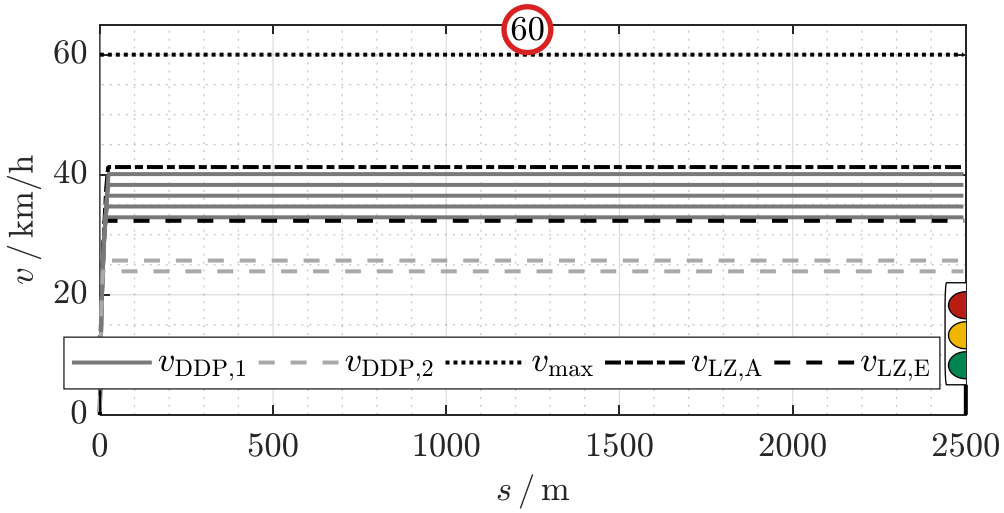


Abb. 5-12: Optimale Geschwindigkeitspfade der DDP beim Erreichen der LSA

Die als $v_{\mathrm{DDP},1}$ gekennzeichneten Pfade erreichen die LSA während der erstmöglichen Grünphase, die als $v_{\mathrm{DDP},2}$ gekennzeichneten während der zweitmöglichen. Die beiden Lösungen des Waterfillingalgorithmus zum Erreichen des Anfangs und Endes der erstmöglichen Grünphase sind als $v_{\mathrm{LZ,A}}$ und $v_{\mathrm{LZ,E}}$ (als Funktion des Ortes) dargestellt und liegen zwischen den Geschwindigkeitsgitterpunkten der DDP. Die Form der Lösung unterscheidet sich nicht von der der DDP. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen dem Waterfillingalgorithmus und der DDP wird

der initiale Geschwindigkeitsverlauf, mit dem der Waterfillingalgorithmus erstmalig aufgerufen wird, nicht mit den Gleichungen des ACC Reglers berechnet, sondern zum Erreichen der Maximalgeschwindigkeit das mittels DDP berechnete Geschwindigkeitsprofil verwendet. Der initiale Geschwindigkeitsverlauf folgt anschließend der Maximalgeschwindigkeit.

Die Maximalgeschwindigkeit sei nun nicht mehr konstant, sondern werde vor der LSA reduziert (siehe Abb. 5-13). Die Geschwindigkeitsreduktion führt dazu, dass sich Pfade höherer Geschwindigkeit (Pfad A wird repräsentativ herausgegriffen) zwingend mit Pfad B kreuzen, woraufhin im vorliegenden Fall die Pfade mit höherer Geschwindigkeit verworfen werden, da Pfad B den geringeren Kostenwert aufweist (die Kostenwerte sind nicht dargestellt). Die Pfade höherer Geschwindigkeit werden demnach bei der Vorwärtssuche bereits *vor* dem Erreichen der LSA verworfen und stehen nicht mehr als mögliche Lösungen zur Verfügung. Dies führt dazu, dass die vorwärtssuchende DDP die Geschwindigkeitspfade zum Erreichen der erstmöglichen Grünphase nicht mehr findet, obwohl – wie das Ergebnis des Waterfillingalgorithmus zeigt – mehrere Geschwindigkeitspfade hierfür in Frage kämen (siehe Abb. 5-14).

Das Beispiel zeigt, dass die vorwärtssuchende DDP mit zweidimensionalem Geschwindigkeit-Position-Zustandsraum potenziell suboptimale Lösungen findet, wenn vor dem Erreichen einer LSA Geschwindigkeitsreduktionen auftreten.

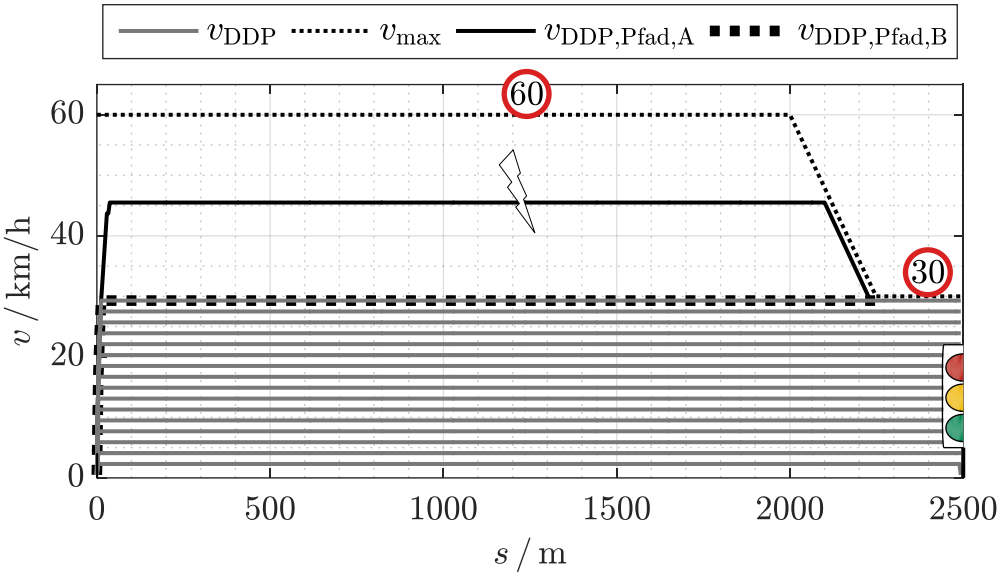


Abb. 5-13: Optimale Geschwindigkeitspfade der DDP kurz vor dem Erreichen der LSA bei vorangehender Verringerung der Maximalgeschwindigkeit. Der Blitz über Pfad A deutet an, dass dieser verworfen wird.

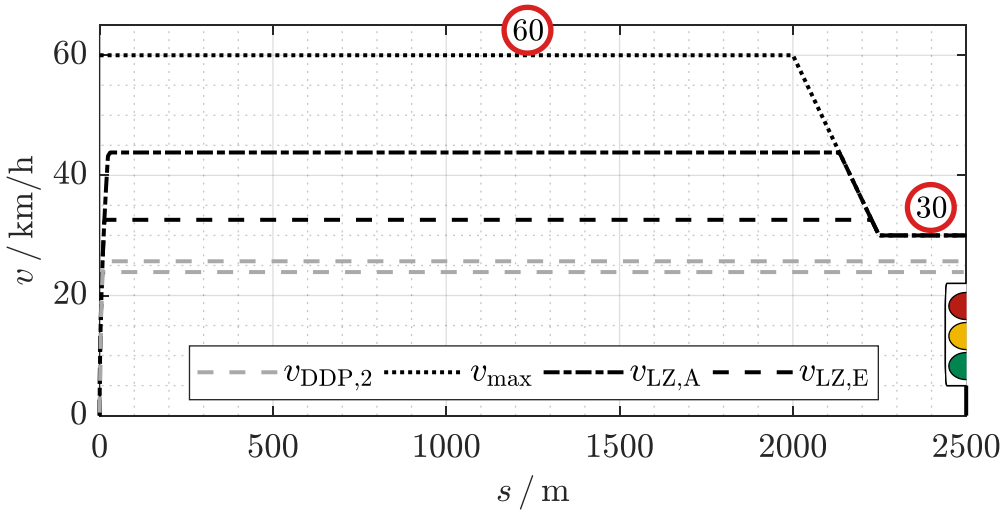


Abb. 5-14: Optimale Geschwindigkeitspfade der DDP beim Erreichen der LSA bei vorhergehender Verringerung der Maximalgeschwindigkeit

Das im Beispiel verwendete Suchgitter der DDP besitzt die Schrittweiten $\Delta v = 0{,}5\ \mathrm{m/s^2}$ und $\Delta s = 4\ \mathrm{m}$. Demnach liegen $n_\mathrm{s} = 625$ Wegpunkte zwischen Startposition und LSA. Die Anzahl an Geschwindigkeitsstützstellen $n_\mathrm{v} = 34$. Auf einem Arbeitsplatzrechner dauert die Berechnung der Geschwindigkeitspfade bis zum Erreichen der LSA mehrere Sekunden. Der Waterfillingalgorithmus wurde mit einer Schrittweite von $0{,}5\ \mathrm{s}$ und einem Horizont von $300\ \mathrm{s}$ aufgerufen (insgesamt $n_\mathrm{t} = 600$ Zeitstützstellen) und berechnet die beiden Verläufe v_A und v_E in wenigen Millisekunden.

Die Vorteile des Waterfillingalgorithmus gegenüber vorwärtssuchender DDP mit zweidimensionalem Zustandsraum lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Rechenkomplexität des Waterfillingalgorithmus ist $\mathrm{O}(n_\mathrm{t})$, d.h. die Rechenzeit skaliert linear mit der Anzahl an Zeitstützstellen; die Komplexität der DDP ist $\mathrm{O}(n_\mathrm{v}^2 \cdot n_\mathrm{s})$ [16].
- Die Geschwindigkeitskonstante des Waterfillingalgorithmus obliegt keiner Diskretisierung durch Gitterpunkte, sondern kann auch zwischen den Gitterpunkten der DDP liegen.
- Der Waterfillingalgorithmus findet für beliebige Verläufe der Maximalgeschwindigkeit stets denjenigen Geschwindigkeitspfad zum Erreichen der ausgewählten Zielgrünphase, der den geringsten Energiebedarf am Rad aufweist. Im Gegensatz zur DDP gibt es keine algorithmischen Hindernisse, als Zielgrünphase immer die nächstmöglich erreichbare auszuwählen.

Bei Verwendung eines dreidimensionalen Suchraums fällt der erstgenannte Vorteil noch stärker ins Gewicht, wohingegen der letztgenannte entfällt.

5.6 Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung

Die Einbettung der Längsführungsregelung mit KZP in das Gesamtsystem erfolgte bereits in Kapitel 5.3 (siehe Abb. 5-2). Die Eingangsgrößen sind der statische Geschwindigkeitsverlauf $v_{\mathrm{stat}}(s)$, die Konstante der LZP v_{A}, der Geschwindigkeitsverlauf der LSAP v_{LSAP} und der durch $s_{\max}(t)$, $s_{\min}(t)$ und $v_{\mathrm{VF}}(t), t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}$, gebildete Lösungsraum. Die Ausgangsgrößen sind die Sollbeschleunigung und der Segelstatus für den nächsten Zeitschritt, da das in dieser Arbeit verwendete Antriebsstrangmanagement keinen Zeitverlauf benötigt. Falls ein Zeitverlauf für die Ausgangsgrößen benötigt wird, kann dieser durch mehrmaligen Aufruf der Längsführungsregelung mit angepassten Eingangsgrößen generiert werden (die Anzahl an Aufrufen ist gleich der Anzahl an Zeitstützstellen der Ausgangsgrößen). Diese geradlinige Vorgehensweise kann durch recheneffizientere Implementierungen ersetzt werden.

Abb. 5-15 liefert eine Übersicht über die Vorausschaufunktionen, die von der Längsführungsregelung mit KZP (im Folgenden kurz als Längsführungsregelung bezeichnet) realisiert werden.

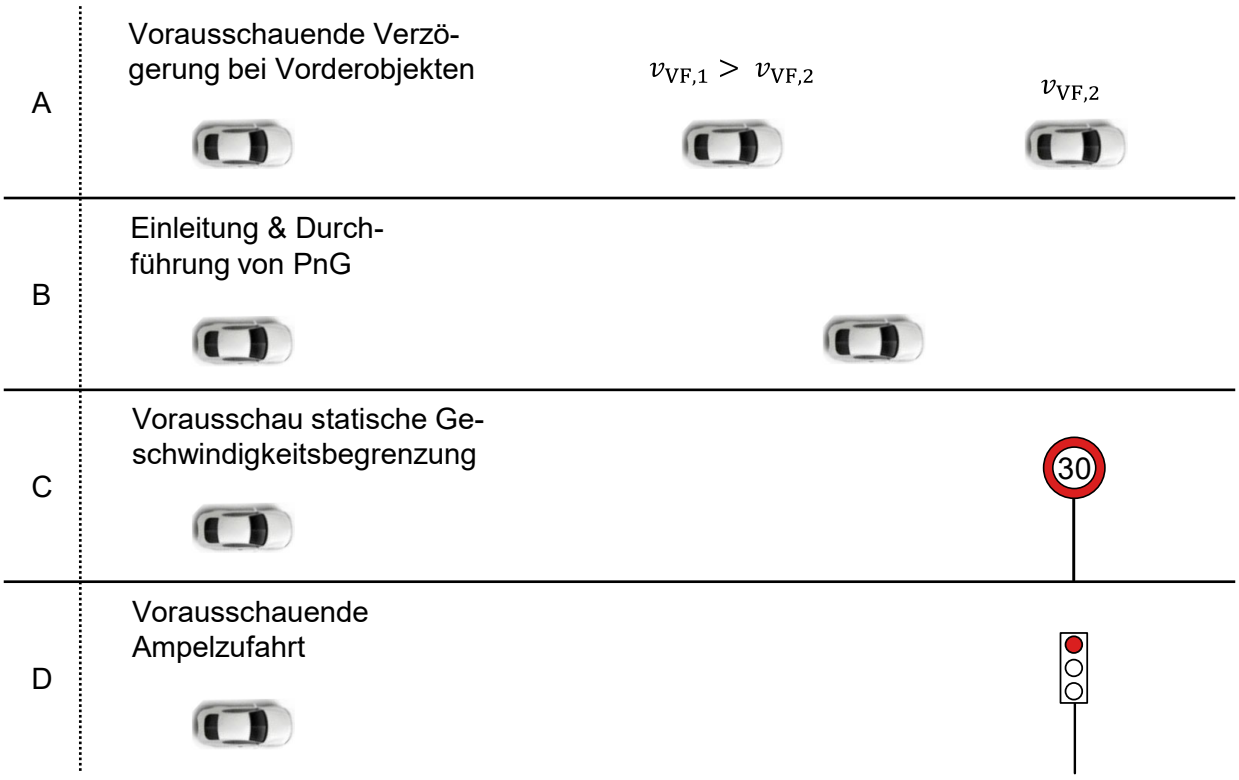


Abb. 5-15: Übersicht über die Vorausschaufunktionen (A bis D), die von der Längsführungsregelung mit KZP realisiert werden

A. Bei Vorhandensein eines Vorderobjekts (ein Fahrzeug oder eine LSA) wird entschieden, ob und wann ein Segel- oder Rekuperationsvorgang eingeleitet wird, sei es, weil das Objekt in Zukunft verzögert (wie im dargestellten Fall), oder weil sich das Egofahrzeug einem langsam fahrenden Objekt oder einer roten LSA annähert.

B. Der PnG Betrieb wird eingeleitet und durchgeführt, wenn die Bedingungen (die im Folgenden noch aufgeführt werden) erfüllt sind.

C. Segel- und Rekuperationsvorgänge werden gemäß der statischen Geschwindigkeitsplanung eingeleitet.

D. Wenn die LSAP einen Segelvorgang verlangt oder die Sollgeschwindigkeitsvorgabe für die LSA-Zufahrt eine ausreichend große Geschwindigkeitsreduktion fordert, wird ein Segelvorgang eingeleitet, und zwar im Unterschied zu Funktion A auch dann, wenn die LSA noch nicht im Zeithorizont der KZP liegt.

Wenn keine der Vorausschaufunktionen aktiv ist, wird das Fahrzeug durch einen ACC Regler geführt.

Zur Realisierung der Vorausschaufunktionen wird die Längsführungsregelung in vier Zustände unterteilt: Prädiktives ACC, Pulse, Glide und Rekuperation (siehe Abb. 5-16). Dabei ist jeder Zustandsübergang möglich, ausgenommen die Übergänge von Prädiktives ACC nach Pulse und von Rekuperation nach Pulse und Glide.

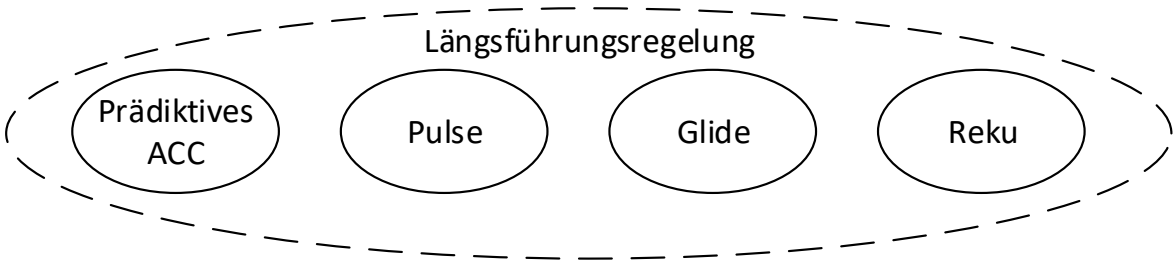


Abb. 5-16: Zustände der Längsführungsregelung

Im Zustand *Prädiktives ACC* wird zur Realisierung der Vorausschaufunktionen der geeignete Zustandswechsel eingeleitet. Der PnG Betrieb wird durch einen Wechsel nach Glide eingeleitet und ein vorausschauender Verzögerungsvorgang durch einen Wechsel nach Glide oder Rekuperation. Ist kein Zustandswechsel erforderlich, folgt die Sollbeschleunigung der Berechnungsvorschrift des ACC Reglers, der in der Lage ist, eine Zielgeschwindigkeit einzustellen oder einen Zielabstand zu halten.

Im Zustand *Pulse* wird ebenfalls geprüft, ob ein vorausschauender Verzögerungsvorgang durch einen Wechsel nach Glide oder Rekuperation einzuleiten ist (Funktionen A, C und D aus Abb. 5-15). Ist dies nicht der Fall, wird der geeignete Zeitpunkt zum Wechsel nach Glide berechnet, um den PnG Betrieb durchzuführen. Falls erkannt wird, dass der PnG Betrieb in den vorgegebenen Grenzen nicht möglich ist, wird der Pulsvorgang durch einen Wechsel nach Prädiktives ACC frühzeitig abgebrochen.

Im Zustand *Glide* wird geprüft, ob für einen vorausschauenden Verzögerungsvorgang ein Wechsel nach Rekuperation nötig ist (Funktionen A, C und D). Ist dies nicht der Fall, wird, sofern der

Segelvorgang beendet ist, nach Prädiktives ACC gewechselt. Befindet sich das Fahrzeug in der Durchführung des PnG Betriebs (Funktion B), wird der geeignete Zeitpunkt zum Wechsel nach Pulse berechnet. Auch hier ist es möglich, den PnG Betrieb durch einen vorzeitigen Wechsel nach Prädiktives ACC abzubrechen.

Im Zustand *Rekuperation* wird die Stärke der Verzögerung vorausschauend berechnet und nach Beendigung des Verzögerungsvorgangs in den Zustand Prädiktives ACC gewechselt.

Zunächst werden die verschiedenen Zeitlücken eingeführt, die zur Realisierung der Vorausschaufunktionen nötig sind. Anschließend werden die einzelnen Zustände detailliert betrachtet.

5.6.1 Definition der Zeitlücken und des Abstandsbandes für PnG

Das ACC System stellt den Zielabstand entsprechend der folgenden Abstandsregel ein:

$$d_{\mathrm{ACC,soll}} = d_{\mathrm{ACC}} + \tau_{\mathrm{ACC}} \cdot v_{\mathrm{ego}}, \tag{26}$$

wobei d_{ACC} den konstanten Anteil, τ_{ACC} die Zeitlücke und v_{ego} die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs bezeichnen. Um diesen Zielabstand lässt sich ein Abstandsband definieren, beschrieben durch die folgenden Abstände:

$$d_{\mathrm{PnG,+}} := (d_{\mathrm{ACC}} + \Delta d_{\mathrm{PnG}}) + (\tau_{\mathrm{ACC}} + \Delta\tau_{\mathrm{PnG}}/2) \cdot v_{\mathrm{ego}} \text{ und} \tag{27}$$

$$d_{\mathrm{PnG,-}} := d_{\mathrm{ACC}} + (\tau_{\mathrm{ACC}} - \Delta\tau_{\mathrm{PnG}}/2) \cdot v_{\mathrm{ego}}, \tag{28}$$

wobei Δd_{PnG} und $\Delta\tau_{\mathrm{PnG}}$ die Breite des Abstandsbandes festlegen.

Man stelle sich nun vor, das Fahrzeug befinde sich im PnG Betrieb, wechsele den Zustand von Pulse nach Glide und bewege sich aufgrund der erhöhten Geschwindigkeit (beim Wechsel von Pulse nach Glide ist die Geschwindigkeit maximal) auf den geringeren Abstand $d_{\mathrm{PnG,-}}$ zu, um diesen bei perfekter Vorausberechnung der Segeltrajektorie und perfekter Prädiktion des VFs im Segelbetrieb zu tangieren. Da im Allgemeinen weder die Vorausberechnung noch die Prädiktion perfekt sind, muss der Abstand $d_{\mathrm{PnG,-}}$ durch einen Toleranzbereich erweitert werden, innerhalb dessen der Zustand Glide beibehalten werden kann. Dazu wird in Gl. (28) der Term $\Delta\tau_{\mathrm{Tol,-}} \cdot v_{\mathrm{ego}}$ subtrahiert:

$$d_{\mathrm{Segeln,-}} := d_{\mathrm{ACC}} + (\tau_{\mathrm{ACC}} - \Delta\tau_{\mathrm{PnG}}/2 - \Delta\tau_{\mathrm{Tol,-}}) \cdot v_{\mathrm{ego}}. \tag{29}$$

Wird allerdings in der Prädiktion der Segeltrajektorie vorausgesehen, dass auch dieser Abstand unterschritten wird, ist zum geeigneten Zeitpunkt nach Rekuperation zu wechseln. Während des Rekuperationsvorgangs wird zunächst eine Komfortverzögerung eingestellt, welche erhöht wird, wenn die berechnete Rekuperationstrajektorie den minimalen Zielabstand d_{Reku} für den Rekuperationsvorgang unterschreitet (siehe Abb. 5-17):

$$d_{\text{Reku}} := d_{\text{ACC}} + (\tau_{\text{ACC}} - \Delta\tau_{\text{Reku}}) \cdot v_{\text{ego}}. \tag{30}$$

Der Zielabstand $d_{\text{Segeln},+}$ ist für den PnG Betrieb relevant, um die Segeldauer unter bestimmten Bedingungen zu verlängern (siehe die Ausführungen zum Zustand Glide im Anhang 8.5.1). Er wird analog zu Gl. (29) definiert, indem $\Delta\tau_{\text{Tol},+}$ zu den Zeitlücken in Gl. (27) addiert wird.

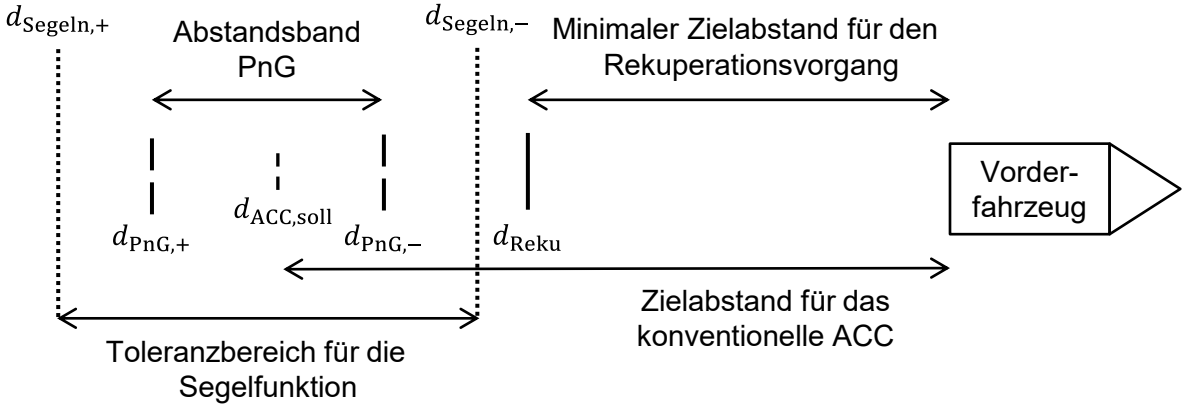


Abb. 5-17: Übersicht über die in der Längsführung verwendeten Zeitlücken bzw. Abstände

5.6.2 Zustand Prädiktives ACC

Im Zustand Prädiktives ACC werden die Vorausschaufunktionen A bis D durch einen Zustandswechsel eingeleitet[24]. Sofern kein Zustandswechsel erforderlich ist, gibt der ACC Regler die Sollbeschleunigung vor[25] [50]:

$$a_{\text{ACC,Obj}} = \left(v_{\text{Obj}} - v_{\text{ego}}\right) \cdot r_{\text{v,Obj}} + \left(\left(s_{\text{Obj}} - s_{\text{ego}}\right) - \left(d_{\text{ACC}} + \tau_{\text{ACC,adapt}} \cdot v_{\text{ego}}\right)\right) \cdot r_{\text{s,Obj}}\ , \tag{31}$$

$$a_{\text{ACC,v}} = \max\left(\left(v_{\text{soll}} - v_{\text{ego}}\right) \cdot r_{\text{v,Abw}}, a_{\text{Verz,Komf}}\right) \text{ und} \tag{32}$$

$$a_{\text{ACC,soll}} = f_{\text{lim}}\left(\min\left(a_{\text{ACC,Obj}}, a_{\text{ACC,v}}\right)\right). \tag{33}$$

Die Reglerparameter $r_{\text{v,Obj}}$ und $r_{\text{s,Obj}}$ werden geschwindigkeitsabhängig gewählt, $r_{\text{v,Abw}}$ ist konstant. Für geringe Geschwindigkeiten werden $r_{\text{v,Obj}}$ und $r_{\text{s,Obj}}$ schärfer eingestellt, um die in Abschnitt 5.2.3 genannten Anforderungen an die Reaktionsfähigkeit der Längsführung zu erfüllen. Gl. (31) beschreibt den Folgefahrt-, Gl. (32) den Geschwindigkeitsregler. Das Vorderobjekt, beschrieben durch v_{Obj} und s_{Obj}, kann ein Fahrzeug, eine LSA oder ein anderes stehendes oder bewegtes Objekt sein. Die Funktion f_{lim} begrenzt das Argument derart, dass die Ableitung des Arguments innerhalb der Grenzen für den Ruck und der Wert des Arguments innerhalb der Grenzen für die Beschleunigung bleiben. Die Begrenzung für den Ruck wird an die Situation angepasst:

[24] Die einzige Abweichung von dieser Regel stellt die Berechnung der Beschleunigung in Gl. (53) dar.
[25] mit Ausnahme von der Berechnung aus Gl. (53)

Wenn $a_{\mathrm{ACC,Obj}} < a_{\mathrm{ACC,v}}$ und $v_{\mathrm{ego}} > v_{\mathrm{Obj}}$, werden die Begrenzungen von Abb. 5-1 verwendet, weil Sicherheit vor Fahrkomfort geht, ansonsten wird der Ruck auf $\pm\,1\,\mathrm{m/s^3}$ begrenzt. Die Begrenzungen für die Beschleunigung sind durch Abb. 5-1 gegeben, wobei die Maximalbeschleunigung aus Abb. 5-1 zusätzlich so weit verringert wird, dass die VKM nicht oberhalb der Linie des optimalen Wirkungsgrads betrieben wird. Eine positive Mindestbeschleunigung wird stets gewährleistet. Die Zeitlücke $\tau_{\mathrm{ACC,adapt}}$ ist adaptierbar, worauf im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

5.6.2.1 Zeitlückenadaption

Die Zeitlücke $\tau_{\mathrm{ACC,adapt}}$ aus Gl. (31) ist bei stationärer Folgefahrt gleich der Zeitlücke τ_{ACC} aus Gl. (26). Sie kann jedoch zeitweise verringert oder vergrößert werden, um abrupte Änderungen der Sollbeschleunigung zu vermeiden, wenn aus einem anderen Zustand heraus in den Zustand Prädiktives ACC gewechselt wird. Die Zeitlücke $\tau_{\mathrm{ACC,adapt}}$ wird vor jedem Eintritt in den Zustand Prädiktives ACC neu berechnet, indem die aktuelle Sollbeschleunigung vor dem Zustandswechsel, $a_{\mathrm{soll,akt}}$, gleich der Beschleunigung des ACC Reglers, $a_{\mathrm{ACC,Obj}}$, gesetzt, Gl. (31) nach der Zeitlücke umgestellt und das Ergebnis auf ein sinnvolles Zeitlückenintervall (z.B. von $0{,}5\,\mathrm{s}$ bis $3\,\mathrm{s}$) begrenzt wird. Nach Eintritt in den Zustand Prädiktives ACC wird $\tau_{\mathrm{ACC,adapt}}$ innerhalb der nächsten Sekunden iterativ in Richtung des stationären Wertes τ_{ACC} zurückgeführt.

Abb. 5-18 zeigt die Auswirkung der Zeitlückenadaption, wenn aus einem Rekuperationsvorgang mit $a_{\mathrm{soll,akt}} = -1\,\mathrm{m/s^2}$ in den Zustand Prädiktives ACC gewechselt wird.

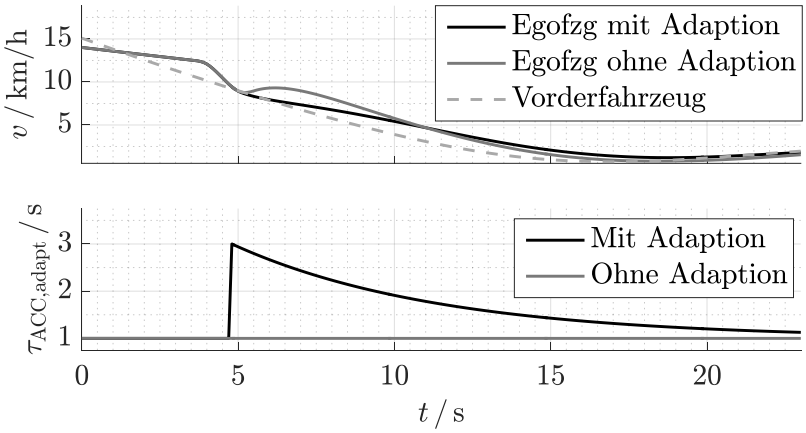


Abb. 5-18: Geschwindigkeitsverläufe mit und ohne Zeitlückenadaption während eines Verzögerungsvorgangs des VFs

Bis Sekunde 4 segelt das Egofahrzeug, rekuperiert dann und wechselt kurz vor Sekunde 5 in den Zustand Prädiktives ACC. Bis zu diesem Zeitpunkt sind die Geschwindigkeitsverläufe mit und ohne Adaption identisch. Die stationäre Zeitlücke $\tau_{\mathrm{ACC}} = 1\,\mathrm{s}$. Die Adaption erhöht die Zeitlücke und vermeidet dadurch unnötige Beschleunigungen. Auf die gleiche Weise können durch

zeitweises Verringern der Zeitlücke unnötige Verzögerungen vermieden werden, z.B. bei Abbruch eines Pulsvorgangs und Wechsel nach Prädiktives ACC.

Das zeitweise Verringern der Zeitlücke könnte auch angewendet werden, um das Überqueren einer LSA noch vor dem Umschalten auf Rot zu ermöglichen, und entspricht dem Verhalten menschlicher Fahrer, die dem VF dichter auffahren, um eine LSA noch bei Grün überqueren zu können.

Die Zeitlückenadaption bietet ferner eine geschickte Möglichkeit, unnötige Verzögerungsvorgänge bei Einschervorgängen anderer Fahrzeuge zu vermeiden, indem auch hier die Zeitlücke zeitweise herabgesetzt wird. Die Vorgehensweise zur Berechnung von $\tau_{\mathrm{ACC,adapt}}$ ist dabei die gleiche wie beim Zustandswechsel: Die Zeitlücke wird zu Beginn des Einschervorgangs so weit verringert, dass die Sollbeschleunigung vor dem Einschervorgang gleich der Vorgabe des ACC Reglers $a_{\mathrm{ACC,Obj}}$ nach dem Einschervorgang ist.

5.6.2.2 Vorausschaufunktionen im Zustand Prädiktives ACC

Die Prüfung, ob ein Zustandswechsel nach Glide oder Rekuperation erforderlich ist, erfolgt gemäß dem Entscheidungsbaum aus Abb. 5-19. Die logischen Aussagen $A_{\mathrm{Verz,1}}$, $A_{\mathrm{Verz,2}}$… A_{LSAP} werden im Folgenden detailliert.

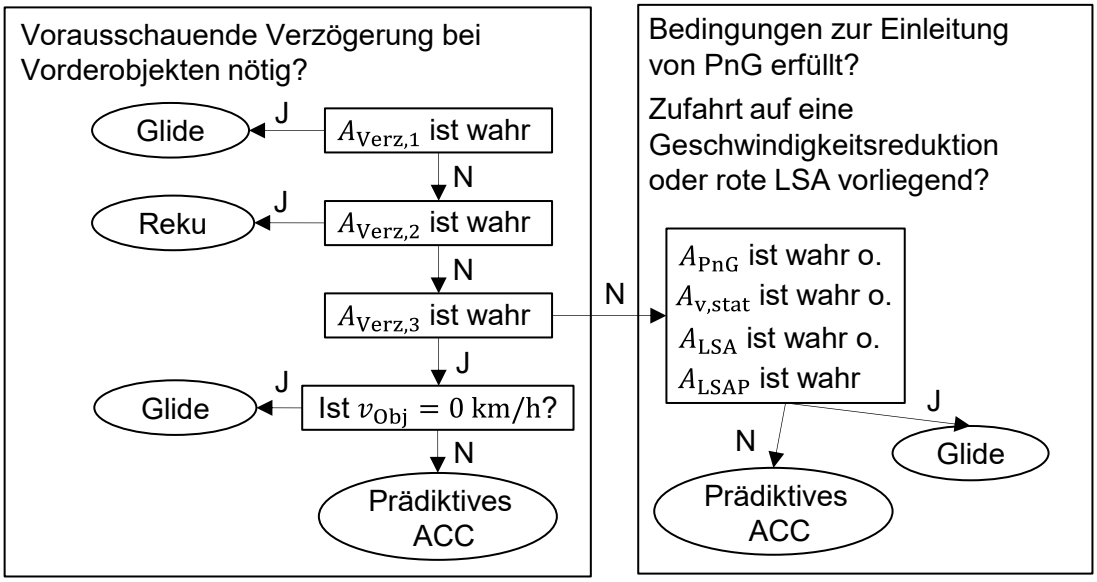


Abb. 5-19: Entscheidungsbaum zur Darstellung der Zustandsübergänge im Zustand Prädiktives ACC (J = Ja, N = Nein)

Vorausschauende Verzögerung bei Vorderobjekten (Funktion A)

Um bei der Zufahrt auf langsamer fahrende oder verzögernde Vorderobjekte rechtzeitig zu verzögern, wird zunächst geprüft, ob der Zielabstand durch einen Segelvorgang eingestellt werden kann, ohne dem Vorderobjekt dabei zu nahe zu kommen. Hierzu werden die Segeltrajektorien

$v_{\mathrm{ego,S}}(t)$ und $s_{\mathrm{ego,S}}(t)$, $t \in \mathfrak{P}_H$, berechnet. Sie ergeben sich aus Integration von $a_{\mathrm{ego,S}}(t)$ (siehe Gl. (23)), wobei die mit Gl. (23) berechneten Beschleunigungswerte zuvor einer Ruckbegrenzung unterzogen werden, um nicht instantan vom aktuellen Beschleunigungswert auf den Wert in Segeln zu wechseln. Die Sollposition des ACC Reglers errechnet sich wie folgt:

$$s_{\mathrm{ACC,soll}}(t) = s_{\mathrm{Obj}}(t) - d_{\mathrm{ACC,soll}}(t),\ t \in \mathfrak{P}_H, \tag{34}$$

wobei $s_{\mathrm{Obj}}(t)$ den prädizierten Verlauf des Vorderobjekts und $d_{\mathrm{ACC,soll}}(t)$ den Zielabstand gemäß Gl. (26) bezeichnen. Die nicht zu überschreitende Position in Segeln ist folgendermaßen definiert:

$$s_{\mathrm{Segeln,max}}(t) := s_{\mathrm{Obj}}(t) - d_{\mathrm{Segeln,-}}(t) \tag{35}$$

mit $d_{\mathrm{Segeln,-}}(t)$ aus Gl. (29). Analog werden unter Verwendung der Gleichungen (27), (28) und (30) weitere Positionsgrenzen eingeführt:

$$s_{\mathrm{Segeln,min}}(t) := s_{\mathrm{Obj}}(t) - d_{\mathrm{Segeln,+}}(t), \tag{36}$$

$$s_{\mathrm{PnG,max}}(t) := s_{\mathrm{Obj}}(t) - d_{\mathrm{PnG,-}}(t), \tag{37}$$

$$s_{\mathrm{PnG,min}}(t) := s_{\mathrm{Obj}}(t) - d_{\mathrm{PnG,+}}(t) \text{ und} \tag{38}$$

$$s_{\mathrm{Reku,max}}(t) := s_{\mathrm{Obj}}(t) - d_{\mathrm{Reku}}(t). \tag{39}$$

Es werden folgende logische Aussagen definiert, die entweder wahr oder falsch sein können:

$$A_0 \colon \left(v_{\mathrm{ego,akt}} < v_{\mathrm{max,lim}} + \Delta v_{\mathrm{Tol,ACC}}\right), \tag{40}$$

$$A_1 \colon \left(\exists\ t_{\mathrm{x}} \in \left[\Delta t_{\mathrm{S,min}}, t_{\mathrm{H}}\right] \colon\ v_{\mathrm{ego,S}}(t_{\mathrm{x}}) \geq v_{\mathrm{Obj}}(t_{\mathrm{x}})\ \wedge\ s_{\mathrm{ego,S}}(t_{\mathrm{x}}) \geq s_{\mathrm{ACC,soll}}(t_{\mathrm{x}})\right), \tag{41}$$

$$A_2 \colon \left(\forall\ t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}} \colon\ s_{\mathrm{ego,S}}(t) < s_{\mathrm{Segeln,max}}(t)\right), \tag{42}$$

$$A_3 = \left(a_{\mathrm{ACC,Obj}} \geq 0\ \wedge\ \dot{a}_{\mathrm{ACC,Obj}} \geq -\left|j_{\mathrm{min,Komf}}\right|\right)\ \vee\ \left(a_{\mathrm{ACC,Obj}} < 0\ \wedge\ \dot{a}_{\mathrm{ACC,Obj}} \geq 0\right) \text{ und} \tag{43}$$

$$\begin{aligned} A_4 = \left(a_{\mathrm{ACC,Obj}} \geq a_{\mathrm{Schub}}\ \wedge\ s_{\mathrm{ego,akt}} \geq s_{\mathrm{ACC,soll,akt}}\right) \\ \vee\ \left(a_{\mathrm{ACC,Obj}} \geq a_{\mathrm{Verz,Komf}}\ \wedge\ s_{\mathrm{ego,akt}} < s_{\mathrm{ACC,soll,akt}}\right) \end{aligned} \tag{44}$$

mit $a_{\mathrm{ACC,Obj}}$ aus Gl. (31). Die Sollposition $s_{\mathrm{ACC,soll,akt}} = s_{\mathrm{ACC,soll}}(0)$ und berechnet sich aus der aktuellen Geschwindigkeit des Egofahrzeugs und der aktuellen Position des Vorderobjekts (siehe Gl. (26) und (34)); $s_{\mathrm{ACC,soll}}(t_{\mathrm{x}})$ berechnet sich aus $v_{\mathrm{ego,S}}(t_{\mathrm{x}})$ und der prädizierten Position des Vorderobjekts zum Zeitpunkt t_{x}. Die anderen Größen werden im weiteren Verlauf erklärt.

Nach Glide wird gewechselt, wenn $A_{\mathrm{Verz},1}$ wahr ist:

$$A_{\mathrm{Verz},1} = A_0 \wedge A_1 \wedge A_2 \wedge A_3 \wedge A_4. \tag{45}$$

A_0 stellt sicher, dass nur dann nach Glide gewechselt wird, wenn sich die Fahrzeuggeschwindigkeit unterhalb der gesetzlichen Höchstgeschwindigkeitsbegrenzung $v_{\mathrm{max,lim}}$ zuzüglich der

Toleranz $\Delta v_{\mathrm{Tol,ACC}}$ befindet. Die Aussage A_1 bedeutet, dass nach der minimalen Segelzeit $\Delta t_{\mathrm{S,min}}$ zu mindestens einem Zeitpunkt die Egogeschwindigkeit größer oder gleich der Geschwindigkeit des Vorderobjekts und gleichzeitig die Egoposition größer oder gleich der Sollposition ist. Diese Aussage kann zum Beispiel erfüllt sein, wenn ein in der Zukunft liegender Verzögerungsvorgang des VFs prädiziert wird. Das Egofahrzeug fällt in Segeln zunächst zurück und holt das Fahrzeug zu einem späteren Zeitpunkt wieder ein, d.h. die Egogeschwindigkeit ist für einen Zeitraum kleiner als die des VFs, jedoch gibt es während des Verzögerungsvorgangs des VFs schließlich einen Zeitpunkt t_{x}, wo $v_{\mathrm{ego,S}}(t_{\mathrm{x}}) \geq v_{\mathrm{Obj}}(t_{\mathrm{x}}) \wedge s_{\mathrm{ego,S}}(t_{\mathrm{x}}) \geq s_{\mathrm{ACC,soll}}(t_{\mathrm{x}})$. Die Bedingung kann auch während eines Annährungsvorgangs an ein langsamer fahrendes VF erfüllt sein. Es gibt also mehrere mögliche Szenarien, die dazu führen, dass A_1 (und auch $A_{\mathrm{Verz,1}}$) wahr werden. Aussage A_2 stellt sicher, dass das Egofahrzeug dem Vorderobjekt während des Segelvorgangs nicht zu nahe kommt. Aussage A_3 erlaubt das Einleiten eines Segelvorgangs nur dann, wenn der ACC Regler zwischen aktuellem und nächstem Zeitschritt die positive Beschleunigung nicht schneller als einen Komfortwert reduziert[26] oder die positive Verzögerung nicht weiter erhöht. Aussage A_4 verhindert das Einleiten eines Segelvorgangs, wenn der ACC Regler größere Verzögerungen als die Schubverzögerung oder als die (noch größere) Komfortverzögerung vorsieht. Mit welchem Wert verglichen wird, hängt vom Abstand des Egofahrzeugs zum Vorderobjekt ab. Die Schubverzögerung wird mit Gl. (22) berechnet, indem $M_{\mathrm{max,Reku}}$ zu Null gesetzt wird. A_3 und A_4 stellen Sicherheitsabfragen dar, die das Einleiten von Segeln im Fall von Fehlprädiktionen verhindern sollen. Sie werden bei der Formulierung weiterer Aussagen wiederholt vorkommen.

Bei perfekter Prädiktion wird bei der Zufahrt auf ein langsamer fahrendes oder verzögerndes Vorderobjekt immer zuerst $A_{\mathrm{Verz,1}}$ wahr werden und die folgenden Abfragen entfallen. Perfekte Prädiktion ist allerdings ein Idealzustand, weshalb geprüft wird, ob ein direkter Wechsel nach Rekuperation erforderlich ist, sofern $A_{\mathrm{Verz,1}}$ falsch ist. Hierzu werden folgende Aussagen definiert:

$$A_5 \colon \left(\exists\, t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}} \colon\ s_{\mathrm{ego,R}}(t) \geq s_{\mathrm{Reku,max}}(t)\right) \tag{46}$$

$$A_{\mathrm{ACC}} \colon \left(s_{\mathrm{ego,akt}} > s_{\mathrm{Segeln,max}}(0)\right). \tag{47}$$

Die Rekuperationstrajektorie $s_{\mathrm{ego,R}}(t)$ wird durch zweifache Integration von $a_{\mathrm{ego,R}}(t)$ aus Gl. (21) berechnet, wobei der Wert aus Gl. (21) zuvor einer Ruckbegrenzung unterzogen wird. Wenn A_{ACC} wahr ist, wird stets mit dem ACC Regler verzögert, weshalb die Verknüpfung mit $\neg A_{\mathrm{ACC}}$ in den folgenden Formulierungen wiederholt vorkommt. In $A_{\mathrm{Verz,1}}$ ist $\neg A_{\mathrm{ACC}}$ durch A_2 bereits abgedeckt.

Wenn $A_{\mathrm{Verz,2}}$ wahr ist, wird in den Zustand Rekuperation gewechselt:

[26] Eine schnelle Beschleunigungsverringerung des ACC Reglers soll nicht durch das Einleiten eines Segelvorgangs verlangsamt werden.

$$A_{\mathrm{Verz,2}} = A_{\mathrm{Verz,2a}} \vee \left(A_{\mathrm{Verz,2b}} \wedge A_{\mathrm{Verz,2c}}\right), \text{ wobei} \tag{48}$$

$$A_{\mathrm{Verz,2a}} = A_5 \wedge \neg A_{\mathrm{ACC}}, \tag{49}$$

$$A_{\mathrm{verz,2b}} = \neg A_2 \wedge \neg A_5 \wedge \neg A_{\mathrm{ACC}} \text{ und} \tag{50}$$

$$A_{\mathrm{Verz,2c}} = \left(a_{\mathrm{ACC,Obj}} < a_{\mathrm{R}}\right) \wedge \left(s_{\mathrm{ego,akt}} < s_{\mathrm{ACC,soll,akt}} - \Delta s_{\mathrm{O}}\right) \wedge \neg A_{\mathrm{ACC}}. \tag{51}$$

Die Beschleunigung $a_{\mathrm{ACC,Obj}}$ wird gemäß Gl. (31) und a_{R} gemäß Gl. (21) berechnet. Zur Verknüpfung $A_{\mathrm{Verz,2b}} \wedge A_{\mathrm{Verz,2c}}$ sei Folgendes angemerkt. Wenn der ACC Regler eine geringere Beschleunigung als a_{R} vorsieht, ist ein Wechsel in den (vorausschauenden) Rekuperationszustand sinnvoll, um die Betätigung der Reibungsbremse zu verringern. Der Wechsel wird allerdings aus Sicherheitsgründen nur dann vollzogen, wenn sich das Fahrzeug jenseits des Zielabstands befindet, d.h. wenn $s_{\mathrm{ego,akt}} < s_{\mathrm{ACC,soll,akt}} - \Delta s_{\mathrm{O}}$ mit dem Parameter Δs_{O}.[27]

Wenn $A_{\mathrm{Verz,2}}$ falsch aber

$$A_{\mathrm{Verz,3}} = A_{\mathrm{verz,2b}} \wedge \left(a_{\mathrm{ACC,Obj}} \geq a_{\mathrm{R}}\right) \tag{52}$$

wahr ist (kurz: $\neg A_{\mathrm{Verz,2}} \wedge A_{\mathrm{Verz,3}}$ ist wahr), wird im Fall von sich bewegenden Vorderobjekten ($v_{\mathrm{Obj,akt}} > 0\ \mathrm{km/h}$) der Zustand Prädiktives ACC beibehalten und die Beschleunigung wie folgt gewählt:

$$a_{\mathrm{ego}} = \begin{cases} a_{\mathrm{R}} & \left(v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{Obj,akt}} + \Delta v_{\mathrm{O}}\right) \wedge \left(s_{\mathrm{ego,akt}} < s_{\mathrm{ACC,soll,akt}} - \Delta s_{\mathrm{O}}\right) \\ \min\left(a_{\mathrm{ACC,soll}}, a_{\mathrm{Schub}}\right) & \text{sonst} \end{cases}, \tag{53}$$

wobei $a_{\mathrm{ACC,soll}}$ die Beschleunigung des ACC Reglers gemäß Gl. (33) ist. Die Fallunterscheidung in Gl. (53) dient dazu, zwischen einem Annäherungsvorgang auf den Zielabstand zu, d.h. einer typischen RC-Verzögerung (oberer Fall in Gl. (53)), und einem Verzögerungsvorgang aus der Folgefahrt heraus zu unterscheiden. In letzterem Fall wäre es für den Fahrer eher ungewohnt mit a_{R} zu verzögern, insbesondere dann, wenn der Auslöser des Verzögerungsvorgangs ein in der Zukunft liegender Verzögerungsvorgang des VFs ist. Die Verzögerung mit a_{R} ließe das Egofahrzeug zunächst zu stark zurückfallen, was auch das Hinterfahrzeug irritieren kann. Aus diesem Grund wird im unteren Fall von Gl. (53) die Schubbeschleunigung a_{Schub} verwendet. Die Parameter Δv_{O} und Δs_{O} machen die Fallunterscheidung robuster bzw. verringern die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Verzögerung mit a_{R}. Wie bereits angemerkt, stellt der obere Fall in Gl. (53) die Rekuperationsphase eines RC-Verzögerungsvorgangs dar, die schließlich bei Zutreffen von $A_{\mathrm{Verz,1}}$ von einer Segelphase abgelöst wird.

[27] Bei geringeren Abständen und einem plötzlichen Verzögerungsvorgang des VFs verzögert der ACC Regler anfangs stärker als die vorausschauende Verzögerungsstrategie im Zustand Rekuperation, was die Sicherheit vor einer Kollision erhöht und das Beibehalten des aktuellen Zustands empfiehlt.

Handelt es sich bei dem Vorderobjekt um eine LSA oder ein stehendes VF, wird (wenn $\neg A_{\mathrm{Verz},2} \wedge A_{\mathrm{Verz},3}$ wahr ist) die Beschleunigung nicht gemäß Gl. (53) eingestellt, sondern nach Glide gewechselt, weil die Anfahrt auf ein stehendes Objekt aus Gründen der Kundenakzeptanz mit der CR-Strategie erfolgen soll (siehe Abschnitt 2.3.2). Allerdings tritt dieser Fall bei der Zufahrt auf eine LSA, für die die Schaltzeiten bekannt sind, i.d.R. nicht auf[28], da die LSAP, die über den Horizont der KZP hinausschaut, den CR-Verzögerungsvorgang bereits früher einleitet.

Einleiten von PnG (Funktion B)

Die folgenden Aussagen werden nur geprüft, wenn alle Aussagen zur vorausschauenden Verzögerung nicht zutreffen, d.h. wenn $\neg A_{\mathrm{Verz},1} \wedge \neg A_{\mathrm{Verz},2} \wedge \neg A_{\mathrm{Verz},3}$ wahr ist. Zur Einleitung des PnG Betriebs werden folgende Aussagen definiert:

$$A_9\colon \left(v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{soll,akt}} - \Delta\tilde{v}_{\mathrm{O}}\right), \tag{54}$$

$$A_{10}\colon \left(\min_{t\in[\Delta t_{\mathrm{S,start}},\Delta t_{\mathrm{S,min}}]}\left(a_{\mathrm{ego,S}}(t)\right) > a_{\mathrm{S,Komf}}\right), \tag{55}$$

$$A_{11}\colon \left(v_{\mathrm{ego,S}}\left(\Delta t_{\mathrm{S,min}}\right) > \min\left(v_{\mathrm{soll,akt}} - \Delta v_{\mathrm{PnG}}\left(v_{\mathrm{soll,akt}}\right), v_{\mathrm{ego,akt}} - \Delta v_{\mathrm{PnG}}\left(v_{\mathrm{ego,akt}}\right)\right)\right), \tag{56}$$

$$A_{12}\colon \text{„In den nächsten } v_{\mathrm{ego,akt}}\Delta t_{\mathrm{S,min}} \text{ Metern liegt eine Geschwindigkeitserhöhung vor und } v_{\mathrm{soll,akt}} \text{ ist gleich } v_{\mathrm{stat,akt}}\text{.”} \tag{57}$$

Die Sollgeschwindigkeit berechnet sich wie folgt (vgl. Gl. (25)):

$$v_{\mathrm{soll,akt}} = \min\left(v_{\mathrm{stat,akt}}, \max\left(v_{\mathrm{LSAP,akt}}, v_{\mathrm{A}}\right)\right) \tag{58}$$

mit $v_{\mathrm{stat,akt}} = v_{\mathrm{stat}}(s_{\mathrm{ego,akt}})$ und $v_{\mathrm{LSAP,akt}} = v_{\mathrm{LSAP}}(s_{\mathrm{ego,akt}})$.

Das Geschwindigkeitsdelta $\Delta\tilde{v}_{\mathrm{O}}$ in Gl. (54) ist positiv und trägt dem Rechnung, dass der ACC Regler die Sollgeschwindigkeit (i.d.R. von unten) asymptotisch annähert. A_9 ist also wahr, wenn die Sollgeschwindigkeit beinahe erreicht ist. Die in A_{10} verwendete Zeitspanne $\Delta t_{\mathrm{S,start}}$ ist die Dauer vom aktuellen Zeitpunkt bis zum Beginn des Segelns; während des Zeitintervalls $\left[\Delta t_{\mathrm{S,start}}, \Delta t_{\mathrm{S,min}}\right]$ darf die Komfortverzögerung nicht unterschritten werden, damit A_{10} wahr ist. Dadurch wird insbesondere sichergestellt, dass PnG bei aktueller oder zukünftiger Bergauffahrt ab einem bestimmten Steigungswert nicht eingeleitet wird.

PnG lässt sich geschickt deaktivieren, indem der Parameter $a_{\mathrm{S,Komf}}$ auf einen hohen Wert gesetzt wird. In der vorliegenden Implementierung wird PnG deaktiviert, wenn die Langzeitprädiktion voraussieht, dass die nächste LSA mit geringem zeitlichen Abstand zur Rotphase erreicht wird (hier: während der Gelbphase). Durch zeitweiliges Deaktivieren von PnG lässt sich ferner ein

[28] es sei denn, die vor der LSA stehende Fahrzeugkette ist lang genug

fahrzeitorientierter PnG Ansatz realisieren, bei dem PnG nur dann zugelassen wird, wenn sich die Fahrzeit nicht erhöht. Deshalb wird PnG beim fahrzeitorientierten Ansatz nur dann zugelassen, wenn $\max(v_{\mathrm{LSAP,akt}}, v_{\mathrm{A}})$ bzw. $v_{\mathrm{soll,akt}}$ kleiner als $v_{\mathrm{stat,akt}}$ ist.

Die Aussage A_{11} ist wahr, wenn mindestens $\Delta t_{\mathrm{S,min}}$ gesegelt werden kann, ohne dass das Geschwindigkeitsband der Breite Δv_{PnG} nach unten verlassen wird; Δv_{PnG} wird als Funktion der Geschwindigkeit parametriert, um bei höheren Geschwindigkeiten ein größeres Band zuzulassen. Vor Geschwindigkeitserhöhungen soll kein PnG Vorgang eingeleitet werden, weshalb A_{12} formuliert wurde.

Nach Glide wird gewechselt, wenn A_{PnG} wahr ist:

$$A_{\mathrm{PnG}} = A_0 \wedge A_2 \wedge A_3 \wedge A_4 \wedge A_9 \wedge A_{10} \wedge A_{11} \wedge \neg A_{12} \wedge \neg A_{\mathrm{ACC}}. \tag{59}$$

Vorausschauende Verzögerung vor statischen Geschwindigkeitsreduktionen (Funktion C)

Es werden folgende Aussagen formuliert:

$$A_{14}\colon \left(v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{stat,akt}} - \Delta\tilde{v}\right) \text{ und} \tag{60}$$

$$A_{15}\colon \text{„Das Fahrzeug befindet sich im Bereich der statischen Geschwindigkeitsplanung, in dem gesegelt werden soll.“,} \tag{61}$$

wobei $\Delta\tilde{v}$ bereits in Gl. (54) eingeführt wurde.

Nach Glide wird gewechselt, wenn $A_{\mathrm{v,stat}}$ wahr ist:

$$A_{\mathrm{v,stat}} = A_0 \wedge A_2 \wedge A_3 \wedge A_4 \wedge A_{14} \wedge A_{15} \wedge \neg A_{\mathrm{ACC}}\,. \tag{62}$$

Vorausschauende Zufahrt auf Lichtsignalanlagen (Funktion D)

Die vorausschauende Zufahrt auf die nächste LSA wird dadurch realisiert, dass

1) die Sollgeschwindigkeit $v_{\mathrm{soll,akt}}$ gemäß Gl. (58) gewählt wird,
2) ein Segelvorgang zur Geschwindigkeitsreduktion eingeleitet wird, falls $v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{soll,akt}}$ und zum Erreichen von $v_{\mathrm{soll,akt}}$ eine Mindestdauer gesegelt werden kann, und
3) das Fahrzeug vor einer roten LSA entsprechend dem CR-Profil der LSAP zum Stillstand gebracht wird.

Zu 1) In Abschnitt 5.5.3 wurde bereits angemerkt, dass die Konstante des Waterfillingalgorithmus, v_{A}, die in Gl. (58) verwendet wird, nicht mit der exakten Zeitdauer zum Erreichen des Beginns der Grünphase, Δt_{A}, sondern einem etwas größeren Wert

$$\Delta\widetilde{t_{\mathrm{A}}} = \Delta t_{\mathrm{x}} + \Delta t_{\mathrm{A}} \tag{63}$$

berechnet wird. Zum einen würde die Verwendung von Δt_{A} zu einem für den Kunden inakzeptablen Verhalten führen (wie in Abschnitt 5.5.3 erklärt), zum anderen würde der ACC Regler der

Sollvorgabe nicht folgen, da die rote aber in wenigen Sekunden umspringende LSA zum aktuellen Zeitpunkt für den ACC Regler ein stehendes Hindernis darstellt und dieser vor dem Umschalten auf grün bereits verzögert. Der Parameter Δt_{x} wird deshalb so berechnet, dass der Abstand zur LSA zum Zeitpunkt des Umschaltens auf grün so groß ist, dass der ACC Regler bis zum Moment des Umschaltens nicht verzögert (vorausgesetzt, es liegen vor der LSA keine Geschwindigkeitsreduktionen). Dieser Ansatz führt zu folgendem Ergebnis (Herleitung siehe Anhang 8.4):

$$\Delta t_{\mathrm{x}} = \tau_{\mathrm{ACC}} + \frac{r_{\mathrm{v,Obj}}}{r_{\mathrm{s,Obj}}}. \tag{64}$$

Zu 2) Nach Glide wird gewechselt, wenn A_{LSA} wahr ist:

$$A_{\mathrm{LSA}} = A_0 \wedge A_2 \wedge A_3 \wedge A_4 \wedge A_{18} \wedge \neg A_{\mathrm{ACC}}, \text{ wobei} \tag{65}$$

$$A_{18}\colon \left(v_{\mathrm{ego,S}}\left(\Delta t_{\mathrm{S,min}}\right) \geq v_{\mathrm{soll,akt}}\right). \tag{66}$$

Zu 3) Es werden folgende Aussagen definiert:

$$A_{16}\colon \left(v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{LSAP,akt}} - \Delta\tilde{v}\right) \text{ und} \tag{67}$$

$$A_{17}\colon \text{„Das Fahrzeug befindet sich in dem Bereich der LSAP, in dem gesegelt werden soll.“,} \tag{68}$$

wobei $v_{\mathrm{LSAP,akt}}$ die aktuelle Geschwindigkeit der LSAP ist und $\Delta\tilde{v}$ bereits in Gl. (54) eingeführt wurde. Nach Glide wird gewechselt, wenn A_{LSAP} wahr ist:

$$A_{\mathrm{LSAP}} = A_0 \wedge A_2 \wedge A_3 \wedge A_4 \wedge A_{16} \wedge A_{17} \wedge \neg A_{\mathrm{ACC}}\,. \tag{69}$$

Treffen die Aussagen $A_{\mathrm{Verz,1}}$, $A_{\mathrm{Verz,2}}$, $A_{\mathrm{Verz,3}}$, A_{PnG}, $A_{\mathrm{v,stat}}$, A_{LSA} und A_{LSAP} alle nicht zu, wird die Beschleunigung entsprechend des ACC Reglers eingestellt und der Zustand beibehalten.

5.6.3 Zustand Pulse

Im Zustand Pulse wird entschieden, ob der Pulsvorgang weitergeführt, durch einen Wechsel nach Prädiktives ACC abgebrochen oder nach Glide oder Rekuperation gewechselt wird.

Zunächst wird der Fall betrachtet, dass die obere Grenze des PnG Abstandsbandes $s_{\mathrm{PnG,max}}$ zuzüglich des Parameters $\Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$ während eines prädizierten Segelvorgangs nicht verletzt wird, d.h. A_{19} wahr ist:

$$A_{19}\colon \left(\forall\, t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}\colon\ s_{\mathrm{ego,S}}(t) < \min\left(s_{\mathrm{Segeln,max}}(t), s_{\mathrm{PnG,max}}(t) + \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}\right)\right). \tag{70}$$

Der Parameter $\Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$ ist erforderlich, um weiter unten den Fall $s_{\mathrm{PnG,max}}(t) \leq s_{\mathrm{ego,S}}(t) < s_{\mathrm{PnG,max}}(t) + \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$ erfassen zu können. Das Einbeziehen von $s_{\mathrm{Segeln,max}}(t)$ ist nur für niedrige Geschwindigkeiten relevant, da dort der Fall $s_{\mathrm{PnG,max}}(t) + \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}} > s_{\mathrm{Segeln,max}}(t)$ eintreten kann.

Nach Glide wird gewechselt, wenn der Verlauf der statischen Geschwindigkeitsplanung einen Segelvorgang vorgibt oder der PnG Betrieb dies erfordert. Der erstgenannte Fall tritt ein, wenn $A_{\mathrm{P,vmax}}$ wahr ist:

$$A_{\mathrm{P,vmax}} = A_{15} \wedge A_{19} \wedge A_{20}, \text{ wobei} \tag{71}$$

$$A_{20}\colon \left(\exists\, t_{\mathrm{x}} \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}\colon\ v_{\mathrm{ego,S}}(t_x) \geq v_{\mathrm{stat}}\left(s_{\mathrm{ego,S}}(t_x)\right)\right). \tag{72}$$

Zur Prüfung, ob zur Durchführung von PnG nach Glide gewechselt wird, werden folgende Aussagen definiert:

$$A_{21}\colon \left(\frac{1}{\Delta t_{\mathrm{S,opt}}}\int_0^{\Delta t_{\mathrm{S,opt}}} v_{\mathrm{ego,S}}(t)\mathrm{d}t \geq v_{\mathrm{soll,akt}}\right) \tag{73}$$

$$A_{22}\colon \left(v_{\mathrm{ego,akt}} \geq v_{\mathrm{soll,akt}} + \frac{\Delta v_{\mathrm{PnG}}\left(v_{\mathrm{ego,akt}}\right)}{2}\right) \tag{74}$$

$$\begin{aligned} A_{23} = &\left(\min_{t\in[\Delta t_{\mathrm{S,start}},\Delta t_{\mathrm{S,min}}]}\left(a_{\mathrm{ego,S}}(t)\right) < a_{\mathrm{S,Komf}} + \Delta\tilde{a}\right) \\ &\wedge \left(\frac{1}{\Delta t_{\mathrm{S,min}}}\int_0^{\Delta t_{\mathrm{S,min}}} v_{\mathrm{ego,S}}(t)\mathrm{d}t \geq v_{\mathrm{soll,akt}}\right) \end{aligned} \tag{75}$$

A_{21} prüft, ob die mittlere Geschwindigkeit der Segeltrajektorie nach der optimalen Zeitdauer[29] $\Delta t_{\mathrm{S,opt}}$ größer oder gleich der Sollgeschwindigkeit ist. A_{22} ist wahr, wenn $v_{\mathrm{ego,akt}}$ größer oder gleich der oberen Grenze des Geschwindigkeitsbandes ist. Die vordere Aussage in A_{23} prüft, ob die Komfortbedingung mit einem etwas höheren Fahrkomfort verletzt wird (durch Addition von $\Delta\tilde{a}$ mit $|\Delta\tilde{a}| \ll \left|a_{\mathrm{S,Komf}}\right|$ wird die Fahrkomfortbedingung leicht verschärft). In diesem Fall ist davon auszugehen, dass bei Fortführung des Pulsvorgangs und damit ansteigender Geschwindigkeit die eigentliche Komfortbedingung auch bald verletzt wird, sodass es sinnvoll ist, bei Zutreffen der hinteren Aussage in A_{23} einen Segelvorgang einzuleiten.

Nach Glide wird gewechselt, wenn $A_{\mathrm{P,PnG1}}$ wahr ist:

$$A_{\mathrm{P,PnG1}} = A_{10} \wedge A_{11} \wedge \neg A_{12} \wedge A_{19} \wedge (A_{20} \vee A_{21} \vee A_{22} \vee A_{23}). \tag{76}$$

Wenn $A_{\mathrm{P,PnG1}}$ falsch ist, wird geprüft, ob der PnG Betrieb innerhalb des Abstandsbandes durchgeführt werden kann und Segeln einzuleiten ist. Hierzu werden folgende Aussagen definiert:

$$A_{24}\colon \left(\exists\, t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}\colon\ s_{\mathrm{ego,S}}(t) \geq s_{\mathrm{PnG,max}}(t)\right), \tag{77}$$

[29] d.i. die hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs unter Einhaltung des Fahrkomfortniveaus optimale Zeitdauer für den PnG Betrieb (vgl. die mittlere Grafik in Abb. 4-17).

A_{25}: „Während des Segelvorgangs kann bis zum Wechsel nach Pulse mindestens die Zeitdauer $\Delta t_{\mathrm{S,min}}$ gesegelt werden.“ und (78)

A_{26}: „Während des Segelvorgangs kann bis zum Wechsel nach Pulse mindestens die Zeitdauer $\Delta t_{\mathrm{S,opt}}$ gesegelt werden.“ (79)

Nach Glide wird gewechselt, wenn $A_{\mathrm{P,PnG2}}$ wahr ist:

$$A_{\mathrm{P,PnG2}} = A_{10} \wedge \big((A_{24} \wedge A_{25}) \vee A_{26}\big). \tag{80}$$

Wenn $\neg A_{10} \vee \big(A_{19} \wedge (A_{20} \vee A_{21} \vee A_{22} \vee A_{23} \vee A_{24})\big)$ wahr ist, aber beide Aussagen $A_{\mathrm{P,PnG1}}$ und $A_{\mathrm{P,PnG2}}$ falsch sind, ist kein PnG Betrieb möglich und es wird in den Zustand Prädiktives ACC gewechselt.

Wenn A_{19} falsch ist und kein Wechsel nach Prädiktives ACC vorgesehen ist, wird beim Eintreffen von $A_{\mathrm{P,Reku}}$ nach Rekuperation und, wenn $A_{\mathrm{P,Reku}}$ falsch ist, nach Glide gewechselt:

$$A_{\mathrm{P,Reku}} = A_{\mathrm{R,1}} \vee A_{\mathrm{R,2}}, \text{ wobei} \tag{81}$$

$$A_{\mathrm{R,1}} = \big(s_{\mathrm{ego,akt}} < s_{\mathrm{PnG,max}}(0) - \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}\big) \wedge \big(\exists\, t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}\colon\ s_{\mathrm{ego,R}}(t) \geq s_{\mathrm{PnG,max}}(t) - \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}\big) \text{ und} \tag{82}$$

$$A_{\mathrm{R,2}} = \big(s_{\mathrm{ego,akt}} \geq s_{\mathrm{PnG,max}}(0) - \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}\big) \wedge \big(\exists\, t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}\colon\ s_{\mathrm{ego,R}}(t) \geq s_{\mathrm{PnG,max}}(t) + \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}\big). \tag{83}$$

Die in den Gleichungen (82) und (83) verwendete Positionsgrenze $s_{\mathrm{PnG,max}}$ wird mit der Rekuperationstrajektorie berechnet. Als Zielabstand für den Rekuperationsvorgang wird die mit dem Parameter $\Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$ verschobene Positionsgrenze von PnG, $s_{\mathrm{PnG,max}}(t) - \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$, anvisiert, da $s_{\mathrm{PnG,max}}(t)$ der Zielabstand für das aktuelle Fahrmanöver des PnG Betriebs ist. Die Fallunterscheidung $s_{\mathrm{ego,akt}} \gtrless s_{\mathrm{PnG,max}}(0) - \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$ wird eingefügt, damit nicht vorschnell nach Rekuperation gewechselt wird, wenn die aktuelle Fahrzeugposition größer als $s_{\mathrm{PnG,max}}(t) - \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$ ist.

Ist kein Zustandswechsel vorgesehen, wird der Zustand Pulse beibehalten. Als Sollbeschleunigung wird der vom Fahrkomfortniveau abhängige Beschleunigungswert aus Tab. 4-2 vorgegeben. Für die Ruckbegrenzung werden ebenfalls die korrespondierenden Werte aus Tab. 4-2 verwendet.

Die Vorgehensweise zur Herleitung der Regeln für den Zustand Glide und Rekuperation unterscheidet sich nicht mehr grundlegend von der bisherigen; sie wird im Anhang 8.5 ausgeführt.

6 Validierung des Längsführungssystems

Das Längsführungssystem wird in einer dynamischen Simulationsumgebung validiert. Das Egofahrzeug bewegt sich zusammen mit anderen simulierten Verkehrsteilnehmern auf einem Rundkurs der Stadt Paderborn. Das Egofahrzeug kann auf Routendaten (Kurvenradien und Geschwindigkeitsbegrenzungen des Rundkurses), auf Position und Geschwindigkeit des VFs, sofern sich dieses innerhalb eines virtuellen Sensorkonus befindet, auf die Verkehrsdichte zwischen aktueller Position des Egofahrzeugs und nächster LSA und auf die Position und Schaltzeiten der nächsten LSA zugreifen. Es wird auch der Fall betrachtet, dass das Egofahrzeug mit mehreren Vorderfahrzeugen per Funkschnittstelle Positions- und Geschwindigkeitsdaten austauschen kann. Die Simulationen werden für ein Mildhybridfahrzeug und ein BEV durchgeführt. Kap. 6.1 beschreibt die Simulationsumgebung, Kap. 6.2 die Simulationsdurchläufe und Kap. 6.3 und Kap. 6.4 die Simulationsergebnisse für das Mildhybridfahrzeug und das BEV.

6.1 Aufbau der Simulationsumgebung

6.1.1 Verkehrssimulation in der Übersicht

Das Egofahrzeug und die simulierten VT bewegen sich innerhalb der Stadt Paderborn auf einem Rundkurs der Länge $L_{\mathrm{Rund}} = 5\,863\,\mathrm{m}$, auf dem 14 LSA positioniert sind (siehe Abb. 6-1). Die LSA sind als Kreise eingezeichnet mit einer Momentaufnahme der Schaltzeiten. Die als Querbalken gekennzeichneten 42 Querstraßen besitzen keine LSA. Der Nullpunkt des Rundkurses wird kurz vor der ersten LSA definiert, gekennzeichnet durch einen Pfeil. Die erste LSA erscheint nach $s_{\mathrm{LSA},1} = 56{,}9\,\mathrm{m}$. Nummerierung der LSA und Fahrtrichtung des Egofahrzeugs sind entgegen dem Uhrzeigersinn. Die Schaltzeiten der LSA werden im Anhang 8.6 bereitgestellt. Die Route weist drei Geschwindigkeitszonen auf. Die Maximalgeschwindigkeit muss aufgrund der gegebenen Kurvenradien an mehreren Positionen verringert werden (siehe Abb. 6-2). Bremsschwellen oder Stoppschilder sind nicht vorhanden.

Die Verkehrsdichte lässt sich durch Variation der Anzahl an Verkehrsteilnehmern, N_{VT}, vor jeder Simulation einstellen. Die mittlere bzw. globale Verkehrsdichte ρ_{glob} berechnet sich wie folgt:

$$\rho_{\mathrm{glob}} = N_{\mathrm{VT}} / L_{\mathrm{Rund}}. \tag{84}$$

Die in Abb. 6-1 eingezeichneten 42 Querstraßen stellen die Verkehrsknotenpunkte dar, an denen die VT abbiegen und wieder erscheinen können. Ist ein VT an einem Verkehrsknotenpunkt (VKP) abgebogen, erscheint er nach einer zufälligen Zeitdauer an einem zufällig ausgewählten VKP wieder. Aufgrund der Stochastik, die durch die VT eingeführt wird, streuen i.d.R. Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch bzw. Bedarf an elektrischer Energie des Egofahrzeugs. Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch bzw. Bedarf an elektrischer Energie werden durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben.

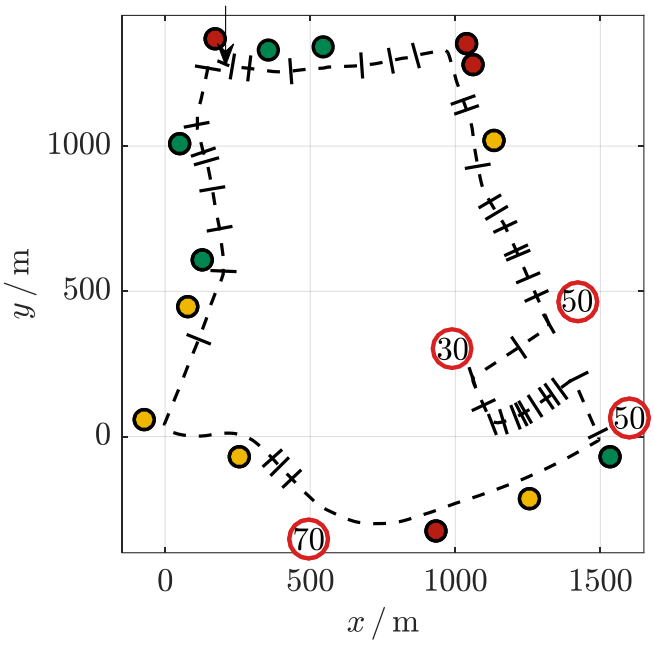


Abb. 6-1: Rundkurs innerhalb der Stadt Paderborn

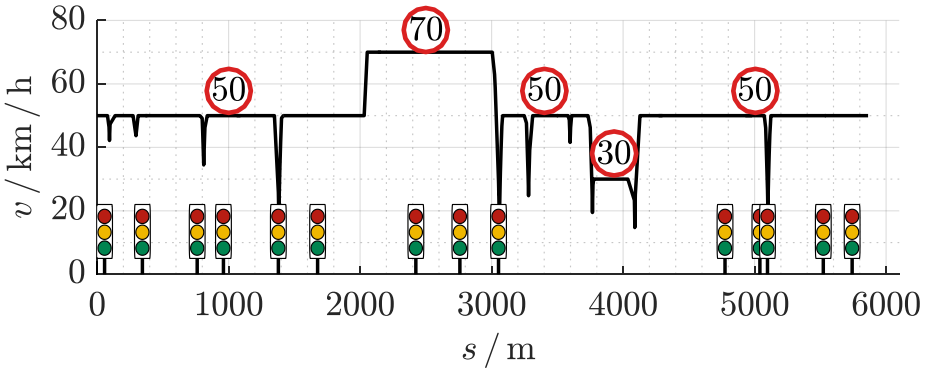


Abb. 6-2: Der Maximalgeschwindigkeitsverlauf des Rundkurses unter Berücksichtigung der Kurvenradien gemäß Gl. (18) und die Positionen der vierzehn LSA

6.1.2 Modellierung der anderen Verkehrsteilnehmer

Zur Beschreibung des Verkehrszustands wird in der Verkehrsdynamik in Abhängigkeit vom Abstraktionsniveau zwischen makroskopischen, mesoskopischen und mikroskopischen Modellen unterschieden [100]. Da dem Egofahrzeug die Geschwindigkeit und Position des VFs bereitgestellt werden soll, bietet sich zur Beschreibung der anderen VT die Klasse der mikroskopischen Modelle an. Die VT folgen der Berechnungsvorschrift des Intelligent Driver Model (IDM), dessen Stärke in einer realitätsnahen Beschreibung des Fahrzeugfolgeverhaltens liegt und das eine Verbesserung des Gipps Modells darstellt [101]. Im Folgenden wird zunächst das IDM beschrieben und dann auf das Überqueren von LSA, die Methodik des Ab- und Einbiegens der VT an Verkehrsknotenpunkten und die Prädiktion des VFs eingegangen.

6.1.2.1 Intelligent Driver Model

Die Beschleunigung des IDM Fahrers berechnet sich wie folgt [101]:

$$a_{\mathrm{IDM}} = \underbrace{a_{\mathrm{max,IDM}} \cdot \left(1 - \left(\frac{v_{\mathrm{IDM}}}{v_{\mathrm{soll}}}\right)^{\delta}\right)}_{Term\ für\ freie\ Fahrt} + \underbrace{\left(-a_{\mathrm{max,IDM}}\right) \cdot \left(\frac{d_{0,\mathrm{IDM}} + \max\left(0, v_{\mathrm{IDM}}\tau_{\mathrm{IDM}} + \frac{v_{\mathrm{IDM}}\Delta v_{\mathrm{IDM}}}{2\sqrt{a_{\mathrm{max,IDM}} b_{\mathrm{K}}}}\right)}{\Delta s_{\mathrm{IDM}}}\right)^{2}}_{Interaktionsterm}, \tag{85}$$

wobei $a_{\mathrm{max,IDM}}$ die maximale Beschleunigung, b_{K} die Komfortverzögerung, δ den Beschleunigungsexponenten, $d_{0,\mathrm{IDM}}$ und τ_{IDM} die den Zielabstand bestimmenden Parameter, v_{soll} die Sollgeschwindigkeit, Δv_{IDM} die Differenzgeschwindigkeit zwischen IDM Fahrer und dessen VF und Δs_{IDM} den Abstand des IDM Fahrers zum VF darstellen. Die Parameter werden in den folgenden Grenzen für jedes Fahrzeug zufällig gewählt (b_{K}, $d_{0,\mathrm{IDM}}$ und τ_{IDM} sind fest):

$a_{\mathrm{max,IDM}}/\mathrm{m/s^2}$	$b_{\mathrm{K}}/\mathrm{m/s^2}$	δ	$d_{0,\mathrm{IDM}}/\mathrm{m}$	$\tau_{\mathrm{IDM}}/\mathrm{s}$
0,7 … 2,5	1,67	2,5 … 4	2	2

Der in Abb. 6-2 dargestellte Geschwindigkeitsverlauf wird vor jeder Geschwindigkeitsreduktion durch Verzögerungsprofile mit der Beschleunigung $a_{\mathrm{Red,IDM}} = -1\,\mathrm{m/s^2}$ erweitert[30], für jeden IDM Fahrer (einmalig) mit einer gleichverteilten Zufallszahl zwischen $0{,}9$ und $1{,}1$ multipliziert und dem IDM Fahrer als Sollvorgabe v_{soll} zugeführt.

6.1.2.2 Überqueren von Lichtsignalanlagen

Bis auf das Egofahrzeug haben die VT keine Information über die Schaltzeiten der LSA und stellen dementsprechend ihre Geschwindigkeit auch nicht vorausschauend ein. Sobald eine LSA von grün auf gelb umspringt, wird für den die LSA annähernden VT entschieden, ob er einen Verzögerungsvorgang einleitet oder die LSA bei gelb überquert (die Dauer der Gelbphase wird hierfür bereitgestellt). Der Verzögerungsvorgang wird eingeleitet, wenn

(1) vor der LSA angehalten werden kann, ohne stärker als $2\,\mathrm{m/s^2}$ verzögern zu müssen, oder
(2) die LSA unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeitsextrapolation nicht vor dem Umschalten auf Rot überquert werden kann.

[30] Es wird also ein statischer Geschwindigkeitsverlauf mit reinem Rekuperationsanteil ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$) erzeugt, vgl. Abb. 5-4.

6.1.2.3 Abbiegen und Einbiegen von Verkehrsteilnehmern an Verkehrsknotenpunkten

Die VT haben die Möglichkeit, den Rundkurs an den in Abb. 6-1 dargestellten 42 Verkehrsknotenpunkten zu verlassen und wieder zu erscheinen. Jeder VT verlässt den Rundkurs an einem VKP mit der Wahrscheinlichkeit p_{VKP} (hier: $p_{\mathrm{VKP}} = 0{,}1$). Ein VT überquert demnach im Mittel $\frac{1-p_{\mathrm{VKP}}}{p_{\mathrm{VKP}}}$ Verkehrsknotenpunkte ohne abzubiegen. Hat der VT den Rundkurs verlassen, erscheint er nach einer festen Zeitdauer an einem zufällig ausgewählten freien VKP mit der Einbiegegeschwindigkeit $v_{\mathrm{VT,ein}}$ erneut. Ein VKP ist frei, wenn der Abstand zwischen dem einbiegenden VT und dessen neuem VF größer als $\Delta s_{\mathrm{VT}\to\mathrm{VF}}$ und der Abstand zwischen dem einbiegenden VT und dessen neuem Hinterfahrzeug (HF) größer als $\Delta s_{\mathrm{HF}\to\mathrm{VT}}$ ist:

$$\Delta s_{\mathrm{VT}\to\mathrm{VF}} = \underbrace{d_{0,\mathrm{IDM}} + v_{\mathrm{VT,ein}}\tau_{\mathrm{VT,ein}}}_{Zielabstand\ des\ einbiegenden\ VT} \tag{86}$$

und

$$\Delta s_{\mathrm{HF}\to\mathrm{VT}} = \frac{1}{2b_{\mathrm{HF}}}\left(\max\left(v_{\mathrm{HF}} - v_{\mathrm{VT,ein}}, 0\right)\right)^2 + \left(d_{0,\mathrm{IDM}} + v_{\mathrm{VT,ein}}\tau_{\mathrm{HF}}\right), \tag{87}$$

wobei $\tau_{\mathrm{VT,ein}}$ die Zeitlücke des einbiegenden VT und τ_{HF} die Zeitlücke des HF bezeichnen. Da alle VT die gleiche Zeitlücke besitzen, gilt $\tau_{\mathrm{VT,ein}} = \tau_{\mathrm{HF}}$. Der erste Term in Gl. (87) ist die Distanz, um die das HF dem einbiegenden VT während eines Verzögerungsvorgangs näher kommt ($b_{\mathrm{HF}} = 1\,\mathrm{m/s^2}$); der zweite Term ist der Zielabstand des HF nach Beendigung des Verzögerungsvorgangs. Der Abstand $\Delta s_{\mathrm{HF}\to\mathrm{VT}}$ ist so berechnet, dass ein schneller fahrendes HF nicht stärker als b_{HF} verzögern muss, um den neuen Zielabstand zum einbiegenden VT einzustellen, wenn dieser die Geschwindigkeit $v_{\mathrm{VT,ein}}$ beibehält. Die Einbiegegeschwindigkeit berechnet sich wie folgt:

$$v_{\mathrm{VT,ein}} = \min\left(v_{\mathrm{ein}}, v_{\mathrm{VF}} + \sqrt{2 \cdot b_{\mathrm{VT,ein}} \cdot \min\left(\Delta s_{\mathrm{VKP}\to\mathrm{VF}} - d_{0,\mathrm{IDM}} - v_{\mathrm{VF}}\tau_{\mathrm{VT,ein}}, 0\right)}\right), \tag{88}$$

wobei v_{ein} eine Konstante ist ($v_{\mathrm{ein}} = 20\,\mathrm{km/h}$); v_{ein} wird durch den hinteren Term in Gl. (88) verringert, wenn die Geschwindigkeit des VFs und der Abstand zum VF, $\Delta s_{\mathrm{VKP}\to\mathrm{VF}}$, kleine Werte annehmen. Der hintere Term in Gl. (88) folgt aus der Umstellung von Gl. (87) nach v_{HF} und der Anwendung der Gleichung auf den einbiegenden VT und dessen VF ($b_{\mathrm{VT,ein}} = 1\,\mathrm{m/s^2}$).

Sind alle Verkehrsknotenpunkte belegt, wird mit dem Einbiegevorgang so lange gewartet, bis in einen freien VKP eingebogen werden kann.

6.1.2.4 Prädiktion des Vorderfahrzeugs

Für den Fall, dass dem Egofahrzeug nur die Geschwindigkeits- und Abstandsdaten des VFs zur Verfügung stehen, wird die Geschwindigkeit des VFs für den Prädiktionshorizont als konstant angenommen. Werden dem Egofahrzeug die Daten weiterer Vorderfahrzeuge über Fahrzeug-zu-

Fahrzeug Kommunikation bereitgestellt, ergibt sich die prädizierte Geschwindigkeit des VFs, $v_{\mathrm{VF}}(t), t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}$, als das Minimum aus der aktuellen Geschwindigkeit des VFs, $v_{\mathrm{VF,akt}}$, und einem mit Fahrermodellen berechneten Geschwindigkeitsverlauf $v_{\mathrm{VF,Modell}}(t), t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}$. Für die Berechnung von $v_{\mathrm{VF,Modell}}$ wird angenommen, dass sich das vorderste Fahrzeug in der durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation erfassten Fahrzeugkette mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegt und sich die nachfolgenden Fahrzeuge während des Prädiktionshorizonts gemäß dem Gipps Modell [102] verhalten. Das Gipps Modell wird gewählt, um nicht das gleiche Fahrermodell wie das der simulierten VT zu verwenden, da auch in der Realität das Fahrermodell des Prädiktors vom Verhalten des tatsächlichen Fahrers abweicht. Durch die Bildung des Minimums aus $v_{\mathrm{VF,akt}}$ und $v_{\mathrm{VF,Modell}}$ wird verhindert, dass Werte größer als $v_{\mathrm{VF,akt}}$ prädiziert werden. Dies vermeidet Fehlprädiktionen, wenn die Sollgeschwindigkeitsvorgabe des VFs unterhalb der Maximalgeschwindigkeit liegt (was für einige IDM Fahrer auch der Fall ist), da beim Gipps Modell davon ausgegangen wird, dass die Sollgeschwindigkeitsvorgabe gleich der Maximalgeschwindigkeit ist.

6.1.3 Streckenmodelle des Egofahrzeugs

Aus Sicht des Längsführungssystems ist das Egofahrzeug die Regelstrecke. Das Antriebsstrangmanagement, das in Abb. 5-2 dem Längsführungssystem zugeordnet wurde, wird im Folgenden der Strecke zugeschlagen (für das Simulationsergebnis ist die Positionierung belanglos). Das Streckenmodell erhält als Eingangsgrößen eine Sollbeschleunigung und im Mildhybridfall noch eine Segelstatusvorgabe.

6.1.3.1 Streckenmodell für das Mildhybridfahrzeug

Als Streckenmodell wird ein von der FEV Europe GmbH und der RWTH Aachen University gemeinsam entwickeltes Vorwärtsmodell eines P0 Mildhybridfahrzeugs verwendet. Die Längsdynamik folgt den Gleichungen (1), (2) und (3). Schleppmoment und Kraftstoffverbrauch der VKM, Verlustmoment des Getriebes und der Wirkungsgrad des RSGs und DC/DC Wandlers werden durch Kennfelder abgebildet. Die Blei-Säure- und die Lithium-Ionen-Batterie werden jeweils durch eine vom Ladezustand, engl. State of Charge (SOC), abhängige offene Klemmenspannung, engl. Open Circuit Voltage (OCV), und einen temperatur- und SOC-abhängigen Innenwiderstand (separat für Lade- und Entladefall) mit zwei seriell nachgeschalteten RC-Gliedern modelliert. Die Temperatur der Batterie wird durch ein thermisches Netzwerk abgebildet, bestehend aus einer Wärmekapazität und einem Wärmewiderstand für den Übergang von Batterie zur Umgebung. Die Parameter der Längsdynamik und des Antriebsstrangs können Tab. 8-1 und Tab. 8-2 entnommen werden. Für die Simulation wurde die VKM mit dem größeren Hubvolumen von $2{,}0\,\mathrm{l}$ verwendet. Die Lithium-Ionen-Batterie besitzt eine Kapazität von $0{,}365\,\mathrm{kWh}$. Die maximale mechanische Rekuperationsleistung des RSG ist spannungsabhängig und liegt zwischen $13\,\mathrm{kW}$ und $16\,\mathrm{kW}$. Für das $12\,\mathrm{V}$ Bordnetz wird ein konstanter Verbrauch von $420\,\mathrm{W}$ angesetzt.

Das Antriebsstrangmanagment

Das Antriebsstrangmanagment bzw. die Hybridstrategie ist regelbasiert ausgeführt. Der Operationsbereich des SOC liegt zwischen $\zeta_{\min} = 0{,}3$ und $\zeta_{\max} = 0{,}8$. Der relative SOC ist wie folgt definiert: $\zeta_{\mathrm{rel}} := \zeta_{\mathrm{Bat}} - \zeta_{\min} - \Delta\zeta_{\mathrm{Boost}}$. Der Wert $\Delta\zeta_{\mathrm{Boost}}$ ist eine Reserve, die für Boostvorgänge bzw. Lastpunktabsenkungen vorgehalten wird.

Wenn $\zeta_{\mathrm{rel}} < 0{,}1$, wird der RSG als Generator betrieben und der Betriebspunkt der VKM in Richtung bzw. bis hin zur Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs angehoben. Wenn $\zeta_{\mathrm{rel}} < 0{,}05$, wird der RSG mit seinem maximalen generatorischen Drehmoment betrieben. Die Übergänge $\zeta_{\mathrm{rel}} \lessgtr 0{,}1$ und $\zeta_{\mathrm{rel}} \lessgtr 0{,}05$ werden mit Hysteresen versehen. Oberhalb des (Hysterese behafteten) Schwellwerts von $0{,}1$ wird das $12\,\mathrm{V}$ Bordnetz über den DC/DC Wandler aus der $48\mathrm{V}$ Batterie gespeist und der RSG nur während Rekuperationsphasen generatorisch betrieben.

SAV wird eingeleitet, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

1) Der Segelstatus der Längsführungsregelung nimmt den Wert Eins an.
2) Zum Ende des Segelvorgangs unterschreitet ζ_{rel} den Wert $0{,}05$ nicht (zur Berechnung von ζ_{rel} zum Ende des Segelvorgangs wird eine geschätzte Segeldauer verwendet).

SAV wird also insbesondere dann unterbunden, wenn ζ_{rel} zum aktuellen Zeitpunkt kleiner als $0{,}05$ ist.

Die Boostreserve $\Delta\zeta_{\mathrm{Boost}}$ ist auf den Bereich von 0 bis $0{,}05$ begrenzt. Der initiale Wert von $\Delta\zeta_{\mathrm{Boost}}$ ist Null. Während Rekuperationsvorgängen wird $\Delta\zeta_{\mathrm{Boost}}$ um den durch Rekuperation gewonnenen SOC Hub vergrößert. Wenn $\Delta\zeta_{\mathrm{Boost}} > 0$ und das Wunschmoment der VKM oberhalb der Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs liegt, wird der Lastpunkt der VKM durch den RSG in Richtung des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs hin abgesenkt, wobei sich $\Delta\zeta_{\mathrm{Boost}}$ um die aufgewendete SOC Differenz wieder entleert.

Korrektur des Kraftstoffverbrauchs

Zur Berechnung des KSVs pro simulierter Rundfahrt wird die Differenz zwischen dem Start- und Endwert des SOC in eine äquivalente Kraftstoffmenge

$$\Delta m_{\mathrm{B,SOC,korr}} = \overline{b_{\mathrm{e}}} \cdot W_{\mathrm{Bat}} \cdot (\zeta_{\mathrm{Start}} - \zeta_{\mathrm{Ende}}) \tag{89}$$

umgerechnet und dem simulierten KSV am Ende der Rundfahrt hinzuaddiert. Der spezifische Kraftstoffverbrauch $\overline{b_{\mathrm{e}}}$ repräsentiert die mittleren Kosten der Umwandlung von chemischer zu elektrischer Energie im Fahrzeug und wird mit $250\,\mathrm{g/kWh}$ beziffert.

6.1.3.2 Streckenmodell für das batterieelektrische Fahrzeug

Das BEV wird ebenfalls durch ein Vorwärtsmodell abgebildet. Die Längsdynamik folgt den Gleichungen (1), (2) und (3), wobei das Moment der VKM in Gl. (1) entfällt. Die Parameter der Längsdynamik folgen Tab. 8-1. Die Batterie wird durch eine SOC abhängige OCV und einen temperatur- und SOC abhängigen Innenwiderstand (separat für Lade- und Entladefall) modelliert, wobei das thermische Netzwerk aus einer Wärmekapazität und einem Wärmewiderstand für den Übergang von Batterie zur Umgebung besteht. Die Daten des elektrischen Antriebsstrangs sind in Tab. 8-3 zusammengefasst. Getriebe und Differentialgetriebe werden in der Modellbildung als Einheit betrachtet. Der Inverter der elektrischen Maschine wird durch eine konstante Effizienz und die Asynchronmaschine durch das Wirkungsgradkennfeld aus Abb. 8-1 abgebildet.

6.2 Beschreibung der Simulationsdurchläufe

Tab. 6-1 führt auf, welche Simulationsdurchläufe für das Mildhybridfahrzeug, engl. Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV), und das BEV durchgeführt werden.

LSA inaktiv bedeutet, dass keine LSA vorhanden bzw. alle LSA stets grün sind. KZP inaktiv bedeutet, dass die Beschleunigung ausschließlich vom ACC Regler vorgegeben wird. Gesegelt wird nur, wenn der statische Geschwindigkeitsverlauf ein Segelprofil vorgibt. Der Prädiktionshorizont der KZP wird auf $t_{\mathrm{H}} = 12\,\mathrm{s}$ bemessen. LZP aktiv bedeutet, dass die Alphaadaption mit dem Zielwert $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$ und der Waterfillingalgorithmus mit einem Horizont von $t_{\mathrm{LZ}} = 50\,\mathrm{s}$ aktiv sind. Bei deaktivierter LZP wird also insbesondere keine Alphaadaption durchgeführt. Die statische Geschwindigkeitsplanung wird immer durchgeführt, unabhängig davon, ob LZP oder KZP aktiv sind, und das Fahrzeug segelt bzw. rekuperiert stets entsprechend des CR Profils der statischen Geschwindigkeitsplanung. Die LSAP ist Teil der LZP, lässt sich aber gesondert aktivieren, um deren Einfluss zu untersuchen.

PnG-FZO steht für PnG Betrieb mit Fahrzeitorientierung und bedeutet, dass PnG nur dann freigegeben wird, wenn die Fahrzeit dadurch nicht verlängert wird, was der Fall ist, wenn $\max\left(v_{\mathrm{LSAP,akt}}, v_{\mathrm{A}}\right) < v_{\mathrm{stat,akt}}$ (vgl. den Abschnitt unterhalb von Gl. (58)). Beim PnG Betrieb mit FZO wird die Mindestgeschwindigkeit für die Zufahrt auf die nächste LSA auf $v_{\mathrm{min,LSA}} = 28\,\mathrm{km/h} < 30\,\mathrm{km/h}$ begrenzt (Parametervariation F), damit PnG auch in der Tempo-30-Zone aktiv ist.[31] Der Wert sollte nicht weiter gesenkt werden, da die Vorausschaufunktionen erst bei Überschreiten von $v_{\mathrm{o}} = 25\,\mathrm{km/h}$ (einschließlich des PnG Betriebs) aktiviert werden. Bei Unterschreiten von $v_{\mathrm{u}} = 3\,\mathrm{km/h}$ werden sie wieder deaktiviert (die Hysterese beträgt $v_{\mathrm{Hys}} = 22\,\mathrm{km/h}$). Zur

[31] Wenn $v_{\mathrm{min,LSA}} \geq 30\,\mathrm{km/h}$ bzw. $v_{\mathrm{LSAP,akt}} \geq 30\,\mathrm{km/h}$, ist die Bedingung $\max\left(v_{\mathrm{LSAP,akt}}, v_{\mathrm{A}}\right) < v_{\mathrm{stat,akt}}$ in der Tempo-30-Zone nie erfüllt.

besseren Vergleichbarkeit wird die gleiche Mindestgeschwindigkeit auch für den PnG Betrieb ohne FZO verwendet. Ohne Verkehr werden die PnG Kalibrierungen Lv8 und Lv7 simuliert. Mit Verkehr beschränken sich die Untersuchungen auf die Lv8 Kalibrierung.

Beim PnG Betrieb werden die Anforderungen an den Fahrkomfort aus Tab. 4-2 und Abb. 4-12 eingehalten und das in Gl. (56) verwendete Geschwindigkeitsband von PnG Δv_{PnG} wie folgt gewählt: $\Delta v_{\mathrm{PnG}}(0\,\mathrm{km/h}) = 5\,\mathrm{km/h}$, $\Delta v_{\mathrm{PnG}}(30\,\mathrm{km/h}) = 10\,\mathrm{km/h}$ und $\Delta v_{\mathrm{PnG}}(100\,\mathrm{km/h}) = 20\,\mathrm{km/h}$. Zwischen den Stützstellen wird linear interpoliert. Die in den Gleichungen (26) bis (30) verwendeten Abstände werden wie folgt bedatet:

$$\tau_{\mathrm{ACC}} = 2{,}25\,\mathrm{s} \qquad \Delta\tau_{\mathrm{PnG}}/2 = 0{,}25\,\mathrm{s} \qquad \Delta\tau_{\mathrm{Tol},-} = 0{,}4\,\mathrm{s} \qquad \Delta\tau_{\mathrm{Tol},+} = 0{,}5\,\mathrm{s} \qquad \Delta\tau_{\mathrm{Reku}} = 0{,}85\,\mathrm{s}$$

$$d_{\mathrm{ACC}} = 2\,\mathrm{m} \qquad d_{\mathrm{PnG}} = 2\,\mathrm{m}$$

Die verbleibenden Parameter der Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung sind im Anhang 8.7 aufgeführt.

Die Parametereinstellungen mit Verkehr sollen folgende Potentiale aufzeigen: Der Vergleich von G und I soll das Potential der LZP aufzeigen, der Vergleich von I und J das der KZP, der Vergleich von J und K das der verbesserten Prädiktion durch Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, der Vergleich von J und L das von PnG und der Vergleich von K und M das Potential von PnG mit verbesserter Prädiktion.

Für die Ergebnisdarstellung ist folgende Notation relevant: Da innerhalb jeder ID maximal ein Parameter variiert wird, kann die ID um eine Ziffer ergänzt werden, um sich auf genau einen Parameterwert beziehen zu können. So bezeichnet „B.1“ die Parametereinstellung mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$ und „B.2“ die Parametereinstellung mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$.

ID	LSA aktiv	Andere VT	KZP aktiv	LZP aktiv	LSAP aktiv	PnG Niveau	FZO	Variationen bzw. Parametereinstellungen
A	N	Ohne Verkehr	-	-	-	Lv10	-	$\alpha_{\mathrm{stat}} \in \{0; 0{,}1 \ldots 0{,}9; 1\}$
B	J		-	N	-	Lv10	-	$\alpha_{\mathrm{stat}} \in \{0;\ 0{,}5\}$
C	J		-	J	N	Lv10	-	$\frac{v_{\mathrm{min,LSA}}}{\mathrm{km/h}} \in \begin{cases} \{0; 50\}, & \mathrm{MHEV} \\ \{0\}, & \mathrm{BEV} \end{cases}$
D	J		-	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\mathrm{min,LSA}}}{\mathrm{km/h}} \in \begin{cases} \{30; 45; 50\}, & \mathrm{MHEV} \\ \{10; 15; 20; 25; 30\}, & \mathrm{BEV} \end{cases}$
E	J		-	J	J	Lv8/Lv7	N	Lv8 und Lv7: $v_{\mathrm{min,LSA}} = 28\,\mathrm{km/h}$
F	J		-	J	J	Lv8/Lv7	J	Lv8 und Lv7: $v_{\mathrm{min,LSA}} = 28\,\mathrm{km/h}$

G	J	Mit Verkehr	N	N	N	Lv10	-	$\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$
I	J		N	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\mathrm{min,LSA}}}{\mathrm{km/h}} = \begin{cases} 50, & \mathrm{MHEV} \\ 0, & \mathrm{BEV} \end{cases}$
J	J		J	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\mathrm{min,LSA}}}{\mathrm{km/h}} = \begin{cases} 50, & \mathrm{MHEV} \\ 0, & \mathrm{BEV} \end{cases}$
K	J		J	J	J	Lv10	-	$\frac{v_{\mathrm{min,LSA}}}{\mathrm{km/h}} = \begin{cases} 50, & \mathrm{MHEV} \\ 0, & \mathrm{BEV} \end{cases}$ und Fzg.-zu-Fzg. Komm. mit drei VFs
L	J		J	J	J	Lv8	J	$v_{\mathrm{min,LSA}} = 28\,\mathrm{km/h}$
M	J		J	J	J	Lv8	J	$v_{\mathrm{min,LSA}} = 28\,\mathrm{km/h}$ und Fzg.-zu-Fzg. Komm. mit drei VFs

Tab. 6-1: Parametervariationen: Die letzte Spalte zeigt, welche Variationen bzw. Parametereinstellungen gefahren werden; die anderen Spalten geben die Parameter an, die von einer Zeile zur nächsten verändert werden (J = Ja; N = Nein; „-“ = nicht relevant).

Referenz für die Ergebnisdarstellung

Das in dieser Arbeit entwickelte Längsführungssystem mit den Parametereinstellungen aus Tab. 6-1 wird mit dem Längsführungssystem von [10], das eine modellprädiktive Regelung, engl. Model Predictive Control (MPC), verwendet, verglichen. Die MPC bestraft Beschleunigungen, Verzögerungen und Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit in einer Kostenfunktion. Die Kostenfunktion und die Gewichtungsfaktoren der MPC werden im Anhang 8.8 bereitgestellt. Der Geschwindigkeitsverlauf $v_{\max}$ aus Gl. (18) und die Positionsgrenzen $s_{\max}$ und $s_{\min}$ (siehe Abb. 5-3) werden in den Nebenbedingungen berücksichtigt. Der Zeithorizont der MPC wird wie der Zeithorizont des Waterfillingalgorithmus zu $50\,\mathrm{s}$ gesetzt. Für die Bestimmung der Positionsgrenzen $s_{\max}$ und $s_{\min}$ ist die Auswahl der nächsten Zielgrünphase erforderlich. Die Auswahl erfolgt gemäß Abschnitt 5.5.1. Der dort verwendete Langzeitverlauf wird mit $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$ berechnet, um die frühestmöglich erreichbare Zielgrünphase auszuwählen. Die Prädiktion des VFs erfolgt gemäß Abschnitt 6.1.2.4, wobei die Position und Geschwindigkeit der voranliegenden drei Vorderfahrzeuge über Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation bereitgestellt werden.

6.3 Simulationsergebnisse für das Mildhybridfahrzeug

Zunächst wird die Route ohne LSA und ohne Verkehr durchfahren und der Parameter α_{stat}, der den Segelanteil des Verzögerungsprofils vor statischen Geschwindigkeitsreduktionen beschreibt, variiert (Parametervariation A). Das Fahrzeug wird zum Routenende auf Kriechgeschwindigkeit (nicht zum Stillstand) gebracht, da als Abbruchkriterium der Simulation die Fahrstrecke dient und

es für die Genauigkeit der Verbrauchssimulation nicht nötig ist, das exakte Streckenende mit der Geschwindigkeit $0\,\mathrm{km/h}$ zu erreichen.

Der relative Kraftstoffverbrauch wird als $\mathrm{Absolutverbrauch/Bezugsgröße}$ definiert, die Verbrauchserhöhung als $\mathrm{Absolutverbrauch/Bezugsgröße} - 1$. Analoges gilt für den Bedarf an elektrischer Energie und die Fahrzeit.

Abb. 6-3 zeigt, dass die Fahrzeit der energieeffizientesten Fahrweise ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 1$) verglichen mit der sportlichsten Fahrweise ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$) um fast $40\,\%$ verlängert wird und gleichzeitig Kraftstoffersparnisse von ca. $30\,\%$ erzielt werden. Da die Fahrzeiterhöhung von den meisten Kunden nicht akzeptiert wird, wird für nachfolgende Untersuchungen $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$ verwendet – ein Kompromiss, der die Fahrzeit um ca. $10\,\%$ erhöht und dabei etwas mehr als $15\,\%$ Kraftstoff einspart. Es ist zu beachten, dass die Werte für die Fahrzeiterhöhung nur für den Fall ohne LSA gelten. Bei aktivierten LSA kann der Wert für Alpha im Zuge der Alphaadaption zeitweise erhöht werden, ohne die Fahrzeit zu verändern.

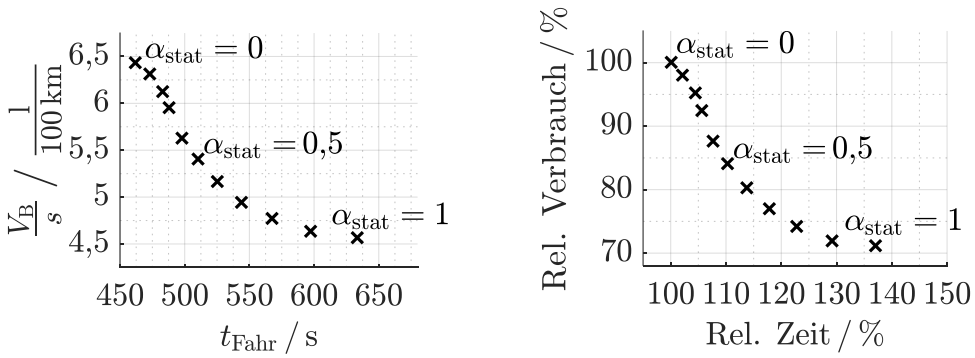


Abb. 6-3: MHEV: Kraftstoffverbrauch pro Strecke und absolute Fahrzeit (links) und relativer Verbrauch und relative Fahrzeit (rechts) bei Variation von α_{stat} in Schritten von $0{,}1$. Die Route wird ohne LSA und ohne Verkehr durchfahren.

Nun wird die Route mit aktivierten Schaltzeiten, aber weiterhin ohne Verkehr durchfahren. Abb. 6-4 stellt Verbrauch und Fahrzeit der Parametervariationen B bis F bezogen auf Verbrauch und Fahrzeit des MPC-Längsführungssystems (im Folgenden kurz als MPC oder Referenzfahrt bezeichnet) dar. Auf die Wahl der Gewichtungsfaktoren der MPC wird in Anhang 8.8 eingegangen. Die MPC absolviert den Rundkurs in $647{,}4\,\mathrm{s}$ mit einem Kraftstoffverbrauch von $6{,}845\,\mathrm{l/100\,km}$. Der Verbrauch der MPC liegt nahe dem der Rundkursfahrt B.1 mit deaktivierter LZP (LZPaus) und möglichst schneller Fahrweise ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$). Die Kostenfunktion der MPC bestraft zwar Beschleunigungen und Verzögerungen, plant aber keine Segelprofile und unterbindet auch nicht langsame, d.h. wirkungsgradungünstige Zufahrten auf LSA.
Bei deaktivierter LZP und der Einstellung $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$ (B.2) ist die Alphaadaption nicht aktiv, was dazu führt, dass im vorliegenden Zyklus genau eine LSA nicht mehr bei Grün erreicht wird. Die Fahrzeit erhöht sich um die Dauer der Rotphase dieser LSA. Gleichzeitig wird durch den

Gebrauch der CR-Verzögerungsprofile (mit $50\,\%$ Segelanteil) der KSV um etwas mehr als $10\,\%$ gegenüber der sportlichen Fahrweise (B.1) reduziert.

Die Parametereinstellungen mit aktivierter LZP (C bis F) führen zu weiteren Ersparnissen und erzielen – mit Ausnahme des PnG Betriebs ohne FZO (E.1 und E.2) – eine ähnliche, nur um einige Prozent höhere Fahrzeit als die MPC. Der Anstieg der Fahrzeit gegenüber der MPC entsteht gegen Routenende, da das Fahrzeug bei aktivierter LZP mit dem CR-Verzögerungsprofil ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$) auf Kriechgeschwindigkeit gebracht wird und die MPC ein reines Rekuperationsprofil wählt.

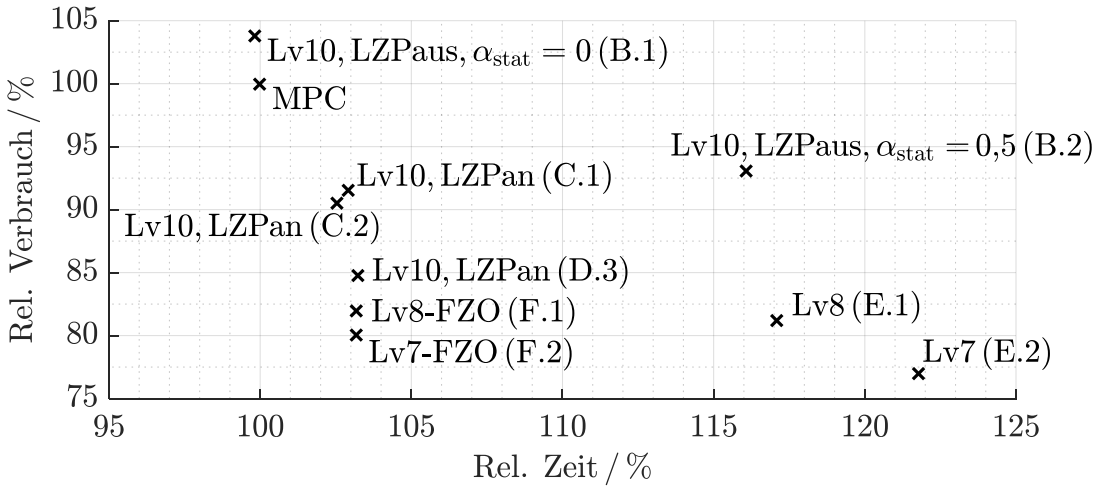


Abb. 6-4: MHEV: Relativer Verbrauch und relative Fahrzeit bei Variation der Langzeitplanung (LZP an/aus), der Mindestgeschwindigkeit zum Anfahren der LSA, der LSA-Anfahrtsplanung (LSAP an/aus) und des Fahrkomfortniveaus (Variationen B bis F aus Tab. 6-1). Bezugsgrößen sind Verbrauch und Fahrzeit der MPC.

Die Aktivierung der LZP (C.1) führt, verglichen mit B.2, zu weiteren Einsparungen von etwas weniger als zwei Prozent. Der Grund für diese geringe Verbesserung ist, dass beim Anfahren der LSA zwar Stillstände vermieden werden, die VKM jedoch in einigen Fällen durch die Wahl geringer Fahrzeuggeschwindigkeiten bei niedrigen Wirkungsgraden betrieben wird. Ein zügigeres Anfahren mit nachfolgender Stillstandszeit ist verbrauchsgünstiger, was die Einstellung C.2 zeigt, die einen weiteren Prozent Kraftstoff spart. Bei dieser Einstellung ist die LSAP, die den Anhaltevorgang mit einem CR-Profil ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$) ausführt, noch nicht aktiv. Die LSAP (D.3) ermöglicht einen beträchtlichen Sprung um weitere $5{,}8\,\%$. Die Aktivierung von PnG, Lv8-FZO (F.1), führt zu Einsparungen von weiteren $2{,}7\,\%$. Die Einsparungen sind nicht größer, weil PnG nur etwa $10\,\%$ der Fahrzeit aktiv ist. Das ist auch der Grund, warum die Einsparungen von Lv7-FZO (F.2) nur $2\,\%$ unterhalb denen von Lv8-FZO liegen. Ohne FZO ist PnG häufiger aktiv und der Verbrauchsunterschied zwischen Lv8 und Lv7 ist größer (Vergleich von E.1 mit E.2). Allerdings wird beim PnG Betrieb ohne FZO nicht mehr gewährleistet, dass die voranliegende LSA möglichst zu Beginn der ausgewählten Grünphase erreicht wird. Die Fahrzeiterhöhung von PnG ohne FZO (E.1

und E.2) um mehr als $15\,\%$ liegt daran, dass eine LSA nicht mehr bei Grün erreicht wird, weil die vorherige LSA nicht früh genug überquert wurde.

In Abb. 6-4 wurde für $v_{\mathrm{min,LSA}}$ der Wert $50\,\mathrm{km/h}$ verwendet (C.2 und D.3), da die VKM bei dieser Geschwindigkeit den geringsten KSV bei KF aufweist (siehe Abb. 4-22). Abb. 6-5 bestätigt diese Wahl. Die Abbildung stellt den Verbrauch von C.1 ($v_{\mathrm{min,LSA}} = 0\,\mathrm{km/h}$) und den von der Parametervariation D bezogen auf den Verbrauch der MPC dar und zeigt, dass beim Übergang von $45\,\mathrm{km/h}$ nach $50\,\mathrm{km/h}$ eine Sättigung eintritt (der Verbrauchsunterschied ist kleiner als $0{,}2\,\%$).

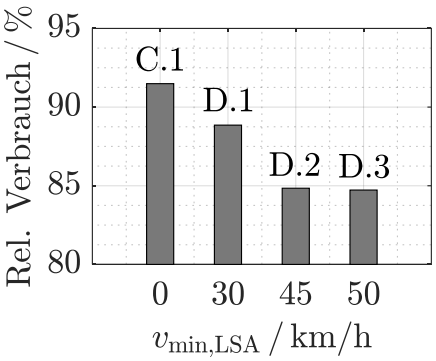


Abb. 6-5: MHEV: Relativer Verbrauch als Funktion der Mindestgeschwindigkeit für die Zufahrt auf die nächste LSA. Die LSAP ist aktiv. Der Verbrauch ist auf den der MPC bezogen.

Nun wird der Einfluss des Umgebungsverkehrs auf den KSV untersucht. Der Rundkurs wird vom Egofahrzeug für jede simulierte Parametereinstellung aus Tab. 6-1 und jede Verkehrsdichte 20-mal durchfahren. Letzteres gilt auch für die Rundkursfahrt mit dem MPC-Längsführungssystem. Das Egofahrzeug startet wie bei den Simulationsdurchläufen ohne Verkehr beim Nullpunkt des Rundkurses und absolviert pro Simulationsdurchlauf eine vollständige Rundfahrt. Simuliert werden die Parametereinstellungen G bis M. Die VT werden vor jeder Rundfahrt mit zufälliger Position initialisiert. Die Anzahl an VT $N_{\mathrm{VT}} \in \{25;\ 75;\ 150;\ 225;\ 300\}$. Für die Verkehrsdichte gilt demnach bei einer Rundkurslänge von $5\,863\,\mathrm{m}$: ρ_{glob} / $(\mathrm{VT/km}) \in \{4{,}3;\ 12{,}8;\ 25{,}6;\ 38{,}4;\ 51{,}2\}$. Als Bezugswert zur Berechnung des relativen Verbrauchs dient der mittlere Verbrauch der MPC.

Abb. 6-6 stellt den mittleren absoluten Verbrauch der MPC über der mittleren Fahrzeit zusammen mit den Standardabweichungen dar. Der absolute Verbrauch und die Fahrzeit steigen mit der Verkehrsdichte an. Zwischen Verbrauch und Fahrzeit besteht ein annähernd linearer Zusammenhang.

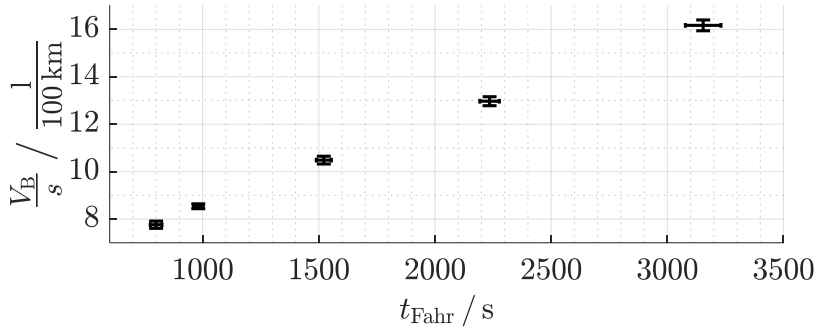


Abb. 6-6: MHEV: Absoluter Verbrauch über Fahrzeit von der Referenzfahrt (MPC) für ρ_{glob} / $(\mathrm{VT/km}) \in \{4{,}3;\ 12{,}8;\ 25{,}6;\ 38{,}4;\ 51{,}2\}$ *(von links nach rechts)*

Abb. 6-7 (mittlere Grafik) zeigt die auf die Mittelwerte der Referenzfahrt bezogene Fahrzeiterhöhung (Mittelwerte und Standardabweichung). Im Fall ohne Verkehr erhöhte sich die Fahrzeit der Parametereinstellung G ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$) aufgrund der deaktivierten Alphaadaption um mehr als $10\,\%$ (vgl. B.2 mit C.1 in Abb. 6-4). Der Grund ist, dass mit Alphaadaption gewisse Ampelphasen (im vorliegenden Zyklus genau eine) noch kurz vor dem Umschalten auf Rot erreicht werden. Dieser Vorteil entfällt zunehmend, wenn Vorderfahrzeuge das Erreichen der LSA bei grün verhindern, weshalb die Fahrzeiterhöhung der Parametereinstellung G im Fall mit Verkehr nahe der der anderen Parametereinstellungen liegt (siehe Abb. 6-7 mittlere Grafik). Die Fahrzeit der Parametereinstellungen G bis M ist bis auf wenige Ausnahmen geringer als die der MPC, da die Zufahrt auf die nächste LSA zügiger erfolgt und deshalb tendenziell weniger Fahrzeuge vor dem Egofahrzeug einbiegen. Bei mittleren bzw. hohen Verkehrsdichten ist der Fahrzeitunterschied noch größer, was daran liegt, dass das durch die MPC geführte Egofahrzeug in großen Abständen hinter einem stehenden Fahrzeug anhält (siehe die große Differenz zwischen den mittleren Abständen in Abb. 6-7 untere Grafik) und andere VT während der Stillstandszeit die Möglichkeit haben, in die offen gelassene Lücke einzubiegen und diese teilweise aufzufüllen, sofern zwischen Egofahrzeug und stehendem VF eine Querstraße liegt.

Abb. 6-7 (obere Grafik) zeigt die auf die Mittelwerte der Referenzfahrt bezogene Verbrauchserhöhung (Mittelwerte und Standardabweichung). Auf die Mittelwerte wird im Folgenden genauer eingegangen; die mit den unterschiedlichen Parametereinstellungen und Verkehrsdichten simulierten Standardabweichungen liegen bis auf wenige Ausnahmen zwischen $3\,\%$ und $3{,}5\,\%$. Wie im Fall ohne Verkehr weist eine Fahrweise, bei der die Zufahrt auf statische Geschwindigkeitsreduktionen mit einem CR-Verzögerungsprofil erfolgt, die aber ansonsten keine Vorausschaufunktionen besitzt, (Parametereinstellung G) Verbrauchseinsparungen von etwas mehr als $10\,\%$ gegenüber der MPC auf (ausgenommen die höchste simulierte Verkehrsdichte). Bei der niedrigsten Dichte von $4{,}3\,\mathrm{VT/km}$ führt die Aktivierung der LZP mit LSAP (I) gegenüber G zu weiteren Ersparnissen von $9{,}6\,\%$, die mit steigender Dichte stetig bis auf ca. $2\,\%$ abnehmen.

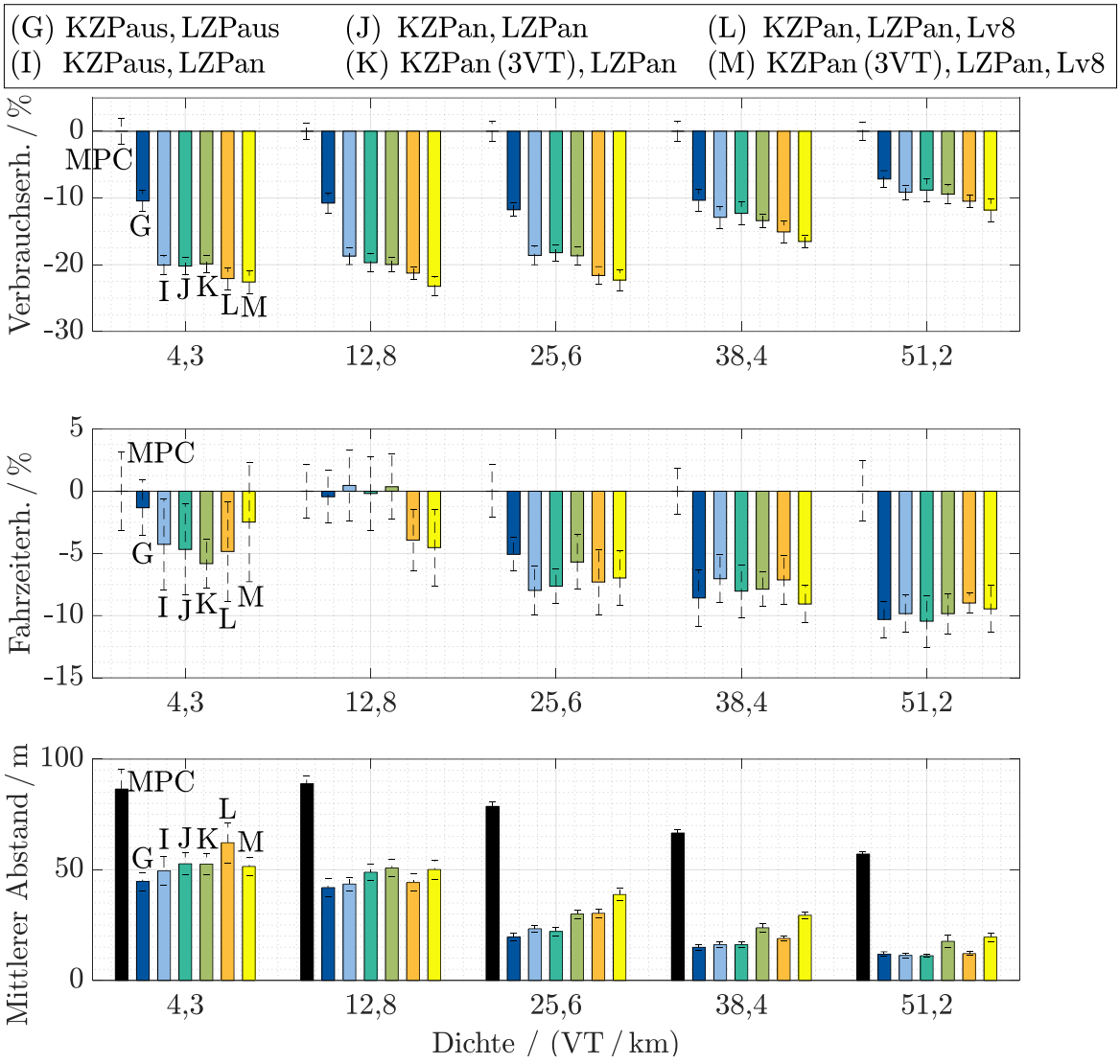


Abb. 6-7: MHEV: Verbrauchserhöhung (oben), Fahrzeiterhöhung (mittig) und mittlerer Abstand (unten) bei Variation der Verkehrsdichte (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Die Aktivierung der KZP ohne Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation mit konstanter Geschwindigkeitsprädiktion (J) verbessert den KSV bei niedrigen Fahrzeugdichten ($4{,}3\,\mathrm{VT/km}$ und $12{,}8\,\mathrm{VT/km}$) geringfügig um max. $1\,\%$ und führt bei höheren Fahrzeugdichten tendenziell zu leichten Verschlechterungen, denen aber durch die Aktivierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation und verbesserten Prädiktion (K) entgegengewirkt werden kann. Ohne die Verfügbarkeit von Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation sollte deshalb die vorausschauende Verzögerungsfunktion nur für Annäherungsvorgänge verwendet werden, bei denen der Abstand zu einem langsamer fahrenden VF deutlich größer als der Zielabstand ist, da sich in diesem Fall Fehlprädiktionen weniger stark auswirken. Die höchsten Einsparungen bei aktivierter KZP mit verbesserter Prädiktion (K) verglichen mit der Einstellung ohne KZP (I) betragen $1{,}3\,\%$ (bei der Dichte $12{,}8\,\mathrm{VT/km}$). Da die KZP mit konstanter Geschwindigkeitsprädiktion (J) zu Verschlechterungen führen kann, werden die zusätzlichen Ersparnisse bei Aktivierung von PnG (L und M) im

Folgenden auf das Maximum der Ersparnisse von I und J bezogen. Die Aktivierung von PnG (L) führt bis zu einer Fahrzeugdichte von $38{,}4\,\mathrm{VT/km}$ zu zusätzlichen Ersparnissen von $1{,}3\,\%$ bis $3\,\%$; in Verbindung mit der verbesserten Prädiktion (M) liegen diese zwischen $2{,}4\,\%$ und $3{,}7\,\%$. Die zusätzlichen Ersparnisse durch PnG können mit Verkehr folglich größer sein als im Fall ohne Verkehr, für welchen sie $2{,}7\,\%$ betrugen (vgl. Abb. 6-4). Der Grund ist, dass die LZP im Fall mit Verkehr blockierte Grünphasen erkennt und in diesem Fall eine spätere Grünphase als Zielgrünphase auswählt, wodurch die Sollgeschwindigkeit verringert wird und der PnG Betrieb insgesamt länger aktiv ist.

6.4 Simulationsergebnisse für das batterieelektrische Fahrzeug

Die Simulationsdurchläufe für das BEV folgen Tab. 6-1. Zunächst wird die Alphavariation dargestellt, dann die Auswirkungen der LZP und des PnG Betriebs bei aktivierten LSA ohne Verkehr und anschließend die Auswirkungen des Verkehrs. Zur Verbesserung der Lesbarkeit wird im Folgenden nur noch der Begriff Energiebedarf verwendet; gemeint ist stets der Bedarf an elektrischer Energie, also die während eines Wegabschnitts s der Batterie entnommene Energiemenge W_{Bat}.

Die Ergebnisse der Alphavariation sind in Abb. 6-8 dargestellt. Die Alphavariation führt zwar auch zu beträchtlichen Energieeinsparungen mit steigendem α_{stat} (von bis zu $20\,\%$), die Einsparungen reichen jedoch an die Spannweite von $30\,\%$ im Mildhybridfall nicht heran. Die Einsparungen sind im Mildhybridfall größer, weil die VKM des P0-MHEV im Rekuperationsbetrieb Schleppverluste aufweist, die im Segelbetrieb entfallen. Die leichten Fahrzeitunterschiede zwischen BEV und MHEV (vgl. Abb. 6-8 mit Abb. 6-3) sind darin begründet, dass der Drehmomentregler des BEV der Sollbeschleunigungsvorgabe der Längsführung beinahe perfekt folgt, wohingegen es beim MHEV zu Abweichungen beim Einleiten von Segeln und bei der Drehmomentübernahme durch die EM im Rekuperationsfall kommen kann.

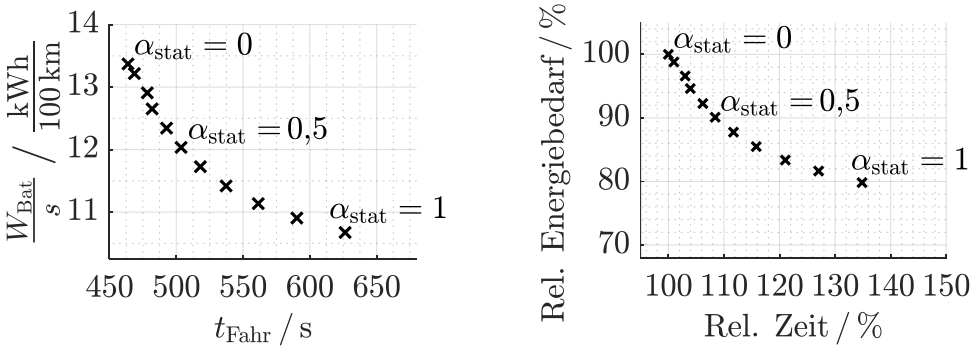


Abb. 6-8: BEV: Energiebedarf pro Strecke über absoluter Fahrzeit (links) und relativer Energiebedarf über relativer Fahrzeit (rechts) analog zu Abb. 6-3

Nun wird der Rundkurs mit aktivierten LSA durchfahren. Die Referenzfahrt (MPC) absolviert den Rundkurs in $647{,}4\,\mathrm{s}$ mit einem Energiebedarf von $12{,}35\,\mathrm{kWh/100\,km}$ (zur Parametrierung der

MPC siehe Anhang 8.8). Relativer Energiebedarf und relative Fahrzeit sind in Abb. 6-9 dargestellt. Der Sprung im Energiebedarf von B.1 nach B.2 ist wie erwartet kleiner als im Mildhybridfall ($8\,\%$ statt $10\,\%$). Die Aktivierung der LZP (C.1) erzielt Einsparungen von weiteren $12\,\%$. Die Parametereinstellung C.1 verringert den Energiebedarf gegenüber der MPC um $1{,}3\,\%$ und erhöht die Fahrzeit um $2{,}5\,\%$. Die Fahrzeiterhöhung tritt auf den letzten Metern des Zyklus auf; sie liegt wie im Mildhybridfall daran, dass die MPC eine reine Rekuperationsstrategie (und keine CR-Strategie) für den Verzögerungsvorgang gegen Zyklusende wählt. Der PnG Betrieb ohne FZO erzielt im Lv7-Fall (E.2) einen ähnlichen, leicht geringeren Energiebedarf verglichen mit dem der Lv10-Kalibrierung (C.1), was jedoch nicht am PnG Betrieb an sich liegt, sondern daran, dass durch den PnG Betrieb die Verzögerungsprofile der statischen Geschwindigkeitsplanung durch vorzeitiges Segeln in hinsichtlich des Energiebedarfs günstigere Profile mit $\alpha_{\mathrm{stat}} > 0{,}5$ umgewandelt werden (wodurch der Zielwert $\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$ umgangen wird). Dies geschieht, wenn die Segelphase von PnG einige Meter vor der eigentlichen Segelphase der statischen Geschwindigkeitsplanung beginnt. Vom (ungewollten) Nebeneffekt des vorzeitigen Segelns abgesehen, hat der PnG Betrieb für das BEV keine Vorteile und wird bei den Simulationsergebnissen mit Verkehr nicht weiter berücksichtigt.

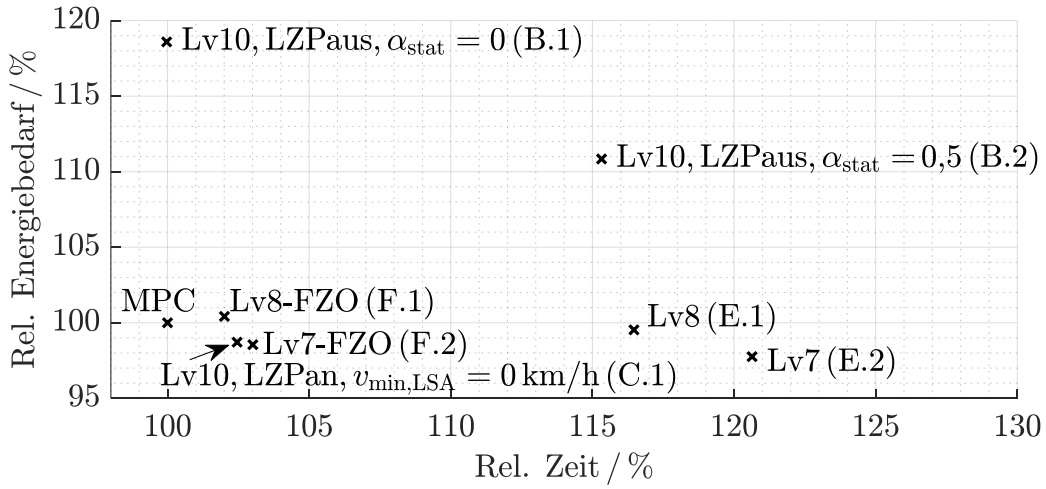


Abb. 6-9: BEV: Relativer Energiebedarf und relative Fahrzeit bei Variation der Langzeitplanung (LZP an/aus) und des Fahrkomfortniveaus. Bezugsgrößen sind Energiebedarf und Fahrzeit der MPC.

Die Geschwindigkeit für die Zufahrt auf die nächste LSA wird bei der Lv10 Kalibrierung (C.1) nicht nach unten begrenzt, da im Gegensatz zum Mildhybridfall der relative Energiebedarf sonst ansteigt (siehe Abb. 6-10).

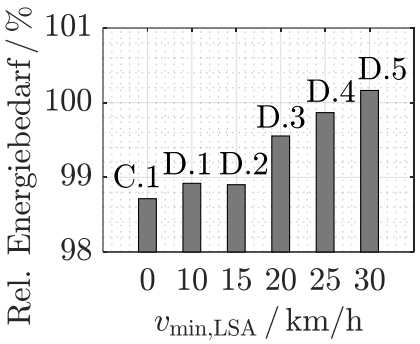


Abb. 6-10: BEV: Relativer Energiebedarf als Funktion der Mindestgeschwindigkeit für die Zufahrt auf die nächste LSA. Die LSAP ist aktiv. Der Energiebedarf ist auf den der MPC bezogen.

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse mit Verkehr dargestellt. Abb. 6-11 stellt den absoluten Energiebedarf der Referenzfahrt (MPC) über der Fahrzeit dar, Abb. 6-12 die auf die Referenzfahrt bezogenen Größen. Auch in Abb. 6-11 besteht wie im Mildhybridfall ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Fahrzeit und Energiebedarf.

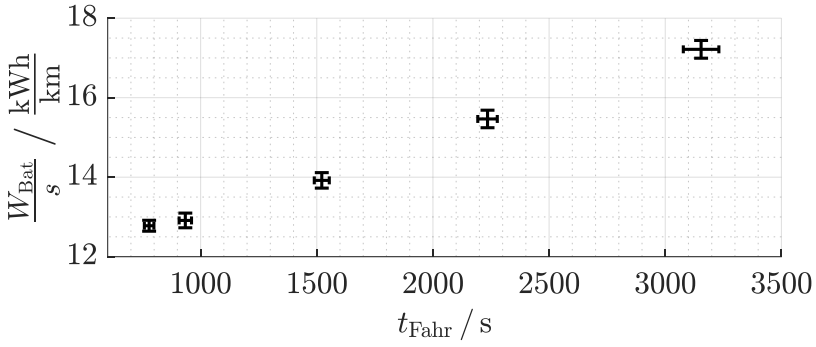


Abb. 6-11: BEV: Absoluter Energiebedarf über Fahrzeit von der Referenzfahrt (MPC) für ρ_{glob} / $(\mathrm{VT/km}) \in \{4{,}3;\ 12{,}8;\ 25{,}6;\ 38{,}4;\ 51{,}2\}$ *(von links nach rechts)*

Die Standardabweichung der Erhöhung des Energiebedarfs (Abb. 6-12, obere Grafik) beträgt in den meisten Fällen ca. $2\,\%$. Im Folgenden werden wieder die Mittelwerte betrachtet. Die Aktivierung der LZP (I) führt zu ähnlichen und mit steigender Dichte leicht höheren Energiebedarfswerten verglichen mit denen der MPC. Die Parametereinstellung G, die bis auf die Planung der Verzögerungsprofile vor statischen Geschwindigkeitsreduktionen keine Vorausschaufunktionen realisiert, führt über weite Verkehrsdichtebereiche zu Erhöhungen des Energiebedarfs von über $10\,\%$ gegenüber der MPC. Bei der höchsten Dichte nimmt das Potential der MPC gegenüber G merklich ab, da die mittlere Geschwindigkeit im Fall G durch die anderen VT bereits reduziert wird und unnötige Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge weniger stark ausgeprägt sind.

Die Aktivierung von LZP und KZP (J) erzielt gegenüber der MPC Energieeinsparungen von $3\,\%$ bei der niedrigsten Dichte; bei mittleren bis hohen Dichten sinken die Einsparungen auf Werte zwischen $1\,\%$ bis $1{,}5\,\%$ ab. Die Ersparnisse durch die Aktivierung der KZP (Übergang von I nach J) ergeben sich nicht nur durch vorausschauende Verzögerungsvorgänge bei der Annäherung

an andere VT, sondern insbesondere dadurch, dass bei aktivierter KZP eine neue Sollgeschwindigkeitsvorgabe der LZP – sofern sie geringer als die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit ist – durch einen Segelvorgang eingestellt werden kann (vgl. Gl. (65)). Dies kommt im Mildhybridfall deutlich seltener vor, da die LSAP im Mildhybridfall eine Mindestgeschwindigkeit von $50\,\mathrm{km/h}$ vorgibt. Die zusätzlichen (mittleren) Ersparnisse durch verbesserte Prädiktion (K) betragen maximal $1{,}2\,\%$ und sind bei einigen Dichten sogar vernachlässigbar gering bzw. nicht vorhanden.

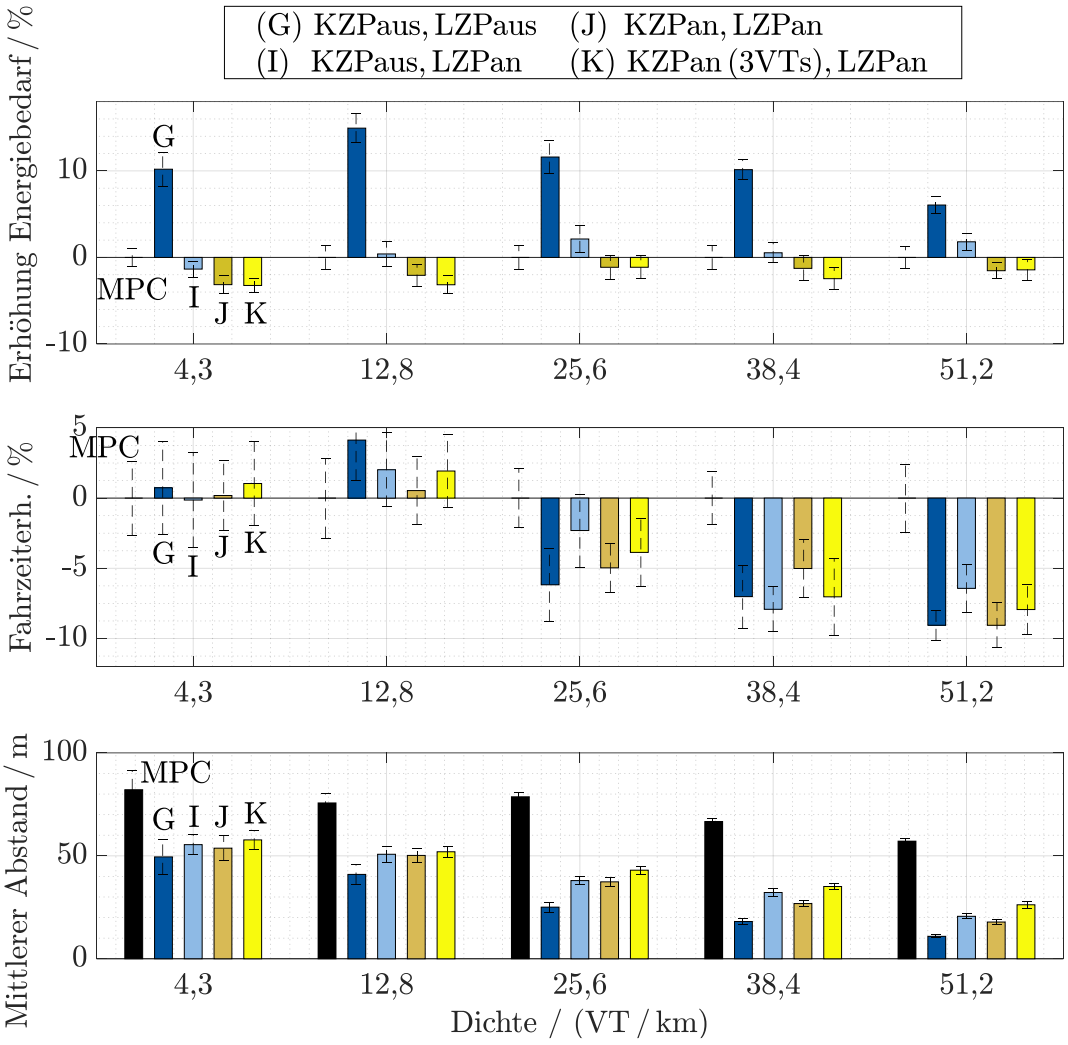


Abb. 6-12: BEV: Erhöhung des Energiebedarfs (oben), Fahrzeiterhöhung (mittig) und mittlerer Abstand (unten) bei Variation der Verkehrsdichte (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Die Standardabweichungen der Fahrzeit sind in einigen Fällen größer als $6\,\%$ (siehe Abb. 6-12, mittlere Grafik), sodass der Vergleich der Mittelwerte weniger aussagekräftig ist als der für die Erhöhung des Energiebedarfs. Bei niedrigen Dichten erhöht sich die Fahrzeit bei aktivierter LZP und KZP (J) geringfügig gegenüber der Referenz (im Mittel weniger als $0{,}6\,\%$). Bei mittleren bis hohen Dichten hingegen verkürzt sich die Fahrzeit um mehrere Prozent, da die MPC, wie bereits im Mildhybridfall geschildert, große Abstände insbesondere zu stehenden Vorderfahrzeugen

wählt (siehe die großen Unterschiede in der Abstandswahl zwischen MPC und den anderen Parametereinstellungen in Abb. 6-12, untere Grafik, insbesondere bei mittleren bis hohen Dichten).

6.5 Diskussion der Ergebnisse

Beim MHEV führt die Aktivierung der LZP bei niedrigen Verkehrsdichten zu Kraftstoffersparnissen von ca. $20\,\%$ gegenüber der MPC Referenz, ohne dabei die Fahrzeit zu erhöhen. Mit steigender Verkehrsdichte sinkt dieser Wert auf $8\,\%$ Prozent ab. Es ist zu beachten, dass die Ersparnisse von ca. $20\,\%$ im Wesentlichen an zwei Eigenschaften der LZP liegen, die von der MPC nicht bereitgestellt werden: 1) Die Zufahrt auf statische Geschwindigkeitsreduktionen erfolgt mit einem CR-Verzögerungsprofil, bei dem $50\,\%$ der Geschwindigkeitsdifferenz durch Segeln überbrückt wird – diese Eigenschaft macht mehr als $10\,\%$ der Ersparnisse aus. 2) Für die Zufahrt auf LSA wird die LSAP verwendet, die den Betrieb der VKM bei schlechten Wirkungsgraden vermeidet (die Mindestgeschwindigkeit für die Zufahrt beträgt $50\,\mathrm{km/h}$, sofern sie nicht durch die Höchstgeschwindigkeit begrenzt wird) und das Fahrzeug mit dem CR-Profil vor roten Lichtsignalanlagen zum Stillstand bringt.

Die Aktivierung der KZP kann das Einsparpotential aufgrund von Fehlprädiktionen bei manchen Verkehrsdichten verschlechtern. Bei der KZP mit Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation und verbesserter Prädiktion ist dies allerdings nicht mehr der Fall. Die zusätzlichen Ersparnisse betragen maximal $1{,}3\,\%$. Durch die Aktivierung von PnG kann der Kraftstoffverbrauch im Bestfall um weitere $3{,}7\,\%$ gesenkt werden. Verglichen mit den simulativen Untersuchungen aus Abschnitt 4.4.2, die Ersparnisse im zweistelligen Prozentbereich aufweisen, sind die Ersparnisse von PnG gering. Der Grund hierfür ist, dass PnG nur einen Bruchteil des Rundkurses (Größenordnung $10\,\%$) aufgrund der sich verändernden Maximalgeschwindigkeit aktiv ist.

Aufgrund des über weite Last- und Drehzahlbereiche hohen Wirkungsgrads elektrischer Antriebe wirkt sich die LSAP beim BEV nachteilig auf den Energiebedarf aus und wird deaktiviert bzw. die Mindestgeschwindigkeit auf $0\,\mathrm{km/h}$ herabgesetzt. Mit dieser Einstellung führt die Aktivierung von LZP und KZP abhängig von der Verkehrsdichte zu Ersparnissen von $1\,\%$ bis $3\,\%$ gegenüber der MPC. Die Fahrzeiterhöhung ist kleiner als $0{,}6\,\%$. Die Energieeinsparungen sind deutlich geringer als im Mildhybridfall, da die Vorteile der LSAP entfallen und der Vorteil von Segeln bei der Anfahrt auf Geschwindigkeitsreduktionen beim batterieelektrischen Fahrzeug deutlich weniger ausgeprägt ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird ein automatisiertes Längsführungssystem bestehend aus einer neuartigen Langzeitplanung und einer regelbasierten Kurzzeitplanung vorgestellt. Die Langzeitplanung wird durch die in dieser Arbeit entwickelte Alphaadaption, den Waterfillingalgorithmus und die Anfahrtsplanung auf rote Lichtsignalanlagen realisiert. Die Alphaadaption erhöht den Segelanteil der Verzögerungsprofile, wenn die nächste Lichtsignalanlage nicht bei grün erreicht wird. Der recheneffiziente Waterfillingalgorithmus bestimmt daraufhin einen Geschwindigkeitsverlauf, der den Energiebedarf am Rad minimiert und die Lichtsignalanlage zu einem vorgegebenen Zeitpunkt (hier der Beginn der nächstmöglichen Grünphase) erreicht. Die Anfahrtsplanung wird nur für verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge verwendet und ersetzt das Ergebnis des Waterfillingalgorithmus bei Unterschreiten einer minimalen Sollgeschwindigkeit durch eine verbrauchsgünstigere zügigere Anfahrt mit nachfolgender Stillstandszeit an der Lichtsignalanlage. Die Kurzzeitplanung implementiert das Wissen über energieminimale Verzögerungsprofile in Form von Regeln und ermöglicht einen fahrkomfortorientierten Pulse und Glide (PnG) Betrieb für freie Fahrt und Folgefahrten. In Kombination mit der Langzeitplanung wird der PnG Betrieb nur dann freigegeben, wenn sich die Fahrzeit dadurch nicht erhöht. Das Längsführungssystem ist für konventionelle Fahrzeuge, Hybridfahrzeuge und batterieelektrische Fahrzeuge einsetzbar, wobei für letztere der PnG Betrieb aufgrund der ausbleibenden Verringerung des elektrischen Energiebedarfs deaktiviert wird.

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Bewertung des Fahrkomforts der PnG Strategie. Die Fahrkomfortstudie zu PnG ergab, dass Beschleunigung, Ruck und die Dauer der Verzögerungsphase beschränkt werden müssen, um einen bestimmten Fahrkomfort zu erreichen. Die Beschränkungen bzw. Schwellwerte wurden anhand der Probandenbewertungen für zwei verschiedene Fahrkomfortniveaus identifiziert. Die Schwellwerte wurden anschließend verwendet, um die Wechselbeziehung von Fahrkomfort und Verbrauchsersparnissen gegenüber Konstantfahrt zu quantifizieren. Die Fahrkomfortkalibrierung, bei der der PnG Betrieb nur für kritische Kunden bemerkbar ist, erzielt bei niedrigen Geschwindigkeiten (Tempo-30-Zone) selbst bei Verwendung eines kleinvolumigen $1{,}2\,\mathrm{l}$ Motors Kraftstoffersparnisse von etwas mehr als $20\,\%$ gegenüber Konstantfahrt. Die Ersparnisse nehmen mit steigender Geschwindigkeit ab. Die aus der Fahrkomfortstudie gewonnen Schwellwerte für Beschleunigung und Ruck sind nicht nur für den PnG Betrieb relevant, sondern werden auch für andere Fahrmanöver der Längsführung verwendet.

Zur Validierung des Längsführungssystems wurde eine Verkehrssimulation entwickelt, die einen mit Querstraßen und Lichtsignalanlagen versehenen Rundkurs innerhalb der Stadt Paderborn nachbildet und beliebige Verkehrsdichten realisieren kann. Verkehrsteilnehmer können an Kreuzungen verschwinden und wieder erscheinen. Die Rundkursfahrten werden mit einem Mildhybridfahrzeug und einem batterieelektrischen Fahrzeug durchgeführt.

Als Referenz für die entwickelte Längsführung dient ein als modellprädiktive Regelung ausgeführtes Längsführungssystem, welches das Fahrzeug durch einen Lösungsraum hindurch navigiert und dabei Beschleunigungen, Verzögerungen und Abweichungen von der Höchstgeschwindigkeit des Zyklus bestraft.

Das entwickelte Längsführungssystem weist für batterieelektrische Fahrzeuge einen leicht geringeren Bedarf an elektrischer Energie verglichen mit dem durch MPC realisierten Längsführungssystem auf und nutzt für Mildhybridfahrzeuge die Fahrzeugeigenschaften und insbesondere die Segelfunktion derart aus, dass bei niedrigen Verkehrsdichten Kraftstoffverbrauchseinsparungen von mehr als $20\,\%$ gegenüber der MPC erzielt werden, wobei sich die Fahrzeit im batterieelektrischen Fall um maximal $0{,}6\,\%$ erhöht und im Mildhybridfall stets verkürzt.

Man beachte, dass die Potentiale der automatisierten Längsführung nur dann gehoben werden, wenn das System aufgrund einer hohen Kundenakzeptanz auch häufig genutzt wird. Dies ist erwartungsgemäß nicht der Fall, wenn das Systemverhalten dazu führt, dass der Fahrer durch drängelnde Hinterfahrzeuge gestresst wird. Zur Erhöhung der Kundenakzeptanz könnte daher die Längsführung für batterieelektrische Fahrzeuge, für die die Geschwindigkeit bei der Zufahrt auf die nächste Lichtsignalanlage aktuell nicht nach unten begrenzt wird, um folgende Eigenschaften erweitert werden. Wenn zwischen nächster Lichtsignalanlage und aktueller Fahrzeugposition eine Abbiegemöglichkeit für das Hinterfahrzeug besteht, kann über einen rückwärtsgerichteten Abstandssensor oder Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ein potenzieller Drängler erfasst und die Mindestgeschwindigkeit angehoben werden. Dasselbe gilt, wenn auf andere Art der nachfolgende Verkehr behindert werden könnte. Wenn z.B. die nächste Lichtsignalanlage eine Abbiegeampel mit eigener Abbiegespur ist, muss die Mindestgeschwindigkeit bei Vorhandensein von Hinterfahrzeugen bis zum Spurwechsel angehoben werden. Es bleibt zu untersuchen, ob zur Erhöhung der Kundenakzeptanz auch unabhängig von einer Abbiegemöglichkeit eine Mindestgeschwindigkeitsbeschränkung bei Vorhandensein eines Hinterfahrzeugs eingeführt werden muss. Ferner muss untersucht werden, ob der Segelanteil der statischen Geschwindigkeitsplanung in bestimmten Situationen (z.B. vor dem Abbiegen in eine Seitenstraße) verkürzt, d.h. der Bereich für Alpha eingeschränkt werden sollte, um die Straße für nachfolgende Verkehrsteilnehmer schneller freigeben zu können.

8 Anhang

8.1 Längsdynamik- und Antriebsstrangparameter

Fahrzeugleergewicht	$m_{\mathrm{Fzg,leer}} = 1530\,\mathrm{kg}$
Zusätzliches Gewicht durch Passagiere	$m_{\mathrm{zus}} = 100\,\mathrm{kg}$
Stirnfläche	$A_{\mathrm{Fzg}} = 2{,}2\,\mathrm{m}^2$
Luftwiderstandsbeiwert	$c_{\mathrm{W}} = 0{,}27$
Dynamischer Radradius	$r_{\mathrm{Rad}} = 0{,}3170\,\mathrm{m}$
Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandsfaktor	$f_0 = 0{,}0105$
Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsfaktor	$f_1 = 0{,}0004\,(\mathrm{m/s})^{-1}$
Trägheitsmoment von Rad und Achse	$J_{\mathrm{Rad}} = 0{,}95\,\mathrm{kg/m}^2$

Tab. 8-1: Längsdynamikparameter für das betrachtete D-Segment Fahrzeug

Daten der 1. VKM	
Typ	Turboaufgeladener Ottomotor
Hubvolumen	$V_{\mathrm{Hub}} = 1{,}2\,\mathrm{l}$
Maximales Antriebsmoment	$M_{\mathrm{max,Antrieb}} = 210\ \mathrm{Nm},\ 1400\ \mathrm{min}^{-1} - 3700\ \mathrm{min}^{-1}$
Nennleistung	$P_{\mathrm{N}} = 83\ \mathrm{kW},\ 3800\ \mathrm{min}^{-1} - 6200\ \mathrm{min}^{-1}$
Minimaler spezifischer KSV	$b_{\mathrm{e,min}} = 222{,}7\ \mathrm{g/kWh}$
Kraftstoffmasse für Wiederstart	$m_{\mathrm{B,Start}} = 0{,}42\ \mathrm{g}$
Daten der 2. VKM	
Typ	Turboaufgeladener Ottomotor
Hubvolumen	$V_{\mathrm{Hub}} = 2{,}0\,\mathrm{l}$
Maximales Antriebsmoment	$M_{\mathrm{max,Antrieb}} = 350\ \mathrm{Nm},\ 1250\ \mathrm{min}^{-1} - 4500\ \mathrm{min}^{-1}$
Nennleistung	$P_{\mathrm{N}} = 170\ \mathrm{kW},\ 4750\ \mathrm{min}^{-1} - 6200\ \mathrm{min}^{-1}$
Minimaler spezifischer KSV	$b_{\mathrm{e,min}} = 230\ \mathrm{g/kWh}$
Kraftstoffmasse für Wiederstart	$m_{\mathrm{B,Start}} = 0{,}5\ \mathrm{g}$

Daten des Getriebes	
Typ	Achtgangautomatikgetriebe Längseinbau
Getriebeübersetzung	$[i_{\mathrm{Getr}}(1) \dots i_{\mathrm{Getr}}(8)] =$ $[4{,}714;\ 3{,}143;\ 2{,}106;\ 1{,}667;\ 1{,}285;\ 1{,}000;\ 0{,}839;\ 0{,}667]$
Differentialgetriebeübersetzung	$i_{\mathrm{Diff}} = 3{,}204$
Differentialgetriebeeffizienz	$\eta_{\mathrm{Diff}} = 0{,}96$

Tab. 8-2: Daten des Antriebsstrangs

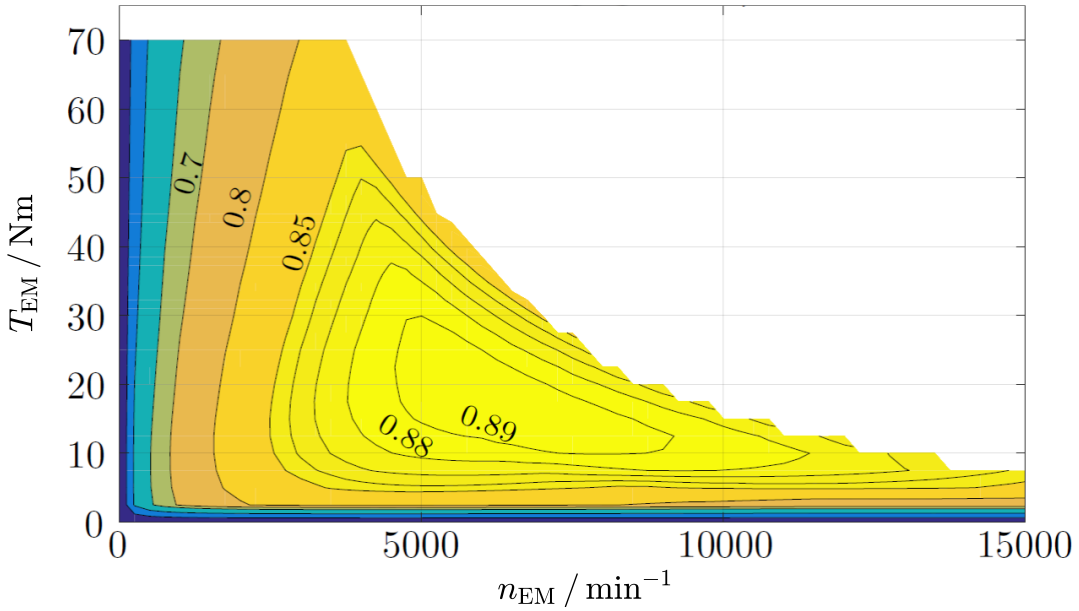


Abb. 8-1: Wirkungsgradkennfeld der unskalierten Asynchronmaschine. Die Drehmomentachse wird in der Simulation mit dem Faktor vier skaliert.

Maximales Antriebsmoment	$M_{\mathrm{max,Antrieb}} = 280\ \mathrm{Nm}$
Maximales Rekuperationsmoment	$M_{\mathrm{max,Reku}} = 2/3 \cdot 280\ \mathrm{Nm}$
Eckdrehzahl	$n_{\mathrm{Eck}} = 3750\ \mathrm{min}^{-1}$ ($\triangleq v_{\mathrm{Fzg}} = 45\ \mathrm{km/h}$)
Nennleistung	$P_{\mathrm{N}} = 110\ \mathrm{kW}$
Wirkungsgradbestpunkt	$\eta_{\mathrm{max}} = 0{,}9$ @ $(6000\ \mathrm{min}^{-1}, 70\ \mathrm{Nm})$
Wirkungsgrad Inverter	$\eta_{\mathrm{Inv}} = 0{,}98$
Getriebeübersetzung EM zu Rad	$r_{\mathrm{Getr}} = 10$
Wirkungsgrad Getriebe	$\eta_{\mathrm{Getr}} = 0{,}95$

Energiemenge Li-Ionen-Batterie	$W_{\mathrm{Bat,ges}} = 30\,\mathrm{kWh}$
Coulombscher Wirkungsgrad	$\eta_{\mathrm{Coul}} = 0{,}95$
Verbrauch des 12 V Bordnetzes	$P_{\mathrm{V,el}} = 420\,\mathrm{W}$

Tab. 8-3: Daten des elektrischen Antriebsstrangs

8.2 Optimale Parameter der Lv7 Kalibrierung

Abb. 8-2 zeigt die optimalen Parameter der Lv7 Kalibrierung. Die optimale Beschleunigung ist in einem schmalen Bereich um $v_{\mathrm{m}} = 40\,\mathrm{km/h}$ gleich der Begrenzung und nimmt sonst geringere Werte an, die mit steigender Geschwindigkeit tendenziell abnehmen. Die optimale Verzögerungsdauer ist bis $v_{\mathrm{m}} = 70\,\mathrm{km/h}$ nahe oder gleich der Limitierung, d.h. die Verzögerungsphase ist relativ lang, um den Zeitanteil der Beschleunigungsphase bezogen auf den Zeitanteil der wirkungsgradungünstigeren Übergangsphasen zu erhöhen.

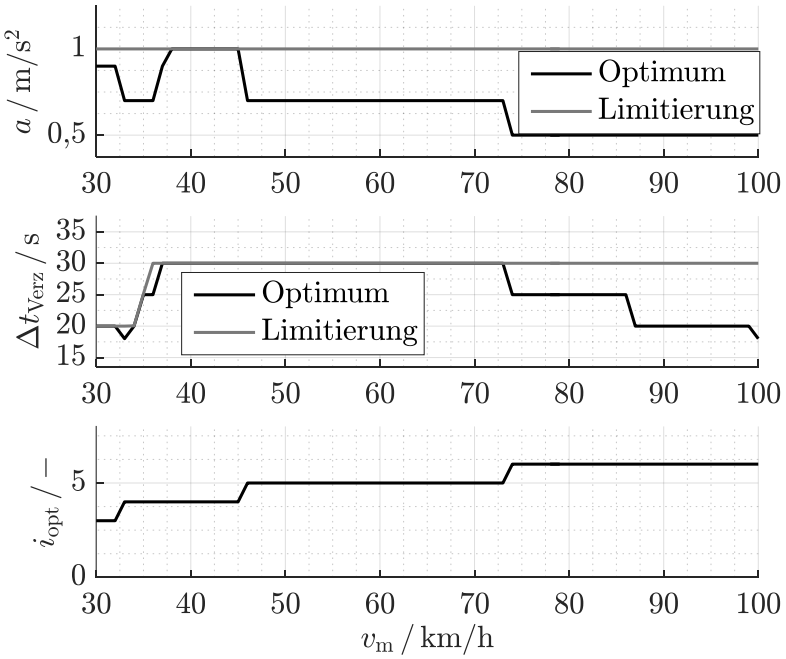


Abb. 8-2: Lv7 Kalibrierung: Optimale Beschleunigung, Verzögerungsdauer und Gangposition als Funktion der mittleren Geschwindigkeit

8.3 Sensitivitätsanalyse für den 2,0 l Motor

Abb. 8-3 fasst die Entwicklung der Kraftstoffersparnisse für den 2,0l Motor zusammen. Die Entwicklung ähnelt der des 1,2l Motors (siehe Abb. 4-26). Bei Beschränkung des Geschwindigkeitsdeltas sind die Einbußen größer als beim 1,2l Motor.

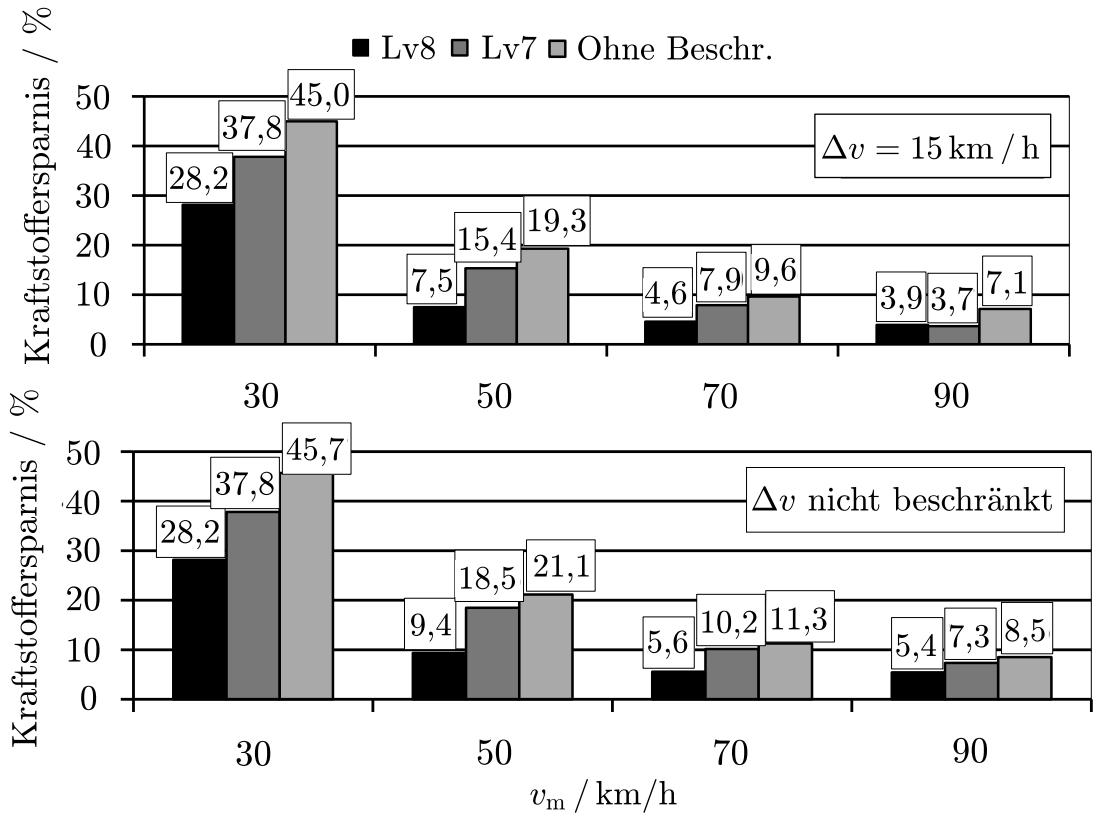


Abb. 8-3: Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse für den 2,0l *Motor*

8.4 Herleitung der Zeitdauer für den Waterfillingalgorithmus

Der Parameter Δt_{x} aus Gl. (63) wird so berechnet, dass der Abstand zur LSA zum Zeitpunkt des Umschaltens auf grün so groß ist, dass der ACC Regler bis zum Moment des Umschaltens nicht verzögert (vorausgesetzt, es liegen vor der LSA keine Geschwindigkeitsreduktionen). Dazu wird in Gl. (31) $a_{\mathrm{ACC,Obj}}$ zu $0\,\mathrm{m/s^2}$ gesetzt und als Objekt die (stehende) LSA eingesetzt, d.h. $v_{\mathrm{Obj}} = 0\,\mathrm{m/s}$. Für die Zeitlücke des ACC Reglers wird die stationäre Zeitlücke τ_{ACC} aus Gl. (26) verwendet. Umstellen nach der Geschwindigkeit ergibt die Gleichung

$$v_{\mathrm{ego,max,LSA}} = \frac{s_{\mathrm{LSA}} - s_{\mathrm{ego}} - d_{\mathrm{ACC}}}{\tau_{\mathrm{ACC}} + r_{\mathrm{v,Obj}}/r_{\mathrm{s,Obj}}}. \tag{90}$$

Das Fahrzeug darf maximal die Geschwindigkeit $v_{\mathrm{ego,max,LSA}}$ besitzen, damit es im Abstand $s_{\mathrm{LSA}} - s_{\mathrm{ego}}$ zur LSA nicht verzögert. Wenn keine Geschwindigkeitsbegrenzungen vor der LSA vorhanden sind, ist die Sollgeschwindigkeit

$$\tilde{v}_0 = {\left(s_{\mathrm{LSA}} - s_{\mathrm{ego}}\right)}\Big/{\left(\Delta t_{\mathrm{x}} + \Delta t_{\mathrm{A}}\right)}. \tag{91}$$

Gleichsetzen von $v_{\mathrm{ego,max,LSA}}$ und $\tilde{v}_0$ für den Grenzfall, dass die LSA gerade auf grün umschaltet (d.h. $\Delta t_{\mathrm{A}} = 0$), ergibt die Gleichung

$$\Delta t_{\mathrm{x}} = \frac{s_{\mathrm{LSA}} - s_{\mathrm{ego}}}{s_{\mathrm{LSA}} - s_{\mathrm{ego}} - d_{\mathrm{ACC}}} \left(\tau_{\mathrm{ACC}} + \frac{r_{\mathrm{v,Obj}}}{r_{\mathrm{s,Obj}}} \right) \tag{92}$$

$$\underset{s_{\mathrm{LSA}} - s_{\mathrm{ego}} \gg d_{\mathrm{ACC}}}{\approx} \tau_{\mathrm{ACC}} + \frac{r_{\mathrm{v,Obj}}}{r_{\mathrm{s,Obj}}}. \tag{93}$$

Einsetzen von Gl. (92) in Gl. (63) ergibt die Zieldauer $\Delta\widetilde{t_{\mathrm{A}}}$, die als Eingangsgröße für den Waterfillingalgorithmus verwendet wird, um v_{A} zu berechnen.

8.5 Zustände Glide und Rekuperation

8.5.1 Zustand Glide

Die Regeln für den Zustand Glide sind zum Teil ähnlich oder identisch mit den in Abschnitt 5.6 bereits eingeführten. Es wird daher nur eine Übersicht über die Abläufe bei der Entscheidungsfindung gegeben.

Zunächst wird geprüft, ob ein Wechsel nach Rekuperation nötig ist. Dies ist der Fall, wenn der mit der Segeltrajektorie prädizierte Abstand zum Vorderobjekt nicht hinreichend groß ist ($\neg A_2$ ist wahr) und zugleich $A_{\mathrm{R},1} \vee A_{\mathrm{R},2}$ zutrifft, d.h. $A_{\mathrm{G,Reku}}$ ist wahr:

$$A_{\mathrm{G,Reku}} = \neg A_2 \wedge \left(A_{\mathrm{R},1} \vee A_{\mathrm{R},2}\right). \tag{94}$$

Ein Wechsel nach Rekuperation wird ebenfalls durchgeführt, wenn das Profil der statischen Geschwindigkeitsplanung einen Rekuperationsvorgang vorgibt oder wenn $v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{max,lim}} + \Delta v_{\mathrm{Tol,Glide}}$, wobei $\Delta v_{\mathrm{Tol,Glide}}$ ein Toleranzwert ist.

Der Segelvorgang wird durch einen Wechsel nach Prädiktives ACC vorzeitig beendet, wenn die Berechnungen der Langzeitprädiktion ergeben, dass die ausgewählte Zielgrünphase kritisch erreicht wird (hier: während der Gelbphase), und wenn zugleich A_2 wahr ist.

Ist kein Wechsel nach Rekuperation oder Prädiktives ACC nötig und ist zusätzlich A_{24} wahr, wird der Zustand Glide beibehalten und die nachfolgenden Prüfungen müssen nicht durchgeführt werden. Ist jedoch A_{24} falsch, wird geprüft, ob ein Wechsel nach Pulse bzw. Prädiktives ACC erforderlich ist. Die Regeln zur weiteren Entscheidungsfindung hängen davon ab, über welche Bedingungen der Zustand Glide beim letzten Zustandswechsel erreicht wurde.

Der Zustand Glide kann eingeleitet worden sein, um

1) dem Segelprofil der statischen Geschwindigkeitsplanung zu folgen,
2) den Zielabstand zum Vorderobjekt einzustellen,
3) PnG innerhalb des Geschwindigkeitsbands durchzuführen oder
4) PnG innerhalb des Abstandsbandes durchzuführen.

Im ersten und zweiten Fall wird nach Prädiktives ACC gewechselt, wenn das Ende des Segelprofils erreicht bzw. der Zielabstand eingestellt ist. Im dritten Fall wird nach Pulse gewechselt, wenn die optimale Segeldauer erreicht ist oder die untere Grenze des Geschwindigkeitsbands unterschritten wird. Im vierten Fall wird nach Pulse gewechselt, wenn die untere Grenze des Abstandsbandes unterschritten wird. Die notwendigen Aussagen zur Behandlung des vierten Falls lauten wie folgt:

$$A_{28}\colon \left(\exists\, t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}\colon\ s_{\mathrm{ego,P}}(t) \leq s_{\mathrm{PnG,min}}(t)\right), \tag{95}$$

$$A_{29}\colon \left(\exists\, t \in \mathfrak{P}_{\mathrm{H}}\colon\ s_{\mathrm{ego,P}}(t) \leq s_{\mathrm{Segeln,min}}(t)\right) \text{ und} \tag{96}$$

$$A_{30}\colon \text{„Es wurde bereits die minimale Segelzeit } \Delta t_{\mathrm{S,min}} \text{ gesegelt.“}, \tag{97}$$

wobei $s_{\mathrm{ego,P}}$ die prädizierte Pulstrajektorie ist. Die Positionsgrenzen $s_{\mathrm{PnG,min}}$ bzw. $s_{\mathrm{Segeln,min}}$ werden mit $v_{\mathrm{ego,P}}$ berechnet. Ein Wechsel nach Pulse wird vollzogen, wenn $A_{\mathrm{P},1}$ oder $A_{\mathrm{P},2}$ wahr ist:

$$A_{\mathrm{P},1} = \neg A_{24} \wedge A_{28} \wedge A_{30} \text{ und} \tag{98}$$

$$A_{\mathrm{P},2} = \neg A_{24} \wedge A_{29} \wedge \neg A_{30}. \tag{99}$$

Die weichere Grenze $s_{\mathrm{Segeln,min}}(t)$ wird verwendet, um die Segelzeit zu vergrößern, wenn die minimale Segelzeit nicht erreicht wurde.

Im Zustand Glide wird die Sollbeschleunigung mit einer Ruckbegrenzung auf den berechneten Wert in Segeln geführt (siehe Gl. (23)). Bei Erreichen des Werts, nimm der Segelstatus den Wert eins an.

Für den Fall, dass ein rein verbrennungsmotorisch betriebenes Fahrzeug nicht über die Segelfunktion verfügt, wird der PnG Betrieb deaktiviert. Der Zustand Glide wird zum Zustand Schub. Die in der KZP verwendeten Segeltrajektorien $a_{\mathrm{ego,S}}(t)$, $v_{\mathrm{ego,S}}(t)$ oder $s_{\mathrm{ego,S}}(t)$ werden konsequent durch Schubtrajektorien ersetzt, die sich mit Gl. (22) berechnen, indem $M_{\mathrm{max,Reku}}$ zu Null gesetzt wird. Die Sollbeschleunigung im Zustand Glide bzw. Schub wird ebenso berechnet. Wenn das Antriebsstrangmanagement eine entsprechende Schnittstelle besitzt, wird anstelle eines Segelstatus ein Schubstatus berechnet und dieser auf den Wert eins gesetzt.

8.5.2 Zustand Rekuperation

Der Zustand Rekuperation wird beibehalten, wenn A_{24} wahr ist oder die statische Geschwindigkeitsplanung ein Rekuperationsprofil vorgibt oder wenn $v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{max,lim}} + \Delta v_{\mathrm{Tol,Reku}}$ mit $\Delta v_{\mathrm{Tol,Reku}} = a_{\mathrm{ego,akt}}^2/\left(2 j_{\mathrm{max,Komf}}\right)$.[32] Ansonsten wird nach Prädiktives ACC gewechselt.

Wenn A_{24} wahr ist, wird die Beschleunigung wie folgt eingestellt.

- Ist A_5 falsch, wird für die Beschleunigung der Komfortwert gemäß Gl. (21) vorgeben. Dieser berücksichtigt die Vorgabe, dass die Reibungsbremse nicht betätigt werden soll.
- Ist A_5 wahr, wird die Sollbeschleunigung von Zeitschritt zu Zeitschritt jeweils um den Wert $\left|j_{\mathrm{Reku,min}}\right| \cdot \Delta t_{\mathrm{Fkt}}$ verringert, und zwar so lange, bis A_5 falsch wird, wobei Δt_{Fkt} die Zeitspanne ist, die zwischen zwei Funktionsaufrufen der Längsführungsregelung vergeht. Zur

[32] $\Delta v_{\mathrm{Tol,Reku}}$ ist so bemessen, dass das Fahrzeug mit der konstanten Geschwindigkeit $v_{\mathrm{max,lim}}$ weiterfährt, wenn bei Eintreffen von $v_{\mathrm{ego,akt}} = v_{\mathrm{max,lim}} + \Delta v_{\mathrm{Tol,Reku}}$ die Verzögerung mit $j_{\mathrm{max,Komf}}$ zurückgenommen wird.

Berechnung der in A_5 verwendeten Trajektorie $s_{\mathrm{ego,R}}(t)$ wird die aktuelle Sollbeschleunigung über den Prädiktionshorizont konstant gehalten.

- Wechselt A_5 von wahr zu falsch, wird $s_{\mathrm{ego,R}}(t)$ nicht mehr mit dem aktuellen, sondern einem um $j_{\mathrm{Reku,max}}\Delta t_{\mathrm{Fkt}}$ erhöhten und über den Prädiktionshorizont konstant gehaltenen Sollwert berechnet und geprüft, ob A_5 weiterhin falsch bleibt. Ist dies der Fall, wird die Beschleunigung um den Wert $j_{\mathrm{Reku,max}}\Delta t_{\mathrm{Fkt}}$ erhöht. Durch die Verwendung von dem um $j_{\mathrm{Reku,max}}\Delta t_{\mathrm{Fkt}}$ erhöhten Wert bei der Berechnung von $s_{\mathrm{ego,R}}(t)$ wird häufiges Wechseln zwischen Erhöhen und Verringern der Beschleunigung vermieden. Die Beschleunigung wird maximal bis zum Erreichen der Beschleunigung in Schubabschaltung erhöht.

Wenn A_{24} falsch ist, aber die statische Geschwindigkeitsplanung ein Rekuperationsprofil vorgibt, wird entsprechend des Profils verzögert. Ansonsten wird bei Zutreffen von $v_{\mathrm{ego,akt}} > v_{\mathrm{max,lim}} + \Delta v_{\mathrm{Tol,Reku}}$ für die Beschleunigung der Komfortwert gemäß Gl. (21) vorgeben.

8.6 Schaltzeiten der Lichtsignalanlagen im Rundzyklus

t / s	LSA 1	LSA 2	LSA 3	LSA 4	LSA 5	LSA 6	LSA 7	LSA 8	LSA 9	LSA 10	LSA 11	LSA 12	LSA 13	LSA 14
0	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
1	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
2	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
3	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
4	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
5	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
6	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
7	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
8	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
9	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
10	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
11	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
12	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
13	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
14	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
15	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
16	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
17	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
18	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
19	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
20	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
21	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
22	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
23	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
24	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
25	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
26	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
27	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
28	r	g	g	g	g	g	g	g	r	g	r	r	g	g
29	r	g	g	g	g	g	y	g	r	g	r	r	g	g
30	r	g	g	g	g	g	y	G	r	g	r	r	g	g
31	r	g	g	y	y	g	y	g	r	y	r	r	g	g
32	r	g	g	y	y	g	y	g	r	y	r	r	g	g
33	r	g	g	y	y	y	y	y	g	y	r	r	g	g
34	r	g	g	y	y	y	r	y	g	y	r	r	g	g
35	r	g	g	r	r	y	r	y	g	r	r	r	g	g
36	r	Y	y	r	r	r	r	y	g	r	r	r	y	y
37	r	y	y	r	r	r	r	y	g	r	r	r	y	y
38	r	y	y	r	r	r	r	y	g	r	r	r	y	y
39	r	y	y	r	r	r	r	r	g	r	r	r	y	y
40	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r	r	r	r
41	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r	r	r	r
42	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r	r	r	r
43	r	r	r	r	r	r	r	r	y	r	r	r	r	r
44	r	r	r	r	r	r	r	r	y	r	r	r	r	r
45	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
46	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
47	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
48	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r

49	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
50	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
51	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
52	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
53	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
54	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
55	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
56	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
57	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
58	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
59	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
60	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
61	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
62	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
63	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
64	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
65	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
66	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
67	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
68	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
69	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
70	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
71	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
72	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
73	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
74	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
75	g	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	g	r	r
76	y	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	g	r	r
77	y	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	g	r	r
78	y	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	g	r	r
79	y	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	g	r	r
80	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r
81	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r
82	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r
83	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r
84	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r
85	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	g	r	r
86	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	r	r
87	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	r	r
88	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	r	r
89	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	r	y	r	r

Tab. 8-4: Schaltzeiten der LSA 1 bis 14: Die Schaltzeiten wiederholen sich zyklisch mit einer Zyklusdauer von $90\,\mathrm{s}$*. LSA 1 ist die LSA in der linken oberen Ecke des Rundzyklus (vgl. Abb. 6-1). Die Zählung erfolgt gegen den Uhrzeigersinn.*

8.7 Parameter der Längsführungsregelung mit Kurzzeitplanung

Die Parameter des konventionellen ACC Reglers sind im Folgenden aufgeführt. Die Werte von $r_{\mathrm{v,Obj}}$ und $r_{\mathrm{s,Obj}}$ werden zwischen den Stützstellen linear interpoliert und außerhalb der Stützstellen konstant gehalten.

$$r_{\mathrm{v,Obj}}(30\,\mathrm{km/h}) = 0.6145\,(\mathrm{m/s^2})/(\mathrm{m/s})$$
$$r_{\mathrm{v,Obj}}(50\,\mathrm{km/h}) = 0.4317\,(\mathrm{m/s^2})/(\mathrm{m/s})$$
$$r_{\mathrm{s,Obj}}(30\,\mathrm{km/h}) = 0.1500\,(\mathrm{m/s^2})/\mathrm{m}$$
$$r_{\mathrm{s,Obj}}(50\,\mathrm{km/h}) = 0.0500\,(\mathrm{m/s^2})/\mathrm{m}$$
$$r_{\mathrm{v,Abw}} = 0.3000\,(\mathrm{m/s^2})/(\mathrm{m/s})$$
$$a_{\mathrm{Verz,Komf}} = -1\,\mathrm{m/s^2}$$

Die Parameter der Zustände Prädiktives ACC, Pulse, Glide und Rekuperation sind wie folgt bedatet:

$$a_{\mathrm{S,Komf}} = -0.15\,\mathrm{m/s^2} \qquad \Delta v_{\mathrm{Tol,ACC}} = 1\,\mathrm{km/h}$$
$$\Delta\tilde{a} = -0.02\,\mathrm{m/s^2} \qquad \Delta v_{\mathrm{O}} = 1\,\mathrm{km/h}$$
$$j_{\mathrm{min,Komf}} = -0.5\,\mathrm{m/s^3} \qquad \Delta\tilde{v}_{\mathrm{O}} = 1\,\mathrm{km/h}$$
$$j_{\mathrm{max,Komf}} = 0.5\,\mathrm{m/s^3} \qquad \Delta s_{\mathrm{O}} = 5\,\mathrm{m}$$
$$j_{\mathrm{Reku,min}} = -1.5\,\mathrm{m/s^3} \qquad \Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}} = 2\,\mathrm{m}$$
$$j_{\mathrm{Reku,max}} = 1.5\,\mathrm{m/s^3} \qquad \Delta t_{\mathrm{S,min}} = 8\,\mathrm{s}$$

8.8 Kostenfunktion und Parameterwahl für das MPC-Längsführungssystem

Die Kostenfunktion des MPC-Längsführungssystems besitzt drei Gewichtungsfaktoren: q_{Beschl} zur Bestrafung von Beschleunigungsvorgängen, q_{Verz} zur Bestrafung von Verzögerungsvorgängen und q_{v} zur Bestrafung von Abweichungen von der Höchstgeschwindigkeit im Zyklus:

$$J\big(\mathbf{u}(\cdot\,|k)\big) = \big(\mathbf{x}(\cdot\,|k) - \mathbf{r}(\cdot\,|k)\big)^T\,\mathbf{Q}\,\big(\mathbf{x}(\cdot\,|k) - \mathbf{r}(\cdot\,|k)\big) + \mathbf{u}(\cdot\,|k)^T\,\mathbf{R}\,\mathbf{u}(\cdot\,|k) \tag{100}$$

mit

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{\mathrm{v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{\mathrm{Beschl}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{\mathrm{Verz}} \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} q_{\mathrm{Beschl}} & 0 \\ 0 & q_{\mathrm{Verz}} \end{pmatrix},$$
$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ r_{\mathrm{v}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} s_{\mathrm{akt}} \\ v_{\mathrm{akt}} \\ a_{\mathrm{akt,pos}} \\ a_{\mathrm{akt,neg}} \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} a_{\mathrm{soll,pos}} \\ a_{\mathrm{soll,neg}} \end{pmatrix}. \tag{101}$$

Die Summe aus $a_{\mathrm{akt,pos}}$ und $a_{\mathrm{akt,neg}}$ ergibt die aktuelle Beschleunigung. Die Sollgeschwindigkeit r_{v} wird auf das Maximum der Höchstgeschwindigkeit im Zyklus gesetzt; im Rundkurs beträgt dieses $70\,\mathrm{km/h}$. Der Gewichtungsfaktor $q_{\mathrm{Verz}} = 25$ erzielt für BEV und MHEV den geringsten Kraftstoffverbrauch bzw. elektrischen Energiebedarf, ohne dabei die Fahrzeit signifikant zu erhöhen (siehe Abb. 8-4), weshalb bei dem in Abb. 6-4 dargestellten Simulationswert der Gewichtungsfaktor $q_{\mathrm{Verz}} = 25$ verwendet wird. Die anderen Parameterwerte werden wie folgt gesetzt: $q_{\mathrm{v}} = 1$ und $q_{\mathrm{Beschl}} = 10$.

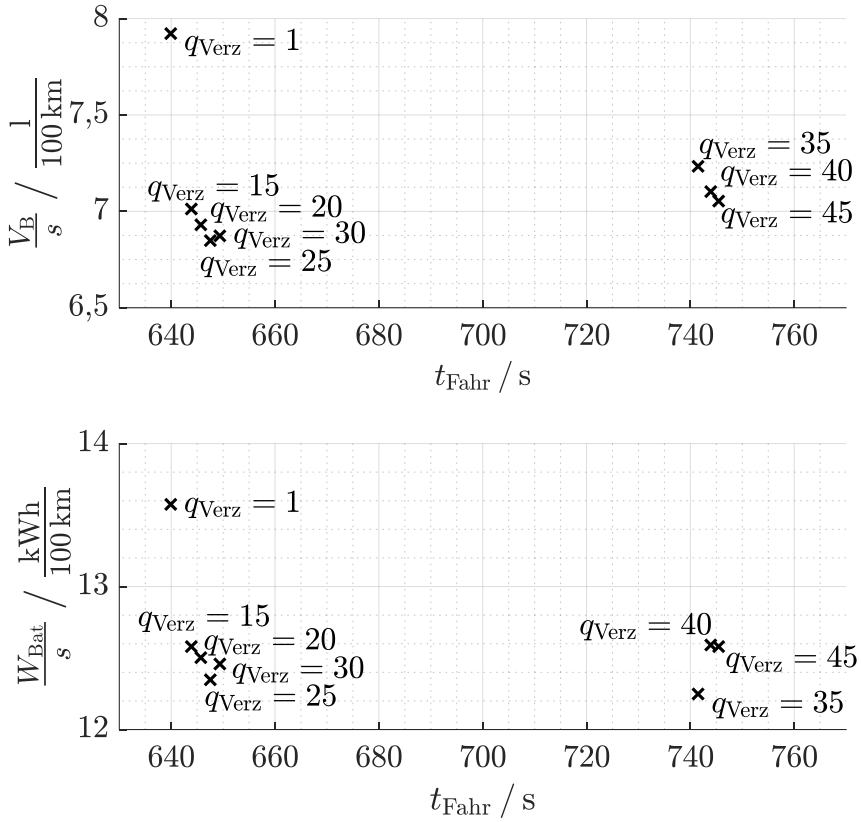


Abb. 8-4: Kraftstoffverbrauch pro Strecke des MHEV (oben) und Energiebedarf pro Strecke des BEV (unten) über der Fahrzeit für verschiedene Werte des Gewichtungsfaktors zur Bestrafung von Verzögerungsvorgängen

Literaturverzeichnis

[1] H. Proff, M. Brand, and D. Schramm, Eds., *Altersgerechte Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.

[2] *EQC von Mercedes-EQ: ECO Assistent.* [Online]. Verfügbar: https://www.mercedes-benz.de/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqc/charging-and-range.pi.html/mercedes-benz-cars/models/eqc/charging-and-range/intelligent-energy/eco-assist (abgerufen: 27. März 2022).

[3] Audi MediaCenter, *Fahrerassistenzsysteme.* [Online]. Verfügbar: https://www.audi-mediacenter.com/de/technik-lexikon-7180/fahrerassistenzsysteme-7184 (abgerufen: 27. März 2022).

[4] *Vernetzte Intelligenz: Nachtsichtassistent und Porsche InnoDrive - Der neue Porsche Panamera Turbo S E-Hybrid.* [Online]. Verfügbar: https://presskit.porsche.de/models/de/porsche-panamera-turbo-s-e-hybrid/topic/assistance-and-comfort-systems.html (abgerufen: 27. März 2022).

[5] M. Ross, “Automobile Fuel Consumption and Emissions: Effects of Vehicle and Driving Characteristics,” *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 19, no. 1, pp. 75–112, 1994, doi: 10.1146/annurev.eg.19.110194.000451.

[6] L. Evans, “Driver Behavior Effects on Fuel Consumption in Urban Driving,” *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, vol. 22, no. 1, pp. 437–442, 2016, doi: 10.1177/107118137802200111 7.

[7] J. van Mierlo, G. Maggetto, E. van de Burgwal, and R. Gense, “Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 218, no. 1, pp. 43–50, 2005, doi: 10.1243/095440704322829155.

[8] A. Brown, J. Gonder, and B. Repac, “An Analysis of Possible Energy Impacts of Automated Vehicles,” in *Road Vehicle Automation*, G. Meyer and S. Beiker, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 137–153.

[9] Z. Wadud, D. MacKenzie, and P. Leiby, “Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 86, pp. 1–18, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2015.12.001.

[10] T. Plum, “Einfluss moderner Antriebsstränge auf den Energiebedarf automatisierter Fahrzeuge,” Dissertation, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen University, Aachen, 2019.

[11] H. Xia *et al.,* “Field operational testing of ECO-approach technology at a fixed-time signalized intersection,” *15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2012. [Online]. Verfügbar: https://www.semanticscholar.org/paper/Field-operational-testing-of-ECO-approach-at-a-Xia-Boriboonsomsin/60d2062519c309ce28ed23e7021129744963f056

[12] M. Barth, S. Mandava, K. Boriboonsomsin, and H. Xia, “Dynamic ECO-driving for arterial corridors,” in *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS): June 29, 2011 - July 1, 2011, Vienna, Austria*, pp. 182–188.

[13] Z. Ye, T. Plum, S. Pischinger, J. Andert, M. Stapelbroek, and J. Pfluger, “Vehicle speed trajectory optimization under limits in time and spatial domains,” in *Fahrerassistenzsysteme 2017*, R. Isermann, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, pp. 319–331.

[14] N. Mueller, S. Strauss, S. Tumback, G.-C. Goh, and A. Christ, “Next Generation Engine Start/Stop Systems: "Free-Wheeling"," *SAE International Journal of Engines*, vol. 4, no. 1, pp. 874–887, 2011, doi: 10.4271/2011-01-0712.

[15] B. Dornieden, L. Junge, and P. Pascheka, “Vorausschauende energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung,” *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 114, no. 03, 2012.

[16] Z. Ye, K. Li, M. Stapelbroek, R. Savelsberg, M. Günther, and S. Pischinger, “Variable Step-Size Discrete Dynamic Programming for Vehicle Speed Trajectory Optimization,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, no. 99, pp. 1–9, 2018.

[17] T. Guan and C. W. Frey, “Unified predictive fuel efficiency optimization using traffic light sequence information,” in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2016, pp. 1103–1108.

[18] B. Asadi and A. Vahidi, “Predictive cruise control: Utilizing upcoming traffic signal information for improving fuel economy and reducing trip time,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 707–714, 2010.

[19] G. de Nunzio, C. C. de Wit, P. Moulin, and D. Di Domenico, “Eco-driving in urban traffic networks using traffic signals information,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 26, no. 6, pp. 1307–1324, 2016, doi: 10.1002/rnc.3469.

[20] S. E. Li and H. Peng, “Strategies to minimize the fuel consumption of passenger cars during car-following scenarios,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part*

D: Journal of Automobile Engineering, vol. 226, no. 3, pp. 419–429, 2011, doi: 10.1177/0954407011420214.

[21] S. E. Li, H. Peng, K. Li, and J. Wang, “Minimum Fuel Control Strategy in Automated Car-Following Scenarios,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 3, pp. 998–1007, 2012, doi: 10.1109/TVT.2012.2183401.

[22] Y. Imanishi, N. Tashiro, Y. Iihoshi, and T. Okada, “Development of Predictive Powertrain State Switching Control for Eco-Saving ACC,” *SAE Technical Paper 2017-01-0024*, 2017, doi: 10.4271/2017-01-0024.

[23] S. Xu, S. E. Li, X. Zhang, B. Cheng, and H. Peng, “Fuel-Optimal Cruising Strategy for Road Vehicles With Step-Gear Mechanical Transmission,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 6, pp. 3496–3507, 2015, doi: 10.1109/TITS.2015.2459722.

[24] S. E. Li, Q. Guo, L. Xin, B. Cheng, and K. Li, “Fuel-Saving Servo-Loop Control for an Adaptive Cruise Control System of Road Vehicles With Step-Gear Transmission,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 3, pp. 2033–2043, 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2574740.

[25] A. Freuer, *Ein Assistenzsystem für die energetisch optimierte Längsführung eines Elektrofahrzeugs,* 1st ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, 2016.

[26] B. Petzold, *Konzept eines Reiseberaters zur energieschonenden Optimierung der Mobilität unter besonderer Berücksichtigung von Hybridfahrzeugen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998. [Online]. Verfügbar: http://www.gbv.de/dms/bs/toc/265579228.pdf

[27] A. Lajunen, Y. Yang, and A. Emadi, “Recent Developments in Thermal Management of Electrified Powertrains,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 12, pp. 11486–11499, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2876315.

[28] A. Biswas and A. Emadi, “Energy Management Systems for Electrified Powertrains: State-of-the-Art Review and Future Trends,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 7, pp. 6453–6467, 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2914457.

[29] T. Grahle, M. Tonne, A. Wiedersberg, and T. Zsebedits, “Regeneration of the Particulate Filter by Using Navigation Data,” *MTZ worldwide*, vol. 77, no. 1, pp. 16–21, 2016, doi: 10.1007/s38313-015-0078-7.

[30] P. Griefnow *et al.,* “Real-Time Modeling of a 48V P0 Mild Hybrid Vehicle with Electric Compressor for Model Predictive Control,” *SAE Technical Paper 2019-01-0350*, Apr. 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2019-01-0350/

[31] P. Rumbolz, G. Baumann, and H.-C. Reuss, “Messung der fahrzeuginternen Leistungsflüsse im Realverkehr,” *ATZ-Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 113, no. 05, 2011.

[32] U. Küster and K. Reiter, *Technikwissen und Fahrverhalten junger Fahrer: eine empirische Studie.* [Online]. Verfügbar: https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/searchtype/series/id/11/docId/1469/start/4/rows/10

[33] K. Boriboonsomsin, M. J. Barth, and A. Vu, “Evaluation of Driving Behavior and Attitude Toward Eco-Driving: Southern California Limited Case Study,” *Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, 11-0151. [Online]. Verfügbar: https://trid.trb.org/view/1091273

[34] J. N. Barkenbus, “Eco-driving: An overlooked climate change initiative,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 762–769, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.021.

[35] M. Staubach, N. Schebitz, F. Köster, and D. Kuck, “Evaluation of an eco-driving support system,” *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, vol. 27, pp. 11–21, 2014, doi: 10.1016/j.trf.2014.09.006.

[36] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, J3016_201806, SAE International, Jun. 2018.

[37] J. Guanetti, Y. Kim, and F. Borrelli, “Control of connected and automated vehicles: State of the art and future challenges,” *Annual Reviews in Control*, vol. 45, pp. 18–40, 2018, doi: 10.1016/j.arcontrol.2018.04.011.

[38] B. Paden, M. Cap, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli, “A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 33–55, 2016, doi: 10.1109/TIV.2016.2578706.

[39] J. Strenkert, C. Schildhauer, N. Ruzicka, M. Richter, and D. Görke, “The Plug-In Hybrid 4-Cylinder Diesel from Mercedes-Benz,” in *26th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, Aachen, 2017.

[40] A. Broggi, P. Medici, P. Zani, A. Coati, and M. Panciroli, “Autonomous vehicles control in the VisLab Intercontinental Autonomous Challenge,” *Annual Reviews in Control*, vol. 36, no. 1, pp. 161–171, 2012, doi: 10.1016/j.arcontrol.2012.03.012.

[41] F. R. Salmasi, “Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 2393–2404, 2007, doi: 10.1109/TVT.2007.899933.

[42] S. G. Wirasingha and A. Emadi, “Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122, 2011, doi: 10.1109/TVT.2010.2090178.

[43] A. A. Malikopoulos and J. P. Aguilar, “An Optimization Framework for Driver Feedback Systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 955–964, 2013, doi: 10.1109/TITS.2013.2248058.

[44] P. Pisu and G. Rizzoni, “A Comparative Study Of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 506–518, 2007, doi: 10.1109/TCST.2007.894649.

[45] D. Maamria, F. Chaplais, N. Petit, and A. Sciarretta, “Comparison of several strategies for HEV energy management system including engine and catalyst temperatures,” in *American Control Conference (ACC),* Chicago, IL, USA, 2015, pp. 2948–2955.

[46] M. Wegener, L. Koch, M. Eisenbarth, and J. Andert, “Automated eco-driving in urban scenarios using deep reinforcement learning,” *Transportation Research Part C*, 2021.

[47] F. Mensing, R. Trigui, and E. Bideaux, “Vehicle trajectory optimization for application in ECO-driving,” in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1–6.

[48] J. Guanetti, Y. Kim, and F. Borrelli, “Control of Connected and Automated Vehicles: State of the Art and Future Challenges,” Apr. 2018. [Online]. Verfügbar: http://arxiv.org/pdf/1804.03757v1

[49] K. Graichen, “Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung,” Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Universität Ulm, Vorlesungsskript Wintersemester 2012/2013. Accessed: 19. Mai 2020. [Online]. Verfügbar: https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/iui.inst.110/Downloads/Vorlesung/Optimierung/Skript/Skript_MOOS_WS1213.pdf

[50] *Adaptive Cruise Control with Sensor Fusion - MATLAB & Simulink - MathWorks Deutschland.* [Online]. Verfügbar: https://de.mathworks.com/help/driving/examples/adaptive-cruise-control-with-sensor-fusion.html (abgerufen: 12. Mai 2020).

[51] B. Alrifaee, M. Reiter, J. P. Maschuw, F. Christen, L. Eckstein, and D. Abel, “Satellite-and Map-based Long Range Cooperative Adaptive Cruise Control System for Road Vehicles,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 21, pp. 732–737, 2013.

[52] P. Rumbolz, *Untersuchung der Fahrereinflüsse auf den Energieverbrauch und die Potentiale von verbrauchsreduzierenden Verzögerungsassistenzfunktionen beim PKW*. Zugl.: Stuttgart, Universität, Dissertation, Renningen: Expert-Verlag, 2013.

[53] C. Knobel, A. Pöltenstein, and S. Knoller, “Predictive EfficientDynamics Features,” *ATZ worldwide*, vol. 118, no. 4, pp. 16–21, 2016, doi: 10.1007/s38311-016-0006-8.

[54] F. Flehmig, F. Kästner, K. Knödler, and M. Knoop, “Eco ACC for Electric and Hybrid Electric Vehicles,” *ATZ worldwide*, vol. 116, no. 4, pp. 10–15, 2014.

[55] F. Graf, S. Deinhard, C. Bottke, and S. Grubwinkler, “Connected Energy Management with a Backend-based Driving Strategy as an Example,” *MTZ worldwide*, vol. 76, no. 12, pp. 10–15, 2015, doi: 10.1007/s38313-015-0067-x.

[56] M. Eisenbarth, T. Plum, and J. Andert, “Energieoptimierte Fahrstrategie unter Berücksichtigung der Verkehrsteilnehmer an Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage,” *Forschung im Ingenieurwesen*, vol. 82, no. 1, pp. 71–81, 2018, doi: 10.1007/s10010-018-0262-4.

[57] D. Hülsebusch, *Fahrerassistenzsysteme zur energieeffizienten Längsregelung - Analyse und Optimierung der Fahrsicherheit*. Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Dissertation. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2018.

[58] D. J. Chang and E. K. Morlok, “Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 131, no. 3, pp. 173–182, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:3(173).

[59] J. Lee, “Vehicle Inertia Impact on Fuel Consumption of Conventional and Hybrid Electric Vehicles Using Acceleration and Coast Driving Strategy,” PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.

[60] S. E. Li, S. Xu, G. Li, and B. Cheng, “Periodicity based cruising control of passenger cars for optimized fuel consumption,” in *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, MI, USA, 2014, pp. 1097–1102.

[61] C. Priestner, H. Petutschnig, A. Ennemoser, and F. Zieher, “Werkzeuge zur effektiven Reibungsoptimierung,” *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 77, no. 12, pp. 20–25, 2016, doi: 10.1007/s35146-016-0142-0.

[62] B. Graziano, B. Heuser, and P. Grzeschik, “Verbesserte Verbrennung im Dieselmotor durch Einspritzverlaufsformung,” *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 76, no. 3, pp. 16–21, 2015, doi: 10.1007/s35146-014-2034-5.

[63] “Rightsizing ist mehr als Downsizing,” *springerprofessional.de*, 21 Jan., 2013. https://www.springerprofessional.de/motorentechnik/motoren/rightsizing-ist-mehr-als-downsizing/6562754 (abgerufen: 5. Mai 2020).

[64] N. Al-Hasan, S. Reuter, M. Klaus, and A. Koch, “RAAX-Turbolader in der Anwendung für das Miller-Brennverfahren,” *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 77, no. 7, pp. 46–53, 2016, doi: 10.1007/s35146-016-0057-9.

[65] P. Schäfer, “Neue Mildhybrid-Ottomotoren für Volvos 60er- und 90er-Modelle,” *springerprofessional.de*, 02 Apr. 2020. https://www.springerprofessional.de/hybridtechnik/ottomotor/

neue-mildhybrid-ottomotoren-fuer-volvos-60er--und-90er-modelle/17851318 (abgerufen: 5. Mai 2020).

[66] M. Pöpperl, D. Schulze, D. Henaux, and T. Uhlmann, “Zweistufig variable Verdichtung - Integration und Industrialisierung,” *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 81, no. 2, pp. 50–53, 2020, doi: 10.1007/s35146-019-0172-5.

[67] B. Richards, K. Gray, and J. Tran, “Elektrisch angetriebener Kompressor zur kontinuierlichen Aufladung,” *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 77, no. 5, pp. 62–67, 2016, doi: 10.1007/s35146-016-0027-2.

[68] K.-M. Fritsch, S. Weber, M. Krappel, and A. Elsäßer, “Elektrische 48-V-Hauptkühlmittelpumpe zur Reduzierung von CO 2 -Emissionen,” *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 76, no. 12, pp. 56–61, 2015, doi: 10.1007/s35146-015-0139-0.

[69] M. Ziegler, “Die Elektrifizierung schreitet voran,” *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, vol. 80, no. 5, pp. 6–7, 2019, doi: 10.1007/s35146-019-0047-9.

[70] J. Andert, C. Sohn, S. Klein, A. Tönnesmann, J. Oesterdiekhoff, and M. Becker, “Influence of sensor and communication setup on electric cam phaser control quality,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 233, no. 3, pp. 687–696, 2019, doi: 10.1177/0954407017746296.

[71] Mahle GmbH, “Variabilitäten im Ventiltrieb,” in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Ventiltrieb: Systeme und Komponenten*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, pp. 145–204. [Online]. Verfügbar: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2491-2_6

[72] X. Ai, M. Wilmer, and D. Remboski, “2008-01-1351 Electrical Variable Cam Phase Shifter for Internal Combustion Engine,” in *SAE-SP*, vol. 2174, *Variable valve optimization, 2008: Papers from the Variable Valve Actuation Session held during the SAE 2008 World Congress, April 14 - 17, in Detroit, Michigan, USA*, Warrendale, Pa.: SAE International, 2008, pp. 73–84.

[73] T. Eckenfels, T. Pfund, and M. Homm, “Mild-Hybrid (48-Volt-Hybrid),” in *Elektrifizierung des Antriebsstrangs*, H. Tschöke, P. Gutzmer, and T. Pfund, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 2019, pp. 153–164.

[74] W. Schöffmann, H. Sorger, and M. Weissbäck, “Efficient and Cost- optimised Powertrain for 48-V Systems,” *MTZ worldwide*, vol. 78, no. 5, pp. 40–45, 2017, doi: 10.1007/s38313-017-0062-5.

[75] O. Vollrath, O. Storz, P. Lautenschütz, and K. Buchholz, “The New Mercedes-Benz In-line Six-cylinder Gasoline Engine with 48-V Electrification,” *MTZ worldwide*, vol. 79, no. 5, pp. 54–61, 2018, doi: 10.1007/s38313-018-0015-7.

[76] J. Bilo *et al., 48-Volt Electrical Systems – A Key Technology Paving the Road to Electric Mobility.* [Online]. Verfügbar: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/april/48-Volt_Electrical_Systems_-_A_Key_Technology_Paving_the_Road_to_Electric_Mobility/48-Volt-Electrical-Systems-Electric-Mobility-engl-2016.pdf (abgerufen: 4. Juni 2020).

[77] *Electric and Electronic Components in Motor Vehicles 48 V On-Board Power Supply Requirements and Tests*, Standard VDA 320, VDA - Verband deutscher Automobilindustrie, 2015.

[78] S. Lauer, S. Baensch, M. Springer, and T. Eckenfels, “Increased Efficiency of a 48-V Mild Hybrid Vehicle Using Two Optimisation Paths,” *ATZ worldwide*, vol. 118, no. 6, pp. 50–53, 2016, doi: 10.1007/s38311-016-0056-y.

[79] H. Tschöke, P. Gutzmer, and T. Pfund, *Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Grundlagen - vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb*. Springer, 2019.

[80] Audi MediaCenter, *Antrieb und Fahrwerk.* [Online]. Verfügbar: https://www.audi-mediacenter.com/de/der-audi-a4-grosses-upgrade-fuer-den-bestseller-11884/antrieb-und-fahrwerk-11894 (abgerufen: 2. April 2023).

[81] F. Eichler *et al.,* “Volkswagen Electrifies the New Golf,” in *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik*, 2017, pp. 14–40.

[82] S. Matsui, “Comfort limits of retardation and its changing rate for train passengers,” *Japanese Railway Engineering*, vol. 3, no. 1, p. 25, 1962.

[83] T. Matsudaira, “Dynamics of High-Speed Rolling Stock,” *Railway Technical Research Institute*, Quarterly Reports, pp. 57–65, 1960. [Online]. Verfügbar: https://trid.trb.org/view/5129

[84] R. L. Everett, “Measuring Vehicle Driveability,” in *SAE Technical Paper Series*, 1971.

[85] P. Schoeggl and E. Ramschak, “Vehicle Driveability Assessment using Neural Networks for Development, Calibration and Quality Tests,” in *SAE Technical Paper Series*, 2000.

[86] *Subjective Rating Scale for Vehicle Handling,* SAE International, 1998.

[87] H. Bellem, B. Thiel, M. Schrauf, and J. F. Krems, “Comfort in automated driving: An analysis of preferences for different automated driving styles and their dependence on personality traits,” *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, vol. 55, pp. 90–100, 2018.

[88] B. d. Graaf and W. van Weperen, “The Retention of Balance: An Exploratory Study into the Limits of Acceleration the Human Body Can Withstand without Losing Equilibrium,” *Human Factors*, vol. 39, no. 1, p. 111, 1997.

[89] D. Gudin, O. Mian, and S. Sanders, “Experimental measurement and modelling of plain bearing wear in start–stop applications,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 227, no. 5, pp. 433–446, 2013, doi: 10.1177/1350650112471287.

[90] *Straßenverkehrsordnung.* [Online]. Verfügbar: https://www.stvo.de/strassenverkehrsordnung (abgerufen: 22. März 2022).

[91] *Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures*, ISO 15622:2018, 2018.

[92] *Intelligent transport systems — Cooperative adaptive cruise control systems (CACC) — Performance requirements and test procedures*, 20035:2019, ISO, 2019.

[93] L. L. Hoberock, “A survey of longitudinal acceleration comfort studies in ground transportation vehicles,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 99, no. 2, pp. 76–84, 1977.

[94] R. G. Mortimer, “Hard braking is more common than you might think,” *Automotive Engineering*, no. 8, p. 32, 1971.

[95] *Intelligent transport systems — Fullspeed range adaptive cruise control(FSRA) systems — Performancerequirements and test procedures*, ISO 22179:2009, ISO, 2009.

[96] E. Hellström, M. Ivarsson, J. Åslund, and L. Nielsen, “Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption,” *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 2, pp. 245–254, 2009, doi: 10.1016/j.conengprac.2008.07.005.

[97] E. Ozatay *et al.,* “Cloud-based velocity profile optimization for everyday driving: A dynamic-programming-based solution,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 2491–2505, 2014.

[98] T. Radke, *Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien*. Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Dissertation. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.

[99] J. Wollaeger *et al.,* “Cloud-computing based velocity profile generation for minimum fuel consumption: A dynamic programming based solution,” in *2012 American Control Conference (ACC 2012):* Montreal, Quebec, Canada, 27 - 29 June 2012, pp. 2108–2113.

[100] D. Helbing, *Verkehrsdynamik: Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Berlin: Springer, 1997. [Online]. Verfügbar: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10645433

[101] Treiber, Hennecke, and Helbing, “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations,” *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics*, vol. 62, 2 Pt A, pp. 1805–1824, 2000, doi: 10.1103/physreve.62.1805.

[102] P. G. Gipps, “A behavioural car-following model for computer simulation,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 15, no. 2, pp. 105–111, 1981. [Online]. Verfügbar: https://econpapers.repec.org/article/eeetransb/v_3a15_3ay_3a1981_3ai_3a2_3ap_3a105-111.htm

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Einflussgrößen auf den Energiebedarf	3
Abb. 2-2:	Funktionsarchitektur vernetzter und automatisierter Fahrzeuge [37, 38]	6
Abb. 2-3:	Methoden der Geschwindigkeitsplanung	8
Abb. 2-4:	Vergleich von PnG und Konstantfahrt (KF)	12
Abb. 3-1:	Definition der Hybridtopologien P0-P4	16
Abb. 4-1:	Anstieg des Leistungsbedarfs am Rad von PnG gegenüber KF als Funktion der mittleren Geschwindigkeit	19
Abb. 4-2:	Anstieg der Leistungsbedarfs am Rad von PnG gegenüber KF als Funktion der Differenzgeschwindigkeit	19
Abb. 4-3:	Wirkungsgradkennfeld eines aufgeladenen Ottomotors mit $1{,}2\ \mathrm{l}$ Hubvolumen. Die Betriebspunkte sind für zwei Beschleunigungswerte bei $v_{\mathrm{Fzg}} = 30\ \mathrm{km/h}$ im 4. Gang eingezeichnet.	20
Abb. 4-4:	Wirkungsgradkennfeld eines 8 Gang Automatikgetriebes im 4. Gang mit eingezeichneten Betriebspunkten für zwei Beschleunigungswerte bei $v_{\mathrm{Fzg}} = 30\,\mathrm{km/h}$	20
Abb. 4-5:	Geschwindigkeitsprofil von PnG und seine Ableitungen Beschleunigung und Ruck	22
Abb. 4-6:	Messausrüstung zur Erfassung der Fahrzeuglängsbeschleunigung	22
Abb. 4-7:	Bewertung der Beschleunigungsphase für unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten und Beschleunigungen	24
Abb. 4-8:	Bewertung des Übergangs von Beschleunigung nach Verzögerung	25
Abb. 4-9:	Bewertung des Übergangs von Beschleunigung nach Verzögerung für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche: $30\ \mathrm{km/h} \leq v_{\mathrm{Fzg}} \leq 50\ \mathrm{km/h}$ (oben); $50\ \mathrm{km/h} \leq v_{\mathrm{Fzg}} \leq 95\ \mathrm{km/h}$ (unten)	26
Abb. 4-10:	Bewertung des Übergangs von Verzögerung nach Beschleunigung	27
Abb. 4-11:	Bewertung der Verzögerungsphase für unterschiedliche	28

Anfangsgeschwindigkeiten v_{Start}, bei denen die Verzögerungsphase beginnt, und Zeitdauern der Phase Δt_{Verz}

Abb. 4-12: Begrenzungskurven für eine Lv7 und Lv8 Kalibrierung 29

Abb. 4-13: Bewertung des Übergangs von Konstantfahrt nach Beschleunigung 29

Abb. 4-14: Ergebnis der Bewertung von drei verschiedenen Beschleunigungsverläufen nach [87]. Die Bewertungen sind mit $-$,o und + gekennzeichnet 30

Abb. 4-15: Geschwindigkeitsprofil der PnG Strategie als Eingangsgröße des Simulationsmodells 31

Abb. 4-16: Lv8 Kalibrierung: Verbrauch pro Strecke (oben) und Verbrauchserhöhung (unten) als Funktion der mittleren Geschwindigkeit 34

Abb. 4-17: Lv8 Kalibrierung: Optimale Beschleunigung, Verzögerungsdauer und Gangposition als Funktion der mittleren Geschwindigkeit 34

Abb. 4-18: Lv8 Kalibrierung: Verbrauchserhöhung als Funktion der Verzögerungsdauer für $v_{\mathrm{m}} = 60\ \mathrm{km/h}$ und $a_{\mathrm{opt}} = 0{,}3\ \mathrm{m/s^2}$ 35

Abb. 4-19: Lv8 Kalibrierung: Geschwindigkeitsdelta als Funktion der mittleren Geschwindigkeit und der Verzögerungsdauer 36

Abb. 4-20: Lv8 Kalibrierung: Anzahl an VKM Startvorgängen pro km als Funktion der mittleren Geschwindigkeit und Verzögerungsdauer 36

Abb. 4-21: Lv8 Kalibrierung: Verbrauchserhöhung über mittlerer Geschwindigkeit für SAV und SLL 37

Abb. 4-22: Lv8 Kalibrierung: Vergleich des KSV für zwei verschiedene Motorgrößen: $1{,}2$ l und $2{,}0$ l 38

Abb. 4-23: Lv8 Kalibrierung: Vergleich der optimalen Parameter für den $1{,}2$ l und den $2{,}0$ l Motor 38

Abb. 4-24: Vergleich von Lv8 und Lv7 Kalibrierung: Verbrauchserhöhung über mittlerer Geschwindigkeit 39

Abb. 4-25: Verbrauchserhöhung als Funktion des totalen Rucks und der maximalen Beschleunigung für verschiedene mittlere 41

Geschwindigkeiten

Abb. 4-26: Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse für den $1{,}2$ l Motor 41

Abb. 5-1: Darstellung der Begrenzungen für Beschleunigung und Ruck von ACC Systemen nach ISO 15622 45

Abb. 5-2: Funktionsarchitektur der Fahrzeuglängsführung 48

Abb. 5-3: Positionsgrenzen, die das Egofahrzeug nicht überschreiten bzw. unterschreiten darf 50

Abb. 5-4: Geschwindigkeitsverlauf der statischen Geschwindigkeitsplanung für drei Verzögerungsstrategien: ausschließlich segeln ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 1$), ausschließlich rekuperieren ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0$) und zuerst segeln, dann rekuperieren ($\alpha_{\mathrm{stat}} = 0{,}5$) 52

Abb. 5-5: Positions- und Geschwindigkeitsverlauf der Langzeitprädiktion über Zeit für drei verschiedene Werte von α_{stat} (entsprechend Abb. 5-4). Der nach drei Iterationen generierte Verlauf des Waterfillingalgorithmus (siehe $v_{\mathrm{LZ,neu,3}}$ aus Abb. 5-9) ist ebenfalls eingezeichnet (gekennzeichnet mit WF). 55

Abb. 5-6: Der Waterfillingalgorithmus in der Übersicht 57

Abb. 5-7: Die konstante Geschwindigkeit (Ergebnis der Schritte A1 bis A7) nach der ersten Iteration (obere Grafik) und der zweiten Iteration (untere Grafik) 59

Abb. 5-8: Berechnung eines neuen Langzeitverlaufs mit herabgesetzter Geschwindigkeit (Ergebnis der Schritte B1 bis B3) 60

Abb. 5-9: Veränderung des Langzeitverlaufs (Schritte A1 bis B3) nach drei Iterationen 60

Abb. 5-10: Geschwindigkeitsverlauf der LSAP 61

Abb. 5-11: Optimale Geschwindigkeitspfade für jeden Geschwindigkeitsknoten der DDP kurz vor dem Erreichen der LSA 63

Abb. 5-12: Optimale Geschwindigkeitspfade der DDP beim Erreichen der LSA 63

Abb. 5-13: Optimale Geschwindigkeitspfade der DDP kurz vor dem Erreichen der LSA bei vorangehender Verringerung der Maximalgeschwindigkeit. Der Blitz über Pfad A deutet an, dass dieser verworfen wird. 64

Abb. 5-14: Optimale Geschwindigkeitspfade der DDP beim Erreichen der LSA bei vorhergehender Verringerung der Maximalgeschwindigkeit 65

Abb. 5-15: Übersicht über die Vorausschaufunktionen (A bis D), die von der Längsführungsregelung mit KZP realisiert werden 66

Abb. 5-16: Zustände der Längsführungsregelung 67

Abb. 5-17: Übersicht über die in der Längsführung verwendeten Zeitlücken bzw. Abstände 69

Abb. 5-18: Geschwindigkeitsverläufe mit und ohne Zeitlückenadaption während eines Verzögerungsvorgangs des VFs 70

Abb. 5-19: Entscheidungsbaum zur Darstellung der Zustandsübergänge im Zustand Prädiktives ACC (J = Ja, N = Nein) 71

Abb. 6-1: Rundkurs innerhalb der Stadt Paderborn 81

Abb. 6-2: Der Maximalgeschwindigkeitsverlauf des Rundkurses unter Berücksichtigung der Kurvenradien gemäß Gl. (18) und die Positionen der vierzehn LSA 81

Abb. 6-3: MHEV: Kraftstoffverbrauch pro Strecke und absolute Fahrzeit (links) und relativer Verbrauch und relative Fahrzeit (rechts) bei Variation von α_{stat} in Schritten von 0,1. Die Route wird ohne LSA und ohne Verkehr durchfahren. 89

Abb. 6-4: MHEV: Relativer Verbrauch und relative Fahrzeit bei Variation der Langzeitplanung (LZP an/aus), der Mindestgeschwindigkeit zum Anfahren der LSA, der LSA-Anfahrtsplanung (LSAP an/aus) und des Fahrkomfortniveaus (Variationen B bis F aus Tab. 6-1). Bezugsgrößen sind Verbrauch und Fahrzeit der MPC. 90

Abb. 6-5: MHEV: Relativer Verbrauch als Funktion der Mindestgeschwindigkeit für die Zufahrt auf die nächste LSA. Die LSAP ist aktiv. Der Verbrauch ist auf den der MPC bezogen. 91

Abb. 6-6: MHEV: Absoluter Verbrauch über Fahrzeit von der Referenzfahrt (MPC) für ρ_{glob} / $(\mathrm{VT/km}) \in \{4{,}3;\ 12{,}8;\ 25{,}6;\ 38{,}4;\ 51{,}2\}$ (von links nach rechts) 92

Abb. 6-7: MHEV: Verbrauchserhöhung (oben), Fahrzeiterhöhung (mittig) 93

und mittlerer Abstand (unten) bei Variation der Verkehrsdichte (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Abb. 6-8: BEV: Energiebedarf pro Strecke über absoluter Fahrzeit (links) und relativer Energiebedarf über relativer Fahrzeit (rechts) analog zu Abb. 6-3 94

Abb. 6-9: BEV: Relativer Energiebedarf und relative Fahrzeit bei Variation der Langzeitplanung (LZP an/aus) und des Fahrkomfortniveaus. Bezugsgrößen sind Energiebedarf und Fahrzeit der MPC. 95

Abb. 6-10: BEV: Relativer Energiebedarf als Funktion der Mindestgeschwindigkeit für die Zufahrt auf die nächste LSA. Die LSAP ist aktiv. Der Energiebedarf ist auf den der MPC bezogen. 96

Abb. 6-11: BEV: Absoluter Energiebedarf über Fahrzeit von der Referenzfahrt (MPC) für $\rho_{\mathrm{glob}} \,/\, (\mathrm{VT/km}) \in \{4{,}3;\ 12{,}8;\ 25{,}6;\ 38{,}4;\ 51{,}2\}$ (von links nach rechts) 96

Abb. 6-12: BEV: Erhöhung des Energiebedarfs (oben), Fahrzeiterhöhung (mittig) und mittlerer Abstand (unten) bei Variation der Verkehrsdichte (Mittelwerte und Standardabweichungen) 97

Abb. 8-1: Wirkungsgradkennfeld der unskalierten Asynchronmaschine. Die Drehmomentachse wird in der Simulation mit dem Faktor vier skaliert. 102

Abb. 8-2: Lv7 Kalibrierung: Optimale Beschleunigung, Verzögerungsdauer und Gangposition als Funktion der mittleren Geschwindigkeit 103

Abb. 8-3: Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse für den $2{,}0\ \mathrm{l}$ Motor 104

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1:	Notensystem für die Bewertung des Fahrkomforts	21
Tab. 4-2:	Zusammenfassung der Schwellwerte zum Erreichen einer Lv8 und Lv7 Kalibrierung	30
Tab. 5-1:	Anforderungen an die Längsführung und Maßnahmen zum Erreichen der Anforderungen	44
Tab. 5-2:	Iteratives Herabsetzen der konstanten Geschwindigkeit (innere Iterationsschleife)	58
Tab. 5-3:	Anpassen des Langzeitverlaufs und Aufruf der äußeren Iterationsschleife	59
Tab. 6-1:	Parametervariationen: Die letzte Spalte zeigt, welche Variationen bzw. Parametereinstellungen gefahren werden; die anderen Spalten geben die Parameter an, die von einer Zeile zur nächsten verändert werden (J = Ja; N = Nein; „-“ = nicht relevant).	88
Tab. 8-1:	Längsdynamikparameter für das betrachtete D-Segment Fahrzeug	101
Tab. 8-2:	Daten des Antriebsstrangs	102
Tab. 8-3:	Daten des elektrischen Antriebsstrangs	103
Tab. 8-4:	Tab. 8-4: Schaltzeiten der LSA 1 bis 14: Die Schaltzeiten wiederholen sich zyklisch mit einer Zyklusdauer von $90\ s$. LSA 1 ist die LSA in der linken oberen Ecke des Rundzyklus (vgl. Abb. 6-1). Die Zählung erfolgt gegen den Uhrzeigersinn.	110

Abkürzungen

ACC	Abstandsregeltempomat, engl. Adaptive Cruise Control
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug, engl. Battery Electric Vehicle
CF	Close Follow
CR	Segeln (dann) Rekuperieren, engl. Coasting Recuperation
DDP	Diskrete Dynamische Programmierung
Eco	Ökologisch/Ökonomisch
EM	Elektrische Maschine
FZO	Fahrzeitorientierung
HF	Hinterfahrzeug
HV	Hochvolt
IDM	Intelligent Driver Model
KF	Konstantfahrt
KSV	Kraftstoffverbrauch
KZP	Kurzzeitplanung
LSA	Lichtsignalanlage(n)
LSAP	Lichtsignalanlagen-Anfahrtsplanung
Lv	Niveau, engl. Level
LZP	Langzeitprädiktion
MHEV	Mildhybridfahrzeug, engl. Mild Hybrid Electric Vehicle
MPC	Modellprädiktive Regelung, engl. Model Predictive Control
MT	Manualgetriebe
OCV	Offene Klemmenspannung, engl. Open Circuit Voltage
PnG	Pulse und Glide
RC	Rekuperieren (dann) Segeln, engl. Recuperation Coasting
RSG	Riemengetriebener Startergenerator
SAE	Verband der Automobilingenieure, engl. Society of Automotive Engineers
SAV	Segeln mit abgeschaltetem Verbrennungsmotor
SLL	Segeln im Leerlauf
SOC	Ladezustand, engl. State of Charge
VAF	Vernetztes und automatisiertes Fahrzeug
VF	Vorderfahrzeug
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VKP	Verkehrsknotenpunkt
VT	Verkehrsteilnehmer

Formelzeichen

a	Beschleunigung
A_{ACC}	Logische Aussage
$a_{\mathrm{ACC,Obj}}$	Beschleunigung des ACC Folgefahrtreglers
$\dot{a}_{\mathrm{ACC,Obj}}$	Ableitung der Beschleunigung des ACC Folgefahrtreglers
$a_{\mathrm{ACC,soll}}$	Sollbeschleunigung des ACC Reglers
$a_{\mathrm{ACC,v}}$	Beschleunigung des ACC Geschwindigkeitsreglers
$a_{\mathrm{ego,R}}$	Beschleunigungsverlauf des Egofahrzeugs während Rekuperation
$a_{\mathrm{ego,S}}$	Beschleunigungsverlauf des Egofahrzeugs während Segeln
A_{Fzg}	Stirnfläche des Fahrzeugs
a_{Fzg}	Fahrzeugbeschleunigung
$A_{\mathrm{G,Reku}}$	Logische Aussage
$A_i, i \in \mathbb{N}$	Logische Ausssagen
a_{IDM}	Beschleunigung des IDM Fahrers
A_{LSA}	Logische Aussage
A_{LSAP}	Logische Aussage
a_{opt}	Optimale Beschleunigung für PnG unter Berücksichtigung des Fahrkomforts
$a_{\mathrm{max,CF}}$	Begrenzung der Beschleunigung im CF Modus
$a_{\mathrm{max,IDM}}$	Maximale Längsbeschleunigung des IDM Fahrers
$a_{\mathrm{max,quer}}$	Maximale Querbeschleunigung während Kurvenfahrten
$A_{\mathrm{P,1}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{P,2}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{P,PnG1}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{P,PnG2}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{P,Reku}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{P,vmax}}$	Logische Aussage
A_{PnG}	Logische Aussage
$A_{\mathrm{R,1}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{R,2}}$	Logische Aussage
a_{R}	Beschleunigung in Rekuperation
$a_{\mathrm{Reku,min}}$	Minimal mögliche Beschleunigung in Rekuperation
a_{S}	Beschleunigung in Segeln
a_{Schub}	Beschleunigung im Schubbetrieb
$a_{\mathrm{S,Komf}}$	Komfortbeschleunigung für den Segelbetrieb

$a_{\mathrm{soll,akt}}$	Aktuelle Sollbeschleunigungsvorgabe
$A_{\mathrm{v,stat}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{Verz,1}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{Verz,2}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{Verz,2a}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{Verz,2b}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{Verz,2c}}$	Logische Aussage
$A_{\mathrm{Verz,3}}$	Logische Aussage
$a_{\mathrm{Verz,Komf}}$	Komfortbeschleunigung während eines Verzögerungsvorgangs
$a_{\mathrm{Red,IDM}}$	Beschleunigung der vor statischen Geschwindigkeitsreduktionen eingeführten Verzögerungsprofile
$\overline{b_{\mathrm{e}}}$	Mittlerer spezifischer Kraftstoffverbrauch
$b_{\mathrm{e,min}}$	Minimaler spezifischer Kraftstoffverbrauch
b_{HF}	Verzögerung des Hinterfahrzeugs
b_{K}	Komfortverzögerung des IDM Fahrermodells
$b_{\mathrm{max,CF}}$	Begrenzung der Verzögerung im CF Modus
c_{W}	Luftwiderstandsbeiwert
d_0	Geschwindigkeitsunabhängige Abstandskonstante
$d_{0,\mathrm{CF}}$	Geschwindigkeitsunabhängige Abstandskonstante im Close-Follow Modus
$d_{0,\mathrm{IDM}}$	Abstandskonstante für den Interaktionsterm des IDM Fahrermodells
$d_{0,\mathrm{min}}$	Mindestwert für die geschwindigkeitsunabhängige Abstandskonstante
d_{ACC}	Geschwindigkeitsunabhängige Abstandskonstante des ACC Reglers
$d_{\mathrm{ACC,soll}}$	Zielabstand des ACC Reglers
d_{min}	Minimaler Zielabstand eines ACC Systems
Δd_{PnG}	Geschwindigkeitsunabhängige Breite des Abstandsbandes von PnG
$d_{\mathrm{PnG,+}}$	Grenze des Abstandsbandes von PnG (größerer Abstand)
$d_{\mathrm{PnG,-}}$	Grenze des Abstandsbandes von PnG (kleinerer Abstand)
d_{Reku}	Minimaler Zielabstand für den Rekuperationsvorgang
$d_{\mathrm{Segeln,+}}$	Grenze des Abstandsband der Segelfunktion (größerer Abstand)
$d_{\mathrm{Segeln,-}}$	Grenze des Abstandsband der Segelfunktion (kleinerer Abstand)
f_0	Geschwindigkeitsunabhängiger Rollwiderstandsfaktor
f_1	Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsfaktor
F_{W}	Fahrwiderstandskraft
g	Schwerebeschleunigung
H_{u}	Unterer Heizwert
i_{Diff}	Differentialgetriebeübersetzung

i_{Getr}	Getriebeübersetzung
$J_{\mathrm{äq}}$	Auf das Rad bezogenes äquivalentes Trägheitsmoment der rotierenden Massen
$j_{\max}$	Begrenzung für den positiven Ruck
$j_{\max,\mathrm{CF}}$	Begrenzung des positiven Rucks im CF Modus
$j_{\max,\mathrm{Komf}}$	In der Längsführung verwendeter Komfortwert für den positiven Ruck
$j_{\min}$	Begrenzung für den negativen Ruck
$j_{\min,\mathrm{CF}}$	Begrenzung des negativen Rucks im CF Modus
$j_{\min,\mathrm{Komf}}$	In der Längsführung verwendeter Komfortwert für den negativen Ruck
J_{Rad}	Trägheitsmoment von Rad und Achse
$j_{\mathrm{Reku,max}}$	Begrenzung für den positiven Ruck im Zustand Rekuperation
$j_{\mathrm{Reku,min}}$	Begrenzung für den negativen Ruck im Zustand Rekuperation
j_{total}	Totaler Ruck
L_{Rund}	Länge des Rundkurses
$m_{\mathrm{B,KF}}$	Brennstoffmasse bei Konstantfahrt
$\dot{m}_{\mathrm{B,KF}}$	Brennstoffmassenstrom bei Konstantfahrt
$\Delta m_{\mathrm{B,SOC,korr}}$	Äquivalente Kraftstoffmenge, wenn Start- und Endwert des SOC nicht übereinstimmen
$\dot{m}_{\mathrm{B,LL}}$	Brennstoffmassenstrom im Leerlauf
$m_{\mathrm{B,PnG}}$	Brennstoffmasse beim PnG Betrieb
$m_{\mathrm{B,Start}}$	Brennstoffmasse für einen Wiederstart
$m_{\mathrm{B,zus}}$	Zusätzliche Kraftstoffmasse beim PnG Betrieb
M_{EM}	Drehmoment der Elektrischen Maschine
m_{Fzg}	Fahrzeuggewicht
$m_{\mathrm{Fzg,leer}}$	Fahrzeugleergewicht
$M_{\mathrm{max,Antrieb}}$	Maximales Antriebsmoment
$M_{\mathrm{max,Reku}}$	Maximales Rekuperationsmoment
M_{VKM}	Drehmoment der VKM
$M_{\mathrm{VKM,Schub}}$	Drehmoment der VKM im Schubbetrieb
m_{zus}	Zusätzliches Gewicht durch Passagiere
n_{Eck}	Eckdrehzahl
$n_{\mathrm{Getr,ein}}$	Eingangsdrehzahl Getriebe
n_{s}	Anzahl an Weggitterpunkten der DDP
n_{t}	Anzahl an zeitlichen Stützstellen bei der Langzeitberechnung
n_{v}	Anzahl an Geschwindigkeitsgitterpunkten der DDP

n_{VKM}	Drehzahl der VKM
$n_{\mathrm{VKM,min}}$	Zulässiger Drehzahlmindestwert der VKM
$n_{\mathrm{VKM,max}}$	Zulässiger Drehzahlhöchstwert der VKM
$N_{\mathrm{VT}\rightarrow\mathrm{LSA}}$	Anzahl an Verkehrsteilnehmern zwischen dem Egofahrzeug und der nächsten LSA
N_{VT}	Anzahl an Verkehrsteilnehmern
$\mathfrak{P}_{\mathrm{A}}$	Zeithorizont, für den die Ausgangsgrößen der Längsführungsregelung berechnet werden
$\mathfrak{P}_{\mathrm{H}}$	Prädiktionshorizont der Längsführungsregelung
P_{N}	Nennleistung
P_{Rad}	Leistungsbedarf am Rad
$P_{\mathrm{Rad,KF}}$	Leistungsbedarf am Rad bei Konstantfahrt
$\bar{P}_{\mathrm{Rad,PnG}}$	Leistungsbedarf am Rad beim PnG Betrieb
$P_{\mathrm{V,el}}$	Leistungsverbrauch des $12\,\mathrm{V}$ Bordnetzes
q_{Verz}	Gewichtungsfaktor der MPC zur Bestrafung von Verzögerungsvorgängen
r_{K}	Kurvenradius
r_{Rad}	Dynamischer Radradius
$r_{\mathrm{s,Obj}}$	Parameter des Folgefahrtreglers für den Positionsterm
$r_{\mathrm{v,Obj}}$	Parameter des Folgefahrtreglers für den Geschwindigkeitsterm
$r_{\mathrm{v,Abw}}$	Parameter des Geschwindigkeitsreglers zur Ausregelung einer Abweichung von der Sollgeschwindigkeitsvorgabe
$r_{\mathrm{V_B}}$	Relativer Verbrauch
$r_{\mathrm{V_B,komb}}$	Kombinierter relativer Verbrauch
$r_{\mathrm{V_B,SAV}}$	Relativer Verbrauch von SAV
$r_{\mathrm{V_B,SLL}}$	Relativer Verbrauch von SLL
Δs_{O} und $\Delta\tilde{s}_{\mathrm{O}}$	Parameter zur Berechnung der Positionsgrenzen der Vorausschaufunktionen
$s_{\mathrm{ACC,soll}}$	Sollposition des ACC Reglers
$s_{\mathrm{ACC,soll,akt}}$	Aktuelle Sollposition des ACC Reglers
s_{ego}	Position des Egofahrzeugs
$s_{\mathrm{ego,akt}}$	Aktuelle Position des Egofahrzeugs
$s_{\mathrm{ego,P}}$	Berechnete Position des Egofahrzeugs während eines Pulsvorgangs
$s_{\mathrm{ego,R}}$	Berechnete Position des Egofahrzeugs während eines Rekuperationsvorgangs
$s_{\mathrm{ego,S}}$	Berechnete Position des Egofahrzeugs während eines Segelvorgangs
$\Delta s_{\mathrm{HF}\rightarrow\mathrm{VT}}$	Abstand zwischen Hinterfahrzeug und einbiegendem Verkehrsteilnehmer

Δs_{IDM}	Abstand zwischen IDM Fahrer und dessen Vorderfahrzeug
Δs_{LSA}	Abstand zwischen der nächsten LSA und dem Egofahrzeug
$s_{\mathrm{LSA},1}$	Position der ersten LSA im Rundzyklus
$s_{\max}$	Nicht zu überschreitende Positionsgrenze des Lösungsraums
$s_{\max,\mathrm{LSA}}$	Durch die Schaltzeiten der LSA vorgegebene nicht zu überschreitende Position
$s_{\max,\mathrm{VF}}$	Durch das Vorderfahrzeug vorgegebene nicht zu überschreitende Position
$s_{\min}$	Nicht zu unterschreitende Positionsgrenze des Lösungsraums
$s_{\min,\mathrm{LSA}}$	Durch die Schaltzeiten der LSA vorgegebene nicht zu unterschreitende Position
s_{Obj}	Position des Vorderobjekts
$s_{\mathrm{PnG,max}}$	Nicht zu überschreitende Position während des PnG Betriebs
$s_{\mathrm{PnG,min}}$	Nicht zu unterschreitende Position während des PnG Betriebs
$s_{\mathrm{Reku,max}}$	Nicht zu überschreitende Position in Rekuperation
$s_{\mathrm{Segeln,max}}$	Nicht zu unterschreitende Position in Segeln
$s_{\mathrm{Segeln,min}}$	Nicht zu überschreitende Position in Segeln
$\Delta s_{\mathrm{VKP}\rightarrow\mathrm{VF}}$	Abstand zwischen Verkehrsknotenpunkt und Vorderfahrzeug
$\Delta s_{\mathrm{VT}\rightarrow\mathrm{VF}}$	Abstand zwischen einbiegendem Verkehrsteilnehmer und Vorderfahrzeug
Δt_{A}	Dauer bis zum Beginn der Grünphase
$\Delta \widetilde{t_{\mathrm{A}}}$	Korrigierte Dauer bis zum Beginn der Grünphase
t_{akt}	Aktueller Zeitpunkt
$\Delta t_{\mathrm{block,min}}$	Dauer, für die die folgenden Grünphasen der nächsten LSA mindestens blockiert sind
$\Delta t_{\mathrm{block}}$	Dauer, für die die folgenden Grünphasen der nächsten LSA tatsächlich blockiert sind
Δt_{E}	Dauer bis zum Ende der Grünphase
t_{H}	Länge des Prädiktionshorizonts
Δt_{ist}	Zeitdauer, nach der die LSA ohne Waterfilling erreicht wird
t_{LZ}	Länge des Horizonts der Langzeitberechnungen
t_{PnG}	Ende des PnG Zyklus
t_{Puls}	Ende der Pulsphase
$\Delta t_{\mathrm{S,min}}$	Minimale Segelzeit
$\Delta t_{\mathrm{S,start}}$	Zeitdauer vom aktuellen Zeitpunkt bis zum Beginn des Segelns
$\Delta t_{\mathrm{S,opt}}$	Die hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs unter Einhaltung des Fahrkomfortniveaus optimale Segeldauer für den PnG Betrieb (vgl. die mittlere Grafik in Abb. 4-17).

Δt_{soll}	Zieldauer zum Erreichen der nächsten LSA
Δt_{Verz}	Dauer der Verzögerungsphase
$\Delta t_{\mathrm{Verz,opt}}$	Optimale Dauer der Verzögerungsphase unter Berücksichtigung des Fahrkomforts
Δt_{x}	Die zur Korrektur von Δt_{A} erforderliche Zeitdauer
v	Geschwindigkeit
v_{A}	Zielgeschwindigkeit zum Erreichen des Beginns der ausgewählten Grünphase
$V_{\mathrm{B,PnG}}$	Verbrauch an Brennstoffvolumen mit PnG
$V_{\mathrm{B,KF}}$	Verbrauch an Brennstoffvolumen mit KF
v_{E}	Zielgeschwindigkeit zum Erreichen des Endes der ausgewählten Grünphase
v_{ego}	Geschwindigkeit des Egofahrzeugs
$v_{\mathrm{ego,akt}}$	Aktuelle Geschwindigkeit des Egofahrzeugs
$v_{\mathrm{ego,P}}$	Berechnete Geschwindigkeit des Egofahrzeugs während eines Pulsvorgangs
$v_{\mathrm{ego,S}}$	Berechnete Geschwindigkeit des Egofahrzeugs während eines Seglevorgangs
v_{Fzg}	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_{\mathrm{Fzg,0}}$	Geschwindigkeit, unterhalb der die Verzögerung zurückgenommen werden muss, um einen maximal zulässigen Ruckwert bei einem Anhaltevorgang einzuhalten
v_{HF}	Geschwindigkeit des Hinterfahrzeugs
V_{Hub}	Hubvolumen
Δv_{IDM}	Differenzgeschwindigkeit zwischen IDM Fahrer und dessen Vorderfahrzeug
v_{IDM}	Geschwindigkeit des IDM Fahrers
v_{konst}	Konstanter Geschwindigkeitswert des Waterfillingalgorithmus
$v_{\mathrm{konst,A}}$	Siehe v_{A}
$v_{\mathrm{konst,E}}$	Siehe v_{E}
v_{LZ}	Langzeit Geschwindigkeitsverlauf
$\dot{V}_{\mathrm{B,LL}}$	Brennstoffvolumenstrom im LL
v_{LSAP}	Geschwindigkeitsverlauf der LSA-Anfahrtsplanung
$v_{\mathrm{LSAP,akt}}$	Aktuelle Geschwindigkeit der LSA-Anfahrtsplanung
v_{m}	Mittlere Geschwindigkeit
v_{max}	Aus den statischen Routeninformationen zusammengesetzte Maximalgeschwindigkeit
$v_{\mathrm{max,Bs}}$	Maximale Geschwindigkeit beim Überqueren einer Bremsschwelle

$v_{\mathrm{max,K}}$	Maximale Geschwindigkeit bei einer Kurvenfahrt
$v_{\mathrm{max,lim}}$	Gesetzliche Höchstgeschwindigkeitsbegrenzung
$v_{\mathrm{max,Stop}}$	Maximale Geschwindigkeit zur Berücksichtigung von Stoppschildern
$v_{\mathrm{min,LSA}}$	Mindestgeschwindigkeit zum Anfahren der nächsten LSA
Δv_{O} und $\Delta \tilde{v}_{\mathrm{O}}$	Versatz für die Geschwindigkeitsgrenzen der Vorausschaufunktionen
v_{opt}	Optimaler Geschwindigkeitsverlauf zum Anfahren der nächsten LSA unter Berücksichtigung der Ankunftszeit
v_{Obj}	Geschwindigkeit des Vorderobjekts
Δv_{PnG}	Breite des Geschwindigkeitsbands von PnG
Δv_{Red}	Betrag der Geschwindigkeitsreduktion
$v_{\mathrm{soll,akt}}$	Aktueller Geschwindigkeitssollwert
v_{Start}	Startgeschwindigkeit der Verzögerungsvorgänge der Fahrkomfortstudie
$v_{\mathrm{stat,akt}}$	Aktueller Geschwindigkeitswert der statischen Geschwindigkeitsplanung
v_{o}	Obere Schwelle der Geschwindigkeitshysterese für die Aktivierung der Vorausschaufunktionen
v_{u}	Untere Schwelle der Geschwindigkeitshysterese für die Deaktivierung der Vorausschaufunktionen
v_{Hys}	Breite der Geschwindigkeitshysterese für die Aktivierung/Deaktivierung der Vorausschaufunktionen
$\Delta v_{\mathrm{Tol,Reku}}$	Geschwindigkeitstoleranzwert für den Zustand Rekuperation
$\Delta v_{\mathrm{Tol,ACC}}$	Geschwindigkeitstoleranzwert für den Zustand Prädiktives ACC
v_{VF}	Prädizierter Geschwindigkeitsverlauf des VFs
$v_{\mathrm{VF,akt}}$	Aktuelle Geschwindigkeit des VFs
$v_{\mathrm{VT,ein}}$	Einbiegegeschwindigkeit des Verkehrsteilnehmers
$v_{\mathrm{VF,Modell}}$	Mit Fahrermodellen berechneter Geschwindigkeitsverlauf des VFs
W_{Bat}	Während eines Wegabschnitts der Batterie entnommene Energiemenge
$W_{\mathrm{Bat,ges}}$	Energiemenge der Li-Ionen-Batterie
α_{stat}	In der statischen Geschwindigkeitsplanung verwendeter Faktor, der den Segelanteil einer Verzögerungstrajektorie beschreibt
δ	Exponent des freie Fahrt Terms des IDM Fahrermodells
η_{Coul}	Coulombscher Wirkungsgrad
η_{Diff}	Differentialgetriebeeffizienz
$\eta_{\mathrm{Diff,KF}}$	Wirkungsgrad des Differentialgetriebes bei Konstantfahrt
$\bar{\eta}_{\mathrm{Diff,PnG}}$	Mittlerer Wirkungsgrad des Differentialgetriebes beim PnG Betrieb
η_{Getr}	Wirkungsgrad des Getriebes
$\eta_{\mathrm{Getr,KF}}$	Wirkungsgrad des Getriebes bei Konstantfahrt

$\bar{\eta}_{\mathrm{Getr,PnG}}$	Mittlerer Wirkungsgrad des Getriebes bei PnG
η_{Inv}	Wirkungsgrad des Inverters
η_{max}	Maximaler Wirkungsgrad
η_{VKM}	Wirkungsgrad der VKM
$\eta_{\mathrm{VKM,KF}}$	Wirkungsgrad der VKM bei Konstantfahrt
$\bar{\eta}_{\mathrm{VKM,PnG}}$	Mittlerer Wirkungsgrad der VKM beim PnG Betrieb
λ	Massenfaktor
ζ_{Bat}	SOC der Batterie
$\Delta\zeta_{\mathrm{Boost}}$	SOC-Wert für die Boostreserve
ζ_{Ende}	Endwert des SOC
ζ_{max}	Maximalwert des SOC
ζ_{min}	Minimalwert des SOC
ζ_{rel}	Relativer SOC
ζ_{Start}	Startwert des SOC
ρ_{glob}	Globale bzw. mittlere Verkehrsdichte
ρ_{L}	Luftdichte
τ	Zeitlücke
τ_{ACC}	Zeitlücke des ACC Reglers
$\tau_{\mathrm{ACC,adapt}}$	Adaptive Zeitlücke des ACC Reglers
τ_{CF}	Zeitlücke im Close-Follow Modus
τ_{Vorein}	Zeitlücke Voreinstellung
τ_{HF}	Zeitlücke des Hinterfahrzeugs
τ_{IDM}	Zeitlücke für den Interaktionsterm des IDM Fahrermodells
τ_{min}	Mindestwert für die Zeitlücke
$\Delta\tau_{\mathrm{PnG}}$	Zeitlücke des Abstandsbandes von PnG
$\Delta\tau_{\mathrm{Reku}}$	Zeitlücke für den Rekuperationsvorgang
$\Delta\tau_{\mathrm{Tol,+}}$	Zeitlückentoleranz für das Abstandsband des PnG Betriebs
$\Delta\tau_{\mathrm{Tol,-}}$	Zeitlückentoleranz für das Abstandsband des PnG Betriebs
$\bar{\tau}_{\mathrm{VT}}$	Mittlere Zeitlücke der Verkehrsteilnehmer
$\tau_{\mathrm{VT,ein}}$	Zeitlücke des einbiegenden VT

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Christian Sohn
Geburtsdatum:	01.07.1991
Geburtsort:	Köln
Staatsangehörigkeit:	deutsch / österreichisch
Eltern:	Gunnar und Dr. Birgit Sohn

Werdegang

2001-2009	Lise-Meitner-Gymnasium, Leverkusen
2009-2014	Studium Elektrotechnik, Fachrichtung Informations- und Kommunikationstechnik, RWTH Aachen University
2015-2020	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Lehr- und Forschungsgebiet Mechatronik in mobilen Antrieben, RWTH Aachen University