

# **Ein Fahrerassistenzsystem zur prädiktiven Planung energie- und zeitoptimaler Geschwindigkeitsprofile mittels Mehrzieloptimierung**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Wirt.-Ing. Sandra Fabia Gausemeier  
aus München

Tag des Kolloquiums: 1. Oktober 2013

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder



## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ansgar Trächtler, dem Leiter dieses Lehrstuhls, möchte ich meinen vorzüglichen Dank für die Betreuung und Erstbegutachtung meiner Arbeit aussprechen. Er hat seine Rolle als Doktorvater zu jeder Zeit vorbildlich ausgefüllt und es dabei immer verstanden, eine gute Balance zu halten, indem er mir sowohl Anleitung als auch Freiraum für Kreativität gegeben hat. Es war mir eine Freude, an seinem Wissen und seiner Erfahrung teilhaben zu dürfen und so von ihm zu lernen.

Ursprünglich kristallisierte sich mein Promotionsthema im Rahmen eines Industrieprojektes heraus. Die Lösung der daraus hervorgegangenen Problemstellung wurde durch die Arbeit meines ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Torsten Bruns inspiriert, dem ich an dieser Stelle für die angenehme Zusammenarbeit danken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder, Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, danke ich für die Übernahme des Korreferats zu dieser Arbeit und die damit verbundenen konstruktiven Gespräche und Anregungen.

Außerdem möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen danken. Einerseits haben sie mich immer fachlich unterstützt und mir neue Denkanstöße gegeben. Andererseits sorgen für ein großartiges Arbeitsklima, das einem erlaubt, mit Freude zu arbeiten. Die angenehme Atmosphäre am Institut half, auch Durststrecken zu überstehen, ohne das Ziel aus den Augen zu verlieren. Danken möchte ich auch allen Studenten, die zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Besondere Dankbarkeit empfinde ich gegenüber meinen Eltern Melanie und Jürgen Gausemeier sowie meiner Schwester Pia. Meine Familie hat mir immer mit viel Verstand und Verständnis zur Seite gestanden, mir die nötige emotionale Stärke gegeben und nie aufgehört, an meinen Erfolg zu glauben.

Paderborn, im November 2013

*Sandra Gausemeier*



## **Zusammenfassung**

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems für vorausschauendes Fahren. Ziel ist eine autonom ausgeführte energie- und zeitoptimale Fahrzeuglängsführung auf einer vorgegebenen Fahrstrecke. Dazu wurde eine neuartige Methodik zur vorausschauenden Planung pareto-optimaler Geschwindigkeitsprofile entwickelt. Basierend auf der dynamischen Programmierung wird dabei unter Berücksichtigung unterschiedlicher Informationen über das Fahrzeug und sein Umfeld eine der Zielgrößenpräferenz des Fahrers entsprechende Geschwindigkeitsvorgabe berechnet. Besonders hervorzuheben ist, dass es sich um eine echtzeitfähige Mehrzieloptimierung handelt. Außerdem bietet die Methodik durch die Gestaltung der internen Struktur die Möglichkeit, sie unabhängig von der Fahrzeug- oder Antriebsart einzusetzen. Die Gestaltung der externen Schnittstellen erlaubt die Einbindung in bestehende informationstechnische Infrastrukturen, bei der kaum Anpassungsaufwand entsteht. Die Einbindung dynamischer Informationen erfolgt durch eine Lösungsraumbeschränkung, so dass schnelle Neuplanungen möglich sind. Das steigert die Robustheit gegen unvorhersehbare Ereignisse.

Die Funktionsfähigkeit der algorithmischen Umsetzung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung wird anhand praxisnaher Simulationen nachgewiesen. Der Neuigkeitswert ist vor allem in der Echtzeitfähigkeit und der sicheren globalen Konvergenz der Mehrzieloptimierung, dem breiten potentiellen Einsatzgebiet und schließlich den Möglichkeiten, die sich auf den Gebieten der Kollektiv-Optimierung und der kooperativen Planung bei hohem technischem Diversifikationsgrad der beteiligten Individualsysteme eröffnen, zu sehen.

## **Abstract**

The work presented in this thesis describes the development of a driver assistance system for anticipatory driving. The objective is an autonomous as well as an energy- and fuel-optimal longitudinal vehicle control on a preallocated track. This is realized and algorithmically implemented by a novel method for predictive planning of vehicle-velocity-profiles.

Based on Dynamic Programming and under consideration of information about the vehicle and its environment, a velocity setting is calculated according to the driver's objective value preferences. Distinguishing features are the realtime-capability of the multi-criteria-optimization and the possibility to adapt it independently of the vehicle type and power unit. The design of the external interfaces allows easy embedment into existing information technology infrastructures of vehicles with little adjustment effort. No constructional modifications or additional components are required. The inclusion of dynamic information is carried out by a reduction of solution space. Re-planning can be executed quickly at any time. Besides positive effects on the quality of optimization results, this enhances robustness against unpredictable occurrences.

The efficiency and benefit of the implemented algorithm is shown by simulation results of several practical scenarios. The innovative values of the presented thesis are the realtime-capability and reliability in global convergence of the multi-criteria-optimization, the independency of the vehicle's characteristics and the potentials for collective-optimization and cooperative behavior of the developed method.

## **Vorveröffentlichungen:**

- [1] Gausemeier, S.; Jäker, K.-P.; Trächtler, A.: *Multi-objective Optimization of a Vehicle Velocity Profile by Means of Dynamic Programming*. In: IFAC Symposium AAC, München, 12.-14.07.2010
- [2] Gausemeier, S.; Jäker, K.-P.; Trächtler, A.: *Fahrerassistenzsystem für energie- und zeitoptimales Fahren durch prädiktive Geschwindigkeitsprofil-Planung*. In: 13. Braunschweiger Symposium AAET, Braunschweig, 08.-09.02.2012



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Problembeschreibung und Handlungsbedarf.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1. Navigationssysteme.....	3
2.2. Vorausschau-Assistenten .....	3
2.3. Autonomes Fahren .....	5
2.4. Optimale Kollektiv-Strategien.....	6
2.5. Resümee .....	7
<b>3. Aufgabenstellung und Ziele .....</b>	<b>9</b>
3.1. Ausgangssituation .....	9
3.2. Zielsetzung .....	9
3.3. Aufgabenstellung und Vorgehensweise .....	10
<b>4. Systemarchitektur .....</b>	<b>11</b>
4.1. Aufgaben der Fahrzeugführung .....	11
4.2. Einbindung in die Systemstruktur des Fahrzeuges .....	13
4.2.1. Konzeption der Schnittstellen .....	13
4.2.2. Nutzung vorhandener Sensorik .....	15
4.2.3. Car2X-Kommunikation .....	18
4.2.4. Kooperation mit weiteren FAS .....	20
4.3. Prozessablauf innerhalb des Vorausschau-Assistenten.....	21
4.3.1. Bildung des Lösungsraumes .....	22
4.3.2. Optimierungsvariable und -modell .....	25
4.3.3. Mehrziel-Optimierung .....	27
<b>5. Auswahl des Optimierungsverfahrens.....</b>	<b>33</b>
5.1. Charakterisierung des Optimierungsproblems .....	33
5.2. Kombinatorische Optimierung.....	34
5.2.1. Graphentheorie und typische kombinatorische Optimierungsprobleme .....	36
5.2.2. Graphentheoretische Darstellung der Geschwindigkeitsprofil- Optimierung.....	37
5.2.3. Lösungsverfahren Dijkstra-, FIFO- und A*-Algorithmus .....	41

5.2.4.	Lösungsverfahren Bellman-Ford-Algorithmus / dynamische Programmierung .....	41
5.3.	Geschwindigkeitsprofil-Optimierung mit dynamischer Programmierung ...	45
5.3.1.	Diskretisierung des Zustandsraumes .....	47
5.3.2.	Berechnung der Kantengewichte .....	50
5.3.3.	Bewertung der Eignung des Verfahrens .....	53
<b>6.</b>	<b>Programmablauf und Optimierungsmodell .....</b>	<b>55</b>
6.1.	Initialisierung durch Optimierungs- und Fahrzeugparameter .....	57
6.2.	Zustandsraumbildung .....	58
6.2.1.	Diskreter Maximalgeschwindigkeitsverlauf .....	59
6.2.2.	Diskreter Minimalgeschwindigkeitsverlauf .....	61
6.3.	Erste Rekursion der dynamischen Programmierung .....	65
6.4.	Modellbasierte Kraftstoffverbrauchs-Berechnung .....	70
6.4.1.	Berechnung der Fahrwiderstände .....	71
6.4.2.	Bestimmung der Fahrpedalstellung .....	73
6.4.3.	Modellierung der Schaltstrategie .....	74
6.4.4.	Berechnung der Getriebeeffizienz und des Motorabtriebsmoments ...	77
6.4.5.	Kraftstoffverbrauch .....	79
6.4.6.	Unterlagerte Diskretisierung zur modellbasierten Verbrauchsberechnung .....	80
6.4.7.	Zusammenfassung der Kostenberechnung anhand eines Beispiels ..	82
6.4.8.	Validierung der modellbasierten Kraftstoffverbrauchsrechnung .....	85
6.5.	Speicherung der Zwischenergebnisse .....	88
6.6.	Bildung des optimalen Geschwindigkeitsprofils .....	92
<b>7.</b>	<b>Simulation und Ergebnisanalyse .....</b>	<b>95</b>
7.1.	Oszillierende Geschwindigkeit im unbeschränkten Zustandsraum .....	95
7.1.1.	Spezifischer Verbrauch .....	99
7.1.2.	Betriebspunkte im Oszillationsmuster .....	100
7.2.	Simulation Stadtfahrt .....	103
7.3.	Simulation Überlandfahrt .....	109
7.4.	Auswirkungen oszillierender Geschwindigkeitsprofile .....	112
7.5.	Berechnungsdauer .....	116
7.5.1.	Rechenaufwand im Optimierungsverlauf .....	117

---

7.5.2. Rechenaufwand und Diskretisierungs-Schrittweiten .....	120
7.6. Einfluss der Diskretisierungs-Schrittweiten auf die Ergebnisqualität .....	121
7.7. Nachbearbeitung von Geschwindigkeitsprofilen.....	126
<b>8. Dynamische Informationen .....</b>	<b>129</b>
8.1. Verbesserungspotential durch Einbindung dynamischer Informationen ..	131
8.2. Berücksichtigung von Schaltzeitpunkten zum Erreichen einer Grünphase.....	135
8.3. Berücksichtigung von Schaltzeitpunkten zur Vermeidung einer Rotphase .....	140
8.4. Weitere Anwendungsmöglichkeiten dynamischer Informationen.....	143
<b>9. Resümee und Ausblick .....</b>	<b>145</b>
<b>10. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>149</b>
<b>A. Anhang .....</b>	<b>153</b>
A.I. Abbildungsverzeichnis .....	153
A.II. Tabellenverzeichnis .....	157



## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

### Fahrphysikalische Größen

$a_{GF}$	Beschleunigung bei Gleitfahrt
$a_{max}$	Maximale Beschleunigung
$a_{min}$	Minimale Beschleunigung
$a_{SB}$	Beschleunigung im Schubbetrieb
$a_{soll}$	Gewünschte Beschleunigung
$b_e$	Spezifische Leistung
$c_{WA}$	Luftwiderstandskoeffizient
$f_{r0} ; f_{r1} ; f_{r4}$	Rollwiderstandskoeffizienten
$F_{Luft}$	Luftwiderstandskraft
$F_{Roll}$	Rollwiderstandskraft
$F_{Steigung}$	Hangabtriebskraft
$F_T$	Beschleunigungswiderstandskraft
$F_x$	Längskraft im Rad-Straße-Kontakt
$F_Z$	Radlast
$g$	Erdbeschleunigung
$i_{Getr}$	Getriebeübersetzung
$k_t$	Radialer Reifensteifigkeitskoeffizient
$KV$	Kraftstoffverbrauch
$M_A$	Motorabtriebsmoment
$M_{A,oV}$	Motorabtriebsmoment ohne Berücksichtigung des Getriebeverlustrmoments
$m_{Fzg}$	Fahrzeugmasse
$m_{Kr}$	Kraftstoffverbrauch (absolut)
$\dot{m}_{Kr,leer}$	Kraftstoffverbrauch im Leerlauf
$M_R$	Getriebeabtriebsmoment

$M_{Verl.}$	Getriebeverlustmoment
$\omega_A$	Motordrehzahl
$\omega_R$	Raddrehzahl
$p_{a+}$	Anteil der für zusätzliche Beschleunigung benötigten Fahrpedalstellung
$p_{Ges}$	Fahrpedalstellung
$p_{KF}$	Anteil der für Konstantfahrt benötigten Fahrpedalstellung
$p_{me}$	Motormitteldruck
$r_0$	Unbelasteter Radradius
$r_d$	Dynamischer Radradius
$r_s$	Statischer Radradius
$\rho$	Luftdichte
$T$	Motortakte je Arbeitsspiel
$V$	Hubvolumen des Motors
$v_{Fzg}$	Fahrzeuggeschwindigkeit

### Größen im Quellcode und beim Optimierungsverfahren

$a_k(v_{k-1}, \Delta v_k)$	Transformationsfunktion zur Änderung des Systemzustandes
$b_k$	Summand zur Berücksichtigung von Störgrößen
$BA$	Betriebsart zwischen zwei benachbarten Stützstellen
$c(z_{k-1}, x_k)$	Kantengewicht
$E$	Ergebnisvektor
$f$	Stufenbezogener Zielfunktionswert
$F(T, KV)$	Zielfunktion
$f_k(z_{k-1}, x_k)$	Stufenbezogene Zielfunktion
$f_k(v_{k-1}, \Delta v_k)$	Stufenbezogene Zielfunktion
$f_{v,min}$	Proportionalitätsfaktor für die Minimalgeschwindigkeit
$f_{ver}$	Stufenbezogener Kraftstoffverbrauch

$f_t$	Stufenbezogene Fahrtdauer
$F_o$	Summe der Zielfunktionswerte für das Teilproblem $\{K, K-1, \dots, k, k-1\}$
$F_u$	Summe der Zielfunktionswerte für das Teilproblem $\{K, K-1, \dots, k\}$
$g_{KV}$ bzw. $g_V$	Gewichtungsfaktor für die Zielgröße Kraftstoffverbrauch
$g_T$	Gewichtungsfaktor für die Zielgröße Fahrtdauer
$i$	Laufvariable über alle Geschwindigkeiten auf der Wegstützstelle $s(k)$
$j$	Laufvariable über alle Geschwindigkeiten auf der Wegstützstelle $s(k-1)$
$k$	Laufvariable über alle Wegstützstellen
$n$	Anzahl der Stufen eines Entscheidungsprozesses
$P_0$	Optimale Politik zur Überführung vom Anfangs- in den Endzustand
$P_{k-1}(z_{k-1})$	Optimale Teilpolitik zur Überführung von $(z_{k-1})$ in den Endzustand
$s_0$	Erste Wegstützstelle
$s_i$	$i$ -te Wegstützstelle
$s_N$	Letzte Wegstützstelle
$\Delta s$	Abstand zwischen zwei Wegstützstellen, Diskretisierungsschrittweite in der Dimension Weg
$T$	Fahrtdauer
$t_k(z_{k-1}, x_k)$	Transformationsfunktion zur Änderung des Systemzustands
$\Delta t$	Fahrtdauer auf einem Streckenabschnitt
$t_{Schalt}$	Umschaltzeitpunkt an einer Signalanlage
$t_{soll}$	Beschränkung der Fahrtdauer auf einer Teilstrecke
$v(KV_{min})$	Kraftstoffoptimaler Geschwindigkeitsverlauf
$v(T_{min})$	Zeitoptimaler Geschwindigkeitsverlauf
$v(s)$	Geschwindigkeit(-sverlauf) über Strecke aufgetragen
$v_0$	Vorgegebene Startgeschwindigkeit zu Beginn der Fahrtroute
$v_k$	Fahrzeuggeschwindigkeit an der Wegstützstelle $k$

---

$V_k$	Menge der realisierbaren Fahrzeuggeschwindigkeiten an der Stützstelle $k$
$v_{max}$	(Verlauf der) Maximalgeschwindigkeit
$v_{max, zul.}$	Zulässige Höchstgeschwindigkeit
$v_{min}$	(Verlauf der) Minimalgeschwindigkeit
$v_{Start}$	Fahrzeuggeschwindigkeit an der ersten Wegstützstelle
$\bar{v}$	Durchschnittsgeschwindigkeit
$\Delta v$	Diskretisierungsschrittweite in der Dimension Geschwindigkeit
$\Delta v_k$	Geschwindigkeitsdifferenz an der Wegstützstelle $k$
$\Delta V_k (v_{k-1})$	Menge aller realisierbaren Geschwindigkeitsdifferenzen an der Stützstelle $k$
$x_k$	Entscheidungsvariable zur Charakterisierung einer Entscheidung
$X_k (z_{k-1})$	Menge aller Entscheidungen, aus denen in Stufe $k$ ausgehend vom Zustand $z_{k-1}$ gewählt werden kann
$z_0 = \alpha$	Vorgegebener Anfangszustand
$z_k$	Zustandsvariable zur Wiedergabe des Zustands auf Stufe $k$
$Z_k$	Menge aller Zustände, in denen sich das System am Ende der Stufe $k$ befinden kann
$Z_n$	Menge möglicher bzw. vorgegebener Endzustände
$z_o$	Systemzustand auf der Stützstelle $k$
$z_u$	Systemzustand auf der Stützstelle $k-1$

# 1. Problembeschreibung und Handlungsbedarf

Über 80% des Personenverkehrs in Deutschland wird durch den motorisierten Individualverkehr (MIV) abgedeckt. Ein weiterer deutlicher Anstieg der Leistung im MIV – der mindestens bis zum Jahr 2025 anhält – wird prognostiziert [1]. Durch die Kombination aus dem steigenden Bedürfnis nach Individualverkehr, das hauptsächlich durch die Nutzung von Pkw abgedeckt wird, und steigenden Energiekosten werden energiesparende Fahrzeuge und Technologien stark nachgefragt. Entsprechend liegt der Fokus der Automobilindustrie bei der Entwicklung von Pkw aller Klassen längst auf der Steigerung der Energieeffizienz. Außerdem erfolgt eine fortschreitende Durchdringung der Produktpalette der Kfz-Hersteller mit Fahrerassistenzsystemen (FAS). Es liegt nahe, dass durch deren Einsatz neben der Erhöhung von Fahrsicherheit und -komfort auch die Senkung des Primärenergiebedarfs und der Schadstoff-Emissionen erzielt werden kann.

Um den Kraftstoffverbrauch zu senken, sind die meisten Autofahrer bemüht, ihr Verhalten vorausschauend an ihr Umfeld im Straßenverkehr anzupassen. Damit dies gelingen kann, müssen sowohl die Strecke als auch das eigene Fahrzeug gut bekannt sein. Doch die erzielten Verbesserungen liegen zumeist noch fernab vom theoretisch erreichbaren Optimum. Eine vorausschauende Reaktion auf künftige Ereignisse ist nicht möglich, ebensowenig wie das vorausschauende Fahren auf unbekanntem Strecken. Eine automatisierte Vorausschau, die das Geschwindigkeitsprofil auf der gewünschten Fahrstrecke entsprechend dem Resultat einer mathematischen Optimierung gestaltet, kann die Mängel, die das vom Menschen gesteuerte vorausschauende Verhalten aufweist, ausgleichen und somit weitere Verbesserungspotentiale erschließen. Durch die Formulierung des mathematischen Optimierungsproblems kann außerdem die Fahrdauer als zusätzliche Zielgröße eingebunden werden.

Ein weiterer Trend, dessen praktische Umsetzung derzeit hauptsächlich durch fehlende gesetzliche Grundlagen gehemmt wird, ist das autonome bzw. vollautomatische Fahren. Technisch ist es schon heute möglich, Kraftfahrzeuge in vielen Verkehrssituationen teil- oder auch hochautomatisch fahren zu lassen. Im Zuge dieser Automatisierung wird auch die Car2x-Kommunikation weiter entwickelt. Sie kann den Wahrnehmungshorizont eines Fahrzeugs weit über die Reichweite der eigenen Sensorik hinaus ausdehnen.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Fakten, der technischen Entwicklungsrichtungen und deren zu erwartenden Resultate, der künftig erforderlichen Veränderungen im Individualverkehr und der Bedürfnisse der Kraftfahrer kristallisiert sich der Bedarf nach einem Fahrerassistenzsystem für energie- und zeitoptimales Fahren heraus. Ziel eines solchen Systems ist die Erhöhung der Energieeffizienz im MIV.



## 2. Stand der Technik

Neben dem in dieser Arbeit beschriebenen Ansatz zur Effizienzsteigerung im MIV gibt es derzeit einige andere Systeme bzw. Ansätze, die ebenfalls dieses Ziel verfolgen. Um den Stand der Technik zu analysieren, sollten an dieser Stelle alle (teilweise) informationstechnischen Maßnahmen zur Senkung des Primärenergieverbrauchs und / oder der Fahrtdauer im Kfz betrachtet werden.

Das Spektrum der Systeme/Ansätze ist sehr groß. Ziel der Analyse des Standes der Technik ist, die in dieser Arbeit beschriebene Methodik mit derzeit aktuellen Systemen zu vergleichen. Aus dieser Vielfalt sollen jene herausgefiltert werden, die an dieser Stelle von besonders hoher Relevanz sind. Zu deren Beurteilung werden daher im Folgenden Merkmale genannt, die die hier vorgestellte Methodik charakterisieren. Die Relevanz anderer Systeme wird anschließend danach beurteilt, ob und zu welchem Grad auch sie diese Charakteristika aufweisen.

- Mittel- bis langfristiger Planungshorizont
- Mathematische Optimierung
- Nutzung erweiterter Kartendaten
- Berücksichtigung dynamischer Informationen
- Berücksichtigung der individuellen Vorgaben des Fahrers
- Multikriterielle Optimierung

### 2.1. Navigationssysteme

Zahlreiche Navigationssysteme bieten neben den herkömmlichen Optionen kürzeste oder schnellste Route auch die Wahlmöglichkeit energieeffizienteste Route an. Die Hauptkriterien, anhand derer der Kraftstoffverbrauch auf einer Route geschätzt wird, sind die Straßenklassen sowie die Anzahl der Ortsdurchfahrten, Kreuzungen etc. Die Berechnungen basieren also auf zu erwartenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten. Teilweise werden dabei außerdem Fahrzeugspezifika berücksichtigt.

Da alle gängigen Navigationssysteme die o.g. Merkmale entweder nicht oder nur in sehr geringem Ausmaß erfüllen und sich lediglich auf die Routenplanung beschränken, sollen sie an dieser Stelle nicht detailliert behandelt werden.

### 2.2. Vorausschau-Assistenten

Moderne Serienfahrzeuge sind im Premium-Segment mit Bordcomputern ausgestattet, die dem Fahrer vorausschauende Verhaltens-Vorschläge zur Verbrauchssenkung bieten. In einer einfachen, aber dafür rechtlich zulässigen und schon heute einsetzbaren Variante ist das „Eco Pro“ System von BMW ein Beispiel für diese Art der Fahrerassistenz. Hier werden hauptsächlich Streckenabschnitte, auf denen das Fahrzeug verzögert, zur Verbrauchssenkung genutzt. So wird dem Fahrer an der entsprechen-

den Stelle empfohlen, wie er verbrauchoptimal durch Nutzung des Segel- oder Schubbetriebs verzögern kann. Solche Systeme sind aktuell in Serie erhältlich.

Die Begrenzungen bei der Entwicklung neuer FAS-Funktionen resultieren u.a. aus Einschränkungen bei der Sensorik. Das Forschungskonsortium *Famos (Galileo for Future Automotive Systems)* setzt hier an, indem hochgenaue Ortungssysteme zur Bestimmung der Fahrzeugposition mit Fahrzeug- und Umfeldsensoren vernetzt werden [2]. So soll ein möglichst vollständiges Bild von der aktuellen Fahrzeugsituation und externen Einflüssen zur Verfügung stehen. Im Zuge dessen entstand unter Koordination der *Volkswagen AG* das System „*Green Driving*“. Wie auch bei o.g. *BMW*-System werden hier Empfehlungen für die Wahl der Fahrzeugbetriebsart für vor dem Fahrzeug liegende Streckenabschnitte mit Verzögerungen gegeben. Durch Einsatz dieses Systems wird der Kraftstoffverbrauch lt. [2] um bis zu 10% gesenkt.

Die Berücksichtigung dynamischer Informationen bei der Vorausschau wird derzeit im Versuchsfahrzeug „*FASCar*“ des DLR Instituts für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig erprobt [3]. Durch Kommunikation mit Lichtsignalanlagen erhält das Assistenzsystem Informationen, wann und wie lange Rot- und Grünphasen einsetzen. So erhält der Fahrer wiederum eine Geschwindigkeitsempfehlung, um sich – im Falle des roten Lichtsignals – dem Haltepunkt möglichst verbrauchsarm zu nähern bzw. bei anstehender Grünphase zum optimalen Zeitpunkt dort anzukommen.

Einen Schritt weiter in Richtung eines autonomen Vorausschau-Assistenz-Systems geht zum Beispiel *Porsche „InnoDrive“* [4]. Hier kann das ACC unter Vorgabe diskreter Fahrerpräferenzen (z.B. „*Dynamik*“ oder „*Komfort*“) erweiterte Kartendaten und Informationen zu Signalanlagen und Verkehrssituation nutzen, um die effizienteste Fahrweise auf einem Planungshorizont von mehreren Kilometern zu berechnen und mit Einbindung des ACC umzusetzen. Dabei handelt es sich aktuell um ein Entwicklungsprojekt. Die Einführung in Serie wird in drei bis fünf Jahren erwartet.

Neben Empfehlungen für die Fahrweise wird Vorausschau auch für das Energiemanagement verschiedener Fahrzeugkomponenten und die Optimierung des Bordnetzmanagements (z.B. Batterieladezyklen oder Energierückgewinnung) genutzt. Entsprechende Strategien hierzu wurden von 11 Partnern aus der deutschen Automobilindustrie im Rahmen des von 2009 bis 2011 vom BMBF geförderten Projektes „*Energieeffizientes Fahren 2014*“ [5] entwickelt.

Bereits 2009 wurde in Schweden ein an der Universität Linköping entwickeltes System getestet, das Topografie-Informationen der bevorstehenden Route zur Verbrauchssenkung von LKW nutzt [6]. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist von besonderem Interesse, dass ein Schwerpunkt bei der Entwicklung dieses Systems auf der Analyse der Abhängigkeit zwischen der Länge des Planungshorizonts und der Ergebnisqualität lag. Die Längen der Planungshorizonte wurden zu diesem Zweck zwischen 500 und 5000 m gewählt. Dabei wurde u.a. festgestellt, dass die Ausprägung dieser Abhängigkeit stark variiert und von der jeweiligen Fahrtroute abhängt.

Es kann also keine allgemeingültige Aussage über einen optimalen Planungshorizont getroffen werden. Neben der Abhängigkeit von der Route muss auch hier ein Kompromiss zwischen Berechnungsaufwand und Ergebnisqualität getroffen werden.

In [7] wird die Entwicklung eines FAS, das wie das im Rahmen dieser Arbeit entstandene System die Dynamische Programmierung zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs nutzt, beschrieben. Die Fahrtdauer fließt hier allerdings nicht als Zielgröße ein, sondern wird in Form einer Beschränkung berücksichtigt. Auch hier wird ein Längsdynamik-Modell zur Kostenberechnung verwendet. Zur Verbrauchsberechnung selbst dient eine Funktion in Abhängigkeit der Motorleistung. Zur Berücksichtigung des Insassenkomforts kann der Verlauf des jeweils optimalen Profils durch die Parametrierung einer Bestrafungsfunktion für Beschleunigungsänderungen beeinflusst werden.

### **2.3. Autonomes Fahren**

Die Aufgabe der Fahrzeugführung besteht aus Längs- und Querverführung. Dem Fahrer stehen dafür die Stellglieder Lenkrad, Gas- und Bremspedal sowie Getriebebeschaltel zur Verfügung. Mit der Einführung der ersten Fahrerassistenzsysteme wurden zunächst Längsführungs-, später auch Querverführungs-Aufgaben in bestimmten Fahrsituationen autonom vom Fahrzeug ausgeführt. Der erste Schritt zur Automatisierung des Fahrens wird durch die Einführung des ABS markiert. Hier wird in einer sicherheitskritischen Situation die Bremsdruck-Vorgabe des Fahrers durch das System so modifiziert, dass ein Blockieren der Räder verhindert wird. Mittlerweile wird der höchste, bei Neuwagen gängige Automatisierungsgrad durch adaptive Geschwindigkeitsregelungen (ACC-Systeme) und Einpark-Assistenten erreicht. Auf ACC-Systemen basieren nahezu alle Lösungsansätze für vorausschauende Assistenzsysteme.

Zur allgemeinen Beschreibung des Grades der Automatisierung der Fahraufgabe wird hier eine Definition verwendet, die im Rahmen einer Arbeitsgruppe zu den rechtlichen Aspekten des automatisierten Fahrens erstellt wurde [8] und zwischen assistiertem, teil-, hoch- und vollautomatisiertem Fahren unterscheidet (Bild 1). Wenn in der vorliegenden Arbeit von autonomem Fahren die Rede ist, so ist darunter summarisch automatisiertes Fahren ohne weitere Abstufung zu verstehen.

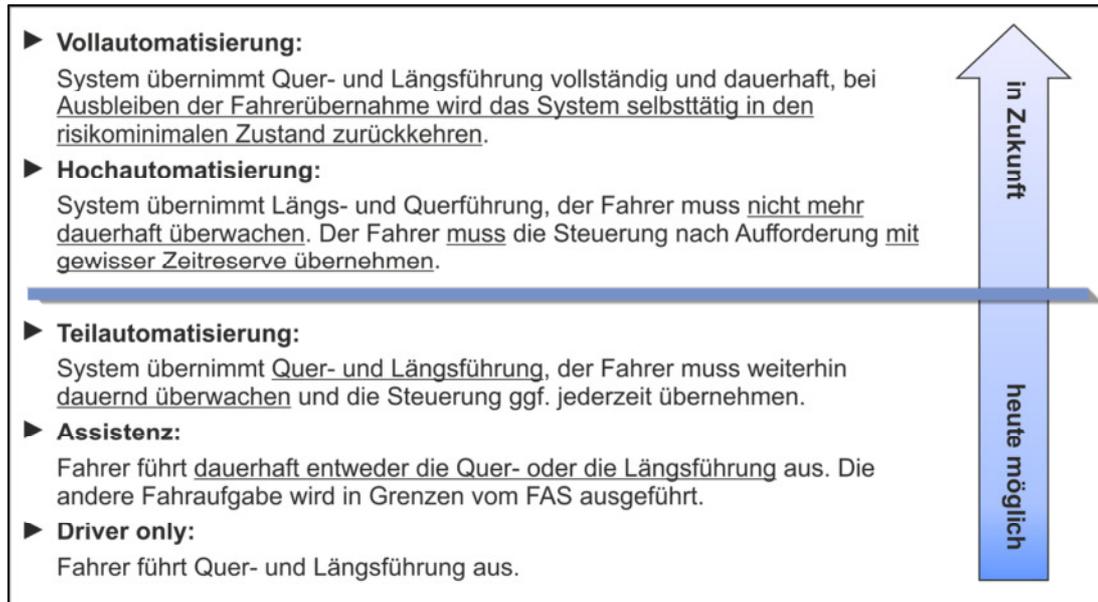


Bild 1: Definition von Automatisierungsgraden, Quelle: Abgewandelte Darstellung aus [8]

Bereits heute ist vollautomatisches Fahren technisch möglich. Der Einsatz in der Realität scheidet derzeit an fehlenden rechtlichen Grundlagen, sowohl aus Sicht des Zulassungs- und Verhaltensrechts gemäß der StVO als auch aus Sicht der (Produkt-)Haftung gemäß BGB und StVG. Gemäß dem Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr, das bereits im Jahre 1968 von den Vereinten Nationen erarbeitet und neben Deutschland von 63 weiteren Staaten ratifiziert wurde, muss jeder Fahrzeugführer sein Fahrzeug dauernd und unter allen Umständen beherrschen [9].

Seit August 2011 testet BMW einen nach obiger Definition teilautomatisch fahrenden Prototypen auf öffentlichen Autobahnen [10], [11]. Dieser hält eine vom Fahrer vorgegebene Grundgeschwindigkeit und überholt selbstständig langsamere Fahrzeuge. Außerdem wechselt er autonom die Spur, um einerseits sich sehr schnell nähernden Fahrzeugen, die vorher nicht in Sensorreichweite waren, die linke Spur frei zu machen und andererseits durch Spurwechsel nach links anderen Fahrzeugen die Auffahrt auf die Autobahn zu erleichtern.

Im Mai 2012 wurde weltweit erstmals ein vollautomatisches Fahrzeug für den öffentlichen Straßenverkehr zugelassen. Im US-Bundesstaat Nevada wurde eine auf den Bundesstaat beschränkte Zulassung für ein Testfahrzeug der Fa. *Google* ausgesprochen [12].

## 2.4. Optimale Kollektiv-Strategien

Optimierungs-Potenzial für Kollektiv-Strategien ergibt sich hauptsächlich an Verkehrsknotenpunkten. Neben den individuellen Vorteilen bezüglich Energie- und Zeitbedarf, die sich für einzelne Fahrzeuge bei möglichst fließender Fahrt durch Ballungsräume mit zahlreichen Verkehrsknotenpunkten ergeben, ist die Reduktion von

Schadstoffemissionen auch aus Sicht aller Verkehrsteilnehmer und Anwohner wünschenswert. Diese Ziele können durch den Einsatz des Autonomen Kreuzungsmanagements [13] erreicht werden, bei dem (derzeit in einer Simulation) hoch- bzw. vollautomatisierte Fahrzeuge selbstständig ampelfreie Kreuzungen überqueren und Kreisverkehre durchfahren.

Beim vom BMWi geförderten Projekt *KOLINE* [14] (Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen) wurden von diversen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft von Juni 2009 bis Mai 2012 die Methoden von FAS zur optimalen Längsgeschwindigkeits-Regelung, Car2Car- und Car2Infrastructure-Kommunikation und der koordinierten Steuerung von Lichtsignalanlagen kombiniert. Projektziel war die Reduktion von Verzögerungs-/Beschleunigungsmanövern und Wartezeiten, ein gleichmäßigerer Verkehrsfluss und somit weniger Emissionsbelastung im städtischen Bereich. Durch die Kommunikation mit den Fahrzeugen im Einzugsgebiet liegen für die zentrale Planung der Schaltung von Lichtsignalanlagen genauere Daten als aktuell üblich vor. Im Gegenzug erhalten die FAS Informationen über künftige Lichtsignalschaltungen im zeitnahen Planungshorizont und können diese zur Geschwindigkeitsprofil-Planung berücksichtigen. Außerdem wurden im Rahmen dieses Projekts auch Ansätze für eine autonome Querführung mit dem Ziel der optimalen Fahrspurwahl bei mehrspurigen Kreuzungsanfahrts-Bereichen entwickelt. So soll die Rückstaulänge minimiert werden. Im Gegensatz zu [13] wird jedoch keine vollautomatische Kreuzungsüberquerung realisiert.

Eine weitere Kollektiv-Strategie, die ebenfalls zu einer Verbesserung bei der Infrastrukturauslastung und gleichzeitig zur Verbrauchs- und Emissionssenkung führt, ist die Konvoi-Bildung. Die autonome Kolonnenfahrt wurde im Juni 2012 im Rahmen des Projekts *SARTRE (Safe Road Trains for the Environment)* auf Autobahnen in Spanien getestet [15]. Dabei fuhren 4 Fahrzeuge bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 90 km/h in einem geringen Abstand (ca. 6m) hintereinander her. Im Gegensatz zum autonomen Kreuzungsmanagement bietet sich diese Strategie eher im Fernverkehr an, da die Verbrauchs-Vorteile (z.B. durch Verringerung des Luftwiderstandes) nur bei höheren Geschwindigkeiten signifikant sind. Theoretische Grundlagen für die stabile Regelung von Fahrzeugkolonnen und entsprechende modellbasierte Untersuchungen sind beispielsweise in [16] oder [17] zu finden. Hier finden außerdem die Methoden der Car2X-Kommunikation zur Koordination der individuellen fahrzeugbezogenen Steuerung mit der des Kollektivs Anwendung.

## 2.5. Resümee

Um die Aktualität der vorliegenden Arbeit zu beurteilen, ist die verbrauchsoptimale Routenplanung in Navigationssystemen von eher geringer Relevanz. Zum einen gibt es hier wenige Schnittmengen bezüglich der Methodik. Die (konkurrierenden) Ziele des Fahrers und seine Gewichtung derer zueinander werden nicht berücksichtigt.

Fahrzeugspezifische Verbrauchscharakteristika fließen nicht oder nur sehr grob ein. Zum anderen ist die Routenplanung im Sinne der Bestimmung der Fahrstrecke nicht Bestandteil des in dieser Arbeit beschriebenen Assistenz-Systems. Vielmehr ist das Ergebnis der Routenplanung und somit die Ausgangsgröße des Navigationssystems eine Eingangsgröße für das FAS.

Die Nutzung der Vorausschau zum Zweck der Verhaltens-Optimierung hingegen ist von hoher Relevanz, denn sie bildet den Kern der vorliegenden Arbeit. Deren Grundidee besteht in der vollständigen Geschwindigkeitsprofilplanung durch Mehrzieloptimierung unter Berücksichtigung der Fahrerpräferenzen bei der Zielgrößengewichtung und ist in [18] beschrieben. Ein ähnlicher Ansatz liegt auch dem Konzept *Porsche InnoDrive* (siehe [4]) zugrunde. Wie auch in [18] optimiert Porsche InnoDrive das Längsgeschwindigkeits-Profil für eine bestimmte Strecke unter Berücksichtigung individueller Fahrerpräferenzen. Hierbei werden jedoch nur die Streckenteile, auf denen Beschleunigung oder Verzögerung gefordert ist, optimiert, da hier das größte Einsparungspotential gesehen wird. Streckenteile, die üblicherweise mit konstanter Geschwindigkeit befahren werden, sind also nicht Teil der Optimierung. Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit geht man außerdem davon aus, dass der Schubbetrieb immer weniger effizient ist als Segeln mit und ohne Motorabschaltung. Daher wird der Schub nicht als für die Optimierung zulässige Betriebsart eingestuft. Zu diesem Ergebnis kam man durch Vergleichstests, in denen jeweils ein alternierendes Geschwindigkeitsprofil aus Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen mit einem Profil mit konstanter Geschwindigkeit verglichen wurde. Dabei wurde die Konstantfahrt mit 95 km/h ausgeführt, das alternierende Profil wurde zwischen 90 und 100 km/h gefahren. In diesem konkreten Fall führte der Einsatz des Schubbetriebs zur Verzögerung zu ca. 2% Einsparung, der Einsatz der Segelverzögerung zu ca. 5% bei Leerlaufbetrieb des Motors und ca. 24% bei Motorabschaltung, jeweils verglichen mit der Konstantfahrt. Eine weitere Gemeinsamkeit zur vorliegenden Arbeit ist die Verwendung der Dynamischen Programmierung als Optimierungsverfahren, die in einem über Weg und Geschwindigkeit diskretisierten Zustandsraum eingesetzt wird. Auch hier wird die Präferenz des Fahrers durch die Variationen der Summanden in der Zielfunktion umgesetzt.

## 3. Aufgabenstellung und Ziele

### 3.1. Ausgangssituation

Zum Zeitpunkt, als die Aufgabenstellung für die vorliegende Arbeit in den Grundzügen formuliert wurde, war bereits ein großer Anteil der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Automobilhersteller auf Reduktion von Primärenergieverbrauch und Effizienzsteigerung im Kfz konzentriert.

Die Optimierung bzw. der optimale Einsatz einzelner Fahrzeugkomponenten ist bereits weitestgehend ausgereizt. Beispiel hierfür ist die schon sehr weit vorangeschrittene Entwicklung möglichst effizienter Verbrennungsmotoren. Je höher hier die Effizienz ist, desto geringer wird das Potential für weitere Verbesserungen.

Größeres Optimierungspotential wird in komponentenübergreifenden Betriebsstrategien gesehen, was häufig mit dem Begriff ‚Energiemanagement‘ beschrieben wird. Am Beispiel des elektrischen Bordnetz erläutert, gilt hier, die einzelnen Verbraucher zu priorisieren und den Spielraum für ihre jeweilige Zu- und Abschaltung so zu nutzen, dass eine möglichst gleichmäßige Auslastung und damit einhergehend ein Downsizing erreicht werden kann. Außerdem kann erreicht werden, dass Primäraggregate häufiger in ihren effizientesten Betriebspunkten arbeiten als dies der Fall wäre, wenn ausschließlich die einzelnen komponenteninternen Betriebsstrategien mit ihrer isolierten Sichtweise den Leistungsbedarf des gesamten Kfz bestimmen.

Die dritte Sichtweise, die auch die Prämisse für die vorliegende Arbeit darstellt, ist der optimale Betrieb des Gesamtsystems ‚Kraftfahrzeug‘. Dieser grenzt sich vom Energiemanagement ab, in dem das Fahrzeug inklusive aller Einzelkomponenten sowie der komponenteninternen als auch der komponentenübergreifenden Betriebsstrategien als gegebenes Gesamtsystem betrachtet wird. Bei der Formulierung des mathematischen Optimierungsmodells fließen die Fahrzeugcharakteristika in Form eines Grey-Box-Modells ein. Das bedeutet, dass alle verbrauchsrelevanten physikalischen und informationstechnischen Prozesse bekannt sein müssen, diese aber nicht direkt beeinflusst werden können. Möglichkeiten für Eingriffe ergeben sich nur an den Grenzen des Gesamtsystems. Im Falle des Kraftfahrzeugs entsprechen die Stellgrößen, die bei der Optimierung variabel sind, denen, die auch dem Fahrer beim manuellen Betrieb zur Verfügung stehen.

### 3.2. Zielsetzung

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, ist das primäre Ziel der vorliegenden Arbeit, das vorausschauende Fahren als Resultat einer intuitiven und auf Erfahrungswerten des Fahrers beruhenden Tätigkeit durch eine autonome Assistenzfunktion zur pareto-optimalen Fahrzeuglängsführung zu ersetzen.

Konkretisiert wird das Ziel durch weitere Vorgaben. Die Optimierungsmethodik soll plattformunabhängig sein, so dass zur Anpassung an unterschiedliche Fahrzeuge ein Austausch des Modells zur Kostenberechnung bei der Zielgröße ‚Energieverbrauch‘ genügt. Das Assistenzsystem soll ausschließlich die vorhandene Fahrzeuginfrastruktur nutzen. Daher sind die nutzbaren Schnittstellen identisch mit denen, die auch dem Fahrer zur Verfügung stehen. Konstruktive Veränderungen am Fahrzeug oder Eingriffe in unterlagerte Betriebsstrategien sind nicht möglich bzw. erwünscht. Die hier berücksichtigten Zielgrößen Fahrdauer und Energieverbrauch konkurrieren miteinander, daher ist die Bedingung für die Berechnung eines eindeutigen Optimums eine Zielgrößen-Gewichtungs-Vorgabe. Diese soll sich aus den Präferenzen des Fahrers ergeben. Damit dieser wiederum die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten kennt und so eine Entscheidung treffen kann, müssen die erreichbaren Zielgrößenerfüllungswerte in absoluter Form bereits vor Fahrtantritt berechnet werden.

### **3.3. Aufgabenstellung und Vorgehensweise**

Aus obiger Zielsetzung leitet sich die Aufgabenstellung ab, ein geeignetes Optimierungsverfahren zu bestimmen, mit dem das Auffinden des globalen Optimums in Echtzeit sichergestellt werden kann. Durch die Wahl des Verfahrens wiederum ergeben sich Anforderungen an das Optimierungsmodell. Im vorliegenden Fall müssen sowohl statische als auch dynamische Informationen zur Erstellung eines diskreten Zustandsraumes einbezogen werden. Außerdem ist vorzusehen, dass sich der Zustandsraum innerhalb des Planungshorizonts auch nach Fahrtantritt ändert. In diesen Fällen ist die optimale Fahrzeug-Betriebsstrategie anzupassen. Schließlich ist ein Modell zur Zielgrößenberechnung, das zur Berechnung der zum Diskretisierungsrasster des Zustandsraumes korrespondierenden Kosten dient, zu erstellen. Dieses Modell ist durch den Vergleich mit Messungen am realen Fahrzeug zu validieren. Die Gestaltung der Zielfunktion soll dem Fahrer ein (quasi-)kontinuierliches Durchschreiten der Pareto-Front ermöglichen.

Die Ergebnisse dieser Teilaufgaben werden zur Erstellung eines Quellcodes für den Vorausschau-Assistenten verwendet. Der Quellcode soll für Simulationen geeignet sein, bei denen Geschwindigkeitsprofile für gegebene Fahrtstrecken von mehreren Kilometern Länge optimiert werden. Zur Analyse der Resultate werden verschiedene Anwendungsszenarien in Form unterschiedlicher Routen ausgearbeitet. Aufgrund der Erkenntnisse aus den Simulationen erfolgen abschließend eine Nutzenbewertung sowie die Formulierung von Ansatzpunkten für Weiterentwicklungen und Ausweitungen des Operationsgebietes.

## 4. Systemarchitektur

Entsprechend den in Abschnitt 3.3 formulierten Anforderungen soll das vorliegende Assistenzsystem das Fahrerverhalten nachbilden. Das bedeutet, dass ursprünglich dem Fahrer obliegende Aufgaben vom FAS übernommen werden. Diese Vorgabe ist bei der Gestaltung der Systemarchitektur zu beachten. Um zu bestimmen, welche der Aufgaben hier zu berücksichtigen sind, soll zunächst eine Begriffsklärung für die Aufgaben bei der Fahrzeugführung im Allgemeinen erfolgen, bevor daraus die Struktur des FAS und seine Einbindung in die im Fahrzeug vorhandene informationstechnische Infrastruktur mit Nutzung vorhandener Sensorik bzw. Aktorik abgeleitet wird.

### 4.1. Aufgaben der Fahrzeugführung

Für die Entwicklung von FAS im Allgemeinen und insbesondere zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion entsteht die Notwendigkeit zur detaillierten Betrachtung der Aufgaben, die der Mensch zur Fahrzeugführung ausführen muss.

In der Literatur hat sich (wie z.B. in [19]) die Unterscheidung in primäre und sekundäre Aufgaben durchgesetzt. Zu ersteren zählen

1. Planen und Navigieren,
2. Manövrieren, Führen sowie
3. Stabilisieren.

Die sekundären Aufgaben, die sich hauptsächlich mit der Überwachung und Bedienung nicht sicherheitsrelevanter Systeme (z.B. Radio, Klimaanlage etc.) befassen, sind an dieser Stelle von nachrangiger Bedeutung und werden nicht weiter betrachtet. Zur Analyse der Interaktion des Menschen mit dem Fahrzeug und seinem Umfeld wird das Modell der Informationszirkulation genutzt, dessen Schema in Bild 2 dargestellt ist.

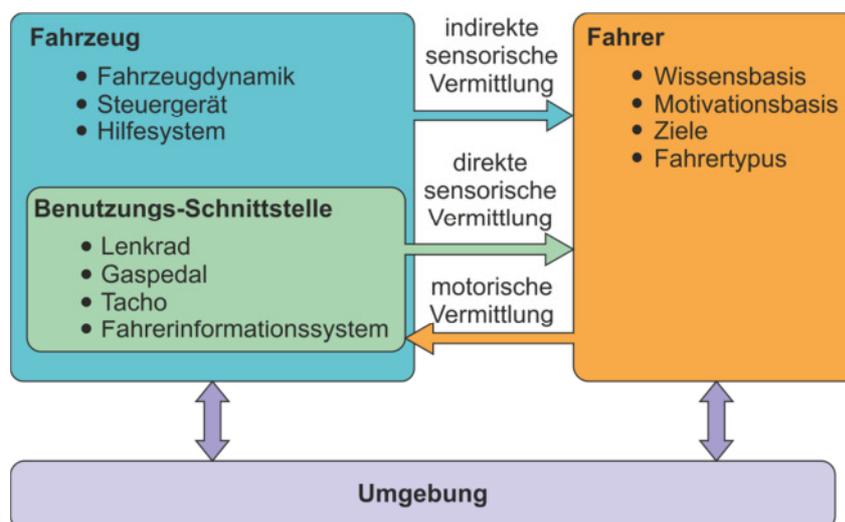


Bild 2: Das System Fahrer-Fahrzeug als Mensch-Maschine-System, aus [19], vom Autor verändert.

Timpe identifiziert in [19] zwei Schwerpunkte der Fahrzeug-Fahrer-Interaktion bzw. deren Gestaltung. Zum einen ist der Aspekt der Informationsdarbietung hinsichtlich der Akzeptanz durch den menschlichen Fahrer wichtig. In der vorliegenden Arbeit kommt dieser Aspekt bei der Präsentation der Optimierungsergebnisse und bei einer eventuellen Rückkopplung durch den Fahrer in Form einer Parametervariation bei der Zielgrößengewichtung zum Tragen. Der andere Schwerpunkt wird in der Unterstützung der Wahrnehmung und der kognitiven Prozesse durch FAS gesehen. Das vorliegende System erweitert diesen Aspekt, indem es nicht nur eine Unterstützung, sondern eine vollständige Übernahme des kognitiven Prozesses der vorausschauenden Planung bietet. Die dafür benötigten Informationen korrespondieren hier mit der Wahrnehmung, und auch hier genügen die ohnehin vorhandenen elektronischen Informationen aus fahrzeugeigener Sensorik sowie aus der Car2x-Kommunikation.

Um zu verdeutlichen, wo FAS den Menschen bei den Aufgaben der Fahrzeugführung unterstützen bzw. ihm diese abnehmen, werden im Folgenden noch einige Beispiele genannt:

1. Planen und Navigieren:
  - Navigationssysteme, größtenteils mit TMC-Daten-Unterstützung (TMC = Traffic Message Channel)
2. Manövrieren, Führen:
  - (Adaptive) Cruise Control ACC/CC,
  - Automatische Notbremse,
  - Spurhalte-Assistent,
  - Spurwechsel-Assistent
3. Stabilisieren:
  - Anti-Blockier-System ABS,
  - Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP, Dynamische Stabilitätskontrolle DSC, ...
  - Antriebsschlupfregelung ASR

Diese Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe geht auf [20] zurück. In [21] wird sie einer anderen Gliederung aus [22] gegenübergestellt, bei der die menschlichen Tätigkeiten bei der Fahrzeugführung in wissens-, regel- und fertigkeitbasiertes Verhalten unterschieden werden. Das vorliegende System ist in ersterer Hierarchie eher dem Aufgabenbereich des Planens und Navigierens zuzuordnen. Bei o.g. Gegenüberstellung mit der Verhaltensunterscheidung wird in [21] jedoch festgestellt, dass das regelbasierte Verhalten nur in der Hierarchieebene des Manövrierens und Führens greift. Daher bedient das vorliegende System die ersten beiden Hierarchieebenen. Gerät das Fahrzeug in einen Zustand, der eine Stabilisierung erforderlich macht, haben die Ziele des vorausschauenden Fahrens keine Priorität mehr. Dieser Aufgabenbereich spielt im vorliegenden Fall also keine Rolle. Eine hierarchische Einordnung von Planungs- und Optimierungsaufgaben in Bezug auf Verkehrssysteme gibt beispielsweise [23], wo die Organisationshierarchie und der Abstraktionsgrad der Ver-

kehrsmittel in die Ebenen operativ, taktisch, dispositiv und strategisch unterteilt werden. Die vorliegende Aufgabenstellung bezieht sich dabei auf die operative Ebene, da lediglich die Bewegungssteuerung einer einzelnen Einheit optimiert werden soll.

## 4.2. Einbindung in die Systemstruktur des Fahrzeuges

Ein Ziel bei der Konzeption der Systemarchitektur des Vorausschau-Assistenten ist die Eingliederung in die bereits vorhandene Fahrzeuginfrastruktur unter möglichst geringem Aufwand. Die daraus abzuleitenden Anforderungen sind:

- Es sollen keine zusätzlichen Fahrzeugkomponenten vorgesehen, sondern nur vorhandene genutzt werden.
- Es soll keine Überschneidungen bei der Informationsverarbeitung oder gar sich gegenseitig beeinträchtigende Betriebsstrategien geben. Beispielsweise bedeutet das, dass bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe die dort hinterlegte Schaltstrategie als Vorgabe zu nutzen und nicht stattdessen innerhalb des Vorausschau-Assistenten die einzulegende Schaltstufe zu ermitteln ist.
- Die Schnittstellen des Vorausschau-Assistenten zu den anderen Fahrzeugkomponenten bzw. zum Fahrer sind so zu gestalten, dass sie den vollen Funktionsumfang unabhängig von der Antriebsart des speziellen Fahrzeugs (z.B. Verbrennungs-, Elektromotor oder Hybridantrieb) gewährleisten.

### 4.2.1. Konzeption der Schnittstellen

Im vorigen Abschnitt 4.1 wurde festgestellt, dass der Vorausschau-Assistent der Fahraufgabe „Führen“ zuzuordnen ist. Daraus lässt sich die geeignete Positionierung innerhalb der Fahrzeuginfrastruktur bestimmen. Wie auch in Bild 3 grafisch dargestellt wird, gliedert er sich in die Informationsfluss-Kette bereits vorhandener FAS ein und kooperiert mit ihnen. Hier bedeutet das, dass die Vorgabe des Fahrers für eine Soll-Geschwindigkeit des ACC durch das Optimierungsergebnis in Form des optimalen Geschwindigkeitsprofils ersetzt wird. Um dies zu ermöglichen, müssen entsprechende Schnittstellen vorgesehen werden. Die Anforderungen an den Funktionsumfang der Schnittstellen ergeben sich daraus wie folgt:

1. Input für
  - Fahrtroute (aus Navigationssystem)
  - Zielgrößengewichtung (vom Fahrer)
  - Fahrzeug (aus Onboard-Sensorik)
  - Fahrzeugumfeld (aus Sensorik und Car2X-Kommunikation)
2. Output von
  - dem optimalen Geschwindigkeitsprofil (an ACC)
  - den Zielgrößenerfüllungswerten (an Fahrer)

In der prozeduralen Sequenz ist der erste Schritt zur Übernahme der Fahraufgabe die Vorgabe von Fahrtziel und der Relation der Zielgrößengewichtung durch den Fahrer.

Alle erforderlichen Informationen über das Fahrzeug, die nicht schon im Vorfeld der Fahrt eingebunden sind und vor jeder Geschwindigkeitsprofilplanung aktualisiert werden müssen, werden durch die vorhandenen Steuergeräte und Sensoren erfasst und können hier eingeholt werden. Um Informationen über das Fahrzeugumfeld zu erlangen, bietet es sich an, das Navigationssystem durch eine Schnittstelle einzubinden. Neben der konkreten Ausgestaltung der Fahrstrecke durch die Zielvorgabe des Fahrers liefern moderne Navigationssysteme erweiterte Kartendaten sowie dynamische Informationen zur Verkehrssituation. Die Ausgabe des optimalen Geschwindigkeitsprofils erfolgt über eine Schnittstelle zur Längsgeschwindigkeitsregelung, dem ACC. Dadurch wird auch die Anforderung, nur die Stellgrößen zu nutzen, die auch dem Fahrer im manuellen Fahrzeugbetrieb zur Verfügung stehen, erfüllt.

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Fahrzeugparameter der anderen Steuergeräte (wie z.B. Motor- oder Getriebesteuergerät) nicht explizit durch eine gesonderte Schnittstelle übergeben werden, so müssen 3 Systemkomponenten an den Vorausschau-Assistenten gekoppelt werden:

1. Fahrer (In- und Output)
2. Navigationssystem (Input)
3. ACC (Output)

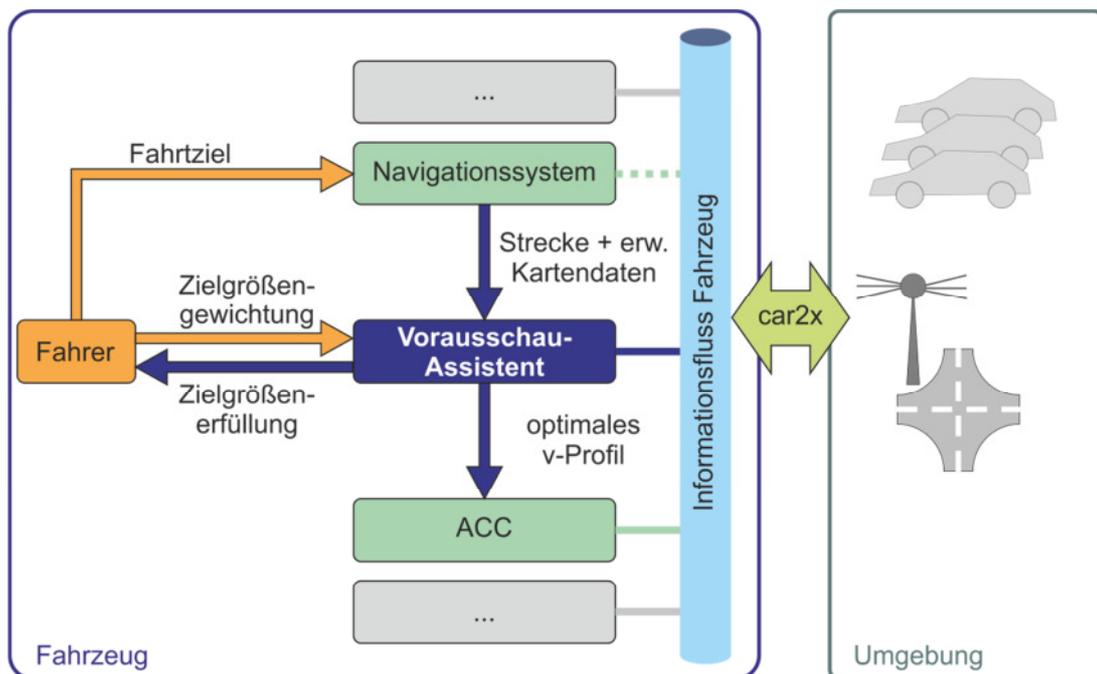


Bild 3: Einordnung des Vorausschau-Assistenten in die informationstechnische Infrastruktur des Fahrzeugs

Um die Optimierung auf Basis dynamischer Informationen zu ermöglichen, ist außerdem eine Schnittstelle zur Umgebung vorzusehen. Hier können entsprechende Daten per Car-to-Infrastructure- (C2I-) und / oder Car-to-Car- (C2C-) Kommunikation ausgetauscht werden.

#### 4.2.2. Nutzung vorhandener Sensorik

Unabhängig vom Verfahren, das zur Lösung des Optimierungsproblems implementiert wird, werden zur vorausschauenden Zielgrößenberechnung zahlreiche Daten und Informationen über den Fahrzeugzustand und die äußeren Bedingungen aus seiner Umgebung benötigt. Die Anforderung möglichst geringer Redundanz des Vorausschau-Assistenten gegenüber vorhandenen Systemen und Bauteilen gilt auch im Kontext der Sensorik. Allerdings ist zu beachten, dass die eingesetzte Messtechnik bezüglich Genauigkeit und Taktung der Messungen so ausgelegt ist, dass sie für sicherheitsrelevante FAS und Komponenten-Steuerungen/-Regelungen in sehr kurzfristigen Planungshorizonten verwendet werden kann. Charakteristisch für den Vorausschau-Assistenten ist hingegen eine langfristige Planung, so dass dessen Parametrierung nur einmalig vor jeder Geschwindigkeitsprofilplanung erfolgt. Dennoch wird im Folgenden ein Überblick über üblicherweise vorhandene Sensorik gegeben und darauf aufbauend aufgezeigt, wie diese im Vorausschau-Assistenten genutzt werden kann.

Sicherheitsrelevante und daher auch in Großserie bereits weit verbreitete FAS bringen eine sehr umfangreiche Ausstattung bordautonomer Sensorik mit sich. Bezogen auf den Fahrzeugzustand werden hier fahrdynamische Größen (z.B. Gierrate, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Raddrehzahlen, Neigungen, Radlasten etc.) und bauteilspezifische Größen (Motor- und Getriebedrehzahlen, -temperaturen, -drücke etc.) gemessen. Stark verbessert wurde in letzter Zeit die Ausstattung mit Sensorik zur Umgebungs-Erkennung. Anwendungsschwerpunkte sind dabei die Erkennung von Objekten im direkten Fahrzeugumfeld, die genaue Positionsbestimmung des Fahrzeugs sowie die Einschätzung der Fahrbahnbeschaffenheit. Neben der Anbindung an Satelliten-Navigationssysteme kommen hier hauptsächlich optische Sensoren wie Video-Kameras und Lidar oder auch Ultraschall- und Radar-Systeme zum Einsatz. In Bild 4 ist ein Beispiel für die Sensorik-Ausstattung eines aktuellen Serienfahrzeuges in der Übersicht zu sehen.

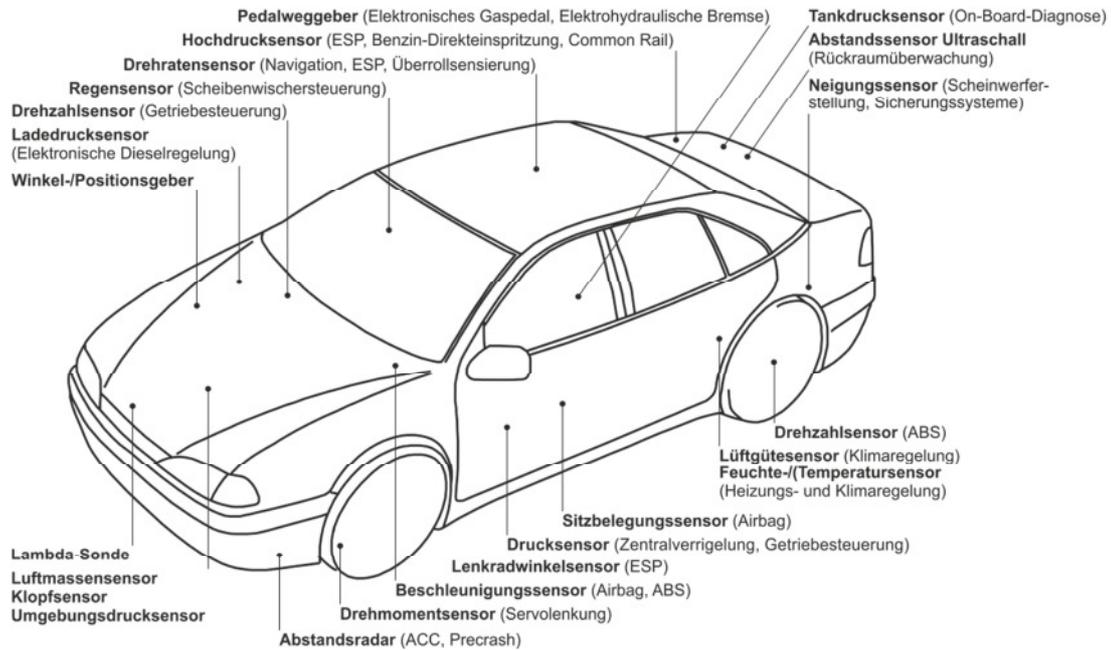


Bild 4: Beispielhafte Übersicht der Sensorik aktueller Serienfahrzeuge, aus [24], S. 230

Um die Nutzung vorhandener Sensorik für die Geschwindigkeitsprofilplanung zu beschreiben, soll zunächst festgestellt werden, welche Informationen zwingend benötigt werden und welche optional verwendet werden können. Folgende Größen sind zur Zielgrößenberechnung erforderlich:

- Fahrbahnsteigung
- Rollwiderstands(bei)werte
- Außentemperatur
- Fahrzeuggesamtgewicht

Da es sich hier um eine vorausschauende Planung handelt, werden Fahrbahnsteigung und von der Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit abhängige Rollwiderstandsbeiwerte nicht aus Sensordaten bezogen. Sie müssen schon vor Fahrtantritt bekannt und daher Bestandteil der erweiterten Kartendaten sein. Diese werden vom Navigationssystem bereitgestellt.

Für die korrekte Fahrwiderstandsberechnung bleiben also die Außentemperatur und das Gesamtgewicht, die beide aus der Fahrzeugsensorik bzw. einer darauf aufbauenden Schätzung bezogen werden müssen. Auch diese Größen können nur zum Planungszeitpunkt, also bei Fahrtantritt, berücksichtigt werden. Eine Aktualisierung während der Fahrt würde also nur Neuplanungen beeinflussen. Das wiederum hat nur bei signifikanten Temperaturänderungen nennenswerte Auswirkungen. Das Fahrzeuggewicht hingegen kann sich während der Fahrt nur durch den abnehmenden Tankinhalt ändern. Das wiederum ließe sich ebenfalls rechnerisch in die vorausschauende Planung einbeziehen, da der Kraftstoffverbrauch ja ein Ergebnis dieser ist. In der vorliegenden Ausgestaltung ist diese Gewichtsreduktion jedoch nicht berücksichtigt.

Optional können vor Fahrtantritt folgende Informationen in die Planung einfließen:

- Aktuelle Motortemperatur
- Aktuelle Getriebetemperatur
- Reifendruck und -temperatur
- Windrichtung und -stärke
- Erwartungswerte für Nebenaggregatlasten

Die Fahrwiderstandsberechnung und somit die Verbrauchsberechnung berücksichtigt Verlustmomente, die in Motor und Getriebe (z.B. durch innere Reibung) entstehen. Ihre Höhe hängt von der Temperatur in Motor und Getriebe ab. Derzeit dienen Kennfelder zur Verlustmoment-Bestimmung, die jeweils für die Betriebstemperaturen von Motor und Getriebe validiert sind. Die Berücksichtigung der höheren Reibungsverluste bei geringeren Motor- bzw. Getriebetemperaturen könnte zur Ergebnisverbesserung dienen, sofern Sensorinformationen über die Temperaturen bei Fahrtantritt vorlägen und die Entwicklung des Temperaturverlaufs während der Fahrt zum Planungszeitpunkt geschätzt werden würde.

Auch die Reifeneigenschaften beeinflussen die Fahrwiderstände. Der Rollwiderstand hängt neben der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche auch von Reifendruck und -temperatur ab. Wie schon bei Motor und Getriebe beschrieben könnte hier eine genauere Parameterschätzung zur Ergebnisverbesserung dienen. Gleiches gilt für die Berücksichtigung von Windrichtung und -stärke bei der Luftwiderstandsberechnung. Allerdings unterliegen sind diese Größen häufigen und schwer prognostizierbaren Änderungen, so dass sie nur dort einbezogen werden sollten, wo sie eine ausreichende Konstanz aufweisen.

Das erforderliche Motormoment wird durch Nebenaggregatlasten erhöht. Falls bei Fahrtantritt berücksichtigt werden würde, zu welchen Zeiten beispielsweise durch Klimaanlageinstellungen höhere Lasten zu erwarten sind, könnten diese bei der Planung berücksichtigt werden. Allerdings ist zu bedenken, dass die Einstellungen während der Fahrt jederzeit durch den Fahrer geändert werden können, so dass sich hier nicht unbedingt eine Verbesserung der Verbrauchsberechnung einstellt.

Sobald das erforderliche Motormoment bei der Geschwindigkeitsprofilplanung berechnet ist, wird der korrespondierende Kraftstoffverbrauch kennfeldbasiert ermittelt. Wie bei den Reibungsverlusten gilt auch dieses Kennfeld für Betriebstemperatur. Diese vereinfachende Annahme lässt die in der Realität variierende Anfettung des Kraftstoffgemisches bei unterschiedlichen Temperaturen außer Acht. Durch Verwendung verschiedener Kennfelder für einen kalten Motor bis hin zur Betriebstemperatur könnte diese Ungenauigkeit eliminiert werden.

Ein weiterer Aspekt bei der Nutzung vorhandener Sensorik bzw. zur Verfügung stehenden Messgrößen ist die Beurteilung der Notwendigkeit einer Neuplanung der Geschwindigkeitsprofile. Wie bereits beschrieben, werden zu Beginn der voraus-

schauenden Planung Annahmen bezüglich Fahrzeug- und vor allem Umgebungsparametern getroffen. Erfolgt während der Fahrt ein regelmäßiger Abgleich zwischen den Planungsparametern und den realen Messwerten, so kann ein Höchstmaß für die zulässige Abweichung definiert werden. Falls die Abweichungen mehrmals hintereinander zu hoch sind, könnte eine Neuplanung mit angepassten Parametern initiiert werden.

Vor allem neuere FAS nutzen die Möglichkeiten, die sich aus der Sensordatenfusion ergeben. Beispielsweise werden für FAS zur Kollisionsvermeidung (Warnungen vor Abstandsunterschreitung oder Objekten im toten Winkel), für Nachtsicht- oder auch Spurhalteassistenten die Daten aus verschiedenen Umfeld-Sensoren kombiniert. Durch Bildverarbeitungs-Software kann die relative Fahrzeugposition bezogen auf die Fahrbahn oder auch auf andere Objekte mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. In Verbindung mit der C2I-Kommunikation kann auch die absolute Positionsbestimmung erfolgen. In [25] wird beispielsweise beschrieben, wie eine solche absolute hochgenaue Fahrzeugpositionsbestimmung durch die Sensorfusion bordautonomer Odometrie (Gierraten- und Geschwindigkeitssensoren), Bildern von Videokameras und Lidar-Daten und deren Abgleich mit Kartendaten aus der Kommunikation mit dem sog. Backend, also einer zentralen Datenverarbeitungsstelle, erfolgt. Diese Art der Positionsbestimmung hat eine Qualität, die hochautomatisches Fahren ermöglicht. Ein anderes Beispiel bietet [26], wo die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche (insbesondere der Reibwert) im Bereich direkt vor dem Fahrzeug bestimmt werden, um den Fahrer vor sinkender Reifenhaftung zu warnen. Optische Sensoren erkennen Nässe, Eis oder Schnee auf der Fahrbahnoberfläche, Temperatursensoren ermitteln unabhängig Fahrbahn- und Umgebungstemperatur. In Verbindung mit Reifendruck- und Fahrdynamiksensoren wird schließlich die zu erwartende Reifenhaftung bestimmt.

Die Sensordatenfusion ist im Kontext der vorliegenden Aufgabenstellung hauptsächlich für das autonome Fahren relevant. Dieses ist wiederum eine Voraussetzung für den Einsatz des Vorausschau-Assistenten. Die Möglichkeiten, die sich aus der Komposition einzelner Messsignale zu einem vollständigen Bild der Fahrzeug-Umgebung ergeben, haben im langfristigen Planungshorizont zunächst keine Bedeutung.

### **4.2.3. Car2X-Kommunikation**

Die Car2Car-Kommunikation kann zur Erweiterung des Wahrnehmungshorizonts fahrzeugeigener Umfeldsensorik genutzt werden. Durch Daten von vorausfahrenden Fahrzeugen können (optisch) abgeschattete Bereiche oder Bereiche, die zwar noch im näheren Umfeld, aber schon außerhalb der fahrzeugeigenen Sensorreichweite liegen, eingesehen werden. Wie in beiden o.g. Beispielen haben aktuelle sicherheitsrelevante FAS zwar einen deutlich kürzeren Vorausschau-Horizont als das in dieser Arbeit entwickelte System. Sieht man jedoch vor, dass die Fahrzeuge ihre Daten nicht nur für eigene Anwendungen nutzen, sondern diese auch per C2I-

Kommunikation an zentrale Einheiten senden oder durch Car2Car-Kommunikation direkt austauschen, so können die Daten von Fahrzeugen, die einige Kilometer voraus fahren auch für die Erweiterung des Wahrnehmungshorizonts der vorliegenden Anwendung genutzt werden.

Die C2I-Kommunikation dient auch dem Kollektiv, indem statische Karten, wie sie von Navigationssystemen genutzt werden, durch Fahrzeugdaten-Verarbeitung in zentralen Einheiten ergänzt, verfeinert und aktualisiert werden. Wie eine derartige zentrale Datenverarbeitung ausgestaltet werden könnte, ist beispielsweise in [27] beschrieben. Dort nutzen autonome Fahrzeuge Informationen aus einem sog. „Backend“, um auch unter erschwerten Bedingungen wie z.B. einer Unterbrechung der Verbindung zur Satelliten-Navigation sicher die eigene Position zu bestimmen.

Herkömmliche statische Kartendaten genügen für die Optimierung von Geschwindigkeitsprofilen nicht. Neben dem Streckenverlauf werden Informationen bezüglich Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrbahnsteigungen, genauer Kurvenradien, Fahrbahnbeschaffenheit, Vorfahrtsregeln an Kreuzungen und Einmündungen, Verkehrsberuhigungsmaßnahmen sowie zur Position von Lichtsignalanlagen benötigt. Diese Informationen können von zentraler Stelle geliefert werden. Wie diese zusätzlichen Informationen bei der Optimierung der Geschwindigkeitsprofile genutzt werden, wird im weiteren Verlauf in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Durch die Vielzahl der Fahrzeuge, die ihrerseits Messdaten an die zentrale Einheit kommunizieren, verbreitert sich deren Informationsbasis erheblich. Das wiederum führt nach Aggregation aller Daten zur ständigen Verbesserung des erweiterten Kartenmaterials. So steigt etwa der Detaillierungsgrad, außerdem bietet sich die Möglichkeit ständiger Aktualisierung in sehr kurzen Intervallen. Da die erweiterten Kartendaten erheblichen Einfluss auf die Qualität des Optimierungsergebnisses haben, ist ihre laufende Aktualisierung unerlässlich. Auch dynamische Informationen über das Umfeld wie beispielsweise zum Wetter oder zur Verkehrslage profitieren von der Car2I-Kommunikation, da sie in wesentlich höherer Auflösung angeboten werden können. Im Gegensatz zum heutigen Stand stehen dann nicht nur einzelne, zentral koordinierte Messstellen zur Verfügung, sondern prinzipiell kann jedes Fahrzeug als Messstelle dienen.

Sicherlich werden viele Informationen, die an zentralen Einheiten eingehen, redundant sein. Dies erzeugt zwar einen relativ hohen Aufwand bei der Datenverarbeitung, kann aber auch konstruktiv zur Qualitätskontrolle genutzt werden. Hier können fehlerhafte Messungen erkannt werden, eine Beschädigung des Datenbestandes somit vermieden werden. Außerdem können die Fahrzeuge, von denen die fehlerhaften Messungen stammen, vor dem Fehler im eigenen System gewarnt werden.

Für die verbrauchs- und zeitoptimale Geschwindigkeitsprofilplanung ist neben den Informationen über das Umfeld der Fahrzeuge ein zweiter Aspekt der Car2Car-Kommunikation relevant. Die vorausschauende Planung profitiert in hohem Maß von

der Kenntnis des künftigen Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer, die sich im Einzugsgebiet der Planungsstrecke aufhalten werden. Einerseits ergeben sich daraus gesicherte Erwartungswerte, wo bei der individuellen Planung zusätzliche Einschränkungen des Zustandsraumes berücksichtigt werden müssen. Dies entspräche einer Reaktion auf das Verhalten anderer. Andererseits eröffnen sich hier Möglichkeiten zur Kooperation, in dem sich mehrere Verkehrsteilnehmer zusammenschließen und so gemeinsam agieren, dass für jeden Verbesserungen gegenüber der rein individuellen Planung erzielt werden.

#### **4.2.4. Kooperation mit weiteren FAS**

Durch die immer stärker ausgeprägte Ausstattung moderner Kfz mit FAS wird es zunehmend wichtiger, sowohl die Koexistenz verschiedener, teilweise parallel arbeitender, FAS als auch ggf. deren Kooperation bei der Systemarchitektur zu berücksichtigen. Hier muss besonders darauf geachtet werden, redundante Berechnungen zu vermeiden. Es gibt zwar Fälle, in denen sie wünschenswert sind, weil sie der Sicherheit des Gesamtsystems dienen. Durch unbeabsichtigte Redundanzen jedoch werden unnötig Rechenkapazitäten gebunden. Im schlechtesten Fall kann es sogar dazu kommen, dass die Systeme gegeneinander arbeiten, weil ihre Ziele in Konflikt zueinander stehen. Daher sind sowohl eine klare Abgrenzung der Aufgabenbereiche einzelner Systeme wie auch eine anschließende Koordination vorzunehmen.

Ein zweiter Schwerpunkt bei der Einbindung eines neuen Systems in die bestehende Systemarchitektur eines Fahrzeuges ist die Kooperation. Ziel ist, anderen Gesamtsystem-Komponenten einen Mehrwert zu verschaffen, in dem sie die zusätzlich verfügbaren Informationen über den künftigen Geschwindigkeitsverlauf und somit den bevorstehenden Leistungsbedarf für eigene Optimierungen nutzen können.

Aus der Beschreibung der Schnittstellen (vgl. Abschnitt 4.2.1), die für die Einbindung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung vorgesehen sind, geht hervor, dass der Vorausschau-Assistent direkt mit dem ACC-System verbunden ist. Sein Ausgang stellt dessen Soll-Vorgabe dar. Tatsache ist, dass optimale Geschwindigkeitsprofile – speziell bei starker Gewichtung der Zielgröße Kraftstoffverbrauch – unter dem Aspekt des Insassenkomforts Schwächen aufweisen. Der Insassenkomfort wird im Allgemeinen anhand der am Fahrzeugaufbau auftretenden Schwingungen bemessen. Neben höherfrequenten Schwingungen, die u.a. zu Geräuscentwicklungen führen, gelten auch Wank- und Nickbewegungen als komfortmindernd (vgl. beispielsweise [28]). Im vorliegenden Fall sind dabei besonders letztere relevant, da sie durch Änderungen der Längsbeschleunigung hervorgerufen werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird darauf detaillierter eingegangen. Die Frage nach einem geeigneten Ausgleich dieser Schwächen ist beispielhaft für eine Kooperationsmöglichkeit verschiedener FAS. So könnte der Komfort sofort durch eine Modifikation der Optimierungsmethodik bei der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung einfließen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, den Insassenkomfort erst später bei der Einregelung der

Soll-Vorgabe bzw. durch deren Modifikation innerhalb des ACC-Systems auf ein angemessenes Niveau zu steigern. Kriterien zur Bewertung des Komforts wären hier Längs- und Querbeschleunigung sowie der Ruck in beiden Dimensionen.

Andere Systeme, die nicht in direktem Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung stehen, aber dennoch von dieser profitieren, sind sämtliche Energiemanagement-Strategien. So können alle Verbraucher, deren Betriebsstrategie einen gewissen Spielraum für energieoptimales Verhalten zulässt, vorausschauend Ressourcen einplanen. Besonders kommt dies bei Batterieladestrategien, Energiemanagementmaßnahmen im Bordnetz und Komfort-Komponenten wie z.B. Klimaanlage oder Heizungen zum Tragen.

Abgesehen von den Kooperationsmöglichkeiten innerhalb des Fahrzeuges eröffnen sich auch Potentiale zur Interaktion mit anderen Fahrzeugen. Das Verhalten des Kollektivs kann durch die Kenntnis bezüglich des künftigen Verhaltens seiner Bestandteile besser geplant werden, ohne dadurch zu starke Einschnitte bei den individuellen Interessen zu verursachen. So genügt es bei der optimalen Konvoi-Bildung beispielsweise nicht, das Ziel der einzelnen Fahrzeuge zu kennen. Es sollte auch die angestrebte Durchschnittsgeschwindigkeit bekannt sein, um die Akzeptanz der einzelnen Fahrer für die Maßnahme zu erzielen.

Neben diesen Möglichkeiten zur Energieoptimierung durch Koordination müssen an anderer Stelle klare Abgrenzungen bei den Aufgabenbereichen getroffen werden. Selbstverständlich haben sicherheitsrelevante Systeme immer Vorrang. Das bezüglich Kraftstoffverbrauch und Fahrdauer optimale Geschwindigkeitsprofil darf nur verfolgt werden, solange dadurch keine Sicherheitskriterien verletzt werden. So muss beispielsweise gewährleistet sein, dass die Soll-Geschwindigkeitsvorgabe an das ACC überstimmt wird, wenn durch ein unvorhergesehenes Manöver eines vorausfahrenden Fahrzeuges der Mindestabstand unterschritten wird. Auch bei den Optimierungen ist zu beachten, dass keine redundanten Vorgaben, die zueinander konkurrieren könnten, entstehen. Es soll also nicht in komponenten-interne Betriebsstrategien eingegriffen werden. Getriebeschaltstrategien und Motormanagement werden als gegeben betrachtet. Ihre jeweiligen Parameter sind daher keine Variablen für die Optimierung.

### **4.3. Prozessablauf innerhalb des Vorausschau-Assistenten**

Nachdem im vorigen Abschnitt die Einbindung des Vorausschau-Assistenten in die Gesamt-Systemarchitektur der informationsverarbeitenden Ebene des Fahrzeugs behandelt wurde, fokussieren die folgenden Ausführungen die Systemarchitektur innerhalb des FAS. Dabei erfolgt an dieser Stelle eine generische Beschreibung, um dem Anspruch der Übertragbarkeit, d.h. der Adaptionsmöglichkeit auf unterschiedliche Plattformen, gerecht zu werden. Die Spezifika bei der Umsetzung der theoretischen

sehen Erkenntnisse, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, werden im Kapitel 6 erläutert.

Bild 5 zeigt einen Ausschnitt der in Bild 3 dargestellten Systemstruktur. Hier wird das dem Vorausschau-Assistenten zugrunde liegende Optimierungsproblem schematisch dargestellt. Wie dort zu sehen ist, lässt sich der Lösungsprozess in vier Bearbeitungsschritte gliedern. Begonnen wird mit der Bildung des Lösungsraumes (vgl. Unterkapitel 4.3.1), bei der anhand der Randbedingungen die prinzipiell für eine zulässige Lösung in Frage kommenden Systemzustände identifiziert werden. Die Optimierung selbst und die Kostenberechnung erfolgen parallel. Letztere dient zur Bewertung von Handlungsalternativen und wird in Unterkapitel 4.3.2 erläutert. Die Charakterisierung des Optimierungsproblems, das bei vorliegender Aufgabenstellung zu lösen ist, schließt sich in Unterkapitel 4.3.3 an. Die Bildung des optimalen Geschwindigkeitsprofils markiert den Abschluss des Prozessablaufes.

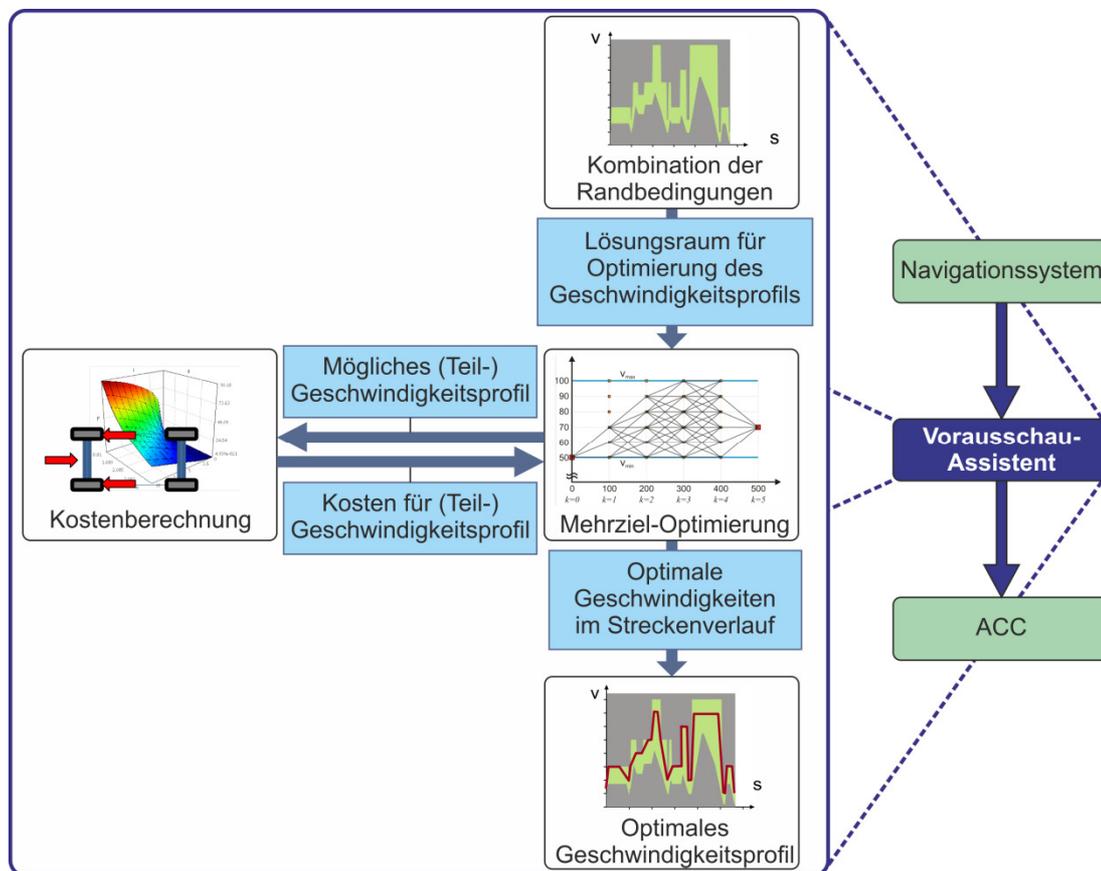


Bild 5: Übersicht des Prozessablaufes innerhalb des Vorausschau-Assistenten

### 4.3.1. Bildung des Lösungsraumes

Mit fortschreitender Entwicklung von FAS nimmt auch die Bedeutung der Informationen über das eigene Fahrzeug und seinem Umfeld zu. Durch die Arbeiten auf dem Gebiet der Sensordatenfusion stehen Werkzeuge zur Verfügung, um die Vielzahl verteilter Informationsfragmente aus unterschiedlichen Quellen zu einem möglichst umfangreichen und detaillierten Gesamtbild zu kombinieren. Im Anwendungsbereich

der Fahrerinformation und der Unterstützung seiner Wahrnehmung finden solche Ansätze bereits Anwendung. Hierbei werden, wie in Bild 6 zu sehen ist, zunächst Informationen erfasst und gesammelt. Anschließend müssen sie interpretiert und miteinander kombiniert werden, so dass ein schlüssiges Gesamtbild entsteht. Schließlich erfolgt die Übermittlung an den Fahrer. Dafür müssen alle Daten z.B. grafisch so aufbereitet werden, dass der Mensch die Situation leicht erfassen und verstehen kann.

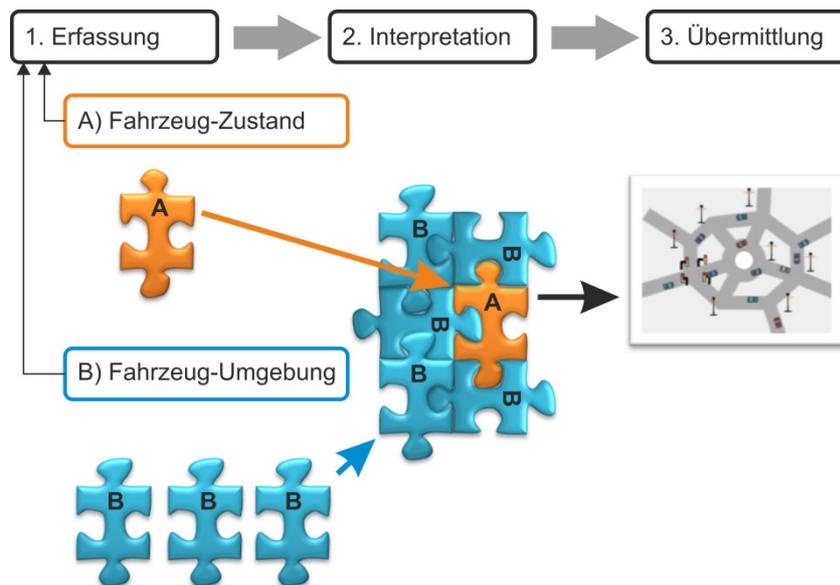


Bild 6: Allgemeine Vorgehensweise zur Sensordatenfusion

Mit dieser allgemein gültigen Vorgehensweise korrespondiert die Bildung des Lösungsraumes für die Geschwindigkeitsprofil-Optimierung beim vorliegenden System. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Erfassung und Interpretation der Informationen. Entsprechend den Schnittstellen-Definitionen des Vorausschau-Assistenten ist es nicht notwendig, den Zustandsraum so aufzubereiten, dass er für den Menschen leicht erfassbar ist. Die Ergebnisrückmeldung an den Fahrer erfolgt hier lediglich in Form von Zielgrößenerfüllungswerten. Der Zustandsraum, auf dem die Berechnungen basieren, hat deshalb für den Fahrer bzw. seine Interaktion mit dem Assistenzsystem keine Relevanz.

Der Lösungsraum spannt sich im vorliegenden Fall in den Dimensionen Geschwindigkeit und Strecke auf. Die Strecke wird durch die Routen-Vorgabe des Navigationssystems spezifiziert. Vor Einbeziehung der Randbedingungen für die Optimierung erstreckt sich der Lösungsraum entlang der Strecke prinzipiell über alle positiven Geschwindigkeiten. Nun erfolgt die Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen, wodurch der Lösungsraum sukzessive beschränkt wird.

Die Randbedingungen erhält man aus den Zusatzinformationen, die vom Navigationssystem geliefert werden und in Abschnitt 4.2.1 als erweiterte Kartendaten bezeichnet wurden. Es handelt sich dabei um

- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Kurvenradien
- Sichtverhältnisse
- Beschaffenheit der Fahrbahnoberflächen
- Vorfahrtsregeln
- Position von Signalanlagen
- Verkehrsberuhigende Maßnahmen

Bild 7 zeigt einige Beispiele, wie o.g. Faktoren auf die Ausprägung des Lösungsraumes einwirken. Im oberen Teil sind reale Gegebenheiten skizziert. Im unteren Teil ist der Lösungsraum zu sehen. Die grüne Kurve markiert die zulässige Maximalgeschwindigkeit. Die schraffierte Fläche darüber kennzeichnet für die Optimierung gesperrte Geschwindigkeiten. Nahelegend ist die erste Randbedingung, die sich aus der Einhaltung der Geschwindigkeitsbeschränkung der StVO ergibt. Selbstverständlich sind nur Lösungen zulässig, bei denen diese zu keiner Zeit überschritten wird.

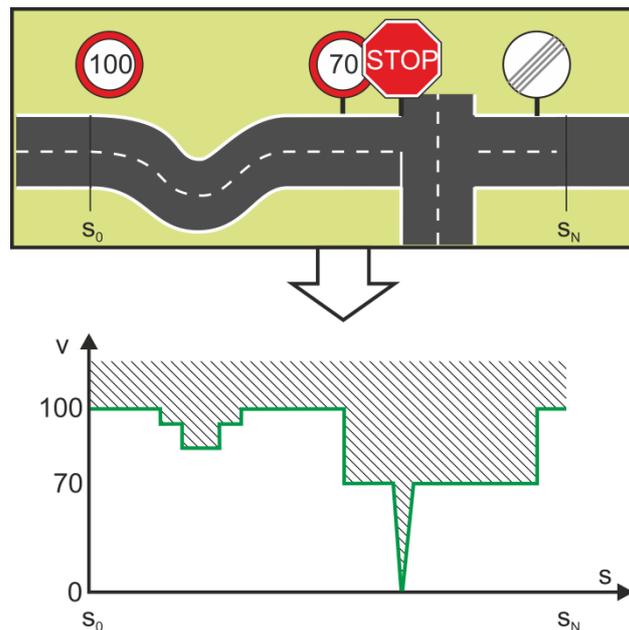


Bild 7: Verwendung erweiterter Kartendaten zur Erstellung des Lösungsraumes

Die nächste Randbedingung ergibt sich aus den Kurvenradien. So gibt es beispielsweise im Streckenverlauf zahlreiche Stellen, an denen die Sicherheit aufgrund des erforderlichen Lenkwinkels gefährdet wäre, wenn sie mit der erlaubten Maximalgeschwindigkeit durchfahren werden würden. Ebenso muss die obere Schranke für die Geschwindigkeit herabgesetzt werden, wenn die Sichtweite bzw. im Falle des autonomen Fahrzeuges der Wahrnehmungshorizont entsprechend eingeschränkt ist. Optional kann auch eine Komfort-Bedingung in Form einer maximalen Querbeschleunigung eingeführt werden, die dann die aus fahrdynamischer Sicht sichere Maximalgeschwindigkeit in einer Kurve weiter reduzieren würde.

Eine weitere obere Geschwindigkeitsbeschränkung kann sich aus der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche ergeben. Weist die Fahrbahn starke Unebenheiten auf, sollte die Maximalgeschwindigkeit aus Sicherheits- und Komfortgründen herabgesetzt werden.

An Einmündungen, wo anderen Verkehrsteilnehmern Vorfahrt gewährt werden muss, sind ebenfalls Beschränkungen vorzusehen. So ist beispielsweise denkbar,

dass innerorts zwar mit 50 km/h gefahren werden darf. Trotzdem muss die Geschwindigkeit an Einmündungen, wo rechts vor links gilt, reduziert werden – auch unabhängig davon, ob tatsächlich ein anderes Fahrzeug einbiegt oder nicht.

Weiterhin ist die Position von Signalanlagen einflussgebend für die Gestaltung des Lösungsraums. Da die hier maßgebliche Ausprägung des Signals veränderlich ist, wird dieser Fall im weiteren Verlauf in Kapitel 8 näher beschrieben.

Schließlich ergeben sich noch weitere Randbedingungen aus verkehrsberuhigenden Maßnahmen in Form von baulichen Veränderungen der Fahrbahn. Beispielsweise hierfür sind Fahrbahnverengungen oder Bremsschwellen.

Nachdem sich alle bisher hier angeführten Randbedingungen auf die obere Beschränkung der Geschwindigkeit auswirken, muss auch eine Minimalgeschwindigkeit definiert werden. Grundsätzlich ist diese frei wählbar, es hat sich jedoch als praktikabel erwiesen, diese in Relation zur Maximalgeschwindigkeit zu setzen und zusätzlich in den Übergangsbereichen lineare Anpassungen vorzusehen.

Im Ergebnis erhält man also aus der Berücksichtigung den Lösungsraum in Form eines über der Strecke aufgetragenen Korridors zwischen Maximal- und Minimalgeschwindigkeit. Grundsätzlich ist es in Bezug auf den Optimierungsaufwand ratsam, den Lösungsraum so stark wie möglich einzugrenzen. Dieser Arbeitsschritt wird im Prozessablauf nur einmal durchgeführt, während der nächste Bearbeitungsschritt iterativ wiederholt wird. So kann durch den erhöhten Aufwand infolge der Berücksichtigung möglichst vieler Informationen bei der Lösungsraum-Bildung der Rechenaufwand bei der iterativen Mehrziel-Optimierung umso stärker reduziert werden. Während des Optimierungsprozesses erfolgen weitere Lösungsraum-Begrenzungen in Form von Ausschlüssen verschiedener Fahrzeugzustände. Dabei werden, in Abhängigkeit des aktuellen Fahrzeugzustandes, nicht realisierbare Folgezustände identifiziert. Hierbei handelt es sich beispielsweise um solche, die aufgrund der begrenzten Beschleunigungsfähigkeit nicht erreicht werden können. Darauf wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

#### **4.3.2. OptimierungsvARIABLE und -modell**

OptimierungsvARIABLE—ist die Fahrzeug-Geschwindigkeit im Streckenverlauf. Um einen Geschwindigkeitsverlauf zu bewerten, müssen – unabhängig vom eingesetzten Optimierungsverfahren – dessen Auswirkungen auf die Zielgrößen berechnet werden. Optimal ist der Verlauf mit dem minimalen Wertepaar, das die Nebenbedingung der vom Fahrer vorgegebenen Zielgrößengewichtung erfüllt.

Die Zielgröße Fahrtdauer lässt sich durch relativ einfache Zusammenhänge direkt aus dem Geschwindigkeitsverlauf und der Streckenlänge berechnen. Die Berechnung des resultierenden Kraftstoffverbrauchs ist deutlich komplexer. Zahlreiche physikalische Effekte, die voneinander abhängen, müssen berücksichtigt werden. So bedarf es zur Verbrauchsermittlung eines in das Optimierungsmodell eingebetteten Fahrzeug-

modells. Bei dessen Bildung ist es besonders wichtig, einen guten Kompromiss zwischen der Ergebnissenauigkeit und einem angemessenen Detaillierungsgrad zu erzielen. Während des Optimierungsprozesses werden die Zielfunktionsauswertungen häufig wiederholt, um die Alternativen unterschiedlicher Geschwindigkeitsprofile miteinander zu vergleichen. Daher wirken sich aufwändige Modelle an dieser Stelle besonders negativ auf die Berechnungszeit aus.

Um das eingangs formulierte Ziel der Portierbarkeit auf verschiedene Fahrzeug- bzw. Antriebstypen weiterhin zu verfolgen, müssen die Schnittstellen des Modells zur Kostenberechnung so gestaltet werden, dass sie für alle potentiellen Ausprägungen des Fahrzeugtyps verwendet werden können. Das wird hier erreicht, in dem die Eingangsgröße immer ein Geschwindigkeitsverlauf auf einer bestimmten (Teil-)Strecke und die Ausgangsgröße der entsprechende Verbrauch sind. Diese Schnittstellengestaltung ist auch in Bild 5 zu sehen.

Innerhalb des Fahrzeugmodells werden anhand der eingehenden Vorgabe die resultierenden Fahrwiderstände berechnet. Diese wiederum führen über einige Zwischenschritte zu einer erforderlichen Motorleistung. Aus der lässt sich - beispielsweise anhand eines Kennfeldes - der Kraftstoffverbrauch ermitteln. Abschließend kann der Verbrauch zusammen mit der Fahrzeit als Bewertungsgrundlage innerhalb der Optimierung ausgegeben werden. Neben den beiden o.a. Schnittstellen sind keine weiteren von außen stellbare Variablen vorgesehen. Es handelt sich also um ein sog. Grey-Box-Modell, was bedeutet, dass zwar alle Vorgänge innerhalb des Modells bekannt und parametrierbar sind, aber die einzige Einflussmöglichkeit über den vordefinierten Input gegeben ist.

Für eine Adaption des FAS auf unterschiedliche Fahrzeugtypen muss also lediglich die Parametrierung der Modellkomponente für die Verbrauchsberechnung angepasst werden. Bei Anpassungen auf unterschiedliche Antriebstypen kann das Verbrauchsmodell ausgetauscht werden. Die Berechnung der Zielgröße Zeit bleibt von Fahrzeug- und Antriebsart unbeeinflusst.

Eine weitere Anforderung an das Fahrzeugmodell ist, dass physikalische Zusammenhänge abgebildet und phänomenologische Bestandteile (wie z.B. Kennfelder) weitestgehend vermieden werden sollen. Würde das Verbrauchsmodell beispielsweise vollständig aus Kennfeldern bestehen, würde die Änderung nur eines Parameters (wie z.B. Fahrzeuggewicht, Temperatur o.ä.) den Austausch sämtlicher Kennfelder erforderlich machen. Dennoch gibt es Stellen, an denen ein Kennfeldeinsatz sinnvoll ist. Beim Verbrennungsvorgang beispielsweise würde eine ausreichend detaillierte Abbildung der physikalischen Zusammenhänge den Rechenaufwand im Vergleich zu dem beim Einsatz eines Verbrauchskennfelds in Abhängigkeit des Motorbetriebspunktes zu stark erhöhen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Verbrauchsmodell für ein verbrennungsmotorisch betriebenes Fahrzeug aufgestellt. Die aus den hier beschriebenen

grundsätzlichen Anforderungen resultierende Umsetzung wird im Detail in Kapitel 6 erläutert.

### 4.3.3. Mehrziel-Optimierung

Aus der Charakteristik des vorliegenden Optimierungsproblems und weiteren Anforderungen, die sich aus dem Einsatzgebiet des Vorausschau-Assistenten ergeben, gehen Kriterien zur Wahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens hervor.

Zunächst wird daher das Optimierungsproblem beschrieben. Im vorliegenden Fall sollen zwei konkurrierende Zielgrößen gleichzeitig minimiert werden, nämlich Fahrtdauer und Primärenergiebedarf (im Folgenden wird der geläufigere Begriff Kraftstoffverbrauch verwendet). Die gesuchte Lösung ist ein Pareto-Optimum, da sich keiner der beiden Zielgrößenerfüllungswerte weiter verbessern lässt, ohne dadurch die jeweils andere zu verschlechtern.

Zur Verdeutlichung werden in einem einfachen Beispiel, das in Bild 8 skizziert ist, vier Geschwindigkeitsprofile miteinander verglichen. Im linken Teil, dem sog. Urbildraum, sind die jeweiligen Verläufe der Fahrzeuggeschwindigkeit über der Strecke aufgetragen. Der hier zugrundeliegende Lösungsraum sei auf einer Strecke bestimmter Länge jeweils konstant nach unten durch  $v_{min}$  und nach oben durch  $v_{max}$  begrenzt. Das Fahrzeug darf also nur Geschwindigkeiten einnehmen, die innerhalb des Korridors zwischen den schraffierten Flächen liegen. Eine weitere Vorgabe für die Profile ist die Start- und Endgeschwindigkeit, die jeweils bei  $v_{max}$  liegt. Das am leichtesten nachvollziehbare Geschwindigkeitsprofil  $v(T_{min})$  resultiert aus der vollständig zeitlastigen Zielgrößengewichtungsvorgabe, in Bild 8.a) in grün dargestellt. Bei der Optimierung wird also nach der Lösung gesucht, mit der das Fahrzeug die Strecke in möglichst kurzer Zeit durchfährt, ohne dabei den Kraftstoffverbrauch zu berücksichtigen. Das entsprechende Profil verläuft erwartungsgemäß auf der gesamten Strecke an der oberen Lösungsraumbegrenzung. Im Bildraum, Bild 8.b), werden die Zielgrößen übereinander aufgetragen. Im vorliegenden Fall die Fahrtdauer  $T$  auf der Abszisse und der Kraftstoffverbrauch  $KV$  auf der Ordinate. Hier repräsentiert jedes Geschwindigkeitsprofil einen Punkt. So ist beispielsweise das Zielgrößenwertepaar, das das zeitoptimale Profil erreicht, durch einen grünen Kreis dargestellt. Den entgegengesetzten Extremfall eines Geschwindigkeitsprofils  $v(KV_{min})$  erhält man aus der vollständig verbrauchslastigen Gewichtung. Sein Verlauf und das korrespondierende Zielgrößenwertepaar sind im Urbild- und im Bildraum in blau dargestellt.

Die Menge aller theoretisch realisierbaren Lösungen spannt sich im Bildraum zwischen den Begrenzungen der Zielgrößenwerte auf. Da durch Optimierung bereits die jeweils erreichbaren Minima bekannt sind, müssen in diesem Beispiel noch die Maxima der Zielgrößen ermittelt werden. Diese haben in der praktischen Anwendung keinerlei Bedeutung und dienen hier nur zur Vervollständigung des Beispiels bzw. zur Bestimmung der Ausdehnung des Lösungsraumes. So wird Bild 8.a) noch durch den Geschwindigkeitsverlauf mit dem höchsten Kraftstoffverbrauch und den mit der

längsten Fahrzeit ergänzt. Als Nebeneffekt lässt sich dabei beobachten, dass das für die Fahrtdauer ungünstigste Profil  $v(T_{max})$  nicht notwendigerweise zum geringsten Kraftstoffverbrauch führt. Ebenso hat das Profil mit dem höchsten Kraftstoffverbrauch  $v(KV_{max})$  nicht die geringste Fahrtdauer. Das disqualifiziert beide Profile als mögliche Lösung der Optimierung, unabhängig von der zugrundeliegenden Zielgrößengewichtung. Wie bereits erwähnt, sind in diesem Beispiel zwei optimale Lösungen bereits bekannt. Die Menge aller optimalen Lösungen entspricht der in Bild 8.b) fett hervorgehobenen Lösungsmengenbegrenzung zwischen den beiden extremen Optima (I. und II.). Sie wird auch als Pareto-Front bezeichnet. Die Ausdehnung des Lösungsraumes wird im konkreten Beispiel sowohl durch die Nebenbedingungen aus dem Optimierungsmodell, in dem der technische Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und Geschwindigkeit abgebildet ist, als auch durch die Beschränkungen der zulässigen Fahrzeugzustände im Urbildraum bestimmt.

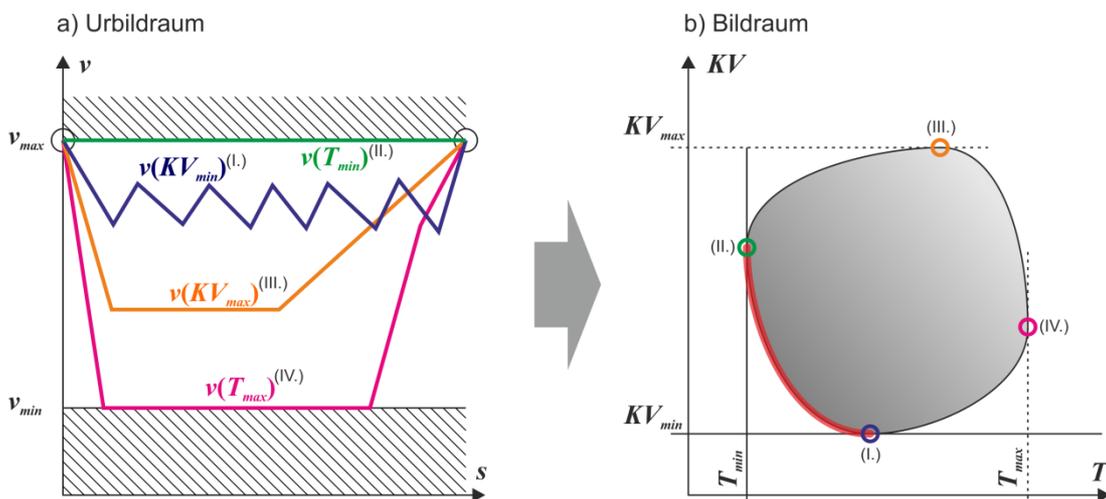


Bild 8: Beispielhafte Darstellung von Urbild- und Bildraum der konkurrierenden Zielgrößen bei der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung

Für multikriterielle Optimierungsprobleme mit konkurrierenden Zielen gibt es verschiedene Lösungsverfahren. Im vorliegenden Fall gibt es zwei konkurrierende Zielfunktionen, die nicht gleichzeitig minimiert werden können. Mit folgenden Methoden kann dies umgangen werden:

- Rangierung der Ziele

Hierbei werden die Ziele zunächst priorisiert und anschließend ihre Zielfunktionen in dieser Reihenfolge minimiert. So würde man bei höherer Priorisierung zunächst den minimalen Kraftstoffverbrauch bestimmen und anschließend, falls es mehrere Geschwindigkeitsprofile gibt, aus denen der Minimalverbrauch resultiert, jenes mit der geringsten Fahrtdauer als Lösung wählen. In obigem Beispiel gibt es jedoch nur jeweils eine Lösung für den Minimal-

verbrauch bzw. die Minimalfahrzeit, so dass bei Anwendung dieser Methode nur zwei Lösungen zur Auswahl stünden.

- $\epsilon$ -Constraint-Methode

Mit dieser Methode wird das ursprüngliche Vektoroptimierungsproblem in ein skalares Optimierungsproblem überführt, in dem man eine der Zielfunktionen beibehält und alle anderen in Nebenbedingungen umwandelt. Die optimale Lösung ist dann das Minimum der Zielfunktion unter der Bedingung, dass keine der oberen Schranken für die andere(n) Zielgröße(n) verletzt wird.

- Elastic-Constraint-Methode

Hier wird das Optimierungsproblem ebenso skaliert. Im Gegensatz zur  $\epsilon$ -Constraint-Methode dürfen die Schranken zwar verletzt werden, jedoch fließt die Höhe der Überschreitung in Form einer Bestrafungsfunktion in die Zielfunktion ein.

- Gewichtete Summe

Auch dieser Methode liegt eine Skalierung des Optimierungsproblems zugrunde. Außerdem bedient man sich hier einer Art kontinuierlich variabler Priorisierung der Ziele. Anders als bei den erstgenannten Methoden der Ziel-Rangierung oder der Beschränkungen muss man sich im vorliegenden Fall nicht zwischen Minimalverbrauch oder Minimalfahrzeit entscheiden, sondern kann durch die Wahl von Zwischengewichtungen prinzipiell auch jede Lösung zwischen den Extrema erreichen.

- Methoden im Bildraum: Utopia-Methode, gleichmäßige Minimierung, spieltheoretischer Kompromiss und Benson-Algorithmus

Hier wird im ersten Schritt der sog. Utopia-Punkt, in Bild 9 als  $P^U$  bezeichnet, bestimmt. Er ergibt sich im vorliegenden Beispiel aus minimalem Verbrauch und minimaler Fahrzeit. Um zu einer zulässigen Lösung zu kommen, kann entweder die betragsmäßig nächstgelegene Lösung gewählt werden oder aber ein Referenzpunkt bestimmt und anschließend der Schnittpunkt der Verbindungsgeraden beider Punkte mit der Pareto-Front als Lösung gewählt werden. Als Referenzpunkte können dabei – je nach Methode – der sog. Nadir-Punkt  $P^1$  oder der Punkt  $P^2$ , der sich aus den jeweiligen Maximalwerten ergibt, dienen. Den Nadir-Punkt erhält man aus den zum Utopia-Punkt korrespondierenden Werten für die jeweils andere Zielgröße. Im Benson-Algorithmus wird ein ähnliches Prozedere mehrfach wiederholt, bis ein Abbruch-Kriterium erfüllt ist.

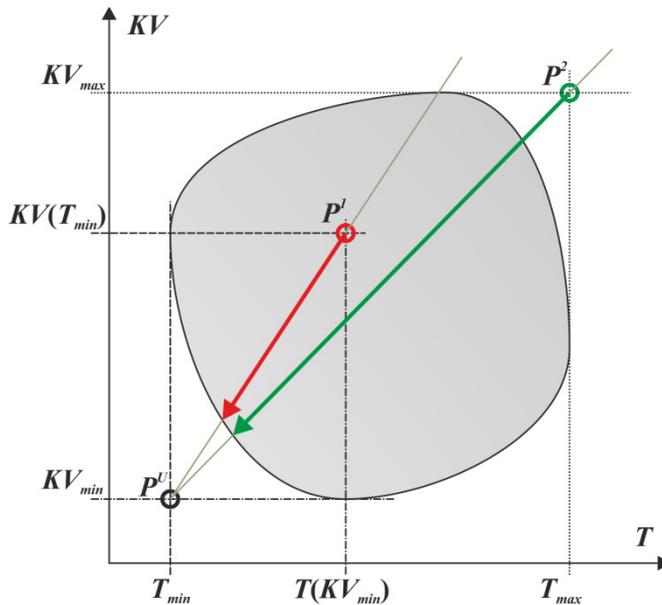


Bild 9: Beispielhafte Darstellung von Mehrziel-Optimierungsmethoden im Bildraum

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich weder die Rangierungsmethode noch eine der Constraint-Methoden für die vorliegende Aufgabenstellung eignen. Denn jede dieser Methoden setzt eine exklusive bzw. binäre Fokussierung auf ein Ziel voraus, Unterschiede bestehen lediglich in der Art der Berücksichtigung nachrangiger Ziele. Die Bildraum-Methoden eignen sich zwar zur Umwandlung in ein skalares Optimierungsproblem. Jedoch können auch hier verschiedene Lösungen nur durch Variation der Fußpunkte erreicht werden. Als einzige Methode, bei der alle Lösungen auf der Pareto-Front erreicht werden können, bleibt also die Skalierung des Optimierungsproblems durch die Verwendung einer gewichteten Summe.

Nachdem nun die Zielgrößen sowie die Lösungsmethode gewählt sind, wird die zu minimierende Zielfunktion

$$F(T, KV) = g_T \cdot T + g_{KV} \cdot KV \xrightarrow{!} \min, \quad g_T, g_{KV} \in [0,1] \quad (4.1)$$

bestimmt. Die Gewichtungsfaktoren  $g_{KV}$  und  $g_T$  sollen in der Relation

$$g_{KV} = 1 - g_T \quad (4.2)$$

zueinander stehen. Da die gewichtete Summe eine lineare Zielfunktion ist, wird sie im Bildraum als Gerade dargestellt. Alle auf der Geraden liegenden Lösungen haben den gleichen Zielfunktionswert, es handelt sich also um eine Indifferenzlinie. Ihre Steigung erhält man mit

$$F(T, KV) = g_T \cdot T + g_{KV} \cdot KV \quad (4.3)$$

$$\Leftrightarrow KV = -\frac{g_T}{g_{KV}} \cdot T + \frac{F(T, KV)}{g_{KV}}$$

aus der Relation der Gewichtungsfaktoren. Mit der Parallelverschiebung der Indifferenzlinie in Richtung Pareto-Front sinken die Zielfunktionswerte. Die Indifferenzlinien für verschiedene Zielfunktionswerte werden in Bild 10 mit Geraden gekennzeichnet. Die optimale Lösung liegt genau an dem Punkt (Raute in Bild 10), wo die Indifferenzlinie gerade noch die Pareto-Front tangiert. Bei einer weiteren Verschiebung in Richtung des Ursprungs würden keine zulässigen Lösungen mehr erreicht werden. Durch Variation der Gewichtungsfaktoren ändert sich die Steigung der Indifferenzlinie. Das ist in Bild 10 für die Fälle einer zeit- und einer verbrauchslastigeren Gewichtung durch die gestrichelten Linien dargestellt. Dementsprechend erhielte man auch eine andere optimale Lösung als bei der ausgewogenen Gewichtung. Durch extreme Gewichtungen (vollständig zeit- bzw. vollständig verbrauchsoptimal) stünde die Indifferenzlinie senkrecht bzw. waagerecht, die dementsprechenden Optima werden in Bild 10 durch die Kreise markiert.

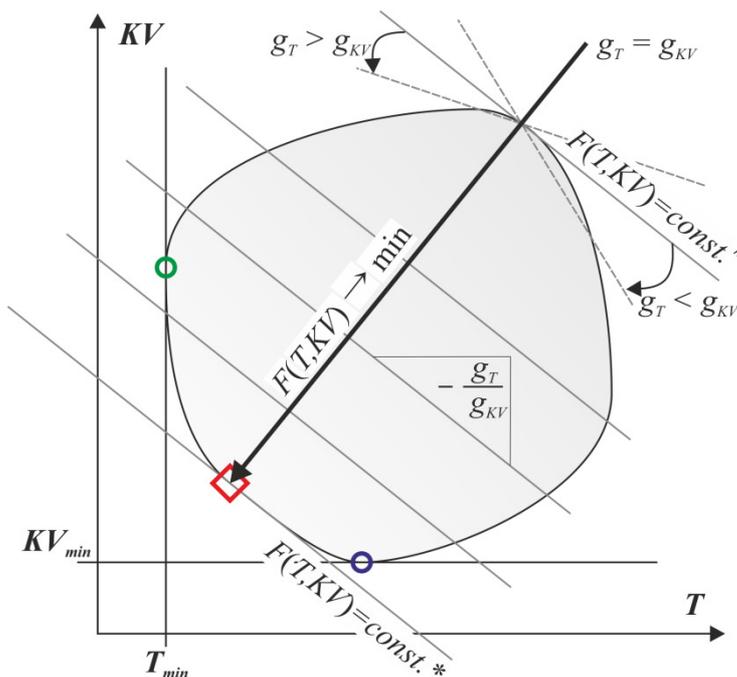


Bild 10: Beispielhafte Lösung eines Mehrziel-Optimierungsproblems mit der gewichteten Summe

Wie sich bei den Ausführungen in Abschnitt 4.3.2 gezeigt hat, ist das Optimierungsproblem im vorliegenden Fall nichtlinear. Aus der Anwendung der Optimierung im Rahmen des FAS für vorausschauendes Fahren ergibt sich die Anforderung, dass die Berechnungen in mehrfacher Echtzeit sicher zum globalen Optimum konvergieren müssen. Außerdem sollte die Größe des Optimierungsproblems beispielsweise zur Bestimmung der geeigneten Länge des Vorausschau-Horizonts in eindeutiger Weise mit der Größe des Lösungsraumes korrelieren. Wie sich diese Anforderungen auf die

Wahl eines Berechnungsverfahrens zur Lösung des Optimierungsproblems auswirken, wird im Kapitel 5 behandelt. Eine Beschreibung der Adaption der allgemeinen Berechnungsvorschriften auf die vorliegende Anwendung in der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung erfolgt in Kapitel 6.

## 5. Auswahl des Optimierungsverfahrens

Das in Abschnitt 4.3.3 beschriebene Optimierungsproblem muss unter Berücksichtigung der Anforderungen, die sich aus dem Einsatz für die vorausschauende Geschwindigkeitsprofilplanung ergeben, gelöst werden. Das Lösungsverfahren muss also

- eine deterministische Rechenzeit haben,
- echtzeitfähig sein,
- sicher konvergieren und
- die global optimale Lösung liefern.

### 5.1. Charakterisierung des Optimierungsproblems

Wie in Abschnitt 4.3.3 dargelegt, soll die linear formulierte Zielfunktion (4.1) minimiert werden. Dennoch liegt ein nichtlineares Optimierungsproblem vor, da sich die Begrenzung des Lösungsraumes aus nichtlinearen Nebenbedingungen. Zudem sind sowohl der Zusammenhang zwischen der Zielfunktion und den Geschwindigkeitsprofilen  $v(s)$  als auch das Verbrauchsmodell nichtlinear. Der Lösungsraum enthält beliebig viele Geschwindigkeitsprofile, die auch als  $T(v(s))$ - $KV(v(s))$ -Kombinationen mit entsprechender Ausprägung im Urbildraum betrachtet werden können. So ergibt sich der Lösungsraum durch die unendlich große Menge aller realisierbaren Geschwindigkeitsprofile, die dementsprechend ein kontinuierliches Gebiet im Bildraum bilden.

Im vorliegenden Fall besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen einem Geschwindigkeitsprofil und seinem Zielgrößenerfüllungswert. Jedoch kann in der Regel nicht von einem vorgegebenen Punkt in der Lösungsmenge auf ein eindeutiges Geschwindigkeitsprofil geschlossen werden. Der Zusammenhang zwischen Urbild- und Bildraum ist daher nicht umkehrbar eindeutig.

Hinzu kommt, dass der Lösungsraum nicht durch einfache Funktionen beschrieben werden kann, sondern vielmehr beliebig nichtlinear ist. Durch die fehlende Möglichkeit, die Struktur des Lösungsraumes in einfacher Weise zu charakterisieren, ist der Einsatz von herkömmlichen Optimierungsverfahren, die direkt zur Minimierung bzw. Maximierung einer Funktion dienen, ineffizient. Durch die sehr hohe Zahl lokaler Minima kann die Forderung, in angemessener Zeit garantiert ein globales Optimum zu finden, nicht erfüllt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall hängen die Zielfunktionswerte  $T$  und  $KV$  von einer Funktion  $v(s)$  ab, so dass ein Funktional minimiert werden muss.

In Anbetracht der vorgenannten Eigenschaften des mathematischen Ersatzmodells können die kontinuierlichen Methoden der linearen und nichtlinearen Optimierung

nicht zur Lösung des vorliegenden Problems verwendet werden. Im Bereich der kombinatorischen Optimierung jedoch gibt es einige diskrete Methoden, die Lösungsmöglichkeiten für derartige Aufgaben bieten.

## 5.2. Kombinatorische Optimierung

Die Kombinatorik lässt sich zur Lösung diskreter Optimierungsaufgaben verwenden. Aus einer endlich großen Menge diskreter Elemente soll – ggf. unter Einhaltung von Nebenbedingungen – eine Teilmenge konstruiert werden. Jede zulässige Kombination der einzelnen Elemente stellt eine mögliche Lösung dar, die anhand einer Zielfunktion bewertet werden kann. Dabei ist die optimale Lösung die mit dem besten Zielfunktionswert.

Häufig sind kombinatorische Optimierungsprobleme NP-schwer [29], d.h. in nichtdeterministisch polynomieller Rechenzeit lösbar. Der simpelste Algorithmus zur Lösung kombinatorischer Probleme ist die vollständige Enumeration. Dabei werden einfach alle zulässigen Lösungen gebildet. Im Anschluss werden all ihre Zielfunktionswerte verglichen, um dann die mit dem besten auszuwählen. Diese Methode garantiert zwar, dass ein globales Optimum gefunden wird. Jedoch wächst die Rechenzeit stärker als polynomial mit der Größe des Optimierungsproblems. Daher ist die vollständige Enumeration nur für sehr kleine Probleme geeignet. Um die Berechnungsdauer einzuschränken, gibt es hauptsächlich zwei unterschiedliche Ansätze.

Liegen einige Informationen über die Struktur des Optimierungsproblems vor, können hierzu beispielsweise Heuristiken oder Meta-Heuristiken eingesetzt werden. Mit ihnen können zwar recht schnell Lösungen gefunden werden. Ihr Nachteil jedoch ist, dass die optimale Lösung nicht notwendigerweise auch das globale Optimum ist. Sie haben außerdem die Gemeinsamkeit, dass sie eine vorgegebene Initiallösung verbessern. Somit hängt die Qualität des Resultats jeweils von der Qualität der vorgegebenen Startlösung ab. Beispiele für heuristische Lösungsmethoden sind die lokale Suche, die simulierte Abkühlung oder die Tabu-Search [29].

Die lokale Suche erfordert neben der Vorgabe einer Startlösung eine vordefinierte Nachbarschaft, innerhalb derer durch schrittweise Variation der Startlösung weitere Lösungen gesucht werden. Alle so entstehenden neuen Lösungen werden im Vergleich mit ihren jeweiligen Vorgängern bewertet. Abschließend wird die beste Lösung innerhalb der Nachbarschaft als Optimum ausgewählt [30]. Ergebnis ist immer ein lokales Optimum. Das globale Optimum wird nur gefunden, wenn die Startlösung und die Nachbarschaft so gewählt werden, dass es auch das lokale Optimum ist.

Die simulierte Abkühlung (auch bekannt als „simulated annealing“) bietet gegenüber der lokalen Suche den Vorteil, dass nicht ausschließlich lokale Optima gefunden werden. Die Namensgebung rührt hier von der thermischen Behandlung von Metallen her, die als Inspiration für das Optimierungsverfahren diente. In einem metalli-

schen Bauteil entwickeln sich unter Lasteinwirkung innerhalb der Kristallstruktur Spannungen unterschiedlicher Größe. Optimal hinsichtlich der Bruchsicherheit wäre aber ein Zustand, in dem alle kristallinen Bindungen gleich stark belastet wären. Um dies zu erreichen, wird das verformte Bauteil so stark erhitzt, dass sich die Kristallstruktur auflöst. Bei der anschließenden langsamen Abkühlung erfolgt die Restrukturierung des Kristallgitters so, dass ein Zustand minimaler Energie erreicht wird, der wiederum impliziert, dass alle Bindungen gleichmäßig belastet sind. Analog zum Absinken der Temperatur im Metall werden im Verlauf der Konvergenz zum Optimum auch schlechtere Zustände als Zwischenlösungen akzeptiert. Daher können – anders als bei der lokalen Suche – lokale Optima überwunden werden [30].

Die Tabu-Search ist der lokalen Suche ähnlich, kann aber ebenfalls lokale Optima überwinden. Bei der Variation der Initiallösung im Optimierungsverlauf wird außerdem eine Tabu-Liste berücksichtigt. Sie kann sowohl bestimmte Variationszüge wie auch Attribute der Zwischenlösungen enthalten, die dann im Optimierungsverlauf ausgeschlossen werden [31].

Alternativ dazu gibt es andere Verfahren, die garantiert eine global optimale Lösung liefern. Hier wird die Berechnungsdauer durch eine sukzessive Einschränkung des Lösungsraumes nach bestimmten Kriterien reduziert. Beispiele für derartige Optimierungsmethoden sind Branch-and-Bound bzw. Branch-and-Cut-Verfahren, aber auch einige Greedy-Algorithmen.

Der Begriff „Branching“ (= Verzweigung) bezeichnet die Aufspaltung des gesamten Optimierungsproblems in mehrere Teilprobleme, also die Gruppierung von Zweigen. Die Bounds (= Schranken) dienen der frühzeitigen Erkennung von Zweigen, die auf suboptimale Lösungen führen. Sie werden im weiteren Verlauf der Optimierung nicht mehr betrachtet, der Berechnungsaufwand wird reduziert [32]. Das Branch-and-Cut-Verfahren kombiniert Branch-and-Bound- mit dem Schnittebenenverfahren. Dabei wird der Lösungsraum mit dem Schnittebenenverfahren so weit eingegrenzt, bis entweder die optimale Lösung gefunden ist oder keine weiteren Schnittebenen hinzugefügt werden. In letzterem Fall wird das Problem mit dem Branch-and-Bound-Verfahren weiter bearbeitet, bis das Optimum erreicht ist.

Die Gruppe der Greedy-Algorithmen („greedy“ = „gierig“) trägt ihren Namen aufgrund der Kriterien, nach denen sie die Betrachtungs-Reihenfolge der Knoten des Graphen erstellen. Im Verlauf der Optimierung wird immer der Knoten als nächstes betrachtet, der entsprechend der im jeweiligen Algorithmus hinterlegten Bewertungsvorschriften mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zum optimalen Kantenzug gehört. Einige Vertreter dieser Gruppe werden in Abschnitt 5.2.3 kurz beschrieben.

Einen Überblick über die vorbeschriebenen (meta-)heuristischen Verfahren gibt auch [33], wo sie hinsichtlich ihrer Eignung für die Lösung einer kombinatorischen Optimierungsaufgabe zur Disposition im Schienenverkehr diskutiert werden. Außerdem werden dort noch weitere, hier nicht aufgeführte Verfahren betrachtet.

### 5.2.1. Graphentheorie und typische kombinatorische Optimierungsprobleme

Die wichtigste Grundlage zur Beschreibung kombinatorischer Optimierungsprobleme ist die Graphentheorie. Hier soll ein Überblick über Grundbegriffe gegeben werden, Details können beispielsweise in [34] oder [35] nachgelesen werden.

Ein Graph besteht aus mindestens zwei Knoten und mindestens einer Kante, die eine Verbindung zwischen zwei Knoten bildet. Der Grad eines Knotens bezeichnet die Anzahl der Kanten, die in ihm münden. Kanten können gerichtet und ungerichtet sein sowie mit Gewichten versehen werden. Der Begriff Kantenzug wird für eine zusammenhängende Folge von Kanten verwendet. Ein sog. Weg ist der Spezialfall eines Kantenzuges, bei dem im Verlauf des Zuges kein Knoten zweimal besucht wird. Ein kreisfreier zusammenhängender Graph wird als Baum bezeichnet.

Ein Graph ist zusammenhängend, wenn von jedem beliebigen Knoten ein Kantenzug zu jedem beliebigen anderen Knoten des Graphen gebildet werden kann. Von einem kreisfreien Graphen wird gesprochen, wenn kein Knoten als Start- und Endpunkt eines geschlossenen Rundweges dienen könnte.

Bevor bestimmt werden kann, wie die vorliegende Aufgabenstellung mit dem Methoden der Graphentheorie modelliert werden kann, sollen die wichtigsten Arten von graphentheoretischen Problemen kurz skizziert werden.

**Minimal aufspannende Bäume** (kurz: MST = Minimal Spanning Tree) zeichnen sich dadurch aus, dass eine Menge von Knoten so mit Kanten verbunden wird, dass die Summe aller Kantengewichte möglichst klein ist. Häufig wird zur Erläuterung das Beispiel eines Leitungsnetzes für Telefonanschlüsse verwendet, bei dem alle Endgeräte mit möglichst kurzer Gesamt-Leitungslänge mit einer Zentrale verbunden werden sollen.

**Matchings** sind Lösungen für Zuordnungsprobleme, bei denen die Elemente einer Menge von Angeboten jeweils den Elementen einer weiteren Menge von Nachfragern zugewiesen werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die Zuordnung verschiedener offener Arbeitsstellen zu einer Menge von Bewerbern, wobei die Präferenzen der Bewerber sowie ihre Eignung für die jeweilige Stelle berücksichtigt werden können. Hierbei entsteht eine Vielzahl nicht zusammenhängender gewichteter Graphen, die aus je zwei Knoten mit dem Grad 1 bestehen. In ihrer Summe sollen sie einen optimalen (minimalen) Zielfunktionswert erreichen.

**Netzwerk-Fluss-Probleme** (kurz: NFP) sind Aufgabenstellungen, bei denen eine bestimmte Menge eines Gutes von einem bestimmten Start- zu einem bestimmten Endknoten transportiert werden soll. Die Kantengewichte geben in diesem Fall die Kapazität der Verbindung zwischen zwei Knoten an. Sie entspricht der Menge des Gutes, die in einer Zeiteinheit zwischen den beiden Knoten transportiert werden

kann. Ein häufig verwendetes Beispiel ist der Transport von Rohöl von der Quelle zur Senke durch ein Netz von Pipelines mit unterschiedlichen Durchmessern.

Das **Travelling-Salesman-Problem** (kurz: TSP) hat das Ziel, jeden Knoten in einem Graphen einmal zu besuchen. Die optimale Tour ist der Kantenzug mit der geringsten Gesamtlänge bzw. der geringsten Summe aller Kantengewichte.

Das **Kürzeste-Wege-Problem** (kurz: KWP) beschreibt den Weg von einem bestimmten Start- zu einem bestimmten Endknoten mit der minimalen Summe der Gewichte aller beteiligten Kanten. Diese Graphen können optional auch gerichtet sein. Neben den SSSP-Problemen (= Single-Source Shortest Path) werden teilweise auch APSP-Probleme (= All-Pairs Shortest Path) betrachtet. Bekannte Lösungsverfahren für SSSP sind der Dijkstra- bzw. der FIFO-, der Bellman-Ford- und der A\*-Algorithmus. APSP-Probleme können mit dem Floyd-Warshall- oder dem Min-Plus-Matrixmultiplikations-Algorithmus gelöst werden. Die Abgrenzung zwischen dem NFP und dem KWP ist einerseits darin zu sehen, dass das Objekt, das beim KWP vom Start- zum Endknoten transportiert werden soll, dimensionslos ist. Beim NFP hingegen ist die Größe des Objektes bzw. Gutes relevant. Andererseits besteht ein weiterer Unterschied in der Interpretation der Kantengewichte. Beim NFP benennen sie die Kapazität des Teilweges, während sie beim KWP der Länge des Teilweges entsprechen.

### 5.2.2. Graphentheoretische Darstellung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung

Um die vorliegende Optimierungsaufgabe mit den Methoden der Kombinatorik bearbeiten zu können, muss sie zunächst als Graph dargestellt werden. Neben der Zielgrößengewichtung sind die hier relevanten vorgegebenen Größen die Fahrtroute und der Bereich der möglichen Fahrzeuggeschwindigkeiten entlang der Strecke, wie nochmals in Bild 11 dargestellt.

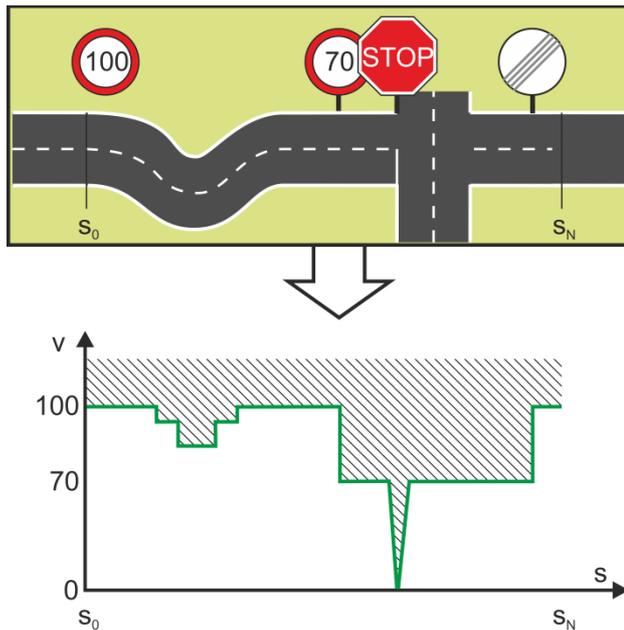


Bild 11: Lösungsraum der vorausschauenden Geschwindigkeitsprofil-Optimierung

Die Informationen Weg und Geschwindigkeit beschreiben den Fahrzeugzustand und müssen diskretisiert werden. Ein Knoten entspricht somit einem Fahrzeugzustand. Entlang der Route muss es eine gewisse Anzahl an Streckenpunkten geben, die als Weg-Stützstellen dienen. An jeder Stützstelle wiederum gibt es mehrere mögliche Geschwindigkeiten. Wie in Bild 12 exemplarisch für einen Teilbereich dargestellt, ergibt sich so ein Netz von Weg-Geschwindigkeits-Knoten über den gesamten Lösungsraum.

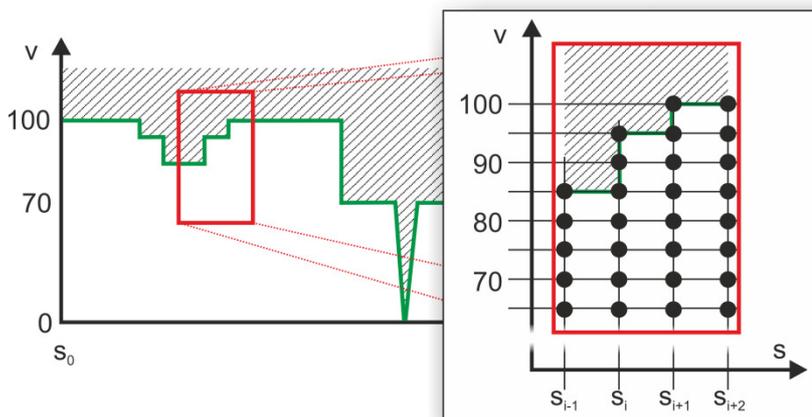


Bild 12: Diskretisierung durch Bildung von Geschwindigkeitsknoten auf Wegstützstellen

Neben der Bildung von Knoten erfordert die Modellierung eines Graphen auch die Erstellung von Kanten. Zur Verdeutlichung der folgenden Überlegungen sind die Knoten aus obigem Beispiel in Bild 13 nochmals isoliert dargestellt. Im vorliegenden Anwendungsfall muss dabei gelten, dass alle Knoten ausschließlich mit Knoten auf

der vorigen und der nachfolgenden Wegstützstelle verbunden werden dürfen. Zwischen Knoten, die auf der gleichen Wegstützstelle liegen, darf keine Verbindung bestehen. Andernfalls würde das in der praktischen Anwendung bedeuten, dass ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit ändern könnte, ohne sich dabei zu bewegen. Ebenso wenig dürfen direkte Verbindungen zwischen Knoten zweier nicht direkt benachbarter Wegstützstellen gezogen werden, da keine Wegstützstelle im Lösungsraum übersprungen werden kann. Vielmehr ist bei jeder Lösung des Optimierungsproblems jeder Stützstelle eine Geschwindigkeit zuzuordnen. Um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu wahren, sind diese Regeln in Bild 13 für einen ausgewählten Knoten auf der Stützstelle  $s_i$  skizziert. Die Reihenfolge, in der das Fahrzeug die Wegstützstellen passiert, ist durch die Fahrtroute festgelegt. Daher müssen alle Kanten im Graph gerichtet sein. Außerdem dürfen die in einem Knoten entspringenden Kanten nur auf Knoten der unmittelbar folgenden Wegstützstelle führen. Analog dazu dürfen Kanten, die in dem Knoten münden, ausschließlich aus Knoten auf der unmittelbar vorangehenden Stützstelle entspringen.

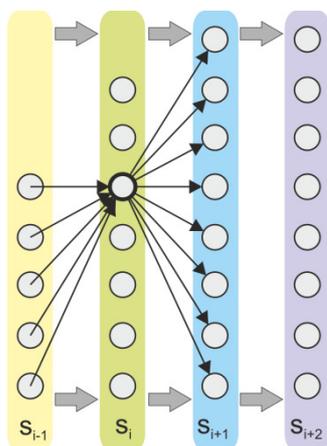


Bild 13: Modellierung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung als Graph (1/3)

Der Knotengrad ist in diesem Anwendungsfall zunächst einmal unbeschränkt. Einschränkungen bei der Erstellung der Kanten ergeben sich aus Fahrzeugcharakteristika sowie aus Sicherheits- und Komfortbedingungen. Details zur Bestimmung dieser maximalen und minimalen Beschleunigungen werden im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt.

Zur Vervollständigung des Graphen müssen alle Kanten mit Gewichten versehen werden. In Bezug auf die praktische Anwendung entspricht jede Kante der Realisierung einer Geschwindigkeitsdifferenz über die Distanz zwischen zwei Wegstützstellen. Im Hinblick auf die Zielgrößen verursacht dies Kosten. Diese sind gemäß der in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 formulierten Skalarisierung der Ziele und der daraus resultierenden Zielfunktion zu berechnen. Auch hier sei bezüglich der genauen Vorgehensweise auf den Abschnitt 5.3.2 verwiesen.

Nachdem nun die Aufgabenstellung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung mit den Methoden der Graphentheorie modelliert wurde, soll sie einem der oben be-

beschriebenen kombinatorischen Grundprobleme zugeordnet werden, um dann im nächsten Schritt die infrage kommenden Lösungsalgorithmen zu bestimmen.

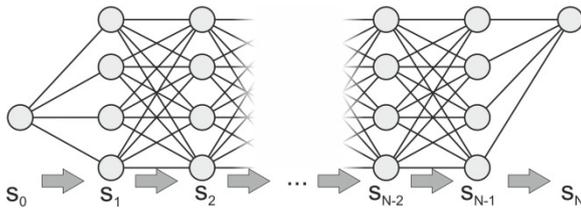


Bild 14: Modellierung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung als Graph (2/3)

Bild 14 zeigt nochmals ein abstrahiertes Beispiel eines Graphen, dessen Knoten die Fahrzeugzustände entlang einer Strecke beschreiben. Wie zuvor erwähnt, ist der Graph gerichtet, die Stützstellen werden in vorher festgelegter Reihenfolge nacheinander passiert. Um die Übersichtlichkeit der Darstellung zu wahren, wurden die Kanten nicht als Pfeile dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass sowohl am Anfang wie auch am Ende der Strecke, also an den Wegstützstellen  $s_0$  und  $s_N$ , jeweils nur ein Zustand möglich ist. Das resultiert aus der Prämisse, dass die Start- und Endgeschwindigkeit des Fahrzeugs bei der Optimierung festgelegt sein sollen. Des Weiteren ist festzustellen, dass an allen anderen Stützstellen jeweils nur ein Zustand eingenommen werden kann. Ein Fahrzeug kann nicht zur selben Zeit verschiedene Geschwindigkeiten haben. Resultat der Optimierung soll, wie in Bild 15 dargestellt, also ein Kantenzug vom Start- zum Endknoten sein, der die minimale Gesamtsumme aller Kantengewichte bietet. Bei der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung steht die Knotenanzahl im Kantenzug von vornherein fest, da sie der Anzahl der Wegstützstellen entsprechen muss.

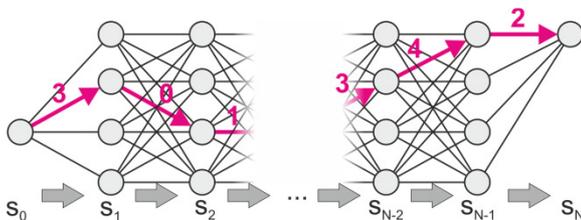


Bild 15: Modellierung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung als Graph (3/3)

Verglichen mit den in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen typischen kombinatorischen Optimierungsproblemen entspricht die hier zu bearbeitende Aufgabenstellung am ehesten der des Kürzeste-Wege-Problems. Da der A\*-Algorithmus ein heuristisches Verfahren ist und daher nicht das Auffinden der global-optimalen Lösung garantiert, kommen noch der Dijkstra-, der FIFO- und der Bellman-Ford-Algorithmus als Lösungsverfahren in Frage. Diese sind auf SSSP-Probleme zugeschnitten, bei denen – ausgehend von einem bestimmten Startknoten – kürzeste Wege zu allen anderen Knoten des Graphen bestimmt werden. Hier genügt ein Teil der vollständigen Lösung des SSSP-Problems, da letztlich nur der kürzeste (bzw. kostenminimale) Weg zum vordefinierten Endknoten gesucht wird.

### 5.2.3. Lösungsverfahren Dijkstra-, FIFO- und A\*-Algorithmus

Im Folgenden werden der Dijkstra-, der FIFO- und der A\*-Algorithmus in Anlehnung an [35](S. 72 ff.) kurz beschrieben. Sie gehören zur Gruppe der Greedy- bzw. Baum-Algorithmen und unterscheiden sich hauptsächlich durch die Reihenfolge, in der die einzelnen Knoten des gewichteten und gerichteten Graphen betrachtet werden. Daher sollen zunächst einige allgemeingültige Vorüberlegungen getroffen werden:

- $s_0$  sei der Startknoten.
- Der Graph besteht aus insgesamt  $n$  Knoten.
- $D[i]$  gibt den kostenminimalen Weg von  $s_0$  zum Knoten  $i$  an.
- $R[i]$  bezeichnet den unmittelbaren Vorgänger-Knoten auf dem Weg von  $s_0$  zu  $i$ .
- $MK$  sei die Menge markierter Knoten.
- $c_{hj}$  bezeichne das Gewicht der Kante vom Knoten  $h$  auf seinen unmittelbaren Nachfolger  $j$

Zu Beginn des jeweiligen Iterationsverfahrens ist  $s_0$  das einzige Element in  $MK$ . Außerdem gilt zu diesem Zeitpunkt  $D[s_0]=0$  und  $D[i]=\infty$  für alle  $i \neq s_0$

Bei einer Iteration ist ein Knoten  $h$  aus  $MK$  auszuwählen. Falls  $D[h]+c_{hj} < D[j]$ , so wird  $j$  ein Element von  $MK$ . Beim Dijkstra-Algorithmus wird derjenige Knoten  $h$  aus  $MK$  gewählt, der den kostenminimalen Weg von  $s_0$  aufweist. Im Gegensatz dazu ist das Auswahlkriterium beim FIFO-Algorithmus (FIFO=First-In-First-Out) die Reihenfolge, in der die einzelnen Elemente in  $MK$  gelangt sind. Dementsprechend wird jener Knoten ausgewählt, der zuerst in  $MK$  hinterlegt wurde. Anschließend werden alle Nachfolger-Knoten  $j$  nacheinander wie folgt geprüft: Falls die Bedingung  $D[h]+c_{hj} < D[j]$  erfüllt ist, wird  $D[h]+c_{hj} = D[j]$  und  $R[j]=h$ .  $MK$  wird um  $j$  ergänzt, anschließend wird  $h$  aus  $MK$  entfernt. Die Iterationen enden, sobald  $MK$  leer ist. Der A\*-Algorithmus ist eine Erweiterung des Dijkstra-Algorithmus und verwendet zur Sortierung von  $MK$  eine zusätzliche Abschätz-Funktion, die zu einer weiteren Reduktion der Berechnungsdauer führen kann. Diese Funktion ist zwar heuristisch, jedoch bleibt das Verfahren nach Dijkstra erhalten und damit auch die garantierte Konvergenz zum globalen Optimum.

### 5.2.4. Lösungsverfahren Bellman-Ford-Algorithmus / dynamische Programmierung

Der Bellman-Ford-Algorithmus ist die Grundlage der dynamischen Programmierung (wird teilweise auch als „dynamische Optimierung“ bezeichnet). Sie dient der Lösung mehrstufiger Entscheidungsprobleme. Dazu wird eine Folge jeweils voneinander unabhängiger Entscheidungen bestimmt, die die optimale Lösung des Gesamtproblems darstellt [35](S. 159 ff.). Üblicherweise wird die dynamische Programmierung zur Lösung von Bestellmengen- und Knapsack-Problemen, aber auch für Kür-

zeste-Wege-Probleme – wie auch hier eines vorliegt – angewendet. Letzteres erfordert einen topologisch sortierten Graphen, bei dem feststeht, in welcher Reihenfolge seine Knoten besucht werden müssen. Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 festgestellt wurde, ist diese Bedingung hier durch die Vorgabe der Fahrtroute erfüllt.

Zur Anwendung der dynamischen Programmierung beim KWP müssen sowohl ein Anfangs- als auch ein Endzustand (bzw. -knoten) definiert werden. Die Nummer der Entscheidungs-Stufe, auf der sich einer der übrigen Knoten  $i$  befindet, ergibt sich aus der Anzahl der Kanten des längsten Weges vom Anfangsknoten zum Knoten  $i$ . Zur allgemeinen Erläuterung der dynamischen Programmierung soll hier die Notation aus [35] verwendet werden:

$n$	<b>Anzahl der Stufen</b> , in die der Entscheidungsprozess zerlegt werden kann.
$z_k$	<b>Zustandsvariable</b> zur Wiedergabe des Zustands, in dem sich das betrachtete Problem oder System am Ende der Stufe $k$ befindet.
$Z_k$	<b>Menge aller Zustände</b> , in denen sich das System am Ende der Stufe $k$ befinden kann.
$z_0 = \alpha$	Vorgegebener <b>Anfangszustand</b> .
$Z_n$	Menge möglicher bzw. vorgegebener <b>Endzustände</b> .
$x_k$	<b>Entscheidungsvariable</b> zur Charakterisierung der Entscheidung in Stufe $k$ .
$X_k(z_{k-1})$	<b>Menge aller Entscheidungen</b> , aus denen in Stufe $k$ ausgehend vom Zustand $z_{k-1}$ gewählt werden kann.
$t_k(z_{k-1}, x_k)$	<b>Transformationsfunktion</b> zur Beschreibung des Zustandes $z_k$ , in den das System in Stufe $k$ übergeht, wenn es sich am Ende von Stufe $k-1$ im Zustand $z_{k-1}$ befindet und die Entscheidung $x_k$ getroffen wird.
$f_k(z_{k-1}, x_k)$	Die <b>stufenbezogene Zielfunktion</b> beschreibt den Einfluss auf den Zielfunktionswert, den die Entscheidung $x_k$ im Zustand $z_{k-1}$ hervorruft.

Ein mehrstufiger Entscheidungsprozess wird durch die dynamische Programmierung sequentiell gelöst, in dem auf jeder Stufe ausschließlich die dort zur Verfügung stehenden Alternativen betrachtet werden. Das mathematische Optimierungsmodell wird, je nachdem, ob es sich um ein Minimierungs- oder ein Maximierungsproblem handelt, durch

$$\min/\max F(x_1, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^n f_k(z_{k-1}, x_k) \quad (5.1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$z_k = t_k(z_{k-1}, x_k) \quad (5.2)$$

$$z_0 = \alpha \quad (5.3)$$

$$z_k \in Z_k \quad (5.4)$$

$$x_k \in X_k(z_{k-1}) \quad (5.5)$$

für  $k = 1, \dots, n$

beschrieben.

Zur Klassifikation von mathematischen Ersatzmodellen, wie sie für die Anwendung der dynamischen Programmierung zu erstellen sind, schlägt [35] folgende Systematik vor:

- Abstände der Stufen
- Informationsgrad über Störgrößen
- Wertigkeit der Zustands- und Entscheidungsvariablen
- Endlichkeit der Mengen  $Z_k$  und  $X_k$

Die Abfolge der Entscheidungsstufen kann im Modell kontinuierlich oder diskret beschrieben werden. Bei der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung sind sie diskret. Störgrößen können stochastisch oder deterministisch auftreten. Hier sind keine Störgrößen vorgesehen, so dass sie als deterministisch zu klassifizieren sind (immer = 0). Die Zustands- und Entscheidungsvariablen können ein- oder mehrwertig sein. Hier werden immer Skalare, also einwertige Variablen, verwendet. Allgemein können die Mengen  $Z_k$  und  $X_k$  sowohl endlich als auch unendlich sein. Im vorliegenden Fall werden beide Mengen bereits im Zuge der Zustandsraumbildung begrenzt, sind also endlich.

Für eine Anwendung der dynamischen Programmierung ist es unerlässlich, dass es sich beim zu lösenden Optimierungsproblem um eine Markov-Kette erster Ordnung

handelt. Das spiegelt sich hier in der stufenbezogenen Zielfunktion wider, da sie nur vom aktuellen Systemzustand und der darauf folgenden Entscheidung abhängt und damit sowohl frühere als auch spätere Zustände keinen Einfluss auf sie haben. Die Knoten des Graphen beschreiben eindeutig die Systemzustände und sind außerdem eindeutig einer Stufe des Gesamtproblems zugeordnet. Die Zustände einer Stufe unterscheiden sich jeweils voneinander, während ein Zustand auf unterschiedlichen Stufen mehrfach auftreten kann. Die Entscheidungen, die die Zustandsübergänge zwischen zwei benachbarten Stufen hervorrufen, und ihre jeweiligen Kosten werden durch gerichtete und gewichtete Kanten repräsentiert. Da die eindeutige Bestimmung eines Anfangszustandes und - zumindest im vorliegenden Fall - eines Endzustandes vorausgesetzt wird, enthalten sowohl die erste als auch die letzte Stufe des Gesamtproblems nur einen Zustand.

Zur Vorbereitung des Optimierungsablaufes ist die Transformationsfunktion (5.2) aufzustellen. In den meisten Optimierungsmodellen sind den Systemzuständen Wertigkeiten zugeordnet. Analog dazu beschreiben die Entscheidungsvariablen  $x_k$  die Änderung dieser Wertigkeiten. In einem solchen Modell würde der Zustandsübergang dann durch

$$z_k = z_{k-1} + x_k - b_k \quad (5.6)$$

ausgedrückt werden. Der Summand  $b_k$  kann optional hinzugefügt werden, um den Einfluss von Störgrößen auf die Zustandsübergänge zu berücksichtigen, falls das Optimierungsproblem dies erfordert.

Die stufenbezogene Zielfunktion

$$f_k(z_{k-1}, x_k) = c(z_{k-1}, x_k) \quad (5.7)$$

entspricht dem Kantengewicht der jeweiligen Entscheidung  $x_k$ . Die Details der Berechnung der Kantengewichte  $c(z_{k-1}, x_k)$  für den vorliegenden Anwendungsfall werden im weiteren Verlauf in Abschnitt 5.3.2 sowie detailliert in den Abschnitten 6.3 und 6.4 beschrieben.

Das Ergebnis der dynamischen Programmierung in einem diskreten, deterministischen Modell ist eine sog. optimale Politik, die das System unter Minimierung der Zielfunktion vom Anfangs- in den Endzustand überführt. Sie besteht aus der Folge der Entscheidungen  $(x_1^*, \dots, x_{k-1}^*, x_k^*, \dots, x_n^*)$ , die zum minimalen Zielfunktionswert führen.

Dabei gilt das Bellman'sche Optimalitätsprinzip. Es besagt, dass bei einer optimalen Politik  $(x_1^*, \dots, x_{k-1}^*, x_k^*, \dots, x_n^*)$ , die die Zustände  $(z_0, \dots, z_{k-1}, z_k, \dots, z_n)$  enthält, auch ein beliebig ausgewählter Teil dieser Optimal-Politik  $(x_a^*, \dots, x_b^*)$  mit  $a, b \in \{1, \dots, n\}$  der optimale Weg ist, das System aus dem Zustand  $z_{a-1}$  in den Zustand  $z_b$  zu überführen.

Die Lösung eines Problems  $P_0(z_0)$  besteht in der Berechnung der optimalen Politik, das System vom Anfangszustand  $z_0$  in den Endzustand  $z_n$  zu überführen. Analog dazu erfolgt beim Problem  $P_{k-1}(z_{k-1})$  die optimale Überführung von  $z_{k-1}$  in  $z_n$ . Der zum Problem gehörige optimale Zielfunktionswert wird mit  $F_{k-1}^*(z_{k-1})$  bezeichnet. Hierbei zeigt  $k \in \{1, \dots, (n-1)\}$  die jeweilige Iterationsstufe an. Die dynamische Programmierung kann sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärts-Rekursion durchgeführt werden. In letzterem Fall beginnt die Iteration mit  $k = n-1$  und endet mit  $k = 1$ . Den optimalen Zielfunktionswert einen Zustand  $z_{k-1} \in Z_{k-1}$  erhält man aus der Bellman'schen Funktionalgleichung zu

$$F_{k-1}^*(z_{k-1}) = \min \left\{ f_k(z_{k-1}, x_k) + F_k^*(z_k = t_k(z_{k-1}, x_k)) \mid x_k \in X_k(z_{k-1}) \right\} \quad (5.8)$$

Im Folgenden wird nun die Vorgehensweise zur Adaption der hier erläuterten theoretischen Grundlagen auf die Geschwindigkeitsprofil-Optimierung dargelegt.

### 5.3. Geschwindigkeitsprofil-Optimierung mit dynamischer Programmierung

Wie im Abschnitt 5.2.2 dargelegt, muss das Problem der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung in Form eines Kürzeste-Wege-Problems mit festgelegtem Startknoten (SSSP-Problem) modelliert werden, um die dynamische Programmierung anzuwenden. Zur eindeutigen und diskreten Beschreibung des Fahrzeugzustandes wurden die Dimensionen Strecke  $s$  und Geschwindigkeit  $v$  gewählt. Die in Abschnitt 5.2.4 eingeführte allgemeine Notation wird wie folgt auf den konkreten Anwendungsfall appliziert werden:

$n$                       **Anzahl der Stufen**, in die der Entscheidungsprozess zerlegt werden kann.

⇒  $n$                       Die Anzahl der Stufen entspricht hier der Anzahl der Wegstützstellen  $s$  auf der zu optimierenden Fahrtroute, zuzüglich ihres Start- und Endpunktes.

$z_k$                       **Zustandsvariable** zur Wiedergabe des Zustands, in dem sich das betrachtete Problem oder System am Ende der Stufe  $k$  befindet.

⇒  $v_k$                       Fahrzeuggeschwindigkeit an der Wegstützstelle  $k$

$Z_k$  **Menge aller Zustände**, in denen sich das System am Ende der Stufe  $k$  befinden kann.

⇒  $V_k$  Die Menge der Fahrzeuggeschwindigkeiten, die an der Stützstelle  $k$  realisierbar sind.

$z_0 = \alpha$  Vorgegebener **Anfangszustand**.

⇒  $v_0$  Vorgegebene Startgeschwindigkeit zu Beginn der Fahrtroute.

$Z_n$  Menge möglicher bzw. vorgegebener **Endzustände**.

⇒  $V_n = v_n$  Analog zur Startgeschwindigkeit soll bei dieser Anwendung zum Ende der Fahrtroute ebenfalls nur eine Fahrzeuggeschwindigkeit zugelassen werden.

$x_k$  **Entscheidungsvariable** zur Charakterisierung der Entscheidung in Stufe  $k$ .

⇒  $\Delta v_k$  Die Entscheidung an der Wegstützstelle  $k$  wird durch die Geschwindigkeitsdifferenz, die auf der Strecke zur folgenden Stützstelle realisiert werden soll, charakterisiert.

$X_k(z_{k-1})$  **Menge aller Entscheidungen**, aus denen in Stufe  $k$  ausgehend vom Zustand  $z_{k-1}$  gewählt werden kann.

⇒  $\Delta V_k(v_{k-1})$  Menge aller Geschwindigkeitsdifferenzen, die an der Stützstelle  $k$  ausgehend von der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_k$  realisiert werden können.

$t_k(z_{k-1}, x_k)$  **Transformationsfunktion** zur Beschreibung des Zustandes  $z_k$ , in den das System in Stufe  $k$  übergeht, wenn es sich am Ende von Stufe  $k-1$  im Zustand  $z_{k-1}$  befindet und die Entscheidung  $x_k$  getroffen wird.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Auf die Verwendung des Formelzeichens „ $t$ “ für die Transformationsfunktion aus der allgemeinen Notation soll im weiteren Verlauf der Arbeit verzichtet werden, um eine Verwechslung mit der Optimierungs-Zielgröße „Fahrzeit“ zu vermeiden.

$\Rightarrow a_k(v_{k-1}, \Delta v_k)$  Die Transformationsfunktion beschreibt hier die Geschwindigkeit  $v_k$ , die das Fahrzeug an der Stützstelle  $k$  erreicht, wenn bei der Stützstelle  $k-1$  ausgehend von der Geschwindigkeit  $v_{k-1}$  die Entscheidung  $\Delta v_k$  getroffen wird. Bezogen auf die allgemeine Formulierung in (5.6) gilt daher

$$v_k = v_{k-1} + \Delta v_k .$$

Beim vorliegenden Optimierungsproblem sind keine Störgrößen zu berücksichtigen.

$f_k(z_{k-1}, x_k)$  Die **stufenbezogene Zielfunktion** beschreibt den Einfluss auf den Zielfunktionswert, den die Entscheidung  $x_k$  im Zustand  $z_{k-1}$  hervorruft.

$\Rightarrow f_k(v_{k-1}, \Delta v_k)$  Die stufenbezogene Zielfunktion bildet die Kosten hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Fahrzeit ab, die die Realisierung einer Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v_k$  aus dem Ausgangszustand  $v_{k-1}$  verursacht.

### 5.3.1. Diskretisierung des Zustandsraumes

Der Zustandsraum wird durch die Größen Strecke und Fahrzeuggeschwindigkeit definiert und muss diskretisiert werden. Durch die Wahl des Diskretisierungsrasters wird die Zahl der Weg-Geschwindigkeits-Knoten bestimmt, die der diesem Optimierungsproblem zugrundeliegende Graph enthält. Das wiederum wirkt sich unmittelbar auf die Komplexität des Problems aus. Je mehr Knoten der Graph enthält, desto länger dauert die Berechnung der optimalen Lösung.

Die Diskretisierung in der Dimension Strecke bestimmt die Anzahl der Optimierungsstufen  $n$ , die bei der dynamischen Programmierung durchlaufen werden müssen. Grundsätzlich sind die Diskretisierungs-Schrittweiten in beiden Dimensionen frei wählbar. Sie müssen nicht notwendigerweise äquidistant sein. Jedoch liegt dies nahe, da dadurch sowohl die algorithmische Bearbeitung des Optimierungsproblems als auch die Berechnung der Kantengewichte stark vereinfacht werden. Analog dazu ergibt sich aus der Schrittweite in der Dimension Fahrzeuggeschwindigkeit die Anzahl der Entscheidungen, die im Verlauf der dynamischen Programmierung gegeneinander abgewogen werden müssen. Grundsätzlich ergibt sich aus einer hohen Knotenzahl neben dem Nachteil der Berechnungsdauer der Vorteil, dass die Resultate bei der Berechnung der Kantengewichte genauer sind. Auch in der globalen Betrachtung über den vollständigen Planungshorizont lässt sich durch eine hohe Auflösung des Optimierungs-Problems die Ergebnisgenauigkeit steigern.

Wie grundsätzlich bei jeglicher Form der Modellbildung gilt auch hier, bei der Abstraktion von der Realität bzw. der Wahl der vereinfachenden Annahmen einen angemessenen Kompromiss zwischen der Berechnungsdauer und der Ergebnisgenauigkeit einzugehen. Wie dieser Kompromiss im Einzelnen zu gestalten ist, lässt sich nicht allgemeingültig festlegen. Vielmehr muss er individuell auf den konkreten Anwendungsfall zugeschnitten sein. Die hierbei relevanten Spezifika der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung sind

- die Beschleunigungsfähigkeit bzw. die längsdynamischen Charakteristika des Fahrzeuges,
- die Länge des Planungshorizontes,
- die Auswirkungen der auf den Berechnungsergebnissen basierenden Entscheidungen und
- die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten.

Obwohl die Diskretisierungs-Schrittweiten in Strecke und Geschwindigkeit prinzipiell unabhängig voneinander gewählt werden können, müssen sie dennoch in einem vernünftigen Verhältnis zueinander stehen. Eine extrem ungünstige Schrittweiten-Kombination wäre beispielsweise ein Abstand von 1 m zwischen zwei benachbarten Wegstützstellen bei einer äquidistanten Geschwindigkeits-Diskretisierung von 10 km/h. Da auf dieser kurzen Strecke derart große Geschwindigkeitsdifferenzen praktisch nie realisierbar sind, würde sich ein Fahrzeug in einer Simulation mit diesem Raster nur mit konstanter Geschwindigkeit durch den Zustandsraum bewegen können. Die diskreten Geschwindigkeiten müssen so feingranular gewählt werden, dass verschiedene Fahrzeugbetriebsarten auf jedem Strecken-Teilstück zwischen zwei Stützstellen vom Modell nachvollzogen werden können. Dies kommt besonders zum Tragen, wenn bei einer Verzögerung zwischen Gleitfahrt (Rollen bei ausgekuppeltem Motor) und Schubetrieb (Rollen mit Motorwiderstand) unterschieden werden soll.

Bei einem Planungshorizont mit einer Länge von mehreren Kilometern sollten die Wegstützstellen so nah beieinander sein, dass ein noch engeres Raster nicht zu deutlichen Verbesserungen bei der Genauigkeit des Gesamtergebnisses führen würde. So würde beispielsweise eine Verdopplung der Stützstellen-Anzahl, die zu einer Erhöhung der Genauigkeit im Prozent-Bereich führen würde, kaum die damit einhergehende Erhöhung der Berechnungsdauer rechtfertigen. Bei der Beurteilung der Berechnungsdauer muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse innerhalb kurzer Zeit vor Fahrtantritt verfügbar sein müssen. Als Vergleichsmarke für eine angemessene Dauer könnte hier die Berechnung der Fahrtroute durch das Navigationssystem herangezogen werden. Außerdem ist zu beachten, dass die im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten stark eingeschränkt sind. Dies gilt besonders im Hinblick auf die eingangs formulierte Anforderung, dass sich die Geschwindigkeitsprofil-Optimierung möglichst in die im Fahrzeug vorhandene informationstechnische Infrastruktur einfügen sollte, ohne Erweiterungen erforderlich zu machen.

Bezüglich der Frage, ob die jeweiligen Schrittweiten über den gesamten Zustandsraum äquidistant sein sollten, steht der Vorteil der einfachen Handhabung im Vordergrund. Eine variierende Schrittweite bei den Wegstützstellen könnte bei Routen mit stark variierender Topologie Vorteile bieten. So wäre beispielsweise wie in Bild 16 skizziert denkbar, dass eine Anhöhe im ungünstigsten Fall genau zwischen zwei Wegstützstellen mit gleichem Höhen-Niveau liegt und daher bei den Berechnungen eine Steigung und das anschließende Gefälle unberücksichtigt blieben. Beim Raster für die Geschwindigkeit könnte vor allem eine Variation in Relation zur absoluten Geschwindigkeit Vorteile einbringen. Konkret würde dies bedeuten, dass die Schrittweite, wie schematisch in Bild 17 dargestellt, bei geringen Geschwindigkeiten kleiner wäre und dann mit steigender Geschwindigkeit vergrößert werden würde. So könnten auch bei gleich bleibender Anzahl von Weg-Geschwindigkeits-Knoten eventuell Verbesserungen bei der Ergebnisgenauigkeit erzielt werden.

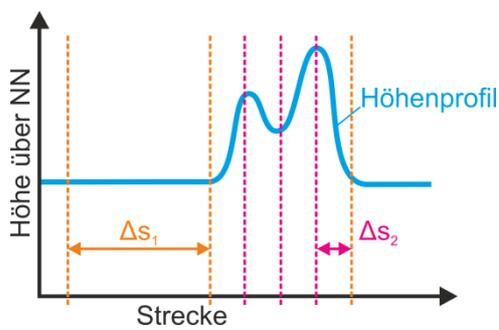


Bild 16: Schrittweiten-Variation bei der Strecken-Diskretisierung

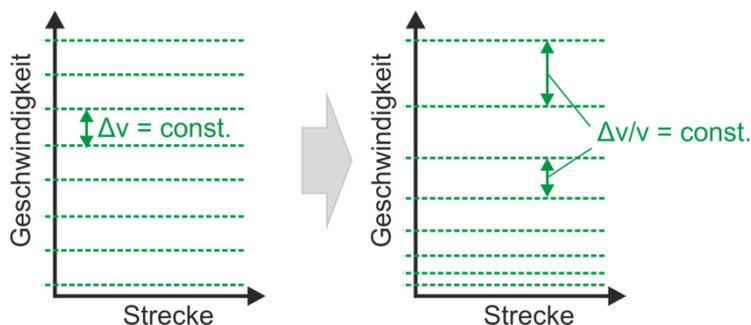


Bild 17: Schrittweiten-Variation bei der Geschwindigkeits-Diskretisierung

Im vorliegenden Fall wurden zur Zustandsraum-Diskretisierung in beiden Dimensionen äquidistante Schrittweiten verwendet, da aus den hier angeführten Möglichkeiten zur Variation relativ geringe Verbesserungen erwartet werden. Sie würden den damit einhergehenden höheren algorithmischen Aufwand nicht aufwiegen. Wie das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand genau ist, wäre im Rahmen weiterer Untersuchungen zu ermitteln.

### 5.3.2. Berechnung der Kantengewichte

Wie im Abschnitt 4.3.2 beschrieben, ist die Zielfunktion des Gesamtproblems das Resultat einer Skalarisierung der beiden Zielgrößen mittels einer gewichteten Summe.

$$F(T, KV) = g_T \cdot T + g_{KV} \cdot KV \stackrel{!}{\rightarrow} \min \quad (5.9)$$

mit  $g_{KV} = 1 - g_T$

Bei der dynamischen Programmierung muss die Bellman'sche Funktionalgleichung

(5.10)

$$F_{k-1}^*(z_{k-1}) = \min \{ f_k(z_{k-1}, x_k) + F_k^*(z_k = t_k(z_{k-1}, x_k)) \mid x_k \in X_k(z_{k-1}) \}$$

auf jeder Stufe des Optimierungsprozesses minimiert werden. Die Lösung des Gesamtproblems ist also ihr Minimum nach Durchlaufen aller Stufen, oder anders formuliert die minimale Summe der stufenbezogenen Zielfunktionen  $f_k(z_{k-1}, x_k)$ . Die Kantengewichte im Graph, der das vorliegende Optimierungsproblem abbildet, repräsentieren daher die stufenbezogenen Zielfunktionswerte für die jeweilige Entscheidung in Abhängigkeit des Ausgangszustandes:

$$f_k(v_{k-1}, \Delta v_k) \quad (5.11)$$

Um die beiden Zielgrößen in der vorgegebenen Relation zueinander innerhalb der einzelnen Stufen des Problems zu berechnen, muss

$$f_k(v_{k-1}, \Delta v_k) = g_T \cdot \Delta t(v_{k-1}, \Delta v_k) + g_{KV} \cdot m_{Kr}(v_{k-1}, \Delta v_k) \quad (5.12)$$

gelten. Daraus geht hervor, dass für jede Entscheidung sowohl die Fahrzeit als auch der Kraftstoffverbrauch zu ermitteln sind. Sie repräsentieren die Kosten, das System bzw. Fahrzeug vom Ausgangs- in den Folgezustand zu transformieren.

Die Darstellung des Systemzustandes in einem durch Weg und Geschwindigkeit definierten Zustandsraum erlaubt keinen Rückschluss auf den zeitlichen Verlauf der Fahrzeuggeschwindigkeit auf einer Teilstrecke zwischen zwei Wegstützstellen. Daher wird an dieser Stelle die Vorgabe eingeführt, dass die Beschleunigung zwischen den Stützstellen als zeitlich konstant

$$a(t) = \text{const.} \quad (5.13)$$

anzunehmen ist. Um zu zeigen, wie sich das System unter dieser Vorgabe im weg-basierten Zustandsraum verhält, soll an dieser Stelle ein einfaches Beispiel dienen. Wie

in Bild 18 qualitativ skizziert, soll das Fahrzeug über eine Strecke von 200 m mit zeitlich konstanter Beschleunigung von der Ausgangsgeschwindigkeit von 20 m/s auf 30 m/s beschleunigt werden. Mit den Parametern

$$v_1 = 20 \frac{m}{s} ; v_2 = 30 \frac{m}{s} ; \Delta s = 200m ; a(t) = const.$$

erhält man also die zeitlich konstante Beschleunigung sowie die Fahrtdauer auf dem Streckenabschnitt aus

$$a(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5.14)$$

und

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{\bar{v}} = \frac{\Delta s}{\frac{v_1 + v_2}{2}} = \frac{2\Delta s}{v_1 + v_2} \quad (5.15)$$

zu

$$a(t) = 1,25 \frac{m}{s^2} ; \Delta t = 8s .$$

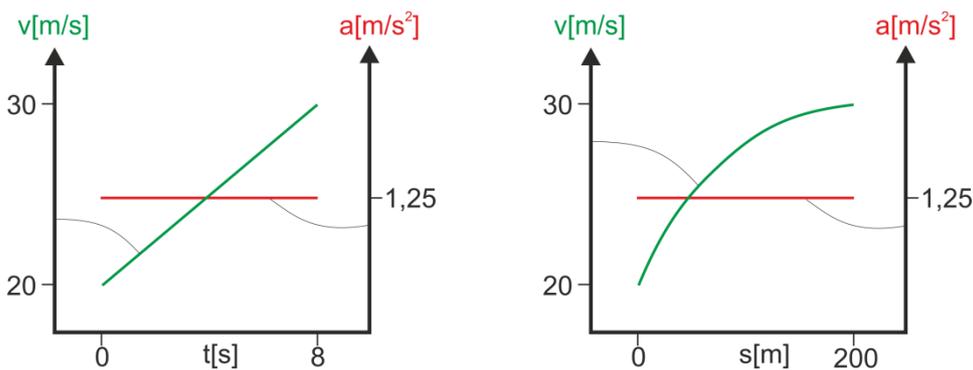


Bild 18: Qualitativer Verlauf der Geschwindigkeit über Zeit und über Strecke

Die Fahrzeit  $\Delta t_k$  als erste Komponente der Zielfunktion ergibt sich unter Kenntnis der Distanz zwischen den Wegstützstellen  $\Delta s_k$  sowie der jeweiligen Geschwindigkeit bei der ersten und der zweiten Stützstelle  $v_{k-1}$  und  $v_k$  zu

$$\Delta t_k = \frac{\Delta s}{\bar{v}_k} = \frac{2\Delta s}{v_{k-1} + v_k} . \quad (5.16)$$

Die zweite benötigte Komponente ist der Kraftstoffverbrauch  $m_{kT}$ . Hier ist die Vorgehensweise aufwändiger als bei der Zeitberechnung. Im ersten Schritt muss eine Fallunterscheidung erfolgen. Alle zur Verfügung stehenden Entscheidungen  $\Delta v_k$  müssen einer von drei möglichen Fahrzeug-Betriebsarten zugeordnet werden. Diese sind

### 1. Antrieb

Zur Realisierung der erforderlichen Geschwindigkeitsdifferenz muss der Motor ein positives Moment an den Antriebsstrang weitergeben. Der daraus resultierende Kraftstoffverbrauch wird modellbasiert berechnet. Details hierzu werden im weiteren Verlauf der Arbeit in Abschnitt 6.4 gesondert beschrieben.

### 2. Gleitfahrt

Zur Realisierung der Geschwindigkeitsdifferenz ist kein Motormoment erforderlich. Das Fahrzeug rollt mit ausgekuppeltem Antriebsstrang, während der Motor im Leerlauf betrieben wird. Der resultierende Kraftstoffverbrauch ergibt sich aus dem Produkt von Kraftstoffmassenstrom im Leerlauf und der Zeit zu

$$m_{Kr,k} = \dot{m}_{Kr,LL} \cdot \Delta t_k . \quad (5.17)$$

### 3. Schubbetrieb

Auch hier erfordert die gewünschte Geschwindigkeitsdifferenz kein positives Motormoment. Das Fahrzeug muss verzögert werden. Daher bleibt der Motor eingekuppelt und gibt ein negatives Moment an den Antriebsstrang ab. Negative Momentanforderungen, die das Motorschleppmoment übersteigen, werden durch einen zusätzlichen Bremsengriff kompensiert. Dabei erfolgt eine Abschaltung der Kraftstoffzufuhr, es wird also kein Kraftstoff verbraucht. Somit gilt in diesem Fall

$$m_{Kr,k} = 0 . \quad (5.18)$$

Grundsätzlich können die beiden Stellgrößen zur Beeinflussung des Kraftstoffverbrauchs, nämlich die Geschwindigkeitsdifferenz sowie die Betriebsart, nicht immer eindeutig einander zugeordnet werden. Speziell ist dies bei Verzögerungsmanövern der Fall, wo sowohl die Gleitfahrt als auch der Schubbetrieb mit jeweils unterstützenden Bremsengriffen als Betriebsart gewählt werden könnten. Zur Vereinfachung des Modells wurde durch die Implementierung einer Betriebsstrategie, die jeder Beschleunigung eindeutig eine Betriebsart zuordnet, eine eindeutige Abhängigkeit geschaffen.

Mit Fahrzeit und Kraftstoffverbrauch sind somit die Variablen der stufenbezogene Zielfunktion bekannt, die Berechnung der Kantengewichte kann erfolgen. Resultat der Diskretisierung mit anschließender Berechnung der Kantengewichte ist ein Graph, der das Optimierungsproblem vollständig beschreibt und die Anwendung der dynamischen Programmierung erlaubt.

Auf weitere Erläuterungen zur Berechnung der entscheidungsabhängigen Kraftstoffverbräuche und der dafür erforderlichen Fallunterscheidung soll an dieser Stelle verzichtet werden. Sie sind im weiteren Verlauf der Arbeit im Unterkapitel 6.3 zu finden.

### 5.3.3. Bewertung der Eignung des Verfahrens

Zu Beginn des Kapitels wurden für die Auswahl des Optimierungsverfahrens vier Kriterien eingeführt, die im speziellen Anwendungsfall der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung eingehalten werden müssen:

- Deterministische Rechenzeit
- Echtzeitfähigkeit
- Sichere Konvergenz
- Global optimale Lösung

Nachdem im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, dass die dynamische Programmierung grundsätzlich zur Lösung dieses Optimierungsproblems verwendet werden kann, muss nun beurteilt werden, ob dabei auch die o.g. Kriterien eingehalten werden.

Die Rechenzeit bzw. die Berechnungsdauer bei der dynamischen Programmierung ist deterministisch und hängt in erster Linie von der Dimension des zugrundeliegenden Graphen ab. Außerdem gibt es anwendungsspezifische Einflüsse auf die Rechenzeit, die speziell bei der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung auftreten. Sie sind besonders im Hinblick auf die Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems wichtig.

Eine Reduktion der Knotenzahl kann bereits vor Beginn der Optimierung durch eine möglichst genaue Beschränkung des Zustandsraumes erreicht werden. Dies geschieht aus globaler Perspektive und basiert auf den allgemein verfügbaren Informationen über die Route. Eine weitergehende Reduktion der Komplexität bzw. Größe des Optimierungsproblems erfolgt aus der fahrzeug-individuellen Betrachtung und unter Berücksichtigung der Realisierbarkeit einzelner Entscheidungen. Hierbei wird die Anzahl der Kanten im Graphen reduziert. Mit jedem Fahrzeugzustand sind individuelle Grenzen hinsichtlich der Beschleunigungsfähigkeit des Fahrzeuges verknüpft. Diese sind in Bild 19 skizziert. Man erkennt dort, dass aus dem Zustand  $v_{k-1}$  die Folgezustände oberhalb der Maximal-Beschleunigung  $a_{max}$  sowie jene unterhalb der maximalen Verzögerung  $a_{min}$  nicht erreicht werden können. Dadurch entfallen jeweils Elemente der Mengen der möglichen Entscheidungen  $\Delta V_k$  sowie der erreichbaren Folgezustände  $V_k$ .

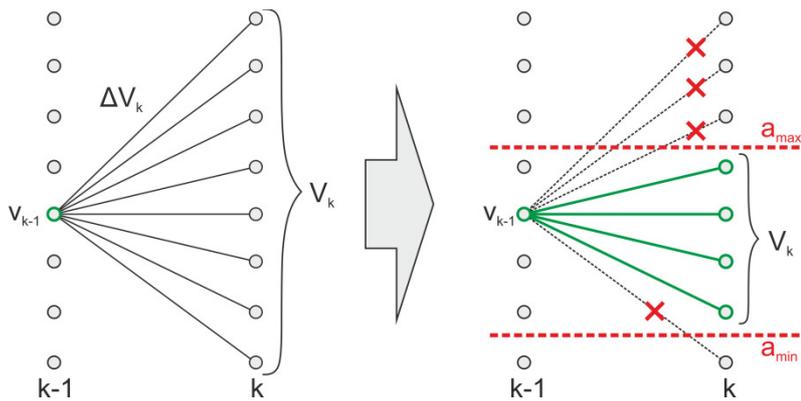


Bild 19: Reduktion der Kantenanzahl durch Berücksichtigung von Beschleunigungsgrenzen

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Rechenzeit ist das Fahrzeugmodell, das im Falle der Betriebsart Antrieb zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs genutzt wird. Sein Detaillierungsgrad ist so zu wählen, dass der Verbrauch mit ausreichender Genauigkeit möglichst schnell berechnet werden kann.

Da die Anwendung der dynamischen Programmierung voraussetzt, dass es sich beim Optimierungsproblem um eine Markov-Kette erster Ordnung handelt, kann die Kostenberechnung im Allgemeinen auch durch die Speicherung von Zwischenergebnissen abgekürzt werden. Jede Ausgangs-/Folgegeschwindigkeits-Kombination verursacht zwar unterschiedliche Kosten, jedoch bleiben diese immer gleich, unabhängig von der Stufe  $k$ , auf der sich das System gerade befindet. So genügt es, jede Kombination einmal zu berechnen. Tritt diese im weiteren Verlauf des Zustandsraumes erneut auf, so kann auf den zuvor gespeicherten Wert zurückgegriffen werden.

Die dynamische Programmierung gewährleistet immer eine sichere Konvergenz zum globalen Optimum. Für jede zulässige Instanz des Optimierungsproblems wird garantiert eine Lösung gefunden. Im Gegensatz zu anderen Optimierungsmethoden kann es nicht vorkommen, dass es sich dabei um ein lokales Optimum handelt. Auch die Vorgabe geeigneter Startwerte für die Optimierung ist nicht notwendig.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass alle eingangs formulierten Anforderungen mit der Anwendung der dynamischen Programmierung erfüllt werden können. Die weitere Ausgestaltung der Methodik zur Geschwindigkeitsprofil-Optimierung sowie deren Umsetzung im Quellcode wird nachfolgend beschrieben.

## 6. Programmablauf und Optimierungsmodell

Die praktische Umsetzung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung mit dynamischer Programmierung erfolgt gemäß der in Kapitel 4 geschilderten Vorgaben durch die Erstellung eines Quellcodes. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde dafür die Anwendungsumgebung und Programmiersprache *MATLAB*® des Herstellers *MathWorks*® verwendet.

Aus der mathematischen Formulierung des Optimierungsproblems ergibt sich ein Optimierungsmodell. Gemeinsam mit dem Lösungsverfahren ist dieses Modell so in einen Programmablauf einzubinden, dass nach Eingabe aller benötigten Informationen und der dem konkreten Anwendungsfall entsprechenden Parameter automatisch die optimale Lösung in Form eines Geschwindigkeitsprofils als Resultat ausgegeben wird. In Bild 20 wird ein Überblick über den Programmablauf gegeben, dessen einzelne Komponenten im Verlauf dieses Kapitels detailliert erläutert werden.

Die Geschwindigkeitsprofil-Optimierung findet in der Hauptdatei des Quellcodes statt, die für bestimmte Funktionen auf unterlagerte Dateien zugreift. Zur Initialisierung des Prozesses müssen die in Abschnitt 6.1 benannten Parameter übergeben werden. Außerdem werden an dieser Stelle Kennfelder, die im weiteren Verlauf zur Kostenberechnung benötigt werden, geladen. Der nächste markante Schritt ist die Bildung des Zustandsraumes, der wie in Abschnitt 6.2 beschrieben den Lösungsraum für das Optimierungsproblem begrenzt. Die Optimierung selbst erfolgt – analog zu den Anforderungen der Dynamischen Programmierung – durch zwei sequentielle Rekursionen in entgegengesetzter Richtung. Bei der ersten, hier als Rückwärtsrechnung implementiert, wird entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.3 ermittelt, welche Strategien zur Überführung des Systems aus dem Anfangs- in den Endzustand grundsätzlich realisierbar sind und welche Kosten sie verursachen. In der zweiten Rekursion, im vorliegenden Fall eine Vorwärtsrechnung, wird dann aus den realisierbaren Strategien die optimale respektive kostenminimale Strategie bestimmt. Dies wird in Abschnitt 6.6 erläutert. Für die Überprüfung der Realisierbarkeit einzelner Teilstrategien sowie zu deren Kostenberechnung (siehe Abschnitt 6.4) werden im Programmablauf unterlagerte Funktionen aufgerufen. Während die Struktur des Programmablaufes von dem zu optimierenden System unabhängig ist, erfolgt die Systemspezifikation durch die Parametrierung dieser unterlagerten Funktionen. Aus den Teilergebnissen der ersten Rekursion wird schließlich in der zweiten Rekursion das optimale Gesamtergebnis und somit die global-optimale Strategie für das vollständige Durchschreiten des Zustandsraumes bestimmt. Außerdem werden hier die absoluten Zielgrößenerfüllungswerte der optimalen Strategie berechnet.

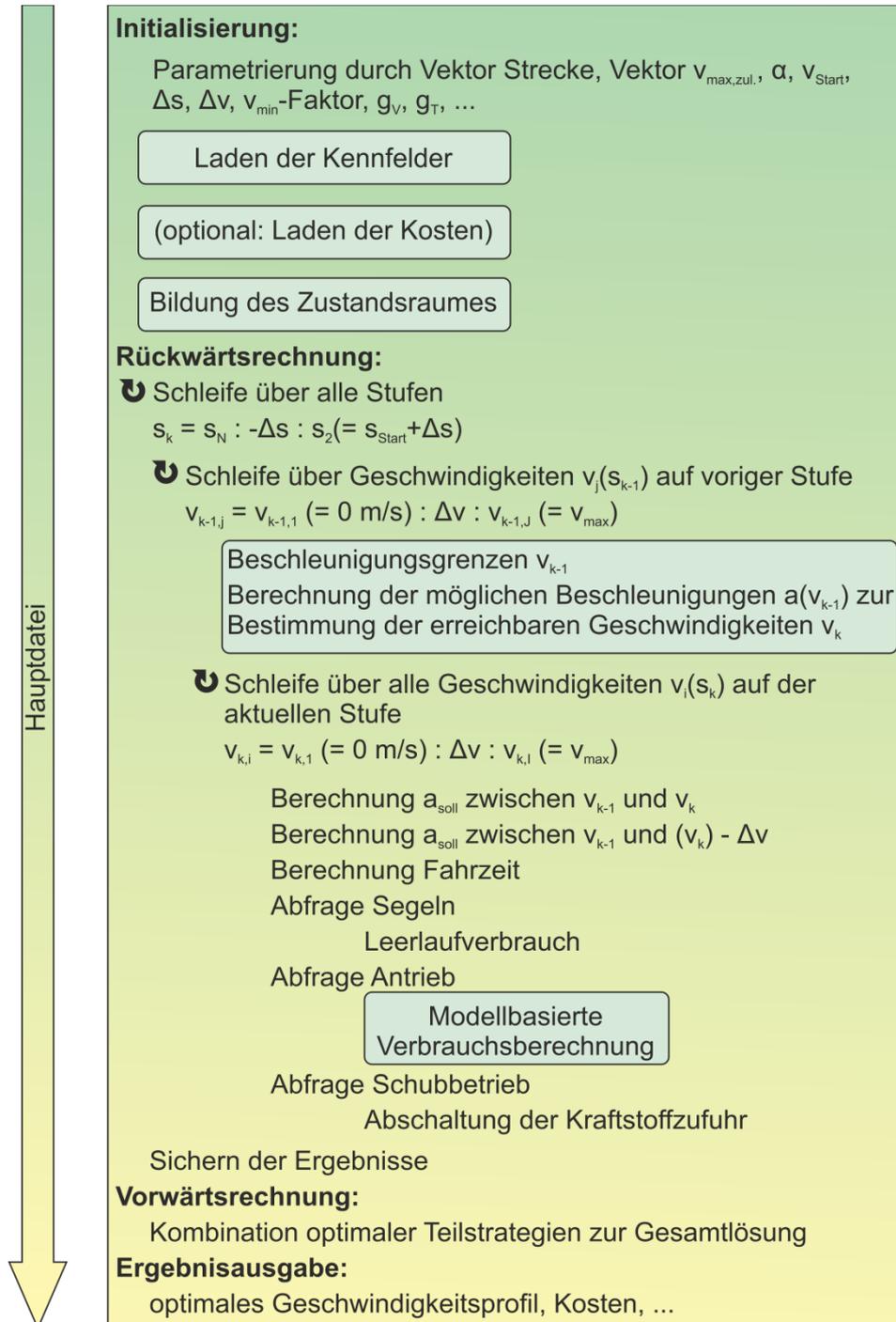


Bild 20: Übersicht über die Dateistruktur und den Programmablauf der Geschwindigkeitsprofiloptimierung

## 6.1. Initialisierung durch Optimierungs- und Fahrzeugparameter

Vor Beginn der Berechnungen muss das System parametrisiert werden. Die benötigten Werte lassen sich in zwei Gruppen einteilen, nämlich

- Optimierungsparameter und
- fahrzeugspezifische Parameter,

jeweils in Form von Skalaren, Vektoren oder auch Matrizen bzw. Kennfeldern.

Mit den Optimierungsparametern werden die Eingangsgrößen und Randbedingungen zur Zustandsraumbildung sowie die Fahrerpräferenz bei der Zielgrößengewichtung, die zur Skalarisierung der zweidimensionalen Kostenfunktion eingesetzt wird, übergeben. Die Zustandsraumbildung basiert auf

- der Fahrtroute  $s$ ,
- den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten entlang der Strecke  $v_{max,zul.}$ ,
- der Fahrzeuggeschwindigkeit zu Beginn und zum Ende der Fahrtroute  $v_{Start}$  und  $v_{End}$ ,
- den Diskretisierungs-Schrittweiten in den Dimensionen Weg und Geschwindigkeit  $\Delta s$  und  $\Delta v$ , sowie
- dem Faktor zur unteren Beschränkung des Zustandsraumes durch die Minimalgeschwindigkeit  $f_{v,min}$ .

Die Vektoren  $s$  (6.1) und  $v_{max,zul.}$  (6.2) haben die gleiche Länge und enthalten mindestens 2 Elemente.  $s$  beginnt bei 0 und endet mit dem Weg  $s_{End}$ , der bis zum Ende der Fahrtroute zurückgelegt wird. Alle Elemente dazwischen markieren Streckenpunkte, an denen sich beispielsweise die zulässige Höchstgeschwindigkeit ändert. Dementsprechend korrespondieren die Elemente von  $v_{max,zul.}$  dazu, da sie die Höchstgeschwindigkeiten, die ab dem betreffenden Streckenpunkt gelten, anzeigen.

$$s = (s_0 = 0, \dots, s_N = s_{End}) \quad (6.1)$$

$$v_{max,zul.} = (v_{max,zul.}(s_0), \dots, v_{max,zul.}(s_N)) \quad (6.2)$$

Beide Parameter haben noch keinen Bezug zum Diskretisierungsraster. Die Länge der Vektoren entspricht nicht notwendigerweise der Anzahl der Wegstützstellen, die nach der Zustandsraumbildung von der Optimierung genutzt werden. Ebenso wenig hat die Differenz zwischen den einzelnen Werten Bezug zu den jeweiligen Diskretisierungsschrittweiten  $\Delta s$  und  $\Delta v$ . Die Nutzung des Parameters zur Berechnung der Minimalgeschwindigkeit wird im Abschnitt 6.2.2 erläutert. Zur Vervollständigung der Optimierungsparameter gibt der Fahrer die gewünschte Gewichtung zwischen den konkurrierenden Zielgrößen mit  $g_T$  für die Fahrtdauer und  $g_{KV}$  für den Kraftstoffverbrauch vor, wobei

$$g_T + g_{KV} = 1$$

gilt.

Die fahrzeugspezifischen Parameter finden in zwei Bereichen innerhalb der ersten Rekursion des Programmablaufes Anwendung. Die Parameter zur Beschleunigungsfähigkeit und den Verzögerungen in den verschiedenen Betriebsmodi dienen zur Beurteilung der Realisierbarkeit von Entscheidungen (in Form von Zustandsübergängen). Weitere Fahrzeugparameter, die in Tabelle 1 aufgelistet sind, sowie die Kennfelder für die Getriebeübersetzung, Getriebeverlustmomente, das Motormoment und die Verbrauchscharakteristik des Motors werden zur Berechnung der Kosten o.g. Entscheidungen benötigt. Wie sie genau eingesetzt werden sowie die konkrete Ausgestaltung möglicher Werte wird in Abschnitt 6.4 beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht der fahrzeugspezifischen Parameter zur Kostenberechnung

Parameter	Beschreibung
$m_{Fzg}$	Fahrzeugmasse
$c_{WA}$	Luftwiderstandskoeffizient
$f_{r0}; f_{r1}; f_{r4}$	Rollwiderstandskoeffizienten
$r_0$	Unbelasteter Radradius
$V$	Hubraum
$T$	Motortakte je Arbeitsspiel
$\dot{m}_{Kr,leer}$	Kraftstoffverbrauch im Leerlauf

Optional können im Zuge der Initialisierung auch Kostentabellen geladen werden. Sämtliche Ergebnisse der Zielgrößenberechnung werden gespeichert, da sie die Eingangsgrößen für die zweite Rekursion sind. Wenn vor Beginn der Optimierung festgestellt wird, dass sowohl die Fahrzeug-Parametrierung als auch die Umgebungsbedingungen vergleichbar sind, kann durch den Rückgriff auf gespeicherte Werte auf die erneute Kostenberechnung verzichtet werden. Das wiederum wirkt sich in erheblichem Maße positiv auf die Berechnungsdauer aus.

## 6.2. Zustandsraumbildung

Bei der Zustandsraumbildung wird der Lösungsraum erstellt. Dazu wird der Bereich der erlaubten Geschwindigkeiten entlang der Strecke durch Definition der Verläufe von Minimal- und Maximalgeschwindigkeit festgelegt. Parallel dazu wird der Zustandsraum in den Dimensionen Weg und Geschwindigkeit anhand der vorher festgelegten Schrittweiten  $\Delta s$  und  $\Delta v$  diskretisiert. Für den Einsatz der Dynamischen Programmierung ist die Diskretisierung eine zwingend erforderliche Voraussetzung. Ergebnis ist die Menge der Weg-Geschwindigkeits-Knoten an jeder Wegstützstelle, die die zulässigen Fahrzeugzustände für die Optimierung repräsentieren.

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise beziehen sich die folgenden Ausführungen auf ein Beispiel, das wie folgt parametrisiert sei:

$$s = (0 ; 200 ; 600 ; 900 ; 1100)[m]$$

$$v_{max,zul.} = (70 ; 100 ; 50 ; 100 ; 100) \left[ \frac{km}{h} \right]$$

$$\Delta s = 100 [m] ; \Delta v = 1 \left[ \frac{km}{h} \right] ; f_{v,min} = 0,5[-]$$

### 6.2.1. Diskreter Maximalgeschwindigkeitsverlauf

Bild 21 zeigt den aus den initialen Vorgaben hervorgehenden Maximalgeschwindigkeits-Verlauf.

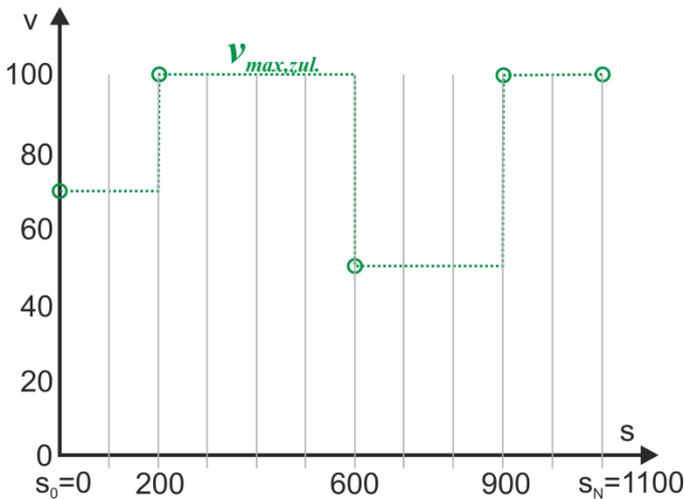


Bild 21: Initialer Maximalgeschwindigkeits-Verlauf bei der Zustandsraumbildung

Um im Ergebnis die den Schrittweiten entsprechende Anzahl diskreter Weg-Geschwindigkeits-Knoten zu erhalten, wird zunächst der vorgegebene Vektor  $s$  erweitert.

$$s_{dis} = (s_0 = 0 ; s_0 + \Delta s ; \dots ; s_N - \Delta s ; s_N)$$

enthält also

$$K = \frac{s_N}{\Delta s} + 1$$

Elemente. Der Einfachheit halber wird hierbei angenommen, dass der Quotient aus  $s_N$  und  $\Delta s$  ganzzahlig sei. Ebenso muss auch der Vektor der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten erweitert werden. Dabei werden für die Wegstützstellen, die nicht im Parameter  $s$  enthalten sind, wohl aber in  $s_{dis}$ , mit den Geschwindigkeiten belegt, die zur unmittelbar vorangehenden Stützstelle aus  $s$  korrespondieren. Im Beispiel wird daher aus

$$s = (0 ; 200 ; 600 ; 900 ; 1100) \text{ und}$$

$$v_{max,zul.} = (70 ; 100 ; 50 ; 100 ; 100)$$

nach Anpassung an das diskrete Raster

$$s_{dis} = (0 ; 100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 ; 600 ; 700 ; 800 ; 900 ; 1000 ; 1100) \text{ und}$$

$$v_{max,zul.,dis} = (70 ; 70 ; 100 ; 100 ; 100 ; 50 ; 50 ; 50 ; 100 ; 100 ; 100) .$$

Die neu hinzugekommenen Knoten sind auch in Bild 22 durch die gefüllten Kreise skizziert. Dabei ist zu beachten, dass die zulässigen Geschwindigkeiten jeweils ab der parametrierten Wegstützstelle gelten. Würde nun aus den sich durch obige Vektoren ergebenden Weg-Geschwindigkeits-Knoten ein Verlauf gebildet, indem sie einfach miteinander verbunden werden würden, so würde das dazu führen, dass im Zustandsraum ein vorzeitiges Beschleunigen des Fahrzeuges erlaubt werden würde. Um dies zu verhindern, werden durch die Prüfbedingung

$$v_{max,zul.,dis}(k+1) - v_{max,zul.,dis}(k) > 0 ? \quad \text{mit} \quad k = 1, 2, \dots, K-1$$

die Wegstützstellen identifiziert, an denen die zulässige Geschwindigkeit steigt. Die betroffenen Knoten sind in Bild 22 mit Pfeilen markiert. Diese Geschwindigkeiten werden durch

$$v_{max,dis}(k+1) = v_{max,zul.,dis}(k)$$

auf den Wert der Vorgänger-Stützstelle reduziert, so dass der endgültige Maximalgeschwindigkeitsverlauf des Beispiels

$$v_{max,dis} = (70 ; 70 ; 70 ; 100 ; 100 ; 100 ; 50 ; 50 ; 50 ; 50 ; 100 ; 100)$$

ist.

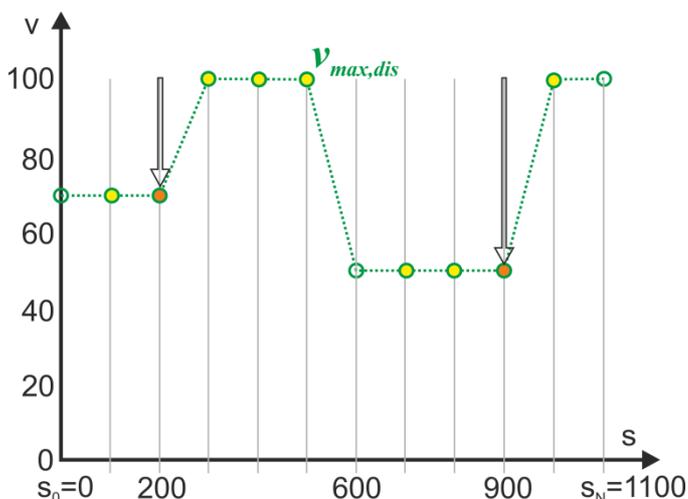


Bild 22: Bearbeitung des Maximalgeschwindigkeits-Verlaufes im Rahmen der Zustandsraumbildung

Prinzipiell wäre durch diese obere Beschränkung des Zustandsraumes ein für die Optimierung geeigneter Lösungsraum geschaffen. Obwohl grundsätzlich Geschwin-

digkeiten von 0 km/h erlaubt sind, wäre die Konvergenz durch die hier getroffene Wahl der Zustandsgrößen  $v$  und  $s$  nicht gefährdet. Jedoch ist aus Sicht der Verträglichkeit des Systems mit seinem Umfeld angeraten, eine untere Beschränkung des Zustandsraumes in Form einer Minimalgeschwindigkeit hinzuzufügen. Andernfalls könnte sich das optimale Geschwindigkeitsprofil, je nach Wahl der Zielgrößengewichtung, negativ auf den Verkehrsfluss auswirken und wäre so aus globaler Perspektive destruktiv. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, eine Mindestgeschwindigkeit festzulegen. Im einfachsten Fall könnte eine konstante Untergrenze definiert werden. Im folgenden Abschnitt wird eine andere, variable Alternative beschrieben, die sich speziell im Hinblick auf den Verkehrsfluss besser eignet als beispielsweise konstante Untergrenzen.

### 6.2.2. Diskreter Minimalgeschwindigkeitsverlauf

Zur Bestimmung der Minimalgeschwindigkeit wird im ersten Schritt der aus der Parametrierung hervorgehende Anteil der zulässigen Höchstgeschwindigkeit

$$v_{min}(k) = v_{max,zul.}(k) \cdot f_{v,min} \quad \text{für alle } k = 1, \dots, n - 1$$

mit  $k$  als Bezeichnung des jeweiligen Elements des parametrisierten Vektors angesetzt. Lediglich die letzten Werte von Minimal- und Maximalgeschwindigkeit (also am Ende der Strecke) sollen übereinstimmen:

$$v_{min}(n) = v_{max,zul.}(n)$$

Hierdurch wird die Fahrzeuggeschwindigkeit am Ende der Fahrtroute auf einen Wert festgelegt. Wenn dort mehr als ein Zustand zulässig wäre, würde das optimale Geschwindigkeitsprofil in beinahe allen Fällen bei der geringsten zulässigen Geschwindigkeit enden, da so zum Streckenende immer eine verbrauchsarme Verzögerungsphase genutzt werden könnte. Jedoch ist die Vergleichbarkeit der Zielgrößenerfüllungswerte verschiedener Geschwindigkeitsprofile nur dann gegeben, wenn jeweils sowohl ihre Start- als auch ihre Endgeschwindigkeiten identisch sind. Im obigen Beispiel wurde  $f_{v,min} = 0.5$  gewählt, so dass sich als Minimalgeschwindigkeit also

$$v_{min} = (35 ; 50 ; 25 ; 50 ; 100)$$

ergibt. Der Minimalgeschwindigkeitsverlauf wird so zunächst in eine konstante Relation zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit gesetzt. Diese Vorgehensweise ist in Bild 23 beispielhaft dargestellt. Alternativ dazu wären auch andere Vorschriften möglich, wie beispielsweise ein konstanter absoluter Wert als Differenz zwischen den beiden Grenzgeschwindigkeiten.

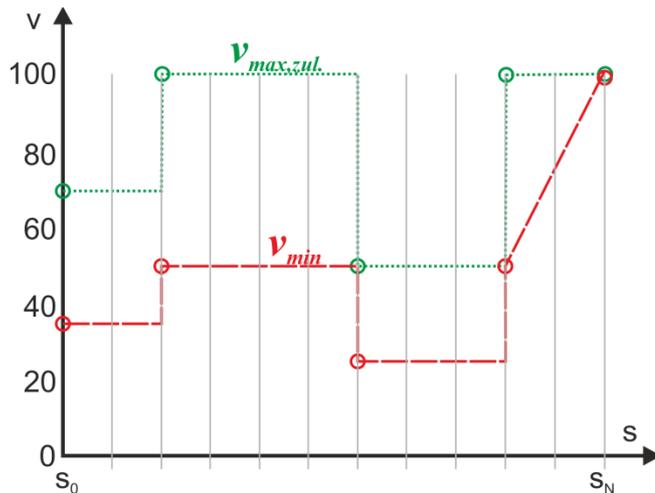


Bild 23: Erster Bearbeitungsschritt zur Definition der Minimalgeschwindigkeit bei der Zustandsraumbildung

Wie zuvor bei der Maximalgeschwindigkeit erhält man auch hier nach diesem ersten Bearbeitungsschritt einen stufenförmigen Verlauf. Dieser ist in der Realität nicht nachvollziehbar und könnte zudem durch Mehrdeutigkeiten von Zuständen zu numerischen Problemen bei der Optimierung führen. Außerdem kann es in bestimmten Fällen dazu kommen, dass sich die Verläufe berühren. An den betroffenen Wegstützstellen wäre so nur eine Geschwindigkeit als Fahrzeugzustand für die Optimierung nutzbar.

Um den Minimalgeschwindigkeitsverlauf anzupassen und dadurch Unstetigkeiten bzw. Mehrdeutigkeiten von Zuständen zu eliminieren, wird geprüft, ob der Verlauf der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten Stellen hat, an denen die Maximalgeschwindigkeit nur für ein sehr kurzes Streckenstück<sup>(2)</sup> erhöht und anschließend wieder verringert wird. An diesen Stellen wird, wie in Bild 24 beispielhaft skizziert, die theoretisch zulässige Geschwindigkeitserhöhung bei der Bildung der Minimalgeschwindigkeit ignoriert.

<sup>(2)</sup> Als Grenze hat sich eine Streckenlänge von 200 m als praktikabel erwiesen. In der aktuellen Implementierung werden daher alle Bereiche, in denen die Maximalgeschwindigkeit für weniger als 200 m erhöht ist, bei der Bildung der Minimalgeschwindigkeit ignoriert.

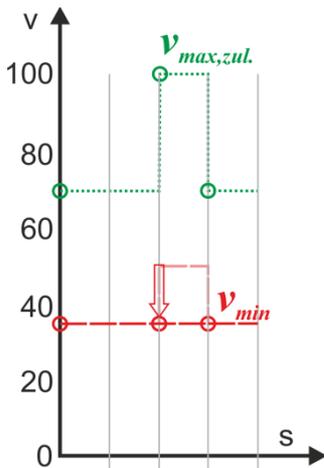


Bild 24: Ausschluss kurzer Geschwindigkeitserhöhungen im Minimalgeschwindigkeitsverlauf

Nun gilt es, jedem Element von  $s_{dis}$  eine Minimalgeschwindigkeit zuzuordnen. Im Zuge der dementsprechenden Erweiterung von  $v_{min}$  in  $v_{min,dis}$  wird auch der Minimalgeschwindigkeitsverlauf durch verschiedene Abfragen so verändert, dass sowohl Stufen an den Übergängen zwischen zwei unterschiedlichen Minimal-Vorgaben als auch Überschneidungen mit dem Verlauf der Maximalgeschwindigkeit eliminiert werden.

Um abrupte Übergänge bei Veränderung der Minimalgeschwindigkeit abzumildern, werden an den betreffenden Stellen Steigungen für Angleichsgeraden berechnet. Hierbei wird im Programmablauf zwischen Erhöhungen und Verringerungen der Minimalgeschwindigkeit unterschieden, um für diese beiden Fälle unterschiedliche Steigungen  $m_+$  und  $m_-$  der Angleichsgeraden parametrierbar zu machen. Die dazu verwendeten Geradengleichungen sind außerdem von der absoluten Differenz zwischen den aus dem Parametersatz abgeleiteten Minimalgeschwindigkeiten und der Entfernung der aktuellen diskreten Wegstützstelle von der letzten bzw. nächsten Stützstelle des Parametersatzes  $diff_{s+}$  bzw.  $diff_{s-}$  abhängig. Bei Erhöhung der Minimalgeschwindigkeit werden hierzu

$$v_{min,neu} = \frac{m_+}{v_k + v_{k-1}} \cdot diff_{s+} + v_{k-1}$$

sowie analog dazu bei Verringerung der Minimalgeschwindigkeit

$$v_{min,neu} = \frac{m_-}{v_{k+1} + v_k} \cdot diff_{s-} + v_{k+1}$$

verwendet. Diese Vorgehensweise ist auch in Bild 25 skizziert. Die betreffenden Knoten sind dort durch Pfeile gekennzeichnet.

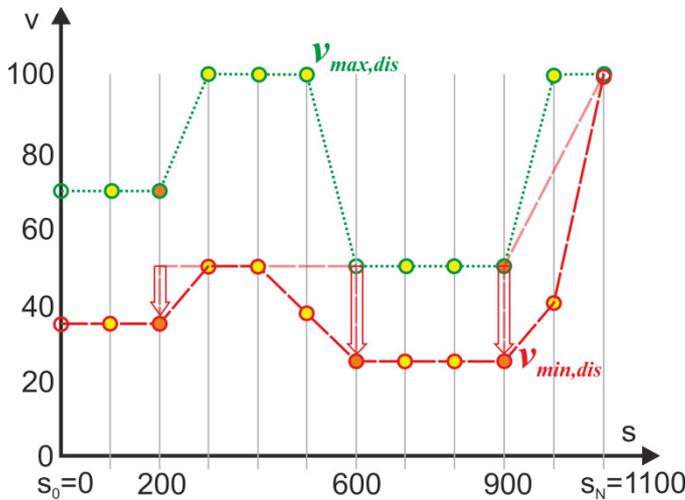


Bild 25: Modifikation des Verlaufs der Minimalgeschwindigkeit durch Angleichsgeraden

Im gleichen Arbeitsschritt werden unter Berücksichtigung oben beschriebener Vorschriften die Minimalgeschwindigkeits-Werte für die nicht im Parameter-Vektor enthaltenen Wegstützstellen berechnet. Somit liegen an dieser Stelle des Programmablaufes zu jeder Wegstützstelle Maximal- und Minimalgeschwindigkeit zur Eingrenzung der erlaubten Fahrzeugzustände vor. Bild 26 illustriert die folglich zulässigen Zustände als gelbe Knoten innerhalb des weißen Korridors zwischen Ober- und Untergrenze. Der hier grafisch aufbereitete Zustandsraum wird im Quellcode durch die Matrix  $ZR$  repräsentiert, in der die erlaubten Zustände durch „1“ und die unzulässigen Zustände mit „0“ gekennzeichnet sind. Die Zustandsraumbildung ist damit abgeschlossen.

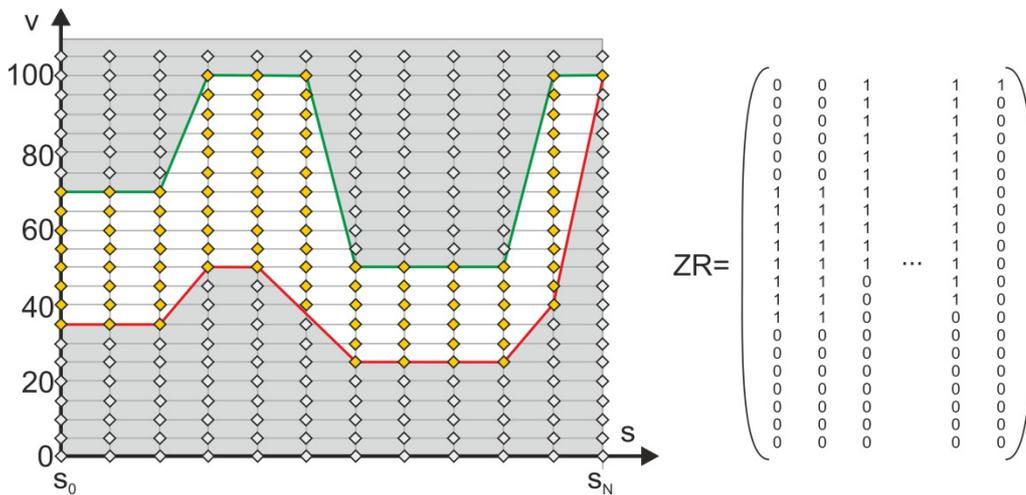


Bild 26: Zustandsraum vor Beginn der ersten Rekursion der dynamischen Programmierung

Bislang wurde zwischen den bei der Initialisierung parametrisierten Vektoren  $s$  und  $v_{max,zul}$  und ihren an das diskrete Raster des Zustandsraumes angepassten Pendanten  $s_{dis}$  und  $v_{max,zul,dis}$  unterschieden. Da die Initialisierungsparameter nach Abschluss der Zustandsraumbildung nicht weiter verwendet werden, entfällt obige Unterscheidung im weiteren Verlauf der Ausführungen zugunsten der einfacheren Lesbarkeit. Die

Elemente  $s(k)$ ,  $v(i)$  und  $v(j)$  beziehen sich von nun an also immer auf die aus der Diskretisierung resultierenden Wegstützstellen bzw. Geschwindigkeiten.

### 6.3. Erste Rekursion der dynamischen Programmierung

Die dynamische Programmierung berechnet das optimale Geschwindigkeitsprofil in zwei Rekursionen. Im vorliegenden Fall wird der Zustandsraum zuerst von der letzten bis zur ersten Wegstützstelle durchschritten. Hier wird also mit einer Rückwärtsrekursion begonnen. Dabei werden die Kosten aller zulässigen Entscheidungen beim Übergang zwischen zwei Stufen des Optimierungsproblems berechnet. In der zweiten Rekursion wird der Zustandsraum in umgekehrter Richtung durchschritten, hier also in einer Vorwärtsrekursion. Aus den zuvor berechneten Teillösungen wird dort die optimale Gesamtlösung gebildet. Grundsätzlich kann frei gewählt werden, ob eine Kombination aus Rückwärts-/Vorwärtsrekursion oder umgekehrt die Kombination Vorwärts-/Rückwärtsrekursion verwendet wird. Diese Entscheidung ist jeweils unter Berücksichtigung der Charakteristika der Optimierungsaufgabe zu treffen.

Bild 27 gibt eine Übersicht der Vorgehensweise beim ersten Durchschreiten des Zustandsraumes in der Rückwärtsrekursion. Ziel ist, die jeweiligen Kosten aller Entscheidungen  $x_k$ , die nicht durch die Zustandsraum-Beschränkung aus dem Lösungsraum ausgeschlossen wurden, zu berechnen. Zur Charakterisierung einer Entscheidung dienen drei Variablen:

- Die aktuelle Wegstützstelle  $k$ ,
- die aktuell betrachtete Geschwindigkeit  $v_i(k)$  auf der Stützstelle  $k$  und
- die aktuell betrachtete Geschwindigkeit  $v_j(k-1)$  auf der im Streckenverlauf vorangehenden Stützstelle  $k-1$ .

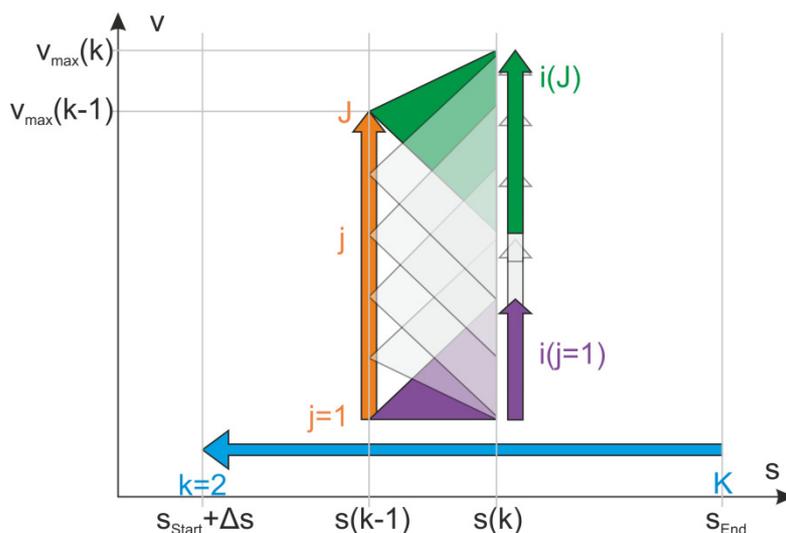


Bild 27: Übersicht der Schleifen im Quellcode der Rückwärtsrechnung der dynamischen Programmierung

Die Rückwärtsrekursion beginnt mit einer Schleife über alle Wegstützstellen, wobei zunächst die letzte Stützstelle  $s_{End}$  ( $k = K$ ) und ihre vorangehende Stützstelle  $s_{End-\Delta s}$  ( $k-1$ ) gesetzt werden. Diese Schleife wird in Bild 27 durch den blauen Pfeil dargestellt. Nun wird in einer unterlagerten Schleife in der Dimension der Geschwindigkeit jeder Zustand auf  $k-1$  besucht. Der aktuelle Zustand wird mit  $v_j$  bezeichnet. Es folgt eine Abfrage, ob  $v_j$  zu den erlaubten Zuständen gehört oder bereits bei der Zustandsraumbildung vom Optimierungsproblem ausgeschlossen wurde. Trifft ersteres zu, so werden in einer weiteren unterlagerten Schleife die Zustände auf  $k$  besucht, die im Weiteren mit  $v_i$  benannt werden. Durch diesen dritten Schritt stehen nun alle Variablen zur Konkretisierung der Entscheidung  $x_k(v_j, v_i)$  fest. Ob die jeweilige Entscheidung zur Lösung des Optimierungsproblems genutzt werden kann, hängt nicht nur davon ab, ob  $v_j$  und  $v_i$  zulässige Zustände sind, sondern auch davon, ob die dazu erforderliche Beschleunigung innerhalb des Streckenteilstücks  $\Delta s$  realisiert werden kann. Daher müssen im nächsten Schritt die entsprechenden Grenzwerte in Form von maximaler Beschleunigung und maximaler Verzögerung – jeweils in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit  $v_j$  – bestimmt werden.

Die maximal realisierbare Beschleunigung  $a_{max}$  ist sowohl von diversen Fahrzeug- und Umgebungsparametern als auch von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig. Für das in dieser Arbeit verwendete Fahrzeugmodell kann sie in guter Näherung durch das Polynom

$$\begin{aligned} a_{max} = & 2,5735 \cdot 10^{-7} \cdot v_{Fzg}^5 - 4,5602 \cdot 10^{-5} \cdot v_{Fzg}^4 \\ & + 3,0209 \cdot 10^{-3} \cdot v_{Fzg}^3 - 8,9947 \cdot 10^{-2} \cdot v_{Fzg}^2 \quad (6.3) \\ & + 1,0264 \cdot v_{Fzg} + 1,05 \end{aligned}$$

berechnet werden. Bei den Koeffizienten handelt es sich um fahrzeugspezifische Daten, die experimentell ermittelt werden können. Der entsprechende Verlauf ist in Bild 28 zu sehen. Die maximal erlaubte Verzögerung  $a_{min}$  ist bei der Lösung des Optimierungsproblems aus Komfort- und Sicherheitsgründen konstant auf  $-3 \text{ m/s}^2$  beschränkt. Für alle Entscheidungen  $x_k$ , die zu einer Beschleunigung

$$a_{min} \leq a_k \leq a_{max}$$

führen, werden im weiteren Programmablauf Kosten berechnet. Wie bereits in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, erhält man die Kosten einer Entscheidung aus der Fahrzeit und dem Kraftstoffverbrauch auf dem betreffenden Teilstück der Gesamtstrecke. Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs wird an dieser Stelle des Programmablaufes eine Fallunterscheidung getroffen, um die zu bewertende Entscheidung eindeutig einer der in 5.3.2 beschriebenen Fahrzeug-Betriebsarten zuzuordnen.

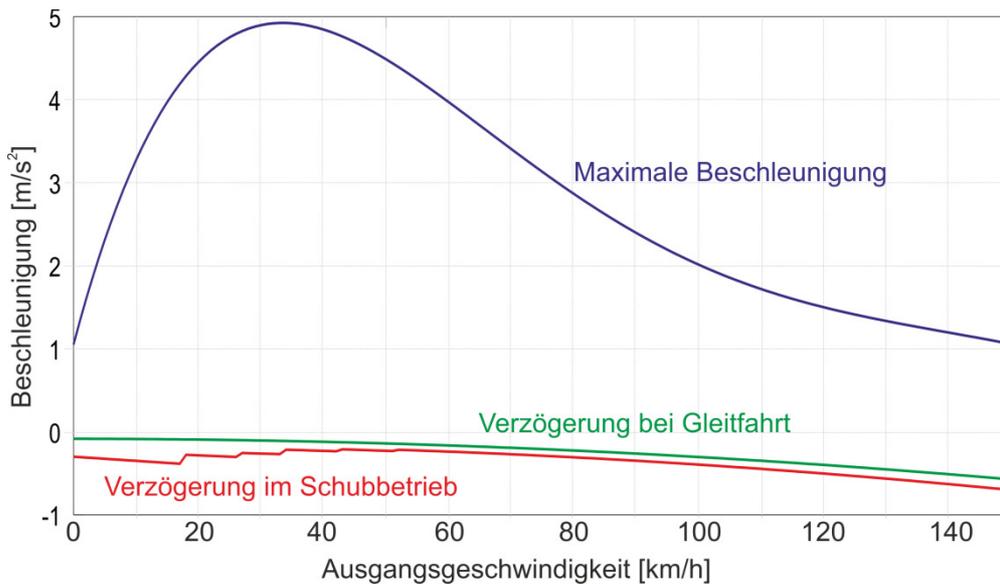


Bild 28: Maximalbeschleunigung und Verzögerungen bei Gleitfahrt und Schubbetrieb, jeweils in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit

In Bild 28 ist zu sehen, dass es neben der maximalen Beschleunigung auch zwei von der Ausgangsgeschwindigkeit abhängige markante Verzögerungen gibt. Es handelt sich dabei um die Verzögerung bei reiner Gleitfahrt (ausgekuppelter Antriebsstrang) und jene beim reinen Schubbetrieb (mitlaufender Antriebsstrang), jeweils ohne Betätigung der Bremse. Die dargestellten Beschleunigungs-Verläufe liegen im Optimierungsmodell als Kennlinien vor, es handelt sich dabei ebenfalls um Polynome in der Form von (6.3). Eine genauere Erläuterung des Beschleunigungs-Verlaufes im Schubbetrieb erfolgt in Abschnitt 6.4.3., da dieser von der jeweils eingelegten Getriebeschaltstufe abhängt. Zusätzliche Beschleunigungs-Einflüsse durch von 0 abweichende Fahrbahnsteigungen werden zum jeweils benötigten Kennlinien-Wert addiert. Beispielsweise sind Fahrsituationen denkbar, in denen das Halten einer konstanten Geschwindigkeit eine verzögernde Einwirkung auf den Antriebsstrang erfordert, etwa wenn das Fahrzeug ein Gefälle befährt. Andererseits könnte auf einer Steigung trotz sinkender Soll-Geschwindigkeit ein positives Motormoment erforderlich sein. Durch den Korrektur-Summanden für die Fahrbahnsteigung werden die Beschleunigungs-Grenzen auch in diesen Sonderfällen korrekt berechnet.

Um diese drei verschiedenen Beschleunigungen jeweils einem Zustand an der Wegstützstelle  $k$  zuzuordnen, werden zunächst die exakten Geschwindigkeiten berechnet, die man ausgehend von  $v_j$  mit der jeweiligen Beschleunigung innerhalb der Strecke von  $\Delta s$  erreichen würde. Zur Vervollständigung wird ebenso die exakte Folgegeschwindigkeit, die aus der maximal erlaubten Verzögerung resultiert, ermittelt. In Bild 29 ist diese Vorgehensweise skizziert. Da die exakten Ergebnisse höchstwahrscheinlich nicht direkt einem diskreten Zustand zugeordnet werden können, werden sie im zweiten Schritt so gerundet, dass sie auf den nächstliegenden Zustand des diskreten Rasters führen. Hier wird – mit Ausnahme der maximal erlaubten Verzögerung – immer abgerundet, da aufgerundete Werte im realen Betrieb nicht nachzu-

vollziehen wären. Bei der maximal erlaubten Verzögerung hingegen würde diese durch ein Abrunden überschritten werden, daher wird hier aufgerundet. Nach diesen Bearbeitungsschritten ist nun jede zulässige Entscheidung eindeutig einer Fahrzeug-Betriebsart zugeordnet.

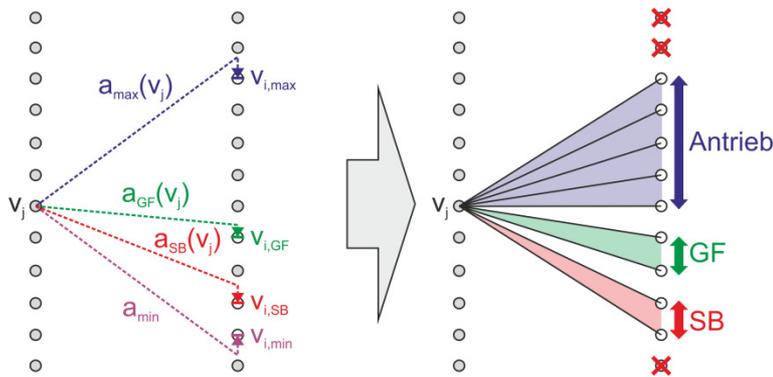


Bild 29: Bestimmung der Beschleunigungsgrenzen zur Zuordnung der Betriebsarten

Im nächsten Schritt sind die Zielfunktionswerte der zulässigen Entscheidungen zu ermitteln. Wie bereits in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, ist diese durch die gewichtete Summe der Kriterien Zeit und Kraftstoffverbrauch gegeben:

$$F(T, KV) = g_T \cdot T + g_{KV} \cdot KV. \quad (6.4)$$

Unter der Annahme zeitlich konstanter Beschleunigung zwischen zwei Wegstützstellen ergibt sich die Fahrzeit – unabhängig von der Betriebsart – zu

$$\Delta t_k = \frac{\Delta s}{\varnothing v(k)} = \frac{2\Delta s}{v(k) + v(k-1)} = \frac{2\Delta s}{v_i + v_j}. \quad (6.5)$$

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs erfolgt nun unter Berücksichtigung der jeweiligen Betriebsart. Sei

$$a_k = \frac{v_i^2 - v_j^2}{2 \cdot \Delta s}$$

die Beschleunigung, die aus der Entscheidung  $x_k$  resultiert, so wird zwischen den Fällen

- 1) Antrieb:  $a_{max} \geq a_k > a_{GF} \Leftrightarrow m_{Kr,k} = f(v_i, v_j, \Delta t_k, gear, M_{Verl}, \dots)$
- 2) Gleitfahrt:  $a_{GF} \geq a_k > a_{SB} \Leftrightarrow m_{Kr,k} = \dot{m}_{Kr,Leerlauf} \cdot \Delta t_k$
- 3) Schubetrieb:  $a_{SB} \geq a_k \geq a_{min} \Leftrightarrow m_{Kr,k} = 0$

unterschieden. Bild 30 zeigt eine beispielhafte Verteilung dieser Betriebsarten über die möglichen Kombinationen aus Ausgangs- und Folgegeschwindigkeiten zwischen 0 und 100 km/h. Dieses Diagramm resultiert aus einer Streckenteilstück-Länge von 50 m und ist ausschließlich für eine bestimmte Fahrzeug-Parametrierung gültig. Die hier relevanten Parameter sind die Schaltstrategie sowie die Polynome für die maximale Beschleunigung (6.3) und die charakteristischen Verzögerungen.

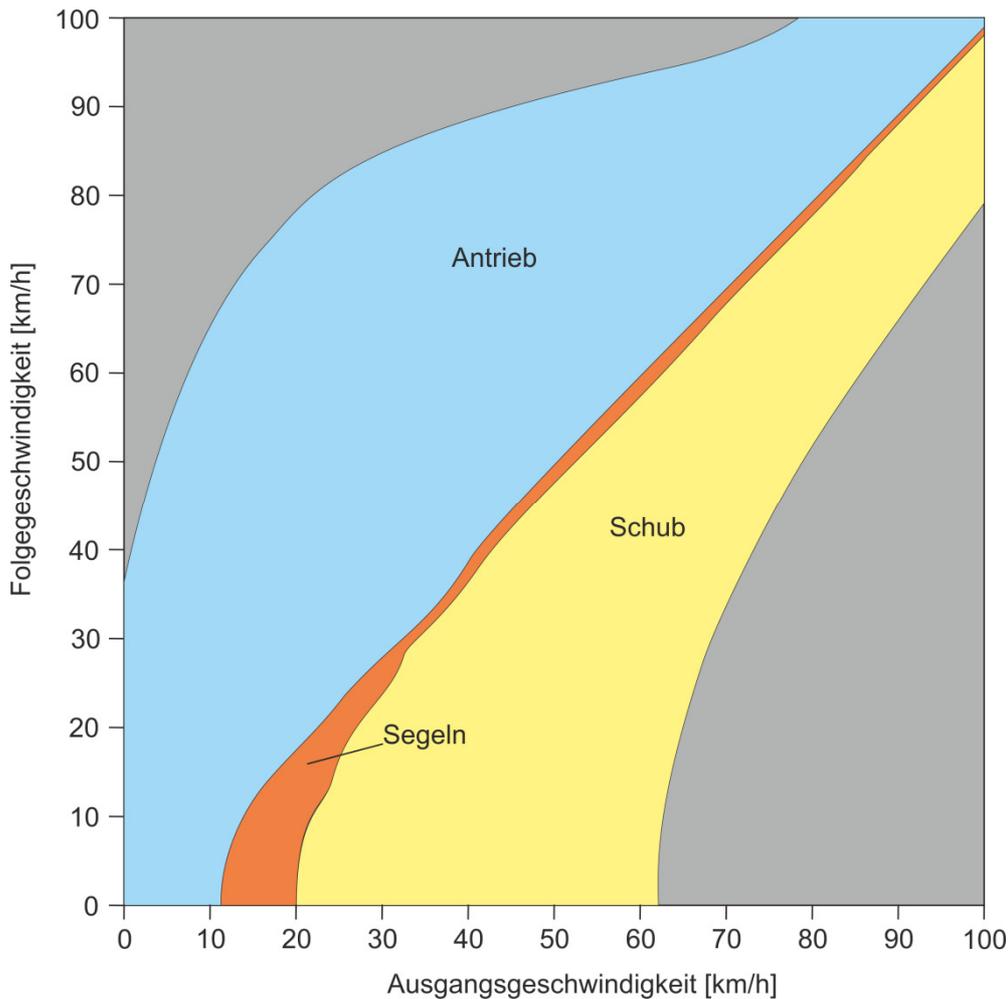


Bild 30: Realisierbare Kombinationen von Ausgangs- und Folgegeschwindigkeit auf einem Streckenabschnitt der Länge 50 m sowie die entsprechenden Fahrzeug-Betriebsarten

Die dargestellten Gültigkeitsbereiche der Betriebsarten wurden für einen diskreten Zustandsraum berechnet, wodurch sich stufige Übergänge zwischen den Bereichen ergeben würden. Die Verläufe der Bereichsgrenzen wurden hier grafisch nachbearbeitet.

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine detaillierte Beschreibung der modellbasierten Verbrauchsberechnung, wie sie im ersten Fall (Antrieb) erforderlich ist.

## 6.4. Modellbasierte Kraftstoffverbrauchs-Berechnung

Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs im Falle des Antriebs auf einem Teilstück der Gesamtstrecke dient ein Längsdynamik-Modell, dessen Struktur Bild 31 zeigt. Darin werden, entgegengesetzt der physikalischen Wirkungskette in der Realität, zunächst die Fahrwiderstände berechnet, die durch die Realisierung der Entscheidung  $x_k$  entstehen bzw. zur Realisierung der Geschwindigkeitsdifferenz  $v_i - v_j$  überwunden werden müssen. Es wird eine gleichmäßige Radlast-Verteilung angenommen, Aufbaubewegungen und damit verbundene Radlast-Schwankungen werden vernachlässigt und der Rad-Straße-Kontakt wird zur Vereinfachung durch eine kinematische Beziehung abgebildet. Die Modellbildung ist von der Bestimmung der Fahrwiderstände  $F_R$  bis hin zur Berechnung des erforderlichen Motorabtriebsmoments  $M_A$  physikalisch motiviert. Die Bestimmung des korrespondierenden Kraftstoffmassenstroms hingegen folgt einem phänomenologischen Ansatz und bedient sich eines Kennfeldes. Würde alternativ hierzu die enge Orientierung an den physikalischen Grundlagen beibehalten werden, so müsste der Verbrennungsvorgang modelliert werden. Dies würde die Komplexität des Modells inakzeptabel steigern. In der Literatur (beispielsweise [36] oder [37]) werden zur Simulation der thermodynamischen Prozesse im Brennraum Modelle mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden beschrieben. Da die Verbrennungsvorgänge sowohl zeit- als auch ortsabhängig sind, müssten bei einer physikalisch motivierten Modellierung und Simulation Systeme aus partiellen Differentialgleichungen formuliert und gelöst werden. Um dies zu vermeiden, kann der Kraftstoffverbrauch durch ein phänomenologisches Modell bestimmt werden. Im Hinblick auf die begrenzt verfügbare Rechenkapazität und -zeit ist dies für die vorliegende Aufgabenstellung, trotz der Einbußen bei der Ergebnisqualität, vorzuziehen. Komplexere Modelle dienen u.a. dazu, die charakteristischen Größen des Verbrennungsprozesses im Verlauf eines Arbeitsspiels darzustellen. Im Falle des Kolbendruckes würde dabei nicht nur ein Mittelwert, sondern auch sein Verlauf über den Kurbelwinkel beschrieben werden. Angesichts des hier zugrunde gelegten mittel- bis langfristigen Planungshorizontes sind derartige Details nicht relevant.

Die einzelnen Bearbeitungsschritte innerhalb des Modells sind:

1. Berechnung der **Fahrwiderstände** aus der vorgegebenen Geschwindigkeitsdifferenz auf dem Streckenteilstück
2. Berechnung des erforderlichen **Getriebeabtriebsmoments** durch eine kinematische Beziehung zur Längskraft im Rad-Straße-Kontakt
3. Berechnung des erforderlichen **Motorabtriebsmoments** aus der aktuellen Getriebeübersetzung sowie den lastabhängigen Getriebeverlusten
4. Berechnung von Motordrehzahl und effektivem Motormitteldruck
5. kennfeldbasierte Bestimmung des aktuellen **Kraftstoffmassenstroms**

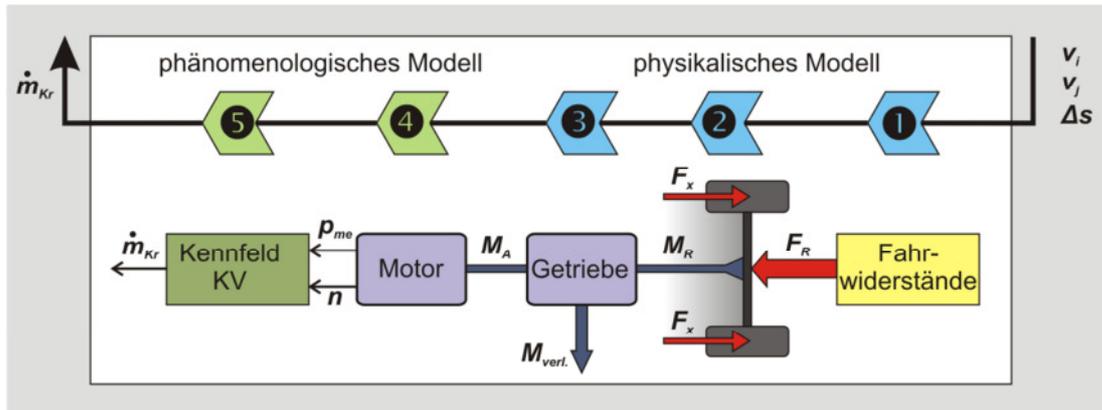


Bild 31: Vorgehensweise bei der modellbasierten Verbrauchsberechnung

### 6.4.1. Berechnung der Fahrwiderstände

Um die wichtigsten Einflüsse auf die erforderliche Antriebskraft zu berücksichtigen, werden im vorliegenden Modell neben der Massenträgheit die Roll-, Luft- und Steigungswiderstandskräfte zum Gesamt-Fahrwiderstand summiert (6.6):

$$F_x = F_T + F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Steigung} \quad (6.6)$$

Die einzelnen Summanden ergeben sich zu

$$F_T = m_{FZg} \cdot a \quad (6.7)$$

$$F_{Roll} = 4 \cdot f_r \cdot F_Z = 4 \cdot f_r \cdot \frac{1}{4} m_{FZg} \cdot g \quad (6.8)$$

$$F_{Luft} = 0,5 \cdot c_{wA} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_{FZg}^2 \quad (6.9)$$

$$F_{Steigung} = m_{FZg} \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (6.10)$$

wobei für den Rollwiderstandskoeffizienten in der gängigen Fachliteratur (wie beispielsweise [28])

$$f_r = f_{r0} + f_{r1} \cdot \frac{v_{FZg} \cdot 3.6}{100} + \left( f_{r4} \cdot \frac{v_{FZg} \cdot 3.6}{100} \right)^4 \quad (6.11)$$

<sup>3</sup> Da bezüglich der Umgebungsbedingungen davon ausgegangen wird, dass der Wind unberücksichtigt bleibt, geht in (6.9) lediglich die Fahrzeuggeschwindigkeit in die Luftwiderstands-Berechnung ein. Zur Berücksichtigung des Windes müsste stattdessen die dementsprechende Anströmgeschwindigkeit als Faktor verwendet werden.

gilt. In den dimensionslosen Gleichungen sind die Größen auf ihre jeweiligen Einheiten normiert. Die für (6.7) bis (6.11) benötigten Parameter wurden für Berechnungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wie folgt gesetzt:

Parameterbezeichnung	Wert	Einheit
Fahrzeugmasse $m_{Fzg}$	1500	kg
Erdbeschleunigung $g$	9,81	m/s <sup>2</sup>
Luftwiderstandsbeiwert $c_{WA}$	0.723	-
Luftdichte (bei 20°C) $\rho$	1,204	kg/ m <sup>3</sup>
Rollwiderstandskoeffizient $f_{r0}$	0,009	-
Rollwiderstandskoeffizient $f_{r1}$	0,002	-
Rollwiderstandskoeffizient $f_{r4}$	0,0004	-

Selbstverständlich sind diese auf das jeweilige Fahrzeug bzw. eventuell veränderten Umgebungsbedingungen anzupassen. Aus (6.6) erhält man die Längskraft  $F_x$ , die auf den Fahrzeugkörper wirken muss, um die geforderte Beschleunigung zu erreichen. Der dynamische Radradius  $r_d$  lässt sich nach [38] in guter Näherung durch eine gewichtete Summe aus unbelastetem Radradius  $r_0$  und statischem Radradius  $r_s$

$$r_d = \frac{2}{3}r_0 + \frac{1}{3}r_s \quad (6.12)$$

bestimmen. Für die Einfederung  $\Delta r$  beim statisch belasteten Rad gelten

$$\Delta r = r_0 - r_s \quad \text{und} \quad (6.13)$$

$$\Delta r = \frac{F_z}{k_t} \quad . \quad (6.14)$$

Durch Gleichsetzen von (6.13) mit (6.14) kann  $r_s$  also in Abhängigkeit der Radlast und dem radialen Steifigkeitskoeffizienten des Reifens  $k_t$  gemäß

$$r_0 - r_s = \frac{F_z}{k_t} \Leftrightarrow r_s = r_0 - \frac{F_z}{k_t} \quad (6.15)$$

ausgedrückt werden. Durch Eliminieren von  $r_s$  in (6.12) ergibt sich der dynamische Radradius schließlich zu

$$r_d = \frac{2}{3}r_0 + \frac{1}{3}\left(r_0 - \frac{F_z}{k_t}\right) = r_0 - \frac{1}{3} \cdot \frac{F_z}{k_t} \quad .$$

Durch die kinematischen Beziehungen

$$M_R = F_x \cdot r_d$$

$$= (F_T + F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Steigung}) \cdot r_d \quad (6.16)$$

und

$$\omega_R = \frac{v_{Fzg}}{r_d} \quad (6.17)$$

werden Abtriebsmoment  $M_R$  sowie -drehzahl  $\omega_R$  am Rad berechnet. Da die Achsübersetzung im vorliegenden Fahrzeugmodell mit der Getriebeübersetzung zusammengefasst wurde, entsprechen Momente und Drehzahlen am Rad auch jenen am Getriebeausgang.

Um die aktuelle Getriebeübersetzung zu bestimmen, wurde die Getriebebeschaltstrategie in Form eines Kennfeldes im Quellcode hinterlegt. Neben der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit ist die gewünschte Beschleunigung zur Wahl der Schaltstufe relevant. Sie geht jedoch nicht direkt in das Kennfeld ein. Die hier erforderliche Größe ist die korrespondierende Fahrpedalstellung. Zunächst wird deshalb die Ermittlung der Pedalstellung beschrieben, bevor die Erläuterung der Schaltstrategie und ihrer Einbindung in den Quellcode folgt.

#### 6.4.2. Bestimmung der Fahrpedalstellung

Das Fahrpedal dient dem Fahrer als Aktor, um das gewünschte Moment am Antriebsstrang zu stellen. Entsprechend wird die Pedalstellung durch ein Kennfeld so interpretiert, dass sich daraus eine Momentanforderung für die Motorsteuerung ergibt. Bei Fahrzeugen mit automatischen Getrieben – wie es auch in der vorliegenden Arbeit vorausgesetzt wird – dient die Pedalstellung auch als Eingangsgröße für die Schaltstrategie. Im vorliegenden Modell wird die Momentanforderung des Fahrers durch die erforderliche Beschleunigung auf einem Streckenabschnitt ersetzt.

Es hat sich bei der Modellbildung als praktikabel erwiesen, die absolute Pedalstellung  $p_{Ges}$  durch die Summe zweier Anteile zu nähern. Dabei handelt es sich zum einen um die Pedalstellung  $p_{KF}$ , die zum konstanten Halten jener Geschwindigkeit, die das Fahrzeug zu Beginn des Streckenabschnitts hat, erforderlich wäre. Hierzu dient eine geschwindigkeitsabhängige Kennlinie, die im vorliegenden Fall experimentell ermittelt wurde. Der andere Anteil  $p_{a+}$  ergibt sich aus der zusätzlichen Momentanforderung, die sich aus der entsprechenden Geschwindigkeitserhöhung ergibt.

So erhält man aus der Kennlinie

$$p_{KF} = -8,984 \cdot 10^{-6} \cdot v_{Fzg}^3 + 6,685 \cdot 10^{-4} \cdot v_{Fzg}^2 - 1,105 \cdot 10^{-3} \cdot v_{Fzg} + 0,05489 \quad (6.18)$$

zunächst ersteren Anteil, um ihn dann mit dem erforderlichen Anteil der Maximalbeschleunigung

$$p_{a+} = (1 - p_{KF}) \cdot \frac{a_{Soll}}{a_{max}} \quad (6.19)$$

zur absoluten Pedalstellung

$$p_{Ges} = p_{KF} + p_{a+} \quad (6.20)$$

zu addieren. Die Pedalstellung kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. In (6.19) wird ermittelt, welche Reserven das Halten der konstanten Geschwindigkeit noch zulässt. Die gewünschte Beschleunigung wird dann in Relation zur maximal möglichen Beschleunigung  $a_{max}$  gesetzt, wodurch sich schließlich aus dem Produkt mit der Pedalstellungs-Reserve der für die Beschleunigung erforderliche Anteil  $p_{a+}$  ergibt. Wenn die erforderliche Beschleunigung  $a_{Soll}$  gleich 0 ist, so wird dieser Summand in (6.20) 0 und folgerichtig ergibt sich die Gesamtpedalstellung ausschließlich durch den für die konstante Fahrt erforderlichen Anteil  $p_{KF}$ . Hierbei ist zu beachten, dass die Kennlinie (6.18) fahrzeugspezifisch und bei Adaption des Modells auf ein anderes Fahrzeug jeweils anzupassen ist.

Im Sonderfall, dass die Soll-Beschleunigung auf einem Streckenabschnitt negativ ist, aber dennoch die Betriebsart Antrieb vorliegt, ist folgendes zu beachten: Durch die Quotientenbildung aus Soll- und Maximalbeschleunigung kann der Ausdruck für den Beschleunigungsanteil der Pedalstellung  $p_{a+}$  negativ werden. Dadurch wiederum kann die Gesamtpedalstellung  $p_{Ges}$  ebenfalls rechnerisch negativ werden. Das ist physikalisch nicht möglich und deshalb kein zulässiger Eingang für die Schaltstrategie. Um diesen Sonderfall abzufangen, wird die geschätzte Pedalstellung im Quellcode auf Werte  $\geq 0$  beschränkt.

$$p_{Ges} = p_{KF} + p_{a+} \quad \geq 0$$

### 6.4.3. Modellierung der Schaltstrategie

Die Gangwahl ergibt sich aus der Schaltstrategie mit den Eingangsgrößen Pedalstellung und aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit. Dabei wird zwischen zwei Schaltstrategien unterschieden: Bild 32 zeigt ein typisches Kennfeld für die Gangwahl, das bei positiven Beschleunigungen gilt. Analog dazu dient das Kennfeld in Bild 33 für die Wahl der Schaltstufe bei negativer Soll-Beschleunigung. Es kommt hauptsächlich bei der Gangwahl im Schubbetrieb zum Einsatz, wodurch wiederum der Betrag der Verzögerung beeinflusst wird.

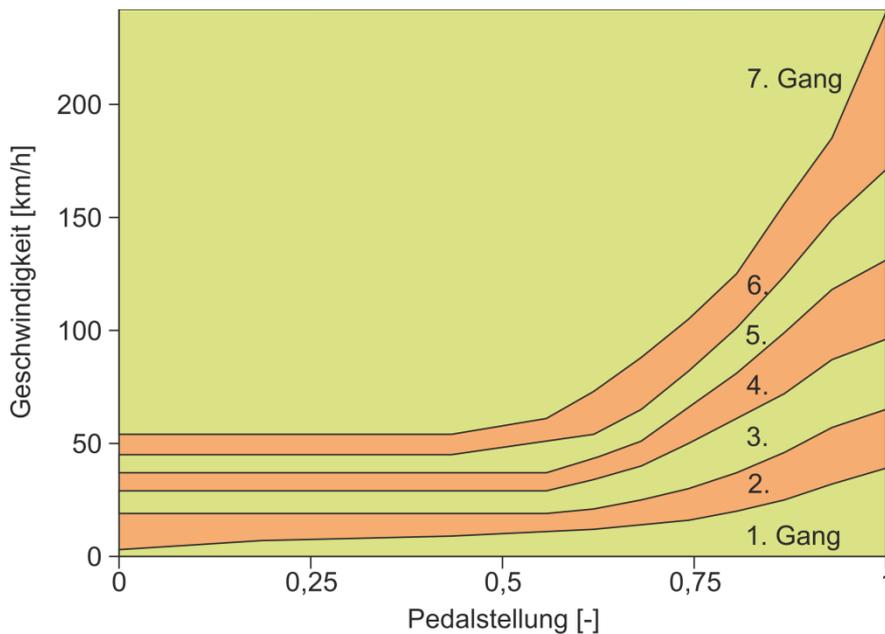


Bild 32: Wahl der Schaltstufen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrpedal-Stellung im Antriebsfall

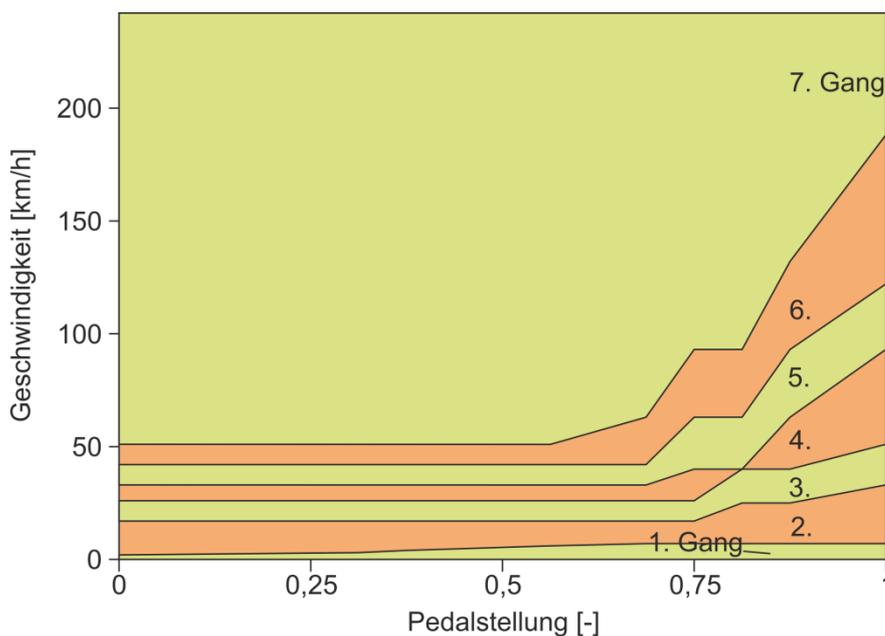


Bild 33: Wahl der Schaltstufen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrpedal-Stellung bei negativen Beschleunigungen

Bei obigem Kennfeld für negative Beschleunigungen könnte man erwarten, dass eine Kennlinie genügt, weil die Pedalstellung im Verzögerungsmodus Schubbetrieb immer 0 ist. Jedoch sind auch Fahrsituationen denkbar, in denen trotz negativer Soll-Beschleunigung ein Antriebsmoment geleistet werden muss und somit eine Fahrpedalstellung größer 0 erforderlich ist. Ein Beispiel hierfür ist das Befahren einer Steigung, an der zwar verzögert werden soll, die Verzögerung jedoch nicht so stark sein darf wie beim leichtesten Verzögerungsmodus (Gleitfahrt).

Die Kennlinie für die Schubverzögerung, die aus Bild 33 mit der Pedalstellung 0 resultiert, wird in Bild 34 durch den fett gedruckten Verlauf dargestellt. Je nach Schaltstufe und Fahrzeuggeschwindigkeit variiert die Verzögerung, die im Schubbetrieb realisiert werden kann. Im Modell werden die jeweiligen Verzögerungen mit Polynomfunktionen  $a_{SB}(v_{Fzg})$  berechnet. Wie zuvor beim Polynom für die maximale Beschleunigung (6.3) wurden auch hier die Koeffizienten experimentell ermittelt. Die Gültigkeitsbereiche der jeweiligen Funktionen (6.21) bis (6.26) ergeben sich aus der Schaltstrategie, wobei die Fahrzeuggeschwindigkeit hierbei in m/s einzusetzen ist. Da es sich hier lediglich um Näherungen für die betreffenden Geschwindigkeitsbereiche handelt, kann die Beschleunigung beispielsweise im Schubbetrieb im 4. Gang nie größer 0 werden. Sie findet nur im gekennzeichneten Bereich zwischen 26 und 33 km/h Anwendung, die Fortführung des Verlaufes ist lediglich theoretischer Natur und wird der Vollständigkeit halber dargestellt.

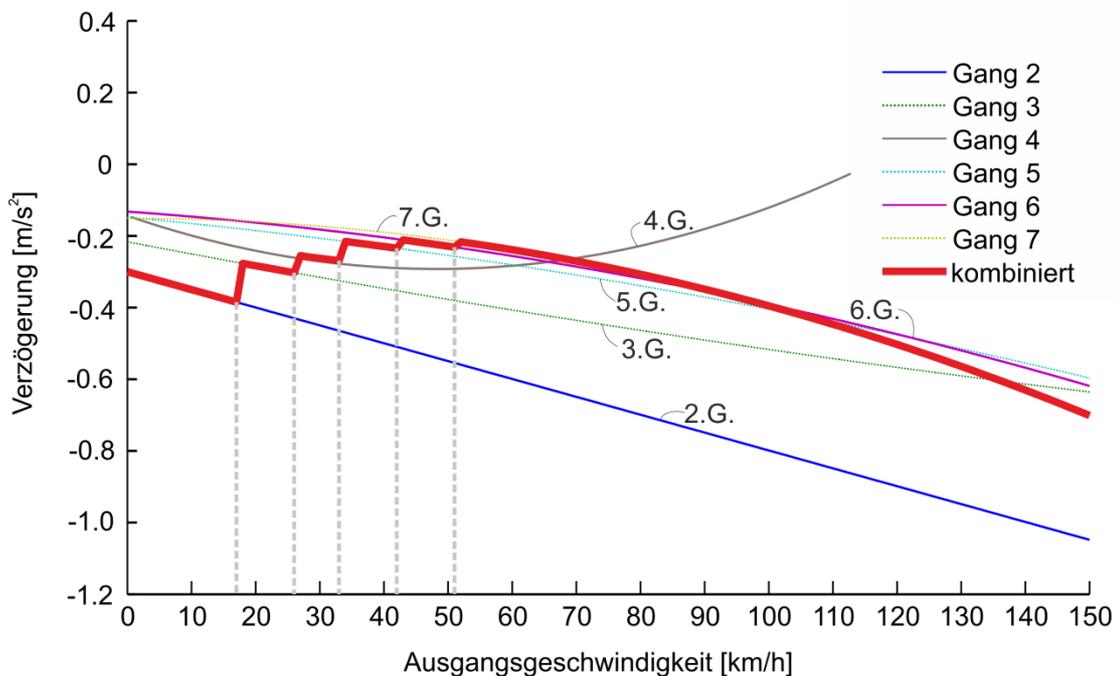


Bild 34: Abhängigkeit der Schubverzögerung von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Schaltstufe

$$a_{SB,Gang2} = -0,017956 \cdot v_A - 0,3 \quad (6.21)$$

$$\text{mit } 0 < v_A < 4,7$$

$$a_{SB,Gang3} = 5,4548 \cdot 10^{-5} \cdot v_A^2 - 1,2329 \cdot 10^{-2} \cdot v_A - 0,21655 \quad (6.22)$$

$$\text{mit } 4,7 \leq v_A < 7,2$$

$$a_{SB,Gang4} = 8,2733 \cdot 10^{-4} \cdot v_A^2 - 2,1921 \cdot 10^{-2} \cdot v_A - 0,13747 \quad (6.23)$$

mit  $7,2 \leq v_A < 9,1$

$$a_{SB,Gang5} = -1,1107 \cdot 10^{-4} \cdot v_A^2 - 6,1538 \cdot 10^{-3} \cdot v_A - 0,1476 \quad (6.24)$$

mit  $9,1 \leq v_A < 11,6$

$$a_{SB,Gang6} = -1,6986 \cdot 10^{-4} \cdot v_A^2 - 4,602 \cdot 10^{-3} \cdot v_A - 0,13217 \quad (6.25)$$

mit  $11,6 \leq v_A < 14,1$

$$a_{SB,Gang7} = -3,1782 \cdot 10^{-4} \cdot v_A^2 + 3,6756 \cdot 10^{-5} \cdot v_A - 0,15105 \quad (6.26)$$

mit  $14,1 \leq v_A$

Ziel der Modellierung der Schaltstrategie ist die Ermittlung der zur jeweiligen Fahr-situation passenden Getriebeübersetzung  $i_{Getr.}$  Im vorliegenden Modell wurde direkt die Gesamtübersetzung verwendet, so dass die Achsübersetzung bereits enthalten ist. Die Übersetzungen der einzelnen Gänge bei der hier verwendeten Parametrierung ergeben sich aus folgender Tabelle:

Gang	$M_{Ab}/M_{An}$ bzw. $\omega_{An}/\omega_{Ab}$
1	16,7059
2	10,0852
3	6,7949
4	5,4115
5	3,7968
6	3,0698
7	2,5671

#### 6.4.4. Berechnung der Getriebeeffizienz und des Motorabtriebsmoments

Wie aus der Übersicht in Bild 31 deutlich wird, erfolgt im nächsten Schritt des Programmablaufes die Berechnung des erforderlichen Motorabtriebsmoments  $M_A$ . Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Getriebe last- und temperaturabhängige Verluste entstehen, die in diesem Modell mit dem Verlustmoment  $M_{Verl.}$  bezeichnet werden. Daher ergibt sich das gesuchte Motormoment unter der in (6.17) getroffenen Annahme der rein kinematischen Beziehungen im Rad-Straße-Kontakt aus

$$M_A = M_R \cdot \frac{1}{i_{\text{Getr.}}} + M_{\text{Verl.}} \quad (6.27)$$

Analog dazu gilt bei den an- und abtriebsseitigen Getriebedrehzahlen

$$\omega_A = \omega_R \cdot i_{\text{Getr.}} \quad (6.28)$$

Neben Last und Drehzahl hängt die Effizienz des Getriebes zudem von seiner Temperatur und dem anliegenden Gang ab. Zur Ermittlung der absoluten Verlustmomente dienen entsprechende Kennfelder. Hier wurde jeweils ein Kennfeld für jede der sieben Schaltstufen implementiert. Diese gelten jeweils für die normale Betriebstemperatur des Getriebes bei ca. 60°C. Um im Modell die Möglichkeit der Berücksichtigung weiterer Temperaturen zu schaffen, müssten je Temperatur sieben weitere Kennfelder aufgenommen und eingefügt werden. Ein Vergleich der Verlustmomente bei unterschiedlichen Temperaturen jedoch hat gezeigt, dass der Einfluss ihrer aus der Temperaturänderung resultierenden Differenzen auf die gesamte Drehimpulsbilanz vernachlässigbar gering ist. Daher wurde an dieser Stelle des Modells auf die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit verzichtet. Bild 35 zeigt am Beispiel des 3. Ganges solch ein Kennfeld der Verlustmomente. Die Eingangsgrößen zur Interpolation innerhalb des Kennfeldes erhält man aus

$$M_{A,0V} = M_R \cdot \frac{1}{i_{\text{Getr.}}} \quad (6.29)$$

für das Lastmoment sowie (6.28) für die antriebsseitige Drehzahl.

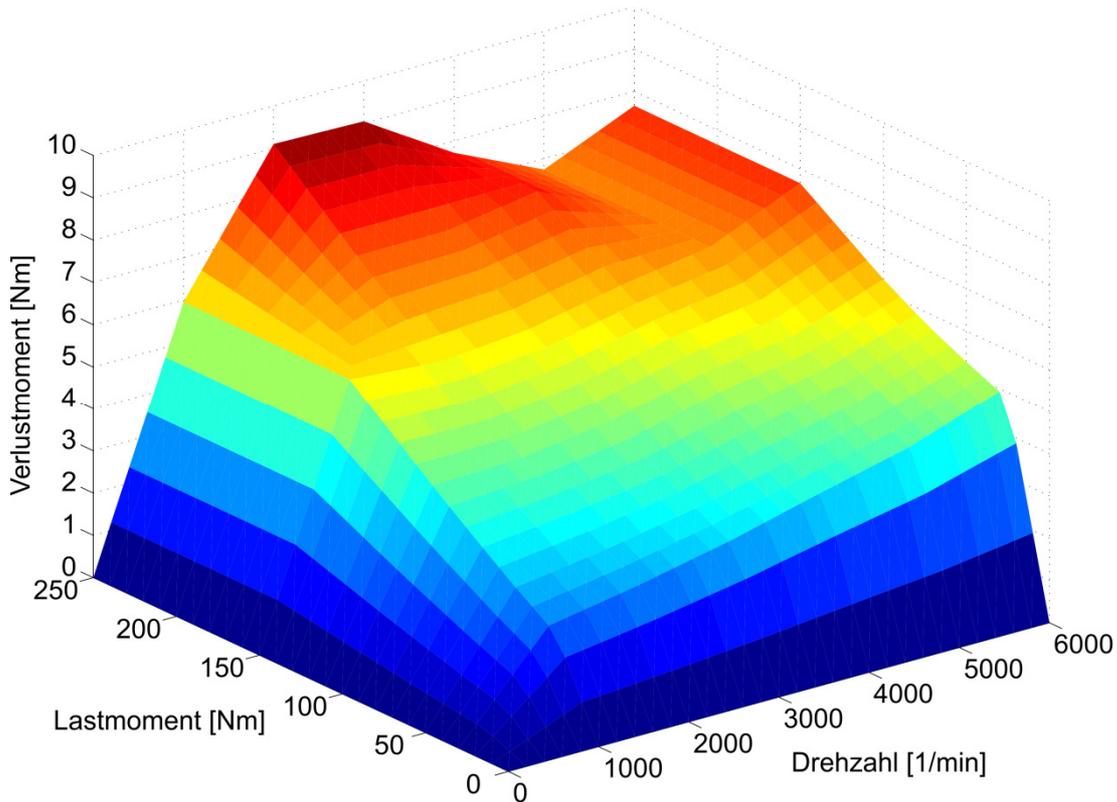


Bild 35: Getriebeverlustmoment im 3. Gang über Last und Drehzahl bei Betriebstemperatur

### 6.4.5. Kraftstoffverbrauch

Wie eingangs erläutert ist die Modellierung der physikalischen Prozesse bei der Energiewandlung im Verbrennungsmotor sehr aufwändig. Eine etablierte Alternative ist die kennfeldbasierte Kraftstoffverbrauchsberechnung, die anhand der Größen Motordrehzahl  $\omega_A$  und effektiver Motormitteldruck  $p_{me}$  gute Näherungen an den realen Verbrauch, insbesondere in langen Simulationsintervallen wie sie auch hier vorliegen, liefert. Dabei ist der effektive Mitteldruck eine rechnerische Größe, die in dieser Form nicht direkt messbar ist, aber in der Literatur (beispielsweise [39]) häufig zur Bewertung der Effizienz von Motoren Anwendung findet. Die je Arbeitsspiel geleistete Arbeit wird dazu in Relation zum Hubraum des Motors gesetzt. Anhand der in diesem Modell verfügbaren Größen ist der effektive Mitteldruck [bar] zu

$$p_{me} = \frac{M_A \cdot 2\pi \cdot 10^{-5}}{V \cdot T} \quad (6.30)$$

mit  $V$  [m<sup>3</sup>] als Hubvolumen und  $T$  [-] als Anzahl der Takte je Arbeitsspiel definiert (siehe z.B. [36]). Bild 36 zeigt ein typisches Verbrauchskennfeld eines PKWs, das im vorliegenden Fall experimentell ermittelt wurde. Um die absolute Kraftstoffmasse für die Zielgrößenberechnung für einen Streckenabschnitt zu erhalten, muss die Ausgangsgröße des Kennfelds noch mit der Fahrzeit aus (6.5) multipliziert werden:

$$m_{Kr} = \dot{m}_{Kr} \cdot \Delta t \quad (6.31)$$

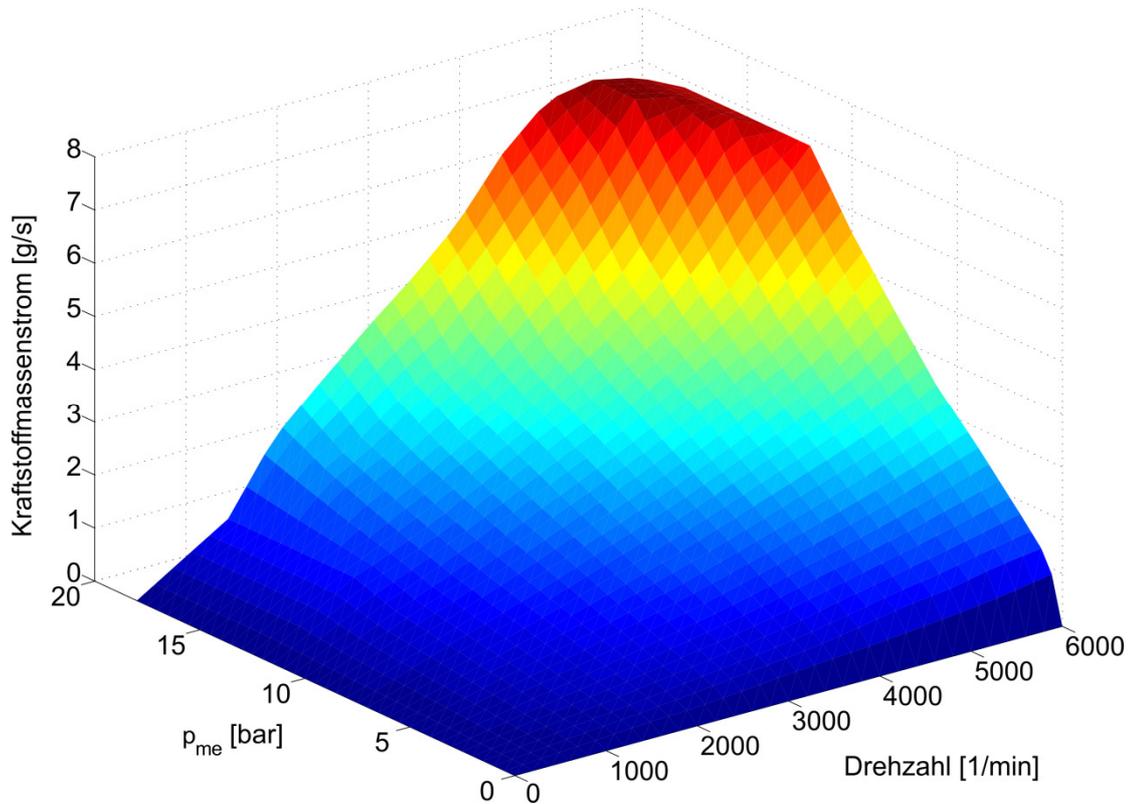


Bild 36: Kennfeld für den Kraftstoffmassenstrom in Abhängigkeit von effektivem Mitteldruck und Drehzahl des Motors

#### 6.4.6. Unterlagerte Diskretisierung zur modellbasierten Verbrauchsberechnung

Die bei der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Zustandsraumbildung angewendeten Diskretisierungs-Schrittweiten sind zu groß, um die modellbasierte Verbrauchsberechnung in ausreichender Genauigkeit zu gewährleisten. Insbesondere die Wechsel der Schaltstufen haben einen erheblichen Einfluss auf das Motormoment. Allerdings wird die Schaltstufe für jedes diskrete Streckenstück nur einmal berechnet, so dass der Gangwechsel im Modell nur an Stützstellen berücksichtigt werden kann. Die Vorteile der ursprünglichen Schrittweiten bezüglich der Rechenzeit sollen beim Schubbetrieb und der Gleitfahrt erhalten bleiben, nachteilig wirken sie sich lediglich bei angetriebenem Fahrzeug aus. Daher erfolgt in letzteren Fällen eine temporäre unterlagerte Diskretisierung mit geringeren Schrittweiten, die den Detaillierungsgrad der Verbrauchsberechnung erhöht.

Die Vorgehensweise bei dieser unterlagerten Diskretisierung wird im Folgenden anhand eines Beispiels, das auch in Bild 37 dargestellt ist, beschrieben. Die linke Ab-

bildung zeigt den Zustandsraum mit ursprünglicher Diskretisierung, rechts ist das Resultat der Verfeinerung zu sehen.

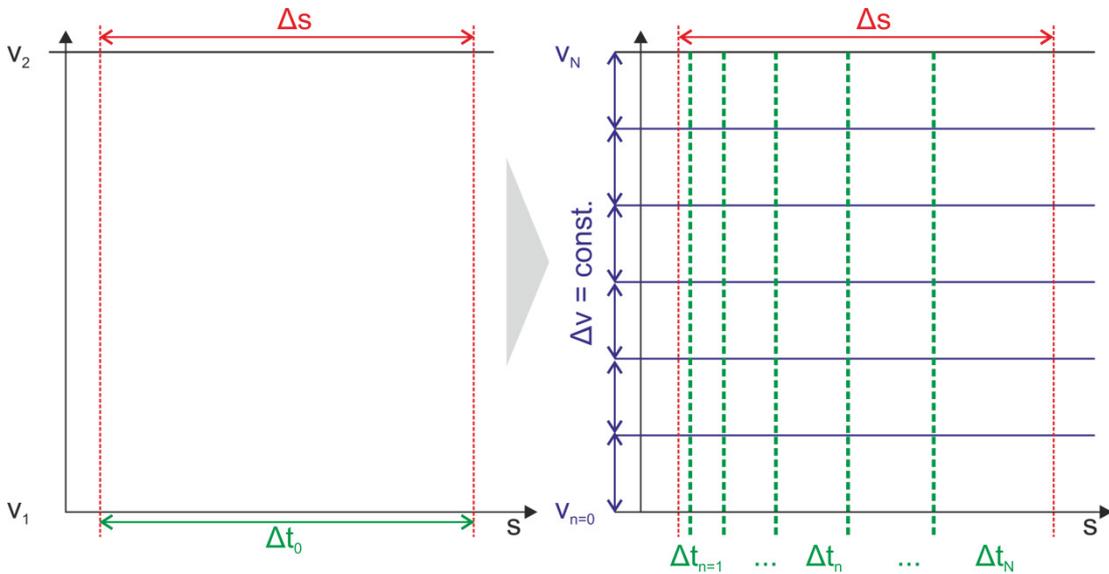


Bild 37: Unterlagerte Diskretisierung bei der modellbasierten Verbrauchsberechnung

Bekannt sind hierbei Ausgangs- sowie Folgegeschwindigkeit  $v_1$  und  $v_2$ , die Länge des Streckenabschnitts  $\Delta s$  und die Gesamtzeit  $\Delta t_0$ , die für das Manöver benötigt wird. In der Dimension Geschwindigkeit wird erneut äquidistant geteilt, beispielsweise in 0,1 km/h- statt der ursprünglich verwendeten 1 km/h-Schritten. Die Anpassung der Diskretisierung in der Dimension Strecke wird nun aus der neuen Geschwindigkeits-Diskretisierung abgeleitet. Sei

$$v_1 = v_{n=0} , \quad v_2 = v_N \quad \text{und} \quad (6.32)$$

$$\Delta v = \frac{v_2 - v_1}{N} , \quad (6.33)$$

so erhält man – weiterhin unter der Annahme konstanter Beschleunigung  $a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t_0}$  zwischen zwei diskreten Punkten – die kleineren Zeitintervalle aus

$$\Delta t_n = \frac{\Delta v}{a} = \frac{v_2 - v_1}{N} \cdot \frac{\Delta t_0}{v_2 - v_1} = \frac{\Delta t_0}{N} , \quad (6.34)$$

wobei

$$\sum_{n=1}^N \Delta t_n = \Delta t_0 \quad \text{und} \quad v_2 > v_1 \quad (6.35)$$

gelten. Im Quellcode sind die Berechnungsvorschriften für die Fälle  $v_1 > v_2$  und  $v_1 = v_2$  entsprechend angepasst. Wie in Bild 37 sichtbar wird, ist die vorübergehende unterlagerte Diskretisierung in der Dimension Strecke aufgrund der konstanten Zeitinter-

valle nicht mehr äquidistant, da mit steigender Geschwindigkeit bei jeweils gleichlangen Zeitintervallen auch die zurückgelegte Strecke steigt.

Die hier berechneten Fahrzeuggeschwindigkeiten und Zeitintervalle werden im gesamten Fahrzeugmodell anstelle der aus der ursprünglichen Diskretisierung hervorgehenden Größen eingesetzt. Sie sind also in (6.9), (6.11), (6.17), (6.18), (6.21) bis (6.26) und (6.31) zu berücksichtigen.

#### **6.4.7. Zusammenfassung der Kostenberechnung anhand eines Beispiels**

Die Kostenberechnung wurde hier exemplarisch für ein Streckenteilstück der Länge  $\Delta s=50\text{m}$  durchgeführt. Die Geschwindigkeitsdifferenzen, die auf diesem Abschnitt mit der vorliegenden Modellparametrierung realisiert werden können, gehen aus Bild 30 hervor. Die dort verwendete Fahrzeug-Parametrierung liegt auch hier zugrunde.

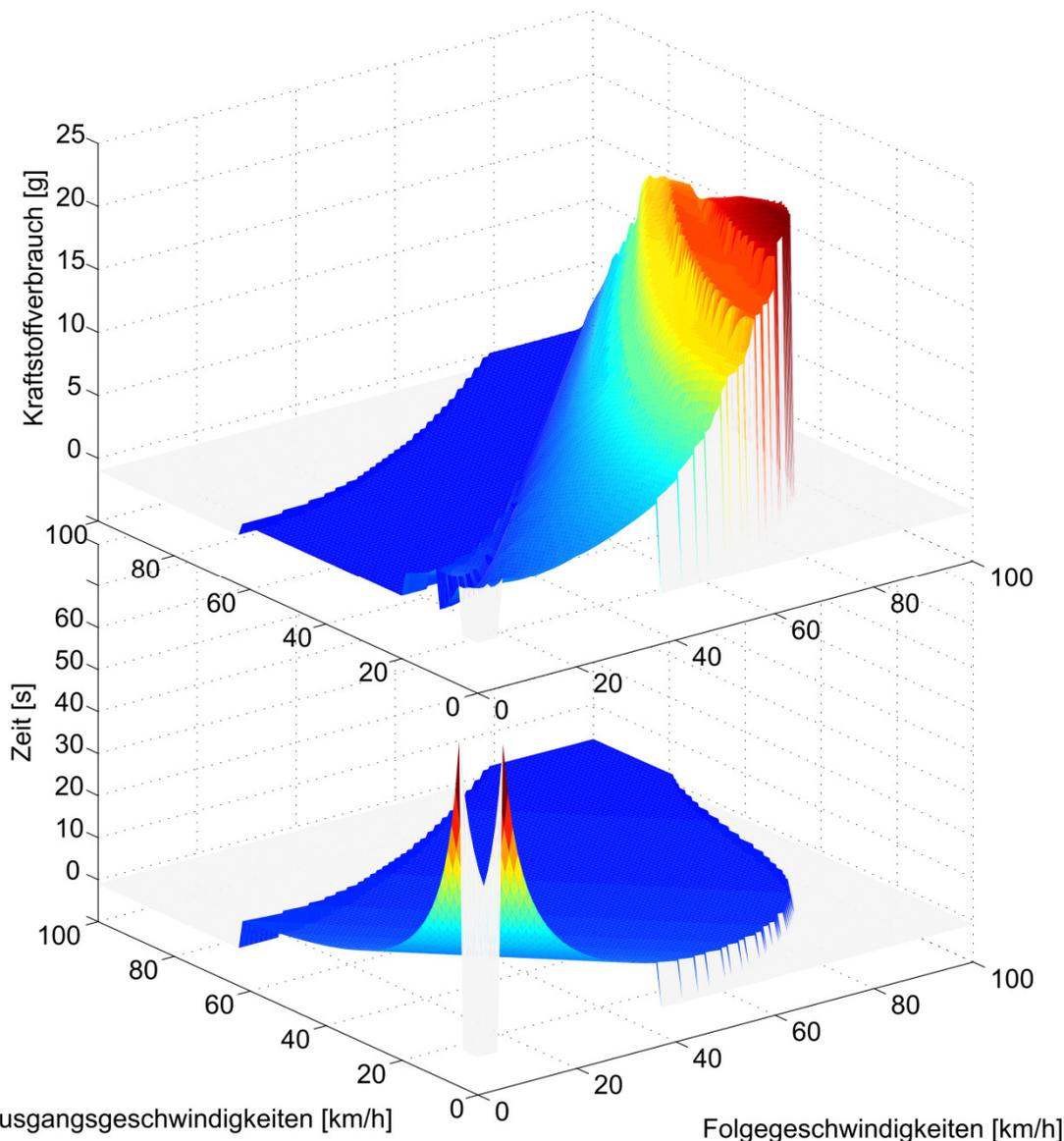


Bild 38: Kosten für Zeit und Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Ausgangs- und Folgegeschwindigkeiten auf einem Streckenteilstück

Bild 38 zeigt die Entscheidungskosten in Form der jeweiligen Zielgrößen Kraftstoffverbrauch (oben) und Zeit (unten). Geschwindigkeits-Kombinationen unter 5 km/h blieben in dieser Beispielrechnung unberücksichtigt, da die jeweiligen Zeiten gegen unendlich anwachsen und somit die übersichtliche Darstellung erschweren würden. Der Kraftstoffverbrauch liegt im Bereich des Schubbetriebes bei 0 und steigt im Bereich des Antriebes an, wobei der stufenförmige Verlauf auf Gangwechsel wie z.B. Herunterschalten bei starken Beschleunigungen zurückzuführen ist. Die Fahrzeiten sind entlang einer Achse der Streckenabschnitte mit konstanter Geschwindigkeit, also den Kombinationen derselben Ausgangs- und Folgegeschwindigkeit, symmetrisch. Grund hierfür ist die bei der Erstellung des Optimierungsmodells getroffene Annahme der zeitlich konstanten Beschleunigung innerhalb eines Streckenteilstückes  $\Delta s$ . Werden dann anhand der Zielfunktion die Gesamtkosten gebildet, entstehen dabei beispielsweise die in Bild 39 dargestellten Verläufe. Hier wurden drei verschie-

dene Kombinationen der Gewichtungsfaktoren angenommen, von oben nach unten mit steigender Gewichtung auf Fahrzeit. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss des Kraftstoffverbrauches im Verhältnis zur Relation der Gewichtungsfaktoren überproportional stark abnimmt. Um diesen Effekt abzumildern, könnten die absoluten Erfüllungswerte der einzelnen Zielgrößen vor Auswertung der Zielfunktion durch eine geeignete Skalierungsvorschrift so angepasst werden, dass ihre Minima und Maxima innerhalb vergleichbarer Spannen bzw. Wertebereiche liegen. Da aber die resultierenden Zahlenwerte für Kraftstoffverbrauch und Fahrzeit bei Verwendung der Einheiten g bzw. s bereits ungefähr gleiche Größenordnung haben, wurde hier davon abgesehen.

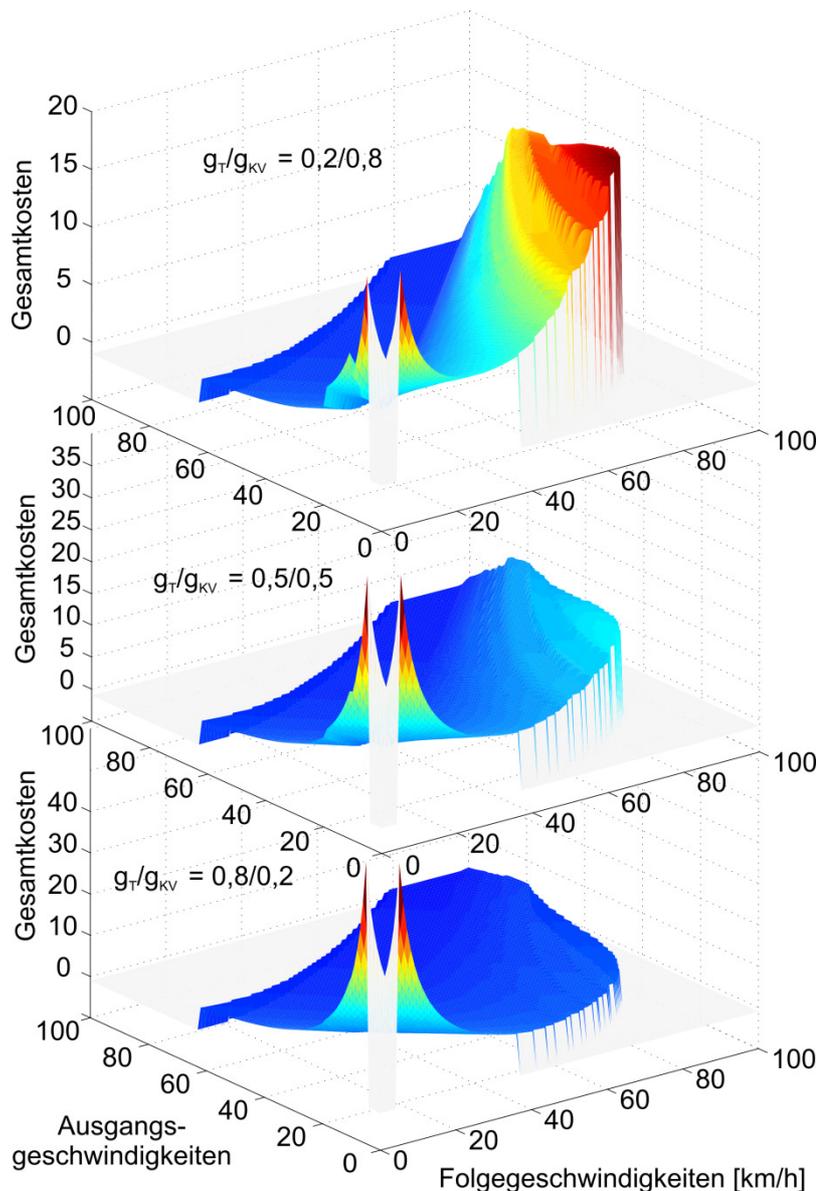


Bild 39: Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Geschwindigkeitskombinationen auf einem Streckenteilstück, resultierend aus unterschiedlichen Zielfunktions-Parametern

#### 6.4.8. Validierung der modellbasierten Kraftstoffverbrauchsberechnung

Um sicherzustellen, dass das Fahrzeugmodell zur Kraftstoffverbrauchsberechnung im Antriebsfall Ergebnisse von ausreichender Genauigkeit liefert, wurde eine Validierung durchgeführt. Grundsätzlich sind detaillierte Modellvalidierungen mit erheblichem Aufwand verbunden, besonders Tests und Messungen am realen System sind sehr zeit-, personal- und damit kostenintensiv. Um dies zu vermeiden und dennoch eine Aussage zur Qualität des Modells treffen zu können, wurde von der klassischen Vorgehensweise einer Modellvalidierung abgewichen.

Zur Verfügung standen Messdaten, die unabhängig von der vorliegenden Arbeit bei einer Testfahrt in anderem Rahmen aufgenommen wurden. Da sich das vorliegende Optimierungsmodell mit geringem Aufwand, nämlich durch Anpassung einiger Parameter und Kennfelder, leicht auf unterschiedliche Fahrzeugtypen adaptieren lässt, konnten diese Daten zu seiner Validierung verwendet werden. Da lediglich das Fahrzeugmodell und nicht das gesamte Optimierungsmodell Gegenstand der Validierung sein sollte, ist es nicht relevant, ob das Geschwindigkeitsprofil, für das die Zielgrößen modellbasiert berechnet werden, optimal ist. Für die vorliegende Validierungsaufgabe wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Extraktion der Kostenberechnung aus dem Optimierungsmodell
2. Bearbeitung der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit bei der Testfahrt
  - a. Diskretisierung
  - b. Aufbereitung als Eingangsgröße für die Kostenberechnung  
⇒ Entscheidungen werden nicht durch die dynamische Programmierung vorgegeben, sondern  $v_i$ - $v_j$ -Kombinationen sind durch die Messdaten vorgegeben
3. Simulation der Testfahrt
4. Vergleich zwischen den modellbasiert berechneten und den gemessenen Zielgrößen

Der Vergleich in Bild 40 zeigt, wie die Geschwindigkeitsvorgabe für die Simulation im diskreten Zustandsraum aufgrund der Diskretisierungs-Effekte von der real gefahrenen abweicht.

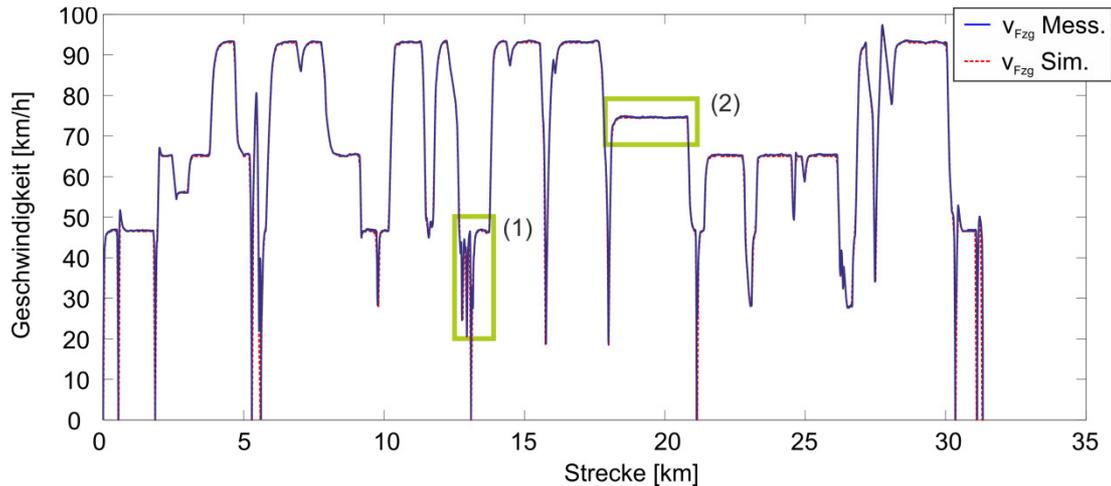


Bild 40: Vergleich zwischen Geschwindigkeitsprofilen aus Testfahrt und der diskreten Soll-Vorgabe für die Simulation

In Bereichen mit starken und/oder kurz aufeinanderfolgenden Geschwindigkeitsänderungen, wie sie beispielsweise in dem in Bild 40 mit Hervorhebung (1) gekennzeichneten und in Bild 41 (oben) vergrößert dargestellten Streckenabschnitt auftreten, kann das Geschwindigkeitsprofil der Testfahrt durch die bei der Diskretisierung angewendete Schrittweite von  $\Delta s=50$  m in der Simulation nicht ganz genau nachvollzogen werden. Außerdem wurden Geschwindigkeiten bei der Testfahrt manuell eingeregelt. Das führt dazu, dass die Geschwindigkeit auch in Abschnitten (Hervorhebung (2) in Bild 40 und unten in Bild 41), wo sie eigentlich konstant gehalten werden sollte, immer leicht variiert. Da die Abweichungen aber unterhalb der in der Simulation verwendeten Diskretisierungs-Schrittweite von  $\Delta v=1$  km/h liegen, werden auch sie nicht nachvollzogen. Als Folge dieser Abweichungen resultiert bei der Simulation außerdem eine von der realen Fahrt abweichende Gangwahl. Diese wiederum wird im Modell durch die Schaltstrategie fest vorgegeben und kann nicht beeinflusst werden.

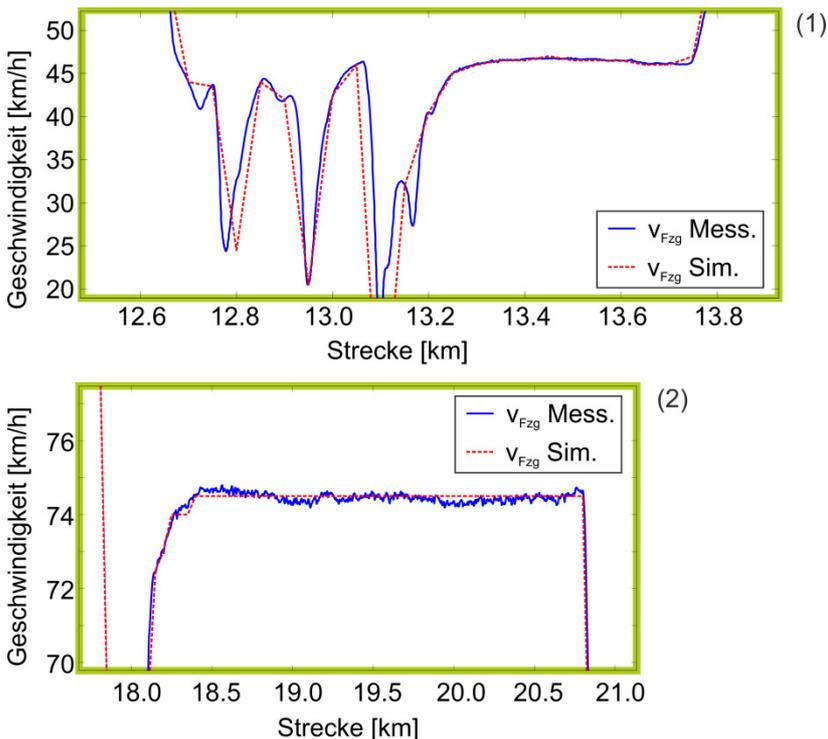


Bild 41: Vergrößerte Darstellungen aus Bild 40

Insgesamt ist bei der Zielgröße Fahrtdauer die Differenz zwischen der Simulation und der realen Testfahrt vernachlässigbar gering, weil die Geschwindigkeitsprofile trotz der beschriebenen geringfügigen Ungenauigkeiten nahezu deckungsgleich sind. Die Differenzen bei der Zielgröße Kraftstoffverbrauch gehen aus Bild 42 hervor. Die dort abgebildeten Kurven zeigen jeweils die Verbräuche je diskretem Streckenabschnitt der Länge  $\Delta s$ .

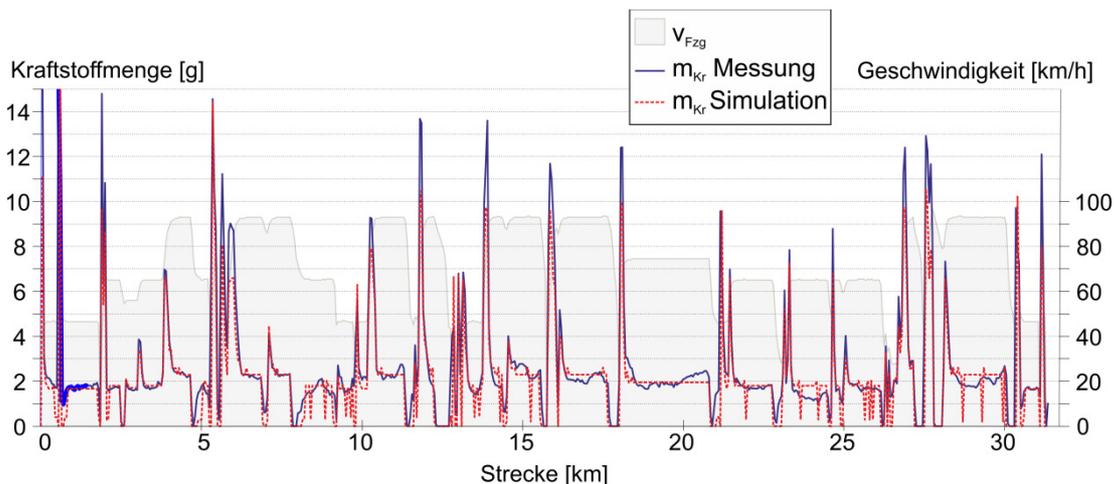


Bild 42: Vergleich zwischen dem Kraftstoffverbrauch einer Testfahrt und dem modellbasiert berechneten

Sie unterscheiden sich hauptsächlich dort, wo bei der Testfahrt große Peaks bei Beschleunigungen auftraten und außerdem in den Phasen mit konstanter Geschwindigkeitsvorgabe, was wiederum die Konsequenz der manuellen Geschwindigkeitsrege-

lung bei der Testfahrt ist. Trotz der Abweichungen stimmen die Verläufe jedoch weitestgehend überein. Über die gesamte Länge der Teststrecke von mehr als 30 km wurden bei der Testfahrt 0,7 l Kraftstoff verbraucht, während bei der Simulation ein Verbrauch von 0,675 l berechnet wurde. Somit beträgt die Verbrauchsdifferenz ca. 3,6 %. Daher wird an dieser Stelle das Fazit gezogen, dass sich das Fahrzeugmodell trotz der stark vereinfachten Darstellung der Längsdynamik im Rahmen dieser Validierung als ausreichend genau für die Verwendung der Verbrauchsberechnung innerhalb des Optimierungsmodells erwiesen hat.

## 6.5. Speicherung der Zwischenergebnisse

Nachdem sich die Ausführungen in den vorigen Unterkapiteln 6.3 und 6.4.1 bis 6.4.6 damit beschäftigt haben, wie Entscheidungen innerhalb eines Teilproblems respektive zwischen zwei Wegstützstellen getroffen und wie deren Kosten berechnet werden, erfolgt hier nun die Vorbereitung zu deren Einbindung in das Gesamtproblem. Dazu müssen die für die Betrachtung des Gesamtproblems bzw. der vollständigen Fahrstrecke relevanten Zwischenergebnisse gespeichert werden. Sie müssen im weiteren Programmablauf zur Verfügung stehen. Eine Übersicht der innerhalb der folgenden Ausführungen verwendeten Variablen findet sich in Tabelle 2 auf Seite 91.

Zu diesem Zweck werden Zwischenergebnisse nach Abschluss der Berechnungen jeder im weiteren Verlauf noch zu berücksichtigenden Entscheidung (d.h. Geschwindigkeitsdifferenz) in einem Vektor  $E$  mit 9 Elementen gespeichert. Später wird dieser zu einem Element der für das Gesamtproblem gültigen Ergebnismatrix<sup>(4)</sup>, deren Dimension der der den Zustandsraum beschreibenden Matrix  $ZR$  entspricht. Diese Matrix wird beispielsweise in Bild 26 (S. 64) dargestellt.

$$E_{k-1, j} = \begin{pmatrix} z_u \\ a \\ z_o \\ f \\ f_{ver} \\ f_t \\ F_u \\ F_o \\ BA \end{pmatrix} \quad (6.36)$$

<sup>(4)</sup> Dabei handelt es sich nicht um eine Matrix im mathematischen Sinne, die aus eindimensionalen Elementen besteht. In MATLAB besteht vielmehr die Möglichkeit, einen sog. „Cell Array“ als Datentyp zu verwenden, der beliebige Objekte wie z.B. die hier definierten Vektoren enthält. Siehe hierzu auch: <http://www.mathworks.de/de/help/matlab/ref/cell.html>, Stand 8. März 2013

$$E = \begin{pmatrix} E_{k=1,j=1} & \cdots & E_{K,j=1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{k=1,J} & \cdots & E_{K,J} \end{pmatrix} \quad (6.37)$$

Bevor darauf eingegangen wird, unter welchen Umständen (6.36) Element von (6.37) wird, soll zunächst erläutert werden, welche Größen dieser Vektor enthält.

Bild 43 greift die Darstellung aus Bild 27 auf und ordnet einige der ergebnisrelevanten Variablen in den Programmablauf ein. Wie dort zu sehen ist, benennt  $z_u$  die aktuell durch die Laufvariable  $j$  fixierte Geschwindigkeit an der Wegstützstelle  $k-1$ . Auf die Fahrzeugbewegung bezogen ist dies die Ausgangsgeschwindigkeit zu Beginn des Streckenteilstücks. Analog dazu steht  $z_o$  für die Folgegeschwindigkeit, die an der Wegstützstelle  $k$  erreicht wird und durch die Laufvariable  $i$  bestimmt wird. Aus den beiden Zuständen erhält man mit

$$a = \frac{z_o^2 - z_u^2}{2 \cdot \Delta s}$$

die erforderliche Beschleunigung auf dem Streckenteilstück der Länge  $\Delta s$ . Der stufenbezogene Zielfunktionswert  $f$  entspricht der gewichteten Summe der einzelnen Zielgrößen bzw. Kosten, im konkreten Fall Kraftstoffverbrauch und Zeit, die beim aktuellen Fahrmanöver zwischen  $s(k-1)$  und  $s(k)$  anfallen

$$f = g_v \cdot f_{ver} + g_t \cdot f_t \quad ,$$

wobei  $f_{ver}$  nach (6.5) und  $f_t$  nach (6.31) berechnet werden. Der Gesamt-Zielfunktionswert  $F_o$  entspricht der Summe aller stufenbezogenen Zielfunktionswerte für das bisher optimierte Teilproblem  $\{K, K-1, \dots, k\}$ . Er korrespondiert also mit der günstigsten Möglichkeit, das System vom Zustand  $z_o = v_i(k)$  in den Zustand  $v_{end}(K)$  zu überführen. Analog dazu bezeichnet  $F_u$  den Zielfunktionswert für das Teilproblem, das gegenüber  $F_o$  nun um den Streckenabschnitt zwischen  $s(k-1)$  und  $s(k)$  erweitert wurde. Dieser Wert wird mit

$$F_u = F_o + f$$

gebildet. Zu Informationszwecken wird der Ergebnisvektor noch durch die Speicherung der Betriebsart, aus der das Ergebnis des aktuellen Streckenabschnittes resultiert, vervollständigt.

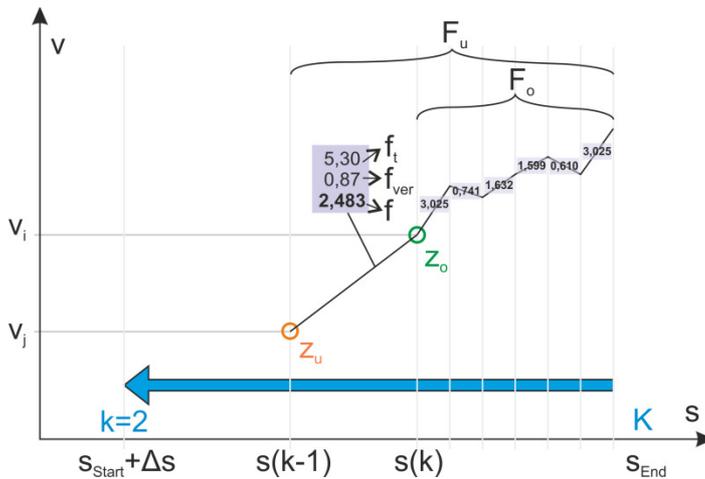


Bild 43: Elemente des Vektors zur Ergebnisspeicherung

Die Anzahl der Ergebnisvektoren, die man so auf der Stufe  $k$  des Programmablaufes erhält, entspricht der Anzahl aller zulässigen  $z_u$ - $z_o$ -Kombinationen, die sich durch das vollständige Durchlaufen der Schleife  $i$  und der jeweils unterlagerten Schleifen  $j$  ergeben. In den meisten Fällen gibt es für jeden Zustand  $z_u$  also mehrere mögliche Folge-Zustände  $z_o$ . Gesucht wird jedoch eine eindeutige Lösung für das Optimierungsproblem, daher muss jedem einzelnen  $z_u$  ein eindeutiger, optimaler Folgezustand zugeordnet werden. Bild 44 zeigt die für die Dynamische Programmierung charakteristische Vorgehensweise der schrittweisen Eliminierung nichtoptimaler Lösungen des Teilproblems  $\{K, K-1, \dots, k, k-1\}$ .

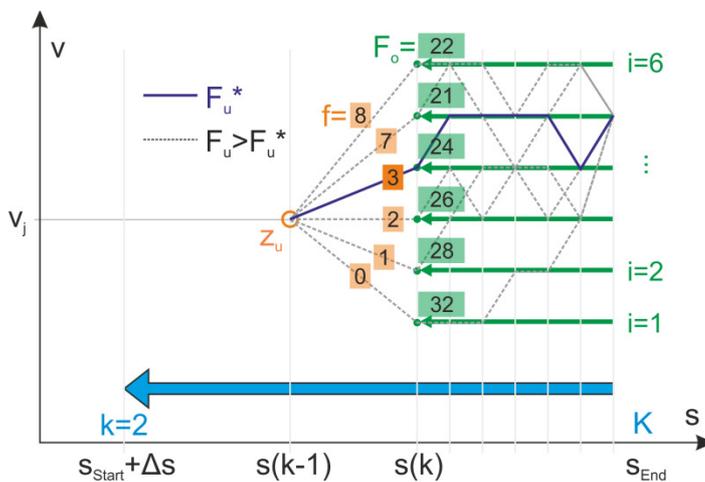


Bild 44: Schrittweise Eliminierung nichtoptimaler Teillösungen

Nach jeder Berechnung eines Ergebnisses  $E_{k-1,j}$  wird geprüft, ob für den betreffenden Zustand  $z_u$  bereits ein Ergebnis vorliegt. Ist dies nicht der Fall, wird das aktuelle Ergebnis gespeichert. Andernfalls greift eine zweite Prüfbedingung, die den zuvor gespeicherten Zielfunktionswert  $F_u$  mit dem aktuellen vergleicht. Da hier ein Minimierungsproblem formuliert wurde, wird der gespeicherte Ergebnisvektor mit dem aktuellen überschrieben, wenn  $F_u$  geringer und somit besser ist.

In Bezug auf das konkrete Beispiel in Bild 44 wäre  $z_u$  aus 6 ( $i=1, \dots, 6$ ) verschiedenen  $z_o$  erreichbar. Für den Fahrtverlauf würde dies bedeuten, dass aus der Geschwindigkeit bei  $s(k-1)$  6 verschiedene Folgegeschwindigkeiten an  $s(k)$  realisierbar wären. Im Optimierungsverlauf sind für alle  $z_o$  bereits die Gesamtkosten  $F_o$ , die von  $s(K)$  bis  $s(k)$  anfallen, bekannt. Für die Ergebnisspeicherung für  $z_u$  würde also zunächst der erste Wert  $F_u(i=1)$  im Programmablauf herangezogen werden, weil dies das erste Ergebnis ist und somit die erste Prüfbedingung greift. Im Anschluss würde dieser Wert jeweils überschrieben werden, weil  $F_u(i=2)$ ,  $F_u(i=3)$  und  $F_u(i=4)$  mit 29, 28 und 27 allesamt immer eine weitere Verbesserung der Teilproblem-Lösung darstellen. Bei  $F_u(i=5)$  und  $F_u(i=6)$  wird die zweite Prüfbedingung allerdings negativ, so dass diese beiden Ergebnisse verworfen werden, obwohl deren  $F_o$  in beiden Fällen geringer sind als  $F_o(i=4)$ . Nach Abschluss der Berechnungen für den aktuellen Streckenabschnitt bleibt also der Weg über  $v(i=4)$  als optimale Strategie für den Übergang von  $z_u$  zu  $v_{end}$  bestehen.

Bedingt durch den Programmablauf unterscheidet sich die Reihenfolge der Zielfunktionsauswertung der einzelnen  $z_u$ - $z_o$ -Kombinationen von obiger Darstellung bzw. Beschreibung. Da die Laufvariable  $j$  in einer der Variable  $i$  unterlagerten Schleife implementiert ist, werden von einem bestimmten  $z_o$  aus zunächst alle  $z_u$  betrachtet, bevor zum nächsten  $z_o$  übergegangen wird. Dies ändert jedoch weder das Ergebnis noch die Anzahl der erforderlichen Rechenschritte.

Tabelle 2: Variablen im Programmablauf der Rückwärtsrekursion

$k$	Laufvariable über alle Wegstützstellen
$i$	Laufvariable über alle zulässigen Geschwindigkeiten an der Wegstützstelle $s(k)$
$j$	Laufvariable über alle zulässigen Geschwindigkeiten an der Wegstützstelle $s(k-1)$
$z_u$	aktuelle Ausgangs-Geschwindigkeit $v(j)$
$z_o$	aktuelle Folge-Geschwindigkeit $v(i)$
$a$	Beschleunigung von $z_u$ auf $z_o$
$f_{Ver}$	Kraftstoffverbrauch für aktuelle Entscheidung
$f_t$	Zeitbedarf für aktuelle Entscheidung
$f$	Gewichtete Summe der Zielgrößenerfüllungswerte auf der aktuellen Stufe
$F_o$	Summe der Zielfunktionswerte für das Teilproblem $\{K, K-1, \dots, k\}$
$F_u$	Summe der Zielfunktionswerte für das Teilproblem $\{K, K-1, \dots, k, k-1\}$
$BA$	Betriebsart

Nach Abschluss der ersten Rekursion, die hier in Rückwärtsrechnung durchgeführt wird, erhält man zu jedem zulässigen Zustand im gesamten Zustandsraum eine eindeutige Folgegeschwindigkeit, die für den betreffenden Zustand den optimalen Ge-

samtzielfunktionswert erzielt. Anhand der Matrix (6.37) kann für jedes beliebige Element abgelesen werden, wie hoch die minimalen Kosten sind, um das System von dort ausgehend in den vordefinierten Endzustand zu überführen.

Um aus diesen zu diesem Zeitpunkt noch voneinander unabhängigen Informationen ein Geschwindigkeitsprofil für die vollständige Fahrstrecke zu bilden, bedarf es nun einer zweiten Rekursion, die hier in Vorwärtsrechnung ausgeführt wird.

## 6.6. Bildung des optimalen Geschwindigkeitsprofils

Die theoretischen Grundlagen der Dynamischen Programmierung fordern die Definition eines eindeutigen Ausgangszustandes, der im vorliegenden Fall durch die Fahrzeuggeschwindigkeit zu Beginn des Planungshorizontes  $v_{Start}$  gegeben ist.

Die im Zuge der ersten Rekursion entstandene Ergebnismatrix (6.37) ist Grundlage der zweiten Rekursion. Zur Initialisierung wird das Element  $(k,j)$  aufgerufen, wobei

$$k = 1 \text{ und} \\ j = \frac{v_{Start}}{\Delta v} + 1$$

gelten.

Außerdem wird die Matrix für das optimale Geschwindigkeitsprofil

$$v_{opt} = \begin{pmatrix} k & & K \\ s(k) & & s(K) \\ v_k & & v_K \\ f_{ver} & & f_{ver} \\ \sum_{\kappa=1}^k f_{ver} & \dots & \sum_{\kappa=1}^K f_{ver} \\ f_t & & f_t \\ \sum_{\kappa=1}^k f_t & & \sum_{\kappa=1}^K f_t \\ \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \quad (6.38)$$

initialisiert, in dem ihre erste Spalte mit

$$v_{opt}(k = 1) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ v_{Start} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

belegt wird. Zur Bildung des Geschwindigkeitsprofils sind nur die Elemente in der zweiten und dritten Zeile unbedingt erforderlich. Alle weiteren Informationen wie die Zielgrößenerfüllungswerte können optional mitprotokolliert werden, um sie beispielsweise später für grafische Ausgaben zu verwenden.

Durch den Aufruf des entsprechenden Elements im Vektor (6.36) wird die optimale Folgegeschwindigkeit

$$v_1 = z_o(k)$$

für den nächsten Bearbeitungsschritt, bei dem zur nächsten Wegstützstelle übergegangen wird, festgestellt. Je Stützstelle wird (6.38) um eine Spalte erweitert. Bild 45 zeigt die schrittweise Bildung des Geschwindigkeitsprofils im Zuge der Vorwärtsrekursion.

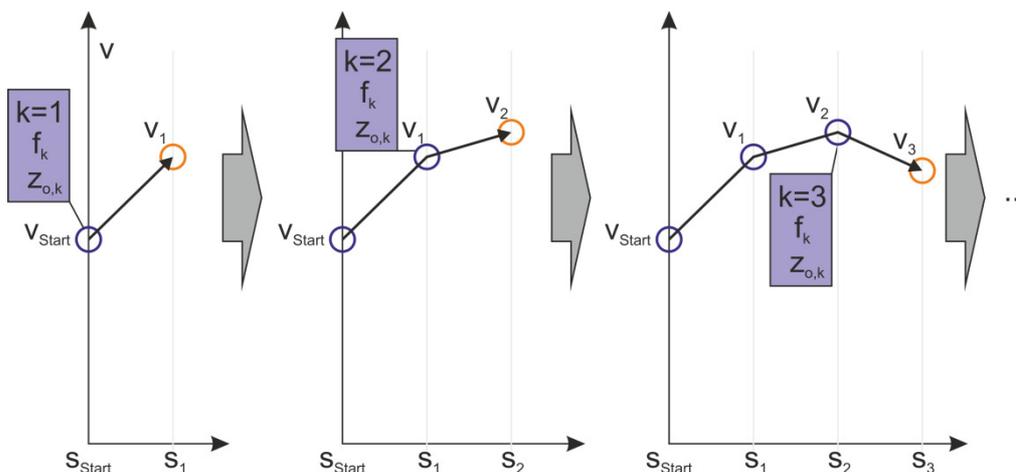


Bild 45: Bildung des optimalen Geschwindigkeitsprofils in Vorwärtsrekursion

Diese Vorgehensweise wird so lange wiederholt, bis der letzte Streckenpunkt  $s_{end}=s(K)$  erreicht wird. Dies markiert gleichzeitig den Endpunkt des eingangs in Bild 20 dargestellten Programmablaufes.



## 7. Simulation und Ergebnisanalyse

Dieses Kapitel beschreibt die Optimierungsergebnisse, die mit dem anhand der in den vorigen Kapiteln beschriebenen Vorgaben erstellten Quellcode erzielt werden. Drei unterschiedliche Simulationsszenarien werden im Folgenden dazu dienen, ein breites Spektrum möglicher Anwendungsfälle abzudecken und dadurch das Verhalten des Algorithmus umfassend zu analysieren.

### 7.1. Oszillierende Geschwindigkeit im unbeschränkten Zustandsraum

Zunächst soll festgestellt werden, wo die kraftstoffeffizientesten Betriebspunkte des Fahrzeugs im einfachsten Fall des Zustandsraumes liegen. Dazu wird ein Zustandsraum mit möglichst wenigen Beschränkungen konstruiert. Das wird hier umgesetzt, indem die erlaubte Maximalgeschwindigkeit konstant auf 130 km/h gesetzt wird, während die Minimalgeschwindigkeit 5% des Maximums, also 6,5 km/h, beträgt. Um außerdem eine Art des stationären Verhaltens bzw. quasistationäre Betriebspunkte herbeizuführen, wird ein Planungshorizont von 10 km vorgesehen.

Da der Fokus dieses Simulationsszenarios auf dem Kraftstoffverbrauch liegt, wird zuerst eine dementsprechende Gewichtung  $g_V=1,0$  und  $g_T=0,0$  gewählt. Um außerdem zu zeigen, wie sich eine zunehmende Verschiebung des Gewichtungsschwerpunktes in 10%-Schritten Richtung Zeit auswirkt, werden noch fünf weitere Optima bis hin zur ausgewogenen Gewichtung  $g_V=0,5$  und  $g_T=0,5$  berechnet. Die wichtigsten Simulationsparameter enthält Tabelle 3.

Tabelle 3: Simulationsparameter für die Optimierung im unbeschränkten Zustandsraum

Strecke	$s = [0 \ 10000 \ 10050] \text{ m}$
Zulässige Höchstgeschwindigkeiten	$v_{\max, \text{zul}} = [130 \ 130 \ 100] \text{ km/h}$
Startgeschwindigkeit	$v_{\text{start}} = 100 \text{ km/h}$
Relation $v_{\min}/v_{\max}$	$f_{v\min}=0.05$
Diskretisierungs-Schrittweite Strecke	$\Delta s = 50 \text{ m}$
Diskretisierungs-Schrittweite Geschwindigkeit	$\Delta v = 1 \text{ km/h}$
Gewichtung Verbrauch	$g_V=[1,0 \ \dots \ -0,1 \ \dots \ 0,5]$
Gewichtung Zeit	$g_T= [0,0 \ \dots \ +0,1 \ \dots \ 0,5]$

Im Gegensatz zur Startgeschwindigkeit erfolgt die Vorgabe für die Geschwindigkeit am Ende der Simulationsstrecke nicht durch einen gesonderten Parameter, sondern

sie geht aus dem letzten Element des Vektors der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten hervor. Beide sind also in dieser Simulation auf 100 km/h gesetzt.

Die optimalen Geschwindigkeitsprofile für jede der sechs verschiedenen Gewichtungsfaktor-Relationen zeigt Bild 46, während die Zielgrößen-Erfüllungswerte und deren Entwicklungen im Streckenverlauf in Bild 47 zusammengefasst sind.

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt zunächst auf, dass das Fahrzeug – unabhängig von der jeweiligen Zielgrößengewichtung – nie mit konstanter Geschwindigkeit bewegt wird. Vielmehr haben alle sechs Profile die Gemeinsamkeit, dass sie nach einer Einschwingphase zu Beginn der Strecke einem sich wiederholenden Oszillationsmuster folgen. Dieses wird erst zum spätest möglichen Zeitpunkt wieder verlassen, nämlich dann wenn die Beschleunigung einsetzen muss, um gerade noch die Geschwindigkeitsvorgabe am Streckenende zu erreichen. Die Länge der Phasen vor und nach den oszillierenden Geschwindigkeiten hängt von der Zielgrößengewichtung ab, wobei die kraftstoffoptimale Gewichtung erwartungsgemäß im niedrigsten Geschwindigkeitsbereich liegt und die Durchschnittsgeschwindigkeit der Profile mit zunehmender Relevanz der Fahrdauer steigt. Obwohl die Fahrdauer im kraftstoffoptimalen Profil keine Rolle spielt und auch nicht in irgendeiner Form durch den Optimierungsalgorithmus beschränkt wird, fällt die Geschwindigkeit nie auf die durch den Zustandsraum definierte minimal zulässige. Außerdem wurde in weiteren Berechnungen überprüft, ob sich Form oder Lage des kraftstoffoptimalen Oszillationsmusters ändert, wenn Start- und Endgeschwindigkeit erhöht werden. Dies ist nicht der Fall. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die charakteristischen Punkte der Oszillationsmuster, jeweils bezogen auf einen Zyklus. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten und -verbräuche können Tabelle 5 entnommen werden. Letztere sind dort jeweils auf einen Streckenabschnitt  $\Delta s$  normiert. Außerdem werden die Verbräuche noch in der geläufigeren Normierung auf l/100 km angegeben.

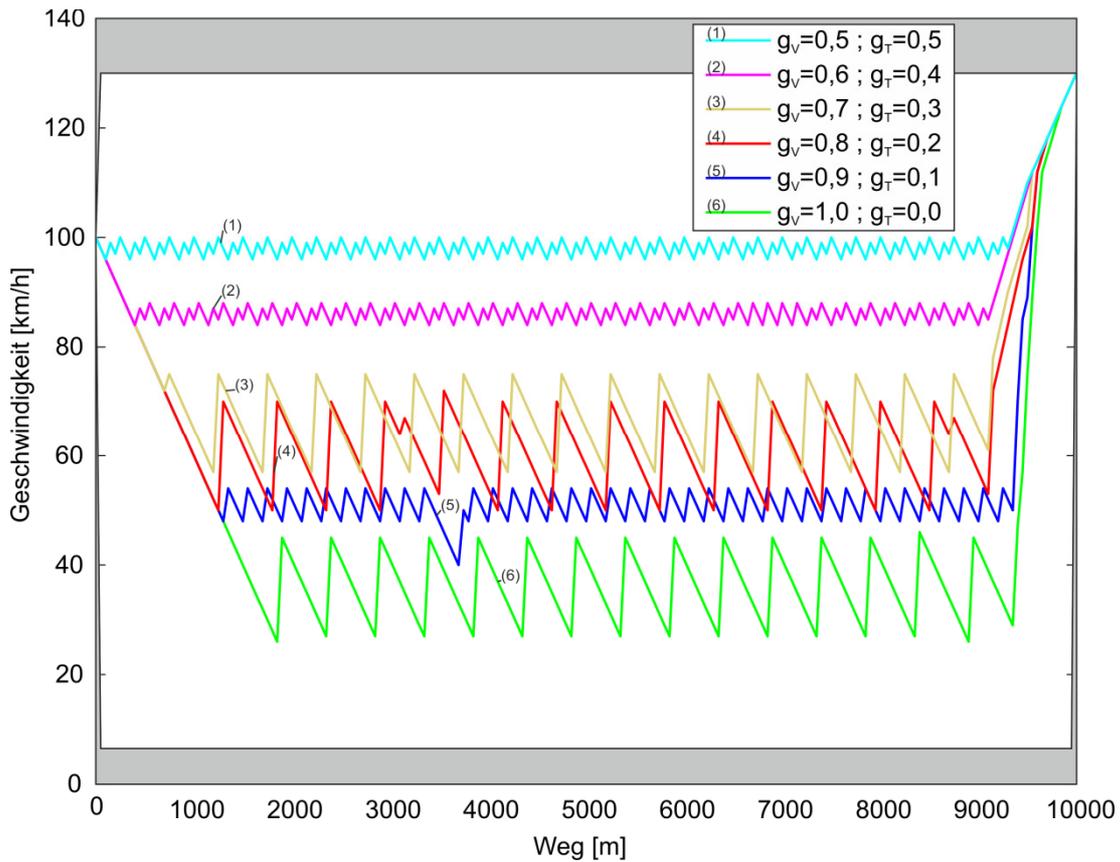


Bild 46: Übersicht der Oszillationsmuster bei unbeschränktem Zustandsraum mit verschiedenen Gewichtungsfaktor-Relationen

Tabelle 4: Charakterisierung der Oszillationsmuster durch Längen und Geschwindigkeiten

$g_v$	$\Delta s_1$	$v_{1,1}$	$v_{1,2}$	$\Delta s_2$	$v_{2,1}$	$v_{2,2}$	$\Delta s_3$	$v_{3,1}$	$v_{3,2}$	$\Delta s_4$	$v_{4,1}$	$v_{4,2}$	Gesamt- länge [m]	Anzahl Abschnitte
1,0	50	27	45	450	45	27							500	10 $\Delta s$
0,9	50	48	54	150	54	48							200	4 $\Delta s$
0,8	50	50	70	500	70	50							550	11 $\Delta s$
0,7	50	57	75	450	75	57							500	10 $\Delta s$
0,6	50	84	87	50	87	85	50	85	88	100	88	84	250	5 $\Delta s$
0,5	50	96	99	50	99	97	50	97	100	100	100	96	250	5 $\Delta s$

In den Verzögerungsabschnitten beträgt die Geschwindigkeitsdifferenz bei allen Szenarien immer  $-2$  km/h je  $\Delta s$ .

Tabelle 5: Durchschnittsgeschwindigkeiten und -verbräuche der Oszillationsmuster

$g_v$	Amplitude [km/h]	$\varnothing_v$ [km/h]	$m_{Kr}$ [g]	$m_{Kr}/\Delta s$ [g/50m]	[l/100km]
1,0	18	36	10,75	1,075	2,91
0,9	6	51	4,9	1,225	3,31
0,8	20	60	14,4	1,309	3,54
0,7	18	66	13,8	1,380	3,73
0,6	4	86	8,47	1,694	4,58
0,5	4	98	9,5	1,900	5,14

An jeder diskreten Wegstützstelle im Zustandsraum liegt ein Wertepaar aus den vom Streckenbeginn an kumulierten Zielgrößen Zeit und Kraftstoffverbrauch vor. Diese Wertepaare sind die Punkte, aus denen die in Bild 47 dargestellten Verläufe entstehen. Die Endwerte der sechs optimalen Geschwindigkeitsprofile bilden einen Teil der Pareto-Front für den Zustandsraum dieses Simulationsszenarios. Zur Vervollständigung der Pareto-Front müssten noch weitere Gewichtungsfaktor-Variationen bis hin zur zeitoptimalen Gewichtung  $g_v=0$  und  $g_T=1$  berechnet werden. Aus der Lage der einzelnen Pareto-Punkte wird deutlich, dass die äquidistante Schrittweite, die zur Variation der Gewichtungen angewendet wurde, nicht zu äquidistanten Abständen der Pareto-Punkte in der Zielgrößen-Darstellung führt. Vielmehr gibt es keinerlei erkennbare Korrelation zwischen der Gewichtungsvariation und der Lage der Pareto-Punkte. Daher lässt sich vor der Berechnung der konkreten Zielgrößen-Werte nicht anhand der Gewichtungsfaktoren prognostizieren, wo ihre Endwerte liegen werden. Lediglich die Begrenzungen der Pareto-Front durch die Extrema (Kraftstoff- oder Zeitoptimalität) können als Anhaltspunkt für die Zielgrößenerfüllungswerte von Zwischengewichtungen genutzt werden.

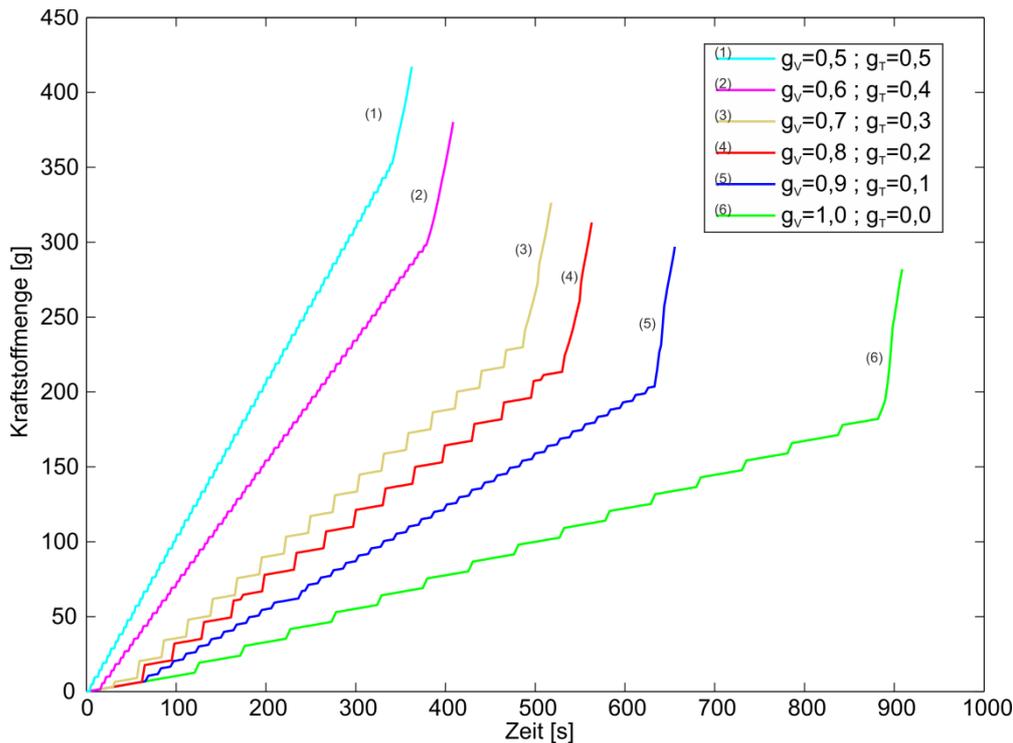


Bild 47: Zielgrößenwerte der Oszillationsmuster bei unbeschränktem Zustandsraum mit verschiedenen Gewichtungsfaktor-Relationen

Um zu analysieren, weshalb sämtliche Optima im vorliegenden Simulationsszenario die für einen menschlichen Fahrer wenig intuitiven oszillierenden Geschwindigkeitsverläufe aufweisen, wird im folgenden Abschnitt auf die Effizienz der Leistungsbereitstellung beim Verbrennungsmotor eingegangen. Anschließend erfolgt die Einordnung der hier erzielten Resultate in diese Leistungs-Charakteristik.

### 7.1.1. Spezifischer Verbrauch

Nach [36](S. 31 ff.) ist der spezifische Kraftstoffverbrauch  $b_e$  ein Maß für die Effizienz von Verbrennungsmotoren, da er den Kraftstoffverbrauch in das Verhältnis zur Motorleistung setzt. Demnach ist er mit der effektiven Leistung

$$P_e = M_A \cdot 2\pi \cdot n \quad (7.1)$$

zu

$$b_e = \frac{\dot{m}_{Kr}}{P_e} \quad (7.2)$$

definiert, wobei  $n$  in der Einheit  $s^{-1}$  eingeht. Das bei den vorliegenden Simulationen verwendete Verbrauchskennfeld ist, wie in Unterkapitel 6.4.5 beschrieben, über der Drehzahl und dem effektivem Mitteldruck

$$p_{me} = \frac{M_A \cdot 2\pi \cdot 10^{-5}}{V \cdot T} \quad (7.3)$$

aufgetragen. Durch den Umrechnungsfaktor  $10^{-5}$  in (7.3) erfolgt die Umrechnung aus der Einheit  $1 \text{ (N/(m}^2\text{))} = 1 \text{ Pa}$  auf die für den Motormitteldruck üblicherweise verwendete Einheit  $\text{bar}$ . Auch im hier verwendeten Kennfeld wird der Mitteldruck als Eingangsgröße in  $\text{bar}$  erfordert. Der Hubraum geht, wie oben ersichtlich, in  $\text{m}^3$  ein. Um aus diesem Kennfeld den spezifischen Verbrauch zu berechnen, muss (7.3) zunächst nach dem Motormoment umgestellt werden. Setzt man dann

$$M_A = \frac{p_{me} \cdot V \cdot T}{2\pi \cdot 10^{-5}} \quad (7.4)$$

in (7.1) ein, so erhält man die effektive Leistung zu

$$P_e = \frac{p_{me} \cdot V \cdot T \cdot n}{10^{-5}} \quad (7.5)$$

Da  $b_e$  gemäß den Standards in der Einheit  $\text{g/kWh}$  anzugeben ist, Kraftstoffmassenstrom und Motordrehzahl jedoch in  $\text{g/s}$  sowie  $\text{min}^{-1}$  vorliegen, sind auch dort entsprechende Umrechnungen vorzunehmen.

### 7.1.2. Betriebspunkte im Oszillationsmuster

Das Oszillationsmuster bei größtmöglicher Kraftstoffeffizienz (Geschwindigkeitsverlauf (6) in Bild 46) besteht aus einem Streckenabschnitt der Länge  $\Delta s$  mit Beschleunigung und einer Verzögerungsphase der Länge  $9\Delta s$  mit Gleitfahrt. Zur näheren Betrachtung der Beschleunigungsphase werden im Folgenden die Verläufe von Drehzahl, Motormitteldruck und spezifischer Leistung dargestellt. Die Verläufe der ersten beiden Größen sind in Bild 48 (gestrichelt, linke Skala bzw. Linie, rechte Skala) zu sehen. Die Sprünge, die beide Verläufe aufweisen, entstehen jeweils durch einen Gangwechsel. Zu Beginn des Abschnitts liegt der 3. Gang, zum Ende der 5. Gang an. Die jeweils markanten Punkte 1 bis 6 dienen zur Eingrenzung des Bereichs der Betriebspunkte, die im Kennfeld des spezifischen Verbrauchs (Bild 49) genutzt werden.

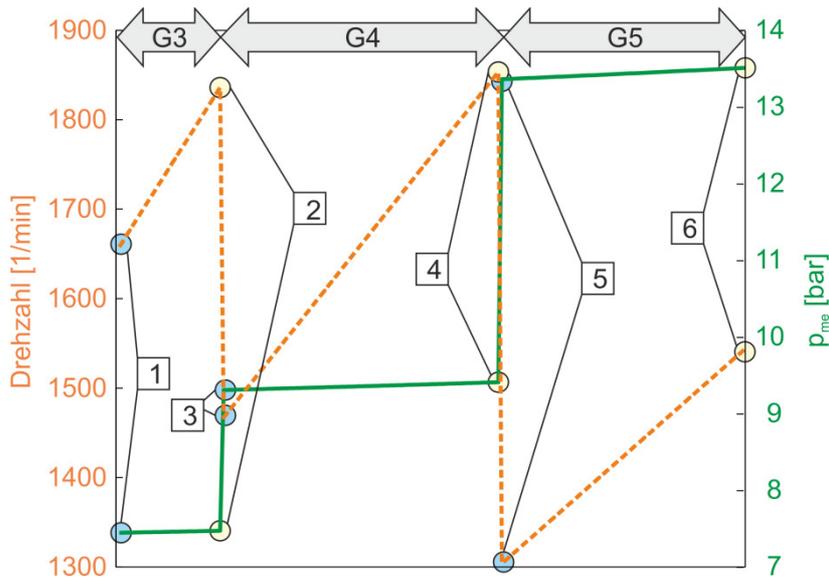


Bild 48: Motordrehzahl und -mitteldruck während der Beschleunigungsphase im Oszillationsmuster der kraftstoffoptimalen Fahrt

Die entsprechenden Werte, die diese Betriebspunkte kennzeichnen, können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 6: Charakteristische Betriebspunkte in den Beschleunigungsphasen des kraftstoffoptimalen Oszillationsmusters

Punkt	$n$ [1/min]	$p_{me}$ [bar]	$b_e$ [g/kWh]
1	1658	7,457	244,49
2	1836	7,483	244,43
3	1467	9,319	238,24
4	1853	9,421	235,26
5	1304	13,37	253,49
6	1544	13,52	247,70

Die anhand der Ausdrücke (7.2) bis (7.5) berechnete Verbrauchs- bzw. Leistungscharakteristik des in diesem Fahrzeugmodell implementierten Verbrennungsmotors ist in Bild 49 zu sehen. Die Betriebspunkte aus Tabelle 6 sind darin durch nummerierte Pfeile markiert.

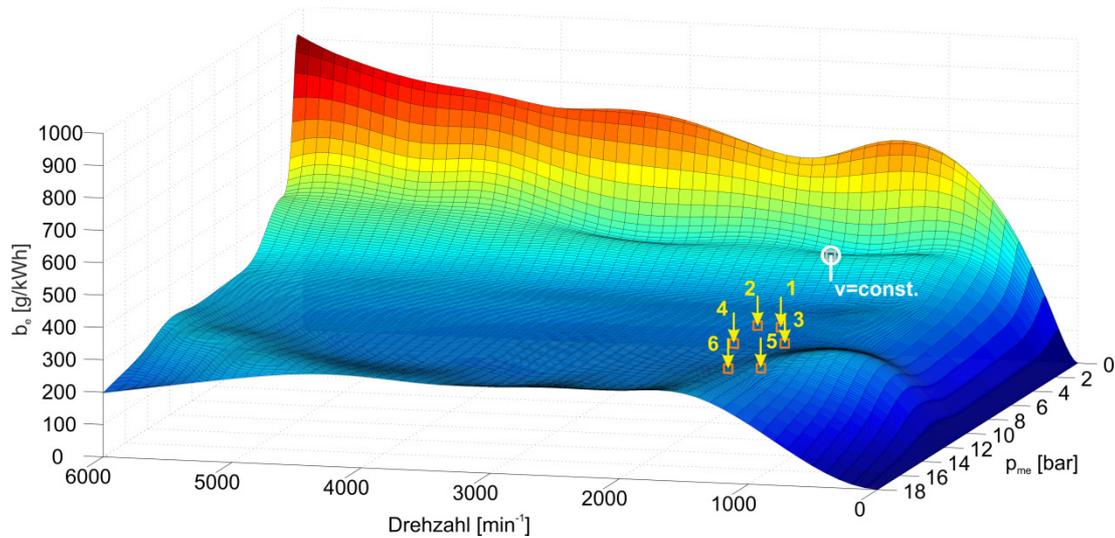


Bild 49: Kennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs mit Betriebspunkten des Oszillationsmusters bei vollständig kraftstofflastiger Gewichtung

Hier ist zu erkennen, dass nur ein Bereich mit nahezu minimalem spezifischem Verbrauch genutzt wird. Das wiederum bedeutet größtmögliche Effizienz bei der Leistungsbereitstellung in der Beschleunigungsphase.

Ein Zyklus dieses maximal kraftstoffeffizienten Oszillationsmusters erstreckt sich über 500 m. Der 50 m langen Beschleunigungsphase, wie sie in Bild 48 dargestellt wird, schließt sich eine 450 m lange Phase der Verzögerung mit Gleitfahrt an. Obwohl bei der Beschleunigung ein relativ hoher Kraftstoffverbrauch von 6,48 g anfällt, ist der gesamte Zyklus durch die lange verbrauchsarme Verzögerungsphase mit insgesamt 10,75 g auf 500 m sehr effizient. Als Vergleichswert zur Beurteilung des Oszillationsmusters soll hier die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit dienen. Würde man über die gleiche Strecke die Durchschnittsgeschwindigkeit des Oszillationsmusters von 36 km/h konstant halten, würden dabei 18,978 g Kraftstoff verbraucht werden. Das entspricht einem Durchschnittsverbrauch von 5,13 l/100km. Das Fahrzeug würde hier bei einer Motordrehzahl von  $1760 \text{ min}^{-1}$  und einem -mitteldruck von 1,8354 bar betrieben, was zu einem spezifischen Verbrauch von 348,62 g/kWh führt. Dieser Betriebspunkt ist in Bild 49 mit einem Kreis markiert. An diesem Beispiel wird deutlich, dass der Teillast-Betrieb eines Verbrennungsmotors ineffizient ist und das Abwechseln von Vollast-Beschleunigung und Verzögerung zu deutlich geringerem Kraftstoffverbrauch führt als die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Zur Veranschaulichung dieser Erkenntnis werden die Zielgrößen der Konstantfahrt auf die Streckenlänge des Simulationsszenarios bezogen und in Bild 50 in die Lösungsmenge eingeordnet. In diesem Beispiel trifft der Verbrauch zufälligerweise beinahe den des Optimums für die ausgewogene Gewichtung  $g_V=0,5$  und  $g_T=0,5$ . Somit wird deutlich, dass sich durch Optimierung der Fahrweise entweder der Verbrauch erheblich senken ließe ohne Zeit zu verlieren oder aber bei gleichem Verbrauch die Durchschnittsgeschwindigkeit auf beinahe 100 km/h erhöht werden könnte.

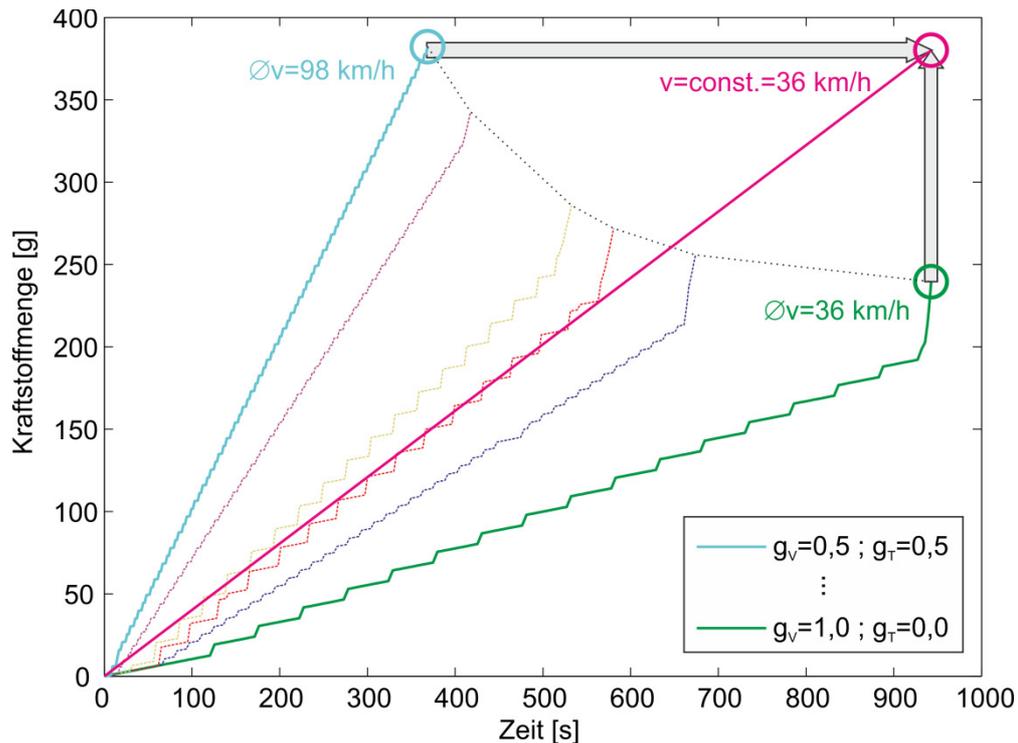


Bild 50: Einordnung der Konstantfahrt in die Lösungsmenge des Simulationsszenarios

Das in Bild 49 abgebildete Kennfeld des spezifischen Verbrauchs ist in dieser Form eher theoretischer Natur. Sowohl im realen Fahrzeugbetrieb als auch im Modell ergeben sich aus der Schaltstrategie Einschränkungen, da nicht jede Kombination aus Drehzahl und Mitteldruck zwischen 0 und  $6000 \text{ min}^{-1}$  bzw. 0 und 18 bar auch wirklich realisiert werden kann. Um die Gültigkeitsbereiche des Kennfeldes zu visualisieren, müssten alle nicht umsetzbaren Betriebspunkte aus der Darstellung entfernt werden.

## 7.2. Simulation Stadtfahrt

Nachdem im vorangegangenen Unterkapitel 7.1 ein eher theoretisches Simulationsszenario behandelt wurde, um das grundlegende Verhalten des Fahrzeug(modell)s zu zeigen, soll nun eine realitätsnähere Testfahrt mit größerer praktischer Relevanz simuliert werden. Dazu wird eine typische Stadtfahrt angenommen, bei der auf einer Länge von insgesamt 6 km variierende Geschwindigkeitsbeschränkungen zwischen 30 und 70 km/h gelten. Eine zusätzliche Einschränkung des Zustandsraumes erfolgt an Stellen, an denen Abbiegevorgänge stattfinden, dort wird die Höchstgeschwindigkeit für ein kurzes Streckenstück auf 10 km/h beschränkt. Ein Halten, wie es beispielsweise in der Realität an Ampeln erforderlich sein könnte, ist hier nicht vorgesehen. Bei der Wahl der zu vergleichenden Gewichtungs-Relationen soll hier das volle Spektrum ausgeschöpft werden.

Tabelle 7: Parameter im Simulationsszenario Stadtfahrt

Strecke	$s = [0 \ 500 \ 550 \ 1400 \ 1450 \ 2200 \ 2250 \ 2600 \ 2800 \ 3000 \ 3050 \ 5500 \ 5550 \ 6000]$ m
Zulässige Höchstgeschwindigkeiten	$v_{\max, \text{zul}} = [50 \ 10 \ 50 \ 10 \ 70 \ 10 \ 50 \ 30 \ 50 \ 10 \ 70 \ 10 \ 30 \ 30]$ km/h
Startgeschwindigkeit	$v_{\text{start}} = 50$ km/h
Relation $v_{\min}/v_{\max}$	$f_{v_{\min}} = 0.1$
Diskretisierungs-Schrittweite Strecke	$\Delta s = 50$ m
Diskretisierungs-Schrittweite Geschwindigkeit	$\Delta v = 1$ km/h
Gewichtung Verbrauch	$g_v = [0,0 \ \dots \ +0,1 \ \dots \ 1,0]$
Gewichtung Zeit	$g_T = [1,0 \ \dots \ -0,1 \ \dots \ 0,0]$

Bild 51 zeigt den Zustandsraum, der aus diesen Vorgaben hervorgeht. Auch hier sind wieder alle Zustände innerhalb des weißen Korridors für die Berechnung der optimalen Geschwindigkeitsprofile zulässig.

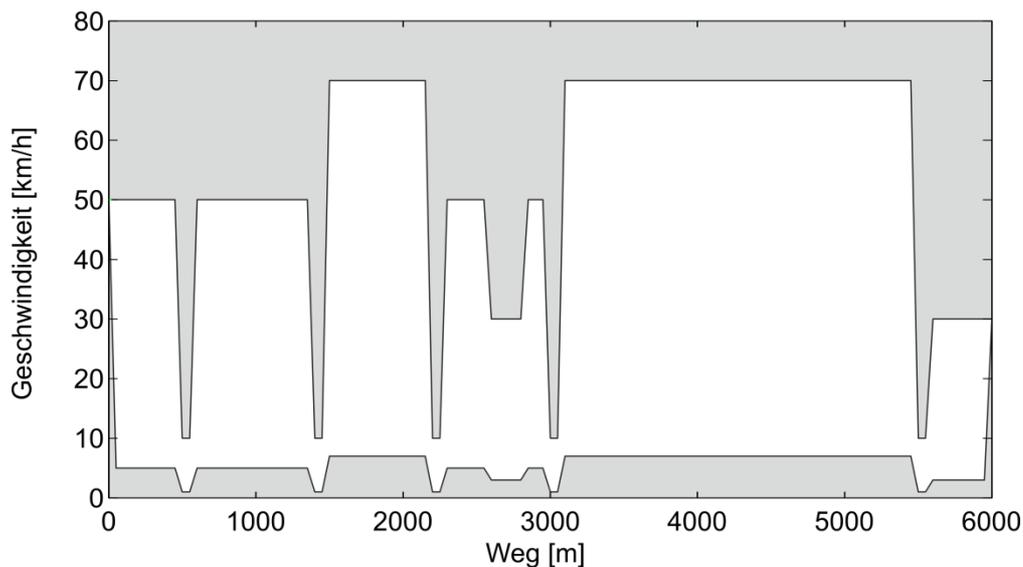


Bild 51: Zustandsraum im Simulationsszenario Stadtfahrt

Die Resultate der Simulation mit den Parametern aus Tabelle 7 sind in Bild 52 und Bild 53 zu sehen. Ersteres zeigt die Geschwindigkeitsprofile, die jeweils zum Optimum der vorgegebenen Gewichtung führen, im Urbildraum. Die zu diesen Optima gehörigen Zielgrößenwerte sind dann im Bildraum als Verläufe der Kraftstoffmengen über der Fahrzeit dargestellt. Die Verbindung der jeweiligen Endwertpaare bildet näherungsweise die Paretofront.

Im Urbildraum finden sich die Oszillationsmuster, die sich bereits im ersten Simulationsszenario gezeigt haben, wieder. Bei den kraftstofflastigen Gewichtungen werden in den Streckenabschnitten mit länger konstant bleibender Geschwindigkeit wieder die entsprechenden Durchschnittsgeschwindigkeiten eingenommen. Die Gewich-

tungsprofile, deren Oszillationsmuster für die unbeschränkte Konstantfahrt eine Durchschnittsgeschwindigkeit oberhalb der in der Stadtfahrt erlaubten Höchstgeschwindigkeit aufweisen, pendeln sich an der oberen Zustandsraumbegrenzung ein. Lediglich das zeitoptimale Profil orientiert sich jederzeit so nah wie möglich an der oberen Begrenzung. Nur an den Stellen, wo die theoretisch erforderliche Beschleunigung aus dem Maximalgeschwindigkeitsverlauf die Beschleunigungsfähigkeit des Fahrzeuges übersteigt, weicht das zeitoptimale Profil von der oberen Begrenzung ab.

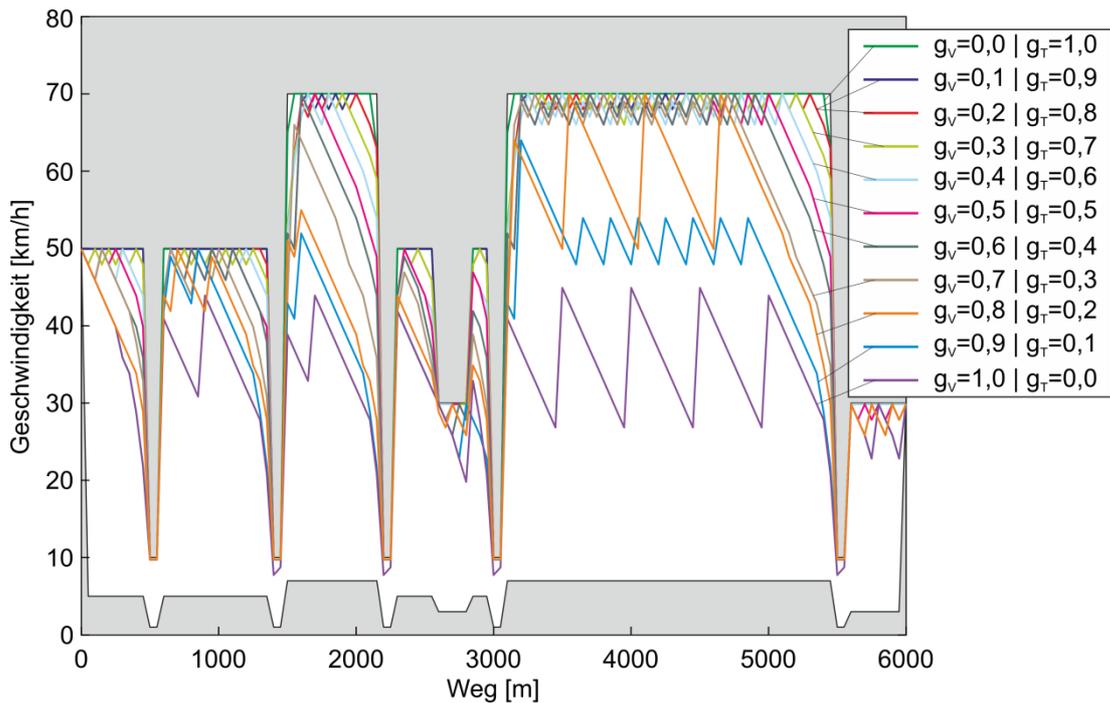


Bild 52: Optimale Geschwindigkeitsprofile für elf unterschiedliche Zielgrößengewichtungen im Simulationsszenario Stadtfahrt

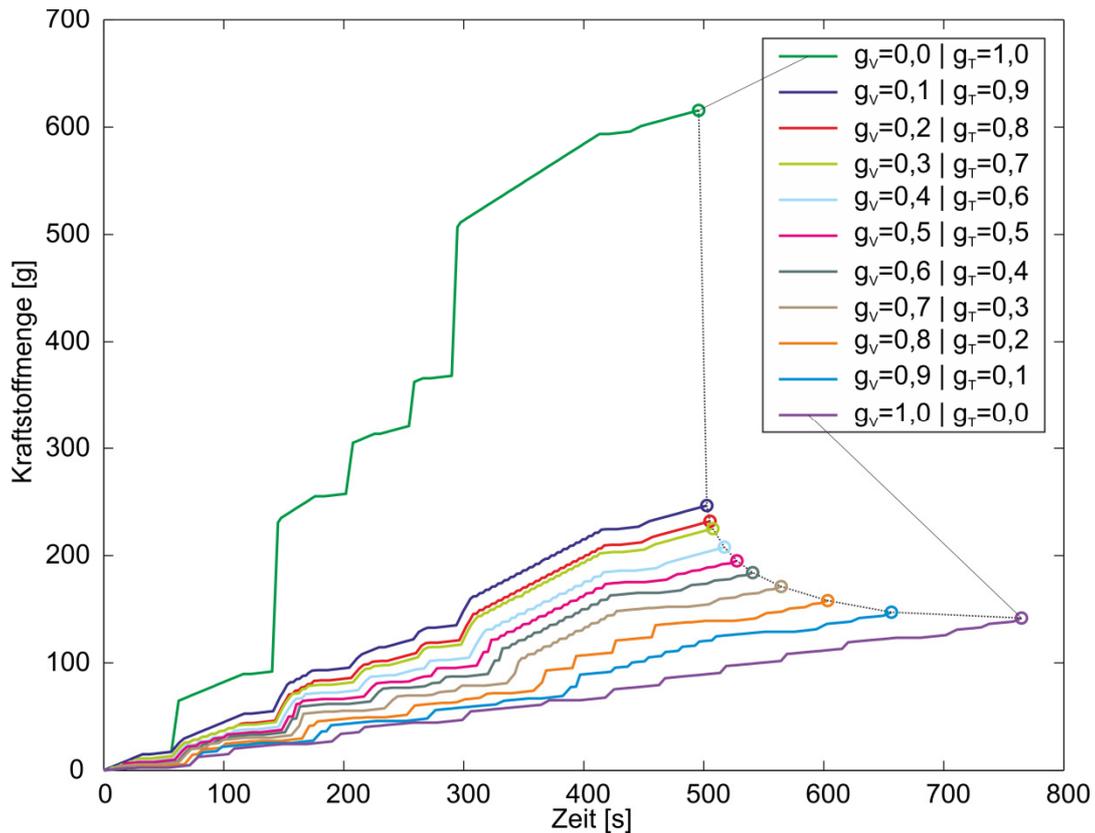


Bild 53: Zielgrößenwerte 11 verschiedener Geschwindigkeitsprofile im Simulationsszenario Stadtfahrt

Bei der Ergebnisdarstellung im Bildraum fällt vor allem auf, dass das zeitoptimale Geschwindigkeitsprofil im Vergleich zu allen anderen Profilen zu einem stark erhöhten Kraftstoffverbrauch führt, wobei die dadurch gewonnene Zeitersparnis sehr gering ist. Dies wird auch in Bild 55 und Tabelle 8 dargestellt. Am anderen Rand der Pareto-Front ist das selbe Phänomen in abgeschwächter Form zu beobachten. Dort spart man durch die Wahl der kraftstoffoptimalen Gewichtung nur wenig Kraftstoff gegenüber der benachbarten Gewichtung, verliert jedoch erheblich mehr Zeit. Zur genaueren Betrachtung sollen die beiden aus den extremen Gewichtungen resultierenden Profile jeweils mit denen aus den direkt benachbarten Gewichtungen verglichen werden. Ihre Verläufe im Urbildraum werden nochmals in Bild 54 dargestellt. Die übrigen Geschwindigkeitsprofile fehlen dort, um die Übersichtlichkeit zu verbessern.

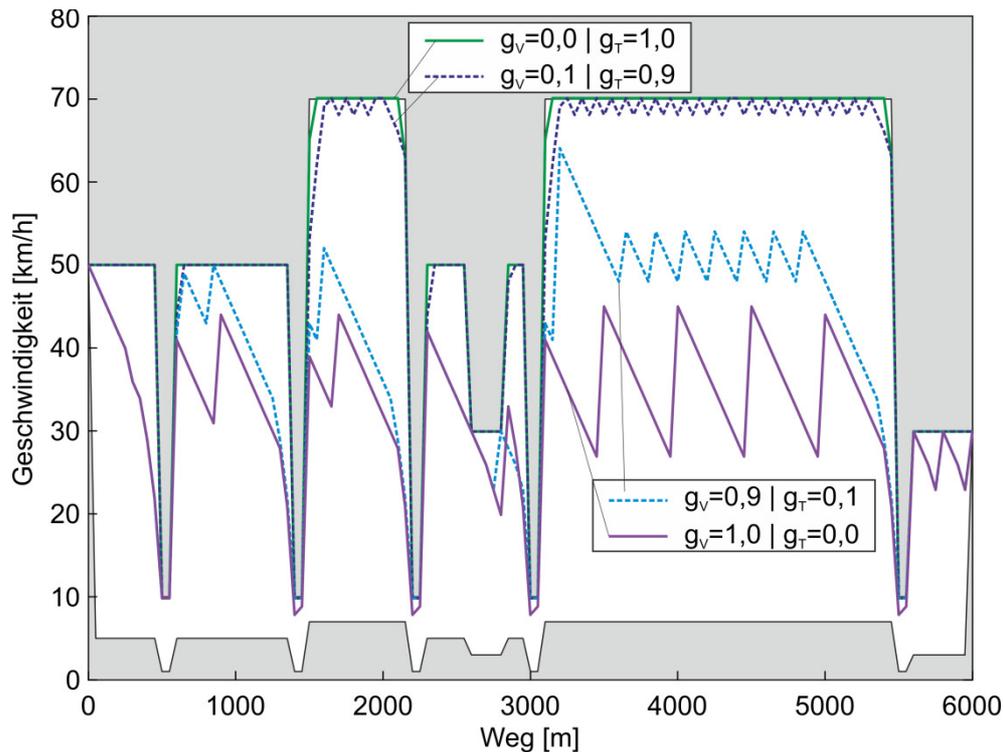


Bild 54: Direktvergleich zwischen dem kraftstoff- bzw. zeitoptimalen Geschwindigkeitsprofil und seinem jeweils nächsten Nachbarprofil aus leichter Gewichtungverschiebung auf Fahrdauer bzw. auf Kraftstoffverbrauch

In dieser Ansicht liegen die Profile der zeitlastigen Gewichtungen scheinbar dicht beieinander, während sich die benachbarten kraftstofflastigen Profile schon hier deutlich voneinander unterscheiden. In dieser Darstellung der Zustandsgrößen ist die Zeit zwar nicht direkt ablesbar, fließt aber über die Geschwindigkeit indirekt ein. Die Darstellung der Zielgrößen in Bild 55 verdeutlicht jedoch neben den Zeitdifferenzen auch jene im Verbrauch.

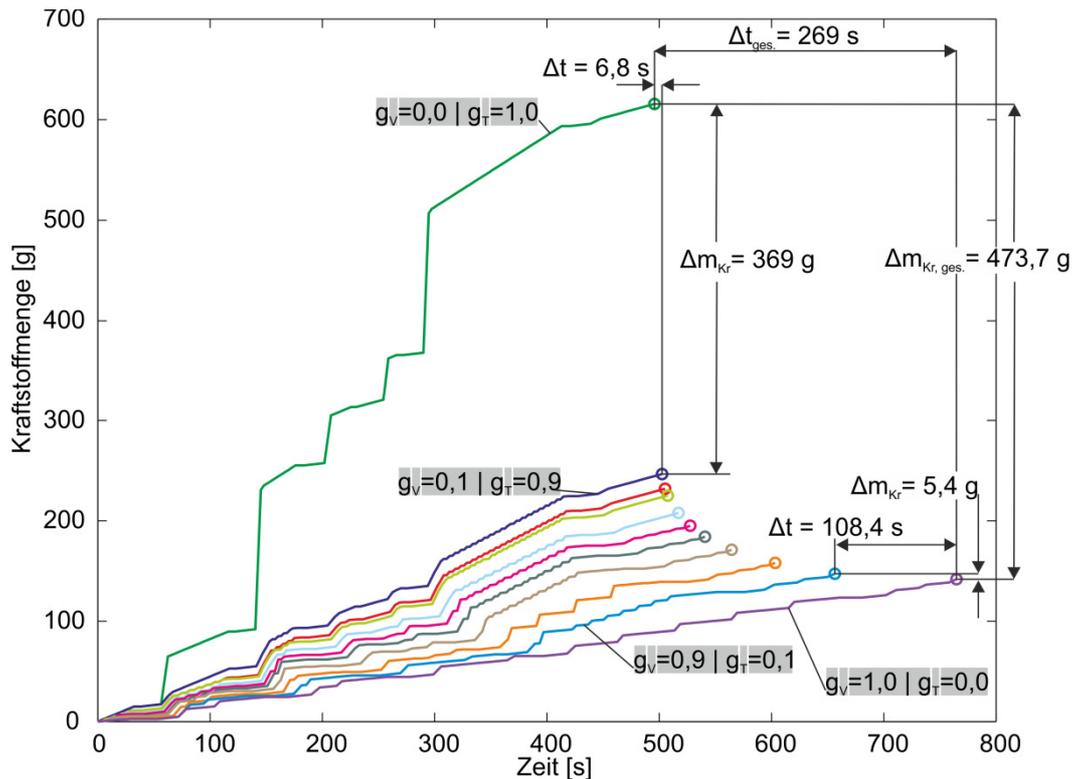


Bild 55: Zielgrößenveränderung in Abhängigkeit der Verschiebung des Gewichtungsschwerpunktes

Die folgende Tabelle 8 zeigt die absoluten Zielgrößen-Differenzen zwischen den jeweils benachbarten Geschwindigkeitsprofilen, so wie sie auch in Bild 55 hervorgehoben werden. Außerdem werden die Differenzen in Relation zu den größtmöglichen Zielgrößendifferenzen, nämlich denen zwischen dem kraftstoffoptimalen und dem zeitoptimalen Geschwindigkeitsprofil  $\Delta t_{ges.}$  und  $\Delta m_{Kr, ges.}$ , gesetzt.

Tabelle 8: Zielgrößenwerte der Profile aus den Extrema der Gewichtungsrelationen im Vergleich zu ihren jeweils nächsten Nachbarprofilen

$g_v$	$t$ [s]	$m_{Kr}$ [g]	$\Delta t$ [s]	$\Delta t$ [%]	$\Delta m_{Kr}$ [g]	$\Delta m_{Kr}$ [%]
0,0	495,8	615,6	6,8	2,53	369,0	77,90
0,1	502,6	246,6				
⋮						
0,9	656,4	147,3	108,4	40,30	5,4	1,14
1,0	764,8	141,9				

Daraus geht hervor, dass bei der Wahl des zeitoptimalen Profils nur ein Zeitvorteil von 2,53 % gegenüber der nächstkleineren Zeitgewichtung erzielt werden kann. Die Kosten für diesen Zeitvorteil sind mit einem ca. 78 % höherem Kraftstoffverbrauch unverhältnismäßig hoch. Im anderen Extremfall muss bei verbrauchsoptimaler Fahrt eine um 40,3 % längere Fahrtdauer im Vergleich zur nächstkleineren Zeitgewichtung

in Kauf genommen werden, um eine nahezu irrelevante Verbrauchseinsparung von 1,14 % zu erzielen.

### 7.3. Simulation Überlandfahrt

Im Folgenden soll nun eine Überlandfahrt simuliert werden, in der neben Landstraßen-Strecken mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten auch ein kurzes Stück auf einer Autobahn gefahren wird. Tabelle 9 zeigt die Optimierungsparameter, in Bild 56 ist der daraus resultierende Zustandsraum zu sehen.

Tabelle 9: Parameter im Simulationsszenario Überlandfahrt

Strecke	$s = [0 \ 1000 \ 1200 \ 1700 \ 2000 \ 2100 \ 2400 \ 2800 \ 2850 \ 3500 \ 3650 \ 7000 \ 7100 \ 8000] \text{ m}$
Zulässige Höchstgeschwindigkeiten	$v_{\text{max,zul}} = [100 \ 100 \ 70 \ 100 \ 70 \ 50 \ 70 \ 100 \ 50 \ 100 \ 50 \ 130 \ 50 \ 100 \ 100] \text{ km/h}$
Startgeschwindigkeit	$v_{\text{start}} = 100 \text{ km/h}$
Relation $v_{\text{min}}/v_{\text{max}}$	$f_{\text{vmin}} = 0.3$
Diskretisierungs-Schrittweite Strecke	$\Delta s = 50 \text{ m}$
Diskretisierungs-Schrittweite Geschwindigkeit	$\Delta v = 1 \text{ km/h}$
Gewichtung Verbrauch	$g_v = [0,0 \ \dots \ +0,1 \ \dots \ 1,0]$
Gewichtung Zeit	$g_T = [1,0 \ \dots \ -0,1 \ \dots \ 0,0]$

Der Proportionalitätsfaktor zur Berechnung der Minimalgeschwindigkeit wurde im Vergleich zum Szenario der Stadtfahrt von 0,1 auf 0,3 angehoben. Durch diese zusätzliche Einschränkung des Zustandsraumes wird die Berechnungsdauer um 23 % (von ca. 350 auf ca. 270 sec.) gesenkt.

Durch die Vorgabe der Maximalgeschwindigkeiten wurde das Szenario so gestaltet, dass mit einer ca. 3 km langen Landstraße begonnen wird. Dort sind zwei Bereiche mit Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 70 km/h vorgesehen. Außerdem werden zwei engere Kurven simuliert, in denen das Fahrzeug höchstens 50 km/h fahren sollte. Da unmittelbar nach der Kurve wieder die zulässige Höchstgeschwindigkeit gefahren werden darf, sind die Kurvenbereiche auf 100 bzw. 50 m begrenzt. Da es sich bei der Auf- und der Ausfahrt auf bzw. von der Autobahn auch um enge Kurven handelt, wurde hier die selbe Zustandsraumbeschränkung gewählt. Im anschließenden Streckenstück auf der Autobahn sind 130 km/h als Maximalbeschränkung gesetzt. Zwar gilt auf Autobahnen teilweise kein Tempolimit, jedoch sollte ein von einem Fahrerassistenzsystem vorgeschlagenes Geschwindigkeitsprofil die Richtgeschwindigkeit nicht überschreiten. Die Zustandsraum-Abschnitte mit konstanter Maximalgeschwindigkeit wurden bewusst kurz gehalten. Erkenntnisse über das Fahrzeugverhalten bei konstanter Beschränkung wurden bereits im Unter-

kapitel 7.1 beschriebenen Simulationsszenario gewonnen, daher sollen hier Geschwindigkeitsänderungen einen größeren Einfluss bekommen.

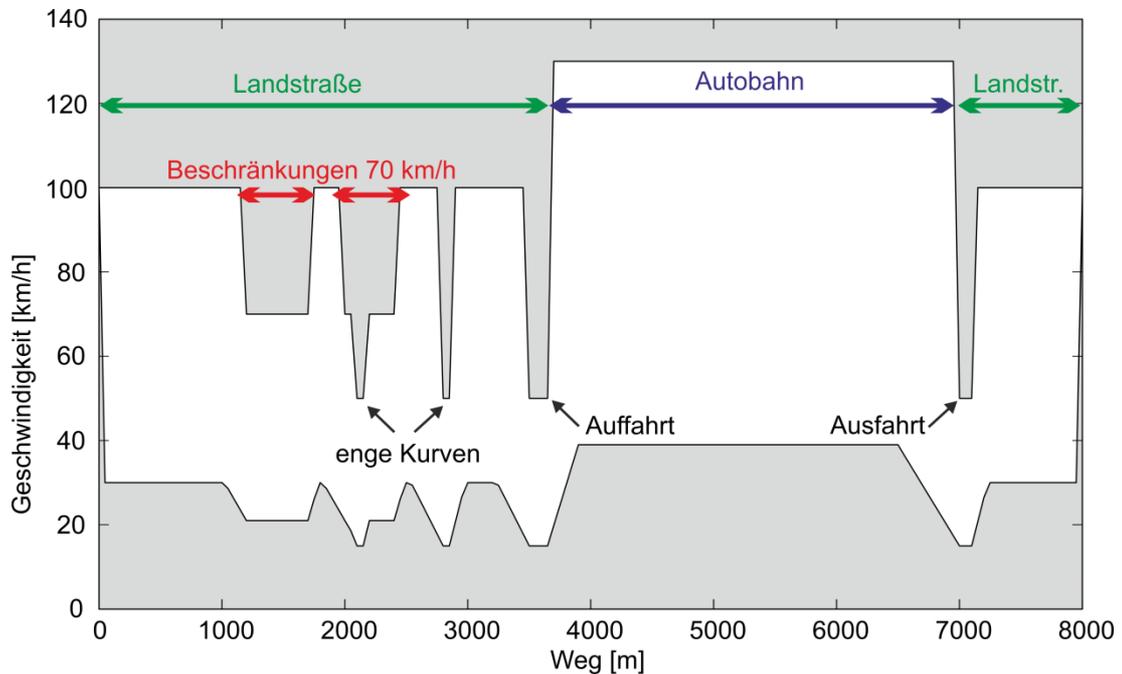


Bild 56: Zustandsraum im Simulationsszenario Überlandfahrt

Analog zur Vorgehensweise, die zur Analyse des Simulationsszenarios der Stadtfahrt angewendet wurde, wurden auch hier wieder Optimierungen für die gleichen Gewichtsrelationen durchgeführt. Die Resultate sind als Geschwindigkeitsprofile in Bild 57 und als Zielgrößenwerte in Bild 58 dargestellt.

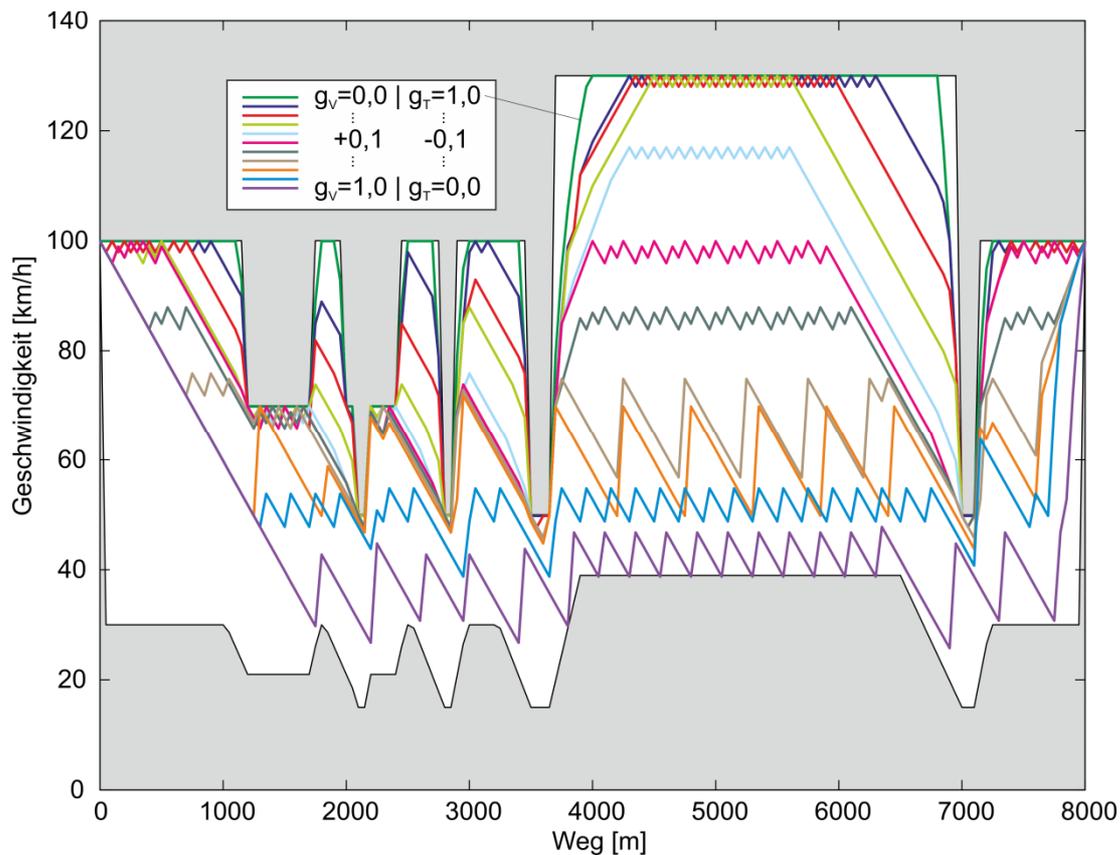


Bild 57: Optimale Geschwindigkeitsprofile für elf unterschiedliche Zielgrößengewichtungen im Simulationsszenario Überlandfahrt

Sowohl die Geschwindigkeitsprofile als auch die Verläufe der Zielgrößenentwicklung im Streckenverlauf (Bild 58) verhalten sich so, wie es aufgrund der Erkenntnisse aus der Simulation der Stadtfahrt zu erwarten war. Da hier die im Fahrerassistenzsystem vorgesehene Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h genutzt werden darf, sind die Stellen deutlicher ausgeprägt, an denen die durch den Maximalgeschwindigkeitsverlauf erlaubte Beschleunigung die im Fahrzeugmodell implementierte Beschleunigungsfähigkeit übersteigt. Sofern es möglich ist, folgt das zeitoptimale Profil ansonsten immer der Maximalgeschwindigkeit. Außerdem zeigt sich auch hier in der Zielgrößendarstellung in Bild 58 wieder der auffällig große Abstand der Pareto-Punkte aus den beiden Extremgewichtungen am Rand der Pareto-Front zu ihren jeweiligen nächsten Nachbarn. Bei der kraftstoffoptimalen Gewichtung ist dieser Abstand im aktuellen Szenario geringer, da die Minimalgeschwindigkeit während der Autobahnfahrt über der Durchschnittsgeschwindigkeit des kraftstoffoptimalen Oszillationsprofils liegt. Dadurch erhöht sich die Durchschnittsgeschwindigkeit der kraftstoffoptimalen Fahrt gezwungenermaßen und der Pareto-Punkt rückt auf der Zeitachse näher an den nächsten Nachbarn ( $g_v=0,9$ ), als es bei unbeschränkter Minimalgeschwindigkeit der Fall wäre.

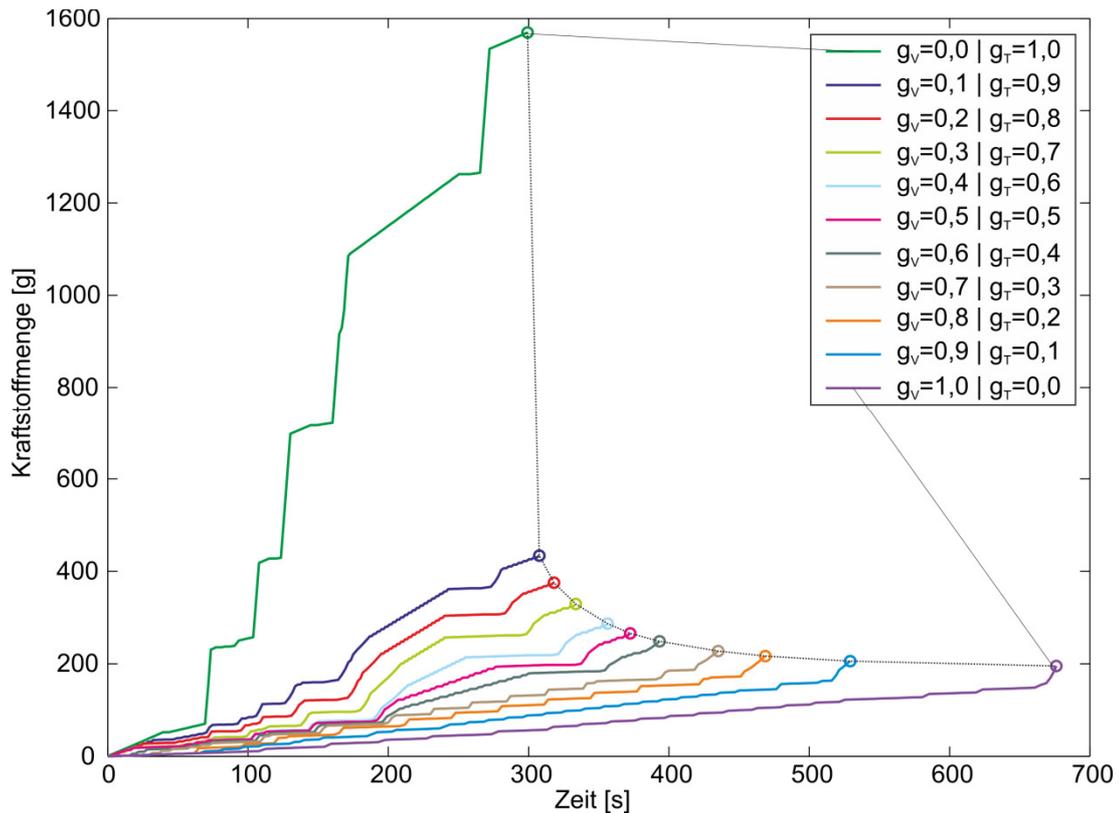


Bild 58: Zielgrößenwerte elf verschiedener Geschwindigkeitsprofile im Simulationsszenario Überlandfahrt

#### 7.4. Auswirkungen oszillierender Geschwindigkeitsprofile

Bei isolierter Betrachtung eines Fahrzeuges wurde bereits festgestellt, dass das Abwechseln zwischen starker Beschleunigung und unmittelbar folgender Verzögerung immer zu geringerem Kraftstoffverbrauch führt als das konstante Halten der dementsprechenden Durchschnittsgeschwindigkeit. Jedoch müssen Verkehrsteilnehmer immer die globalen Auswirkungen ihres Verhaltens berücksichtigen. Es ist naheliegend, dass sich die Oszillationsmuster – je nach Höhe ihrer Amplitude – störend auf nachfolgende Fahrzeuge auswirken. Selbst wenn man das menschliche Empfinden außer Acht ließe, bleibt dennoch die Problematik, dass ein nachfolgendes Fahrzeug aufgrund der Einschränkungen, die sich durch das Verhalten des vorausfahrenden Fahrzeuges ergeben, selbst sein Optimum nicht mehr erreichen kann. Der Zustandsraum wäre hier also nicht mehr durch die Maximalgeschwindigkeit beschränkt, sondern durch das Profil des Vorausfahrenden. Um diesen Sachverhalt zu analysieren, soll das Simulationsszenario des simplen und unbeschränkten Zustandsraumes aus Unterkapitel 7.1 erneut aufgegriffen werden. Dort wurde gezeigt, dass sich bei einer eher verbrauchslastigen Gewichtung von  $g_v=0,7$  ein bestimmtes Oszillationsmuster einstellt, das sich alle 500 m wiederholt. Es weist eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 66 km/h bei einer Amplitude von 18 km/h auf. Nimmt man nun an, dass ein zweites Fahrzeug dem ersten in einem geschwindigkeitsunabhängig mindestens gleichbleibenden Abstand folgen soll, so würde sich für dessen Geschwindigkeits-

profiloptimierung ein Zustandsraum, wie er in Bild 59 abgebildet ist, ergeben. Die für das Folgefahrzeug gültige Maximalgeschwindigkeit wird jetzt also vom Voraushenden eingeschränkt.

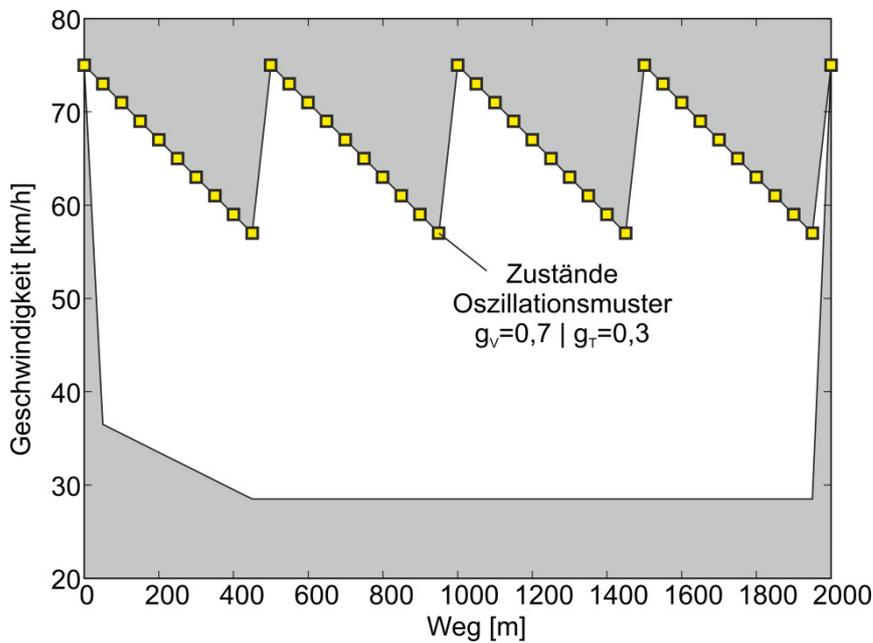


Bild 59: Einschränkung des Zustandsraumes für ein Folgefahrzeug durch ein vorausfahrendes Fahrzeug mit oszillierendem Geschwindigkeitsprofil

Für die Berechnung der Geschwindigkeitsprofile des Folgefahrzeugs wurde jeweils die Startgeschwindigkeit von 75 km/h angenommen.

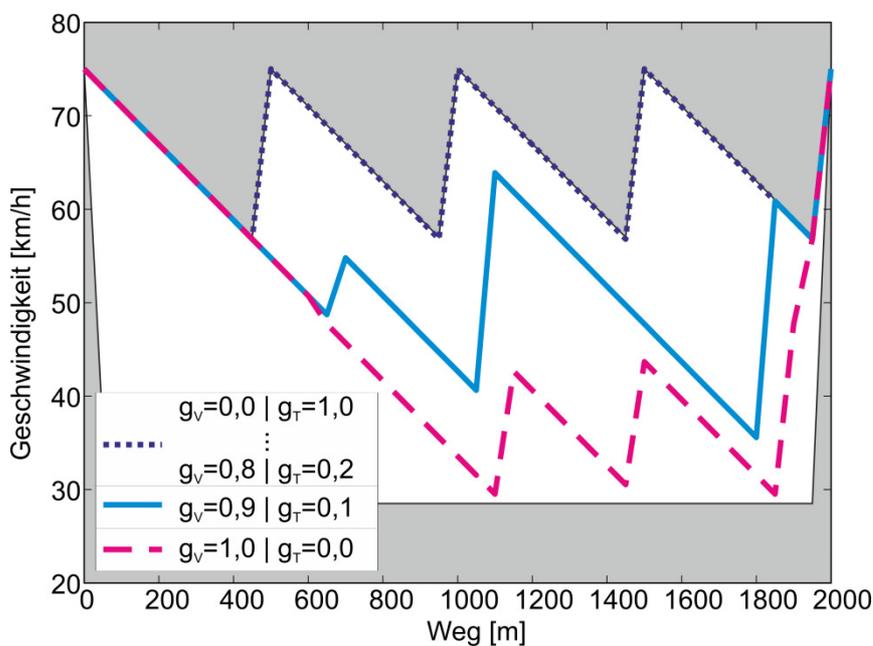


Bild 60: Optimale Geschwindigkeitsprofile bei Einschränkung des Zustandsraumes durch ein vorausfahrendes Fahrzeug mit oszillierender Geschwindigkeit

Erwartungsgemäß haben sich alle Geschwindigkeitsprofile, die aus einer Verbrauchsgewichtung  $g_v \leq 0,7$  resultieren, am Profil des vorausfahrenden Fahrzeuges

orientiert. Überraschend ist hier jedoch das Verhalten bei einer Gewichtung von  $g_V = 0,8$ . Dieses Folgefahrzeug passt sich in diesem Szenario ebenfalls dem Oszillationsmuster des Vorfahrers an, obwohl das Oszillationsmuster bei  $g_V = 0,8$  wie im Konstantfahrt-Szenario aus Unterkapitel 7.1 ermittelt eine niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeit hat. Grund hierfür könnte die Überschneidung der Oszillationsmuster von  $g_V = 0,8$  und  $g_V = 0,7$  sein, die in Bild 46 (siehe Seite 97) zu erkennen ist, so dass ersteres Muster in diesem Zustandsraum nicht realisierbar ist. Zur Vervollständigung der Ergebnisübersicht zeigt Bild 61 die Zielgrößen-Verläufe der drei verschiedenen Geschwindigkeitsprofile.

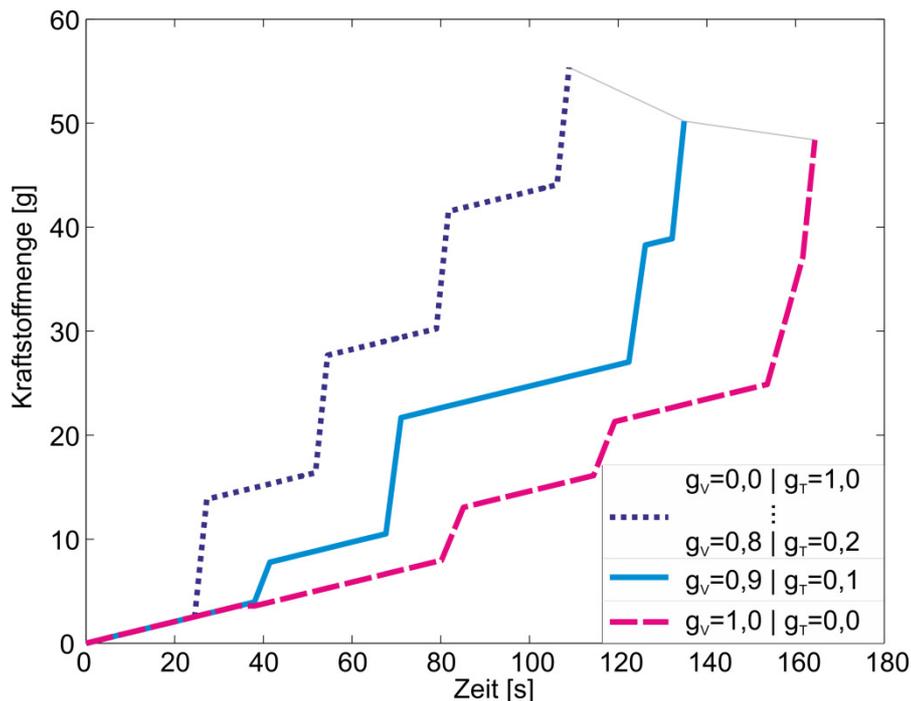


Bild 61: Zielgrößen bei Einschränkung des Zustandsraums durch ein vorausfahrendes Fahrzeug mit oszillierender Geschwindigkeit

Eine weitere Auffälligkeit zeigt sich im Profil aus  $g_V = 0,9$ , weil es ebenfalls von seinem Oszillationsmuster bei unbeschränktem Zustandsraum abweicht. Grund hierfür ist vermutlich, dass zu Beginn und Ende der 2km langen Teststrecke 75 km/h als Start- bzw. Endgeschwindigkeit vorgegeben sind und die Strecke dazwischen nicht ausreichend ist, dass sich das im Konstantfahrt-Szenario beobachtete Muster einstellt. Um dies näher zu betrachten, wird das Simulations-Szenario leicht abgeändert, indem der Zustandsraum jeweils vor und nach dem Bereich, in dem ein vorausfahrendes Fahrzeug eine Einschränkung verursacht, Streckenabschnitte von 1km Länge mit einer Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h hinzugefügt werden. Dies zeigt Bild 62. Wie bereits bei den in Bild 60 dargestellten Ergebnissen wurden hier wieder Berechnungen mit elf Gewichtungs-Relationen durchgeführt. Abgesehen von der Erweiterung der Simulationsstrecke sind alle Parameter unverändert. Wie erwartet bleiben die Profile mit  $g_V \leq 0,7$  im eingeschränkten Bereich zwischen 1000 und 3000 m gleich und liegen übereinander. Davor und danach zeigen sie ihre jeweils spezifi-

schen Oszillationsmuster. Im Gegensatz zum Szenario aus Bild 60 fallen hier die starren Geschwindigkeits-Vorgaben von 75 km/h bei 1000 und 3000m weg. Die Vermutung, dass sich dadurch die optimalen Geschwindigkeitsprofile mit  $g_v \geq 0,8$  ändern, wird bestätigt.

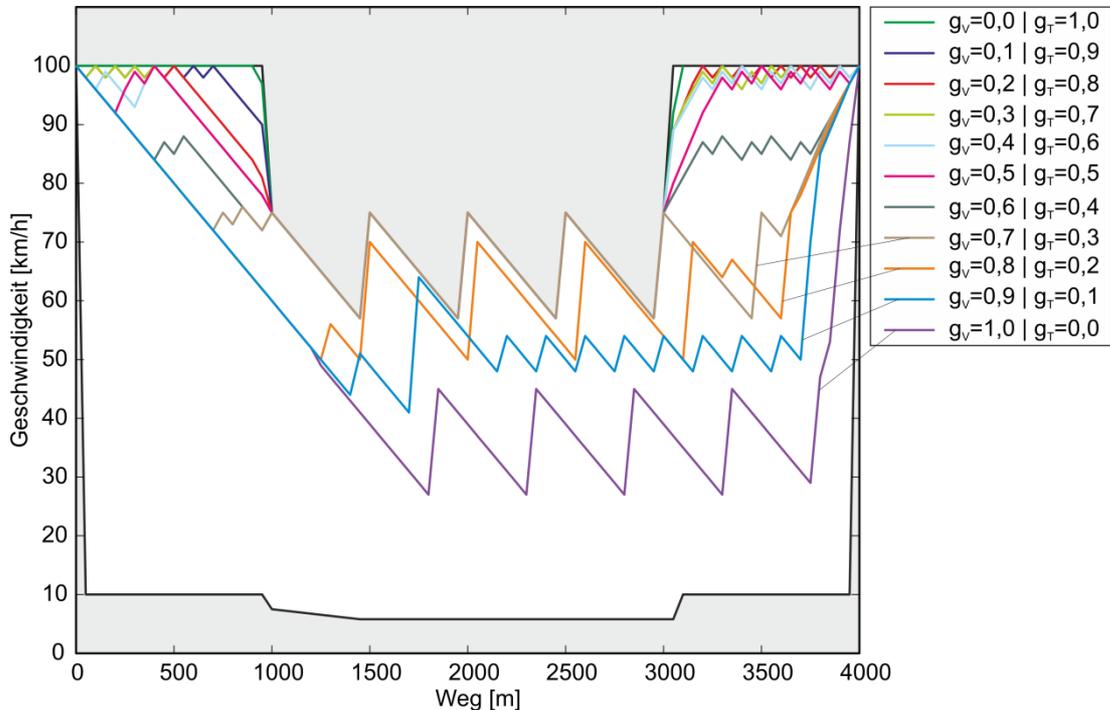


Bild 62: Geschwindigkeitsprofile im erweiterten Zustandsraum mit freier Fahrt vor und nach der Einschränkung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug

Um die Veränderungen deutlicher sichtbar zu machen, zeigt Bild 63 den direkten Vergleich der betroffenen Geschwindigkeitsprofile. Daraus lässt sich erkennen, dass die Erweiterung des Planungshorizontes einen großen Einfluss auf die Ergebnisqualität hat, da die jeweiligen Berechnungen einer hohen Empfindlichkeit auf die Geschwindigkeitsvorgaben zum Beginn und am Ende der Simulationsstrecke reagieren. Im Falle des erweiterten Zustandsraumes bleiben die Fahrten, die mit kraftstofflastiger Gewichtung durchgeführt werden, von der Einschränkung durch das vorausfahrende Fahrzeug unbeeinträchtigt.

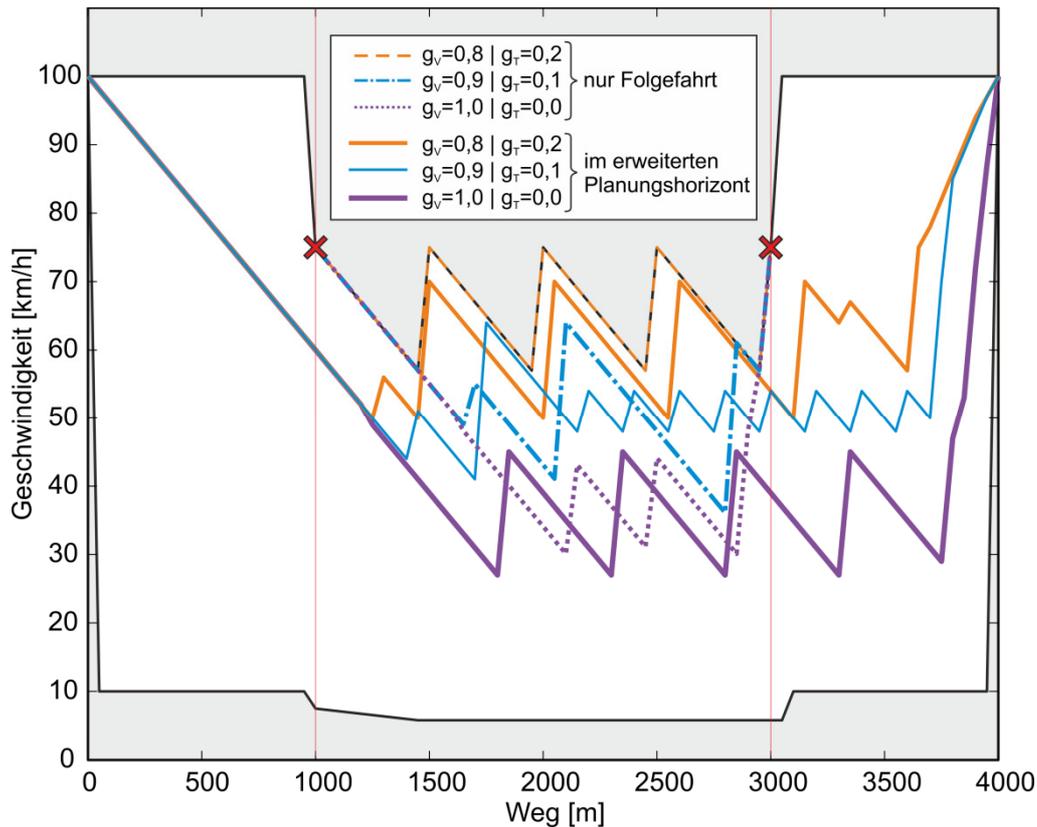


Bild 63: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile mit kraftstofflastiger Gewichtung in den Zustandsräumen mit und ohne Erweiterung der Simulationsstrecke

Beschränkt man die Berechnungen ausschließlich auf den Bereich zwischen 1000 und 3000 m, erfolgt durch die (algorithmisch notwendigen) Vorgaben für Start- und Endgeschwindigkeit gewissermaßen eine zwangsweise Anpassung an die obere Zustandsraumbegrenzung, die dann wiederum die optimalen Geschwindigkeitsprofile verfälscht. Somit ist hier der Schluss zu ziehen, dass neben den Diskretisierungsschrittweiten auch die Länge des Planungshorizontes großen Einfluss auf die Qualität der Geschwindigkeitsprofiloptimierung hat.

## 7.5. Berechnungsdauer

Der Rechenaufwand für die Optimierung von Geschwindigkeitsprofilen hängt einerseits von Faktoren, die aus dem Einsatz der Dynamischen Programmierung resultieren, und andererseits von anwendungsspezifischen Faktoren (wie beispielsweise der Wahl der Zielgrößen, dem Fahrzeugmodell etc.) ab.

Grundsätzlich gilt, dass der erforderliche Rechenaufwand der dynamischen Programmierung polynomial mit der Problemdimension, also der Anzahl der zu berücksichtigenden Knoten, wächst. In [40] werden folgende Möglichkeiten zur Einschränkung des Zustandsraumes vorgeschlagen:

1. Eingrenzung durch anwendungsbezogene Erwägungen (z.B. Ausschluss physikalisch nicht realisierbarer Systemzustandsübergänge)

2. Anpassung der Diskretisierungsintervalle (so lang wie möglich und so kurz wie nötig)
3. Aufwandsreduktion durch algorithmische Modifikationen (iterative Reduktion der Länge der Diskretisierungsintervalle)
4. Parallelisierung der Berechnungen

Im vorliegenden Fall finden die ersten beiden Punkte bereits Anwendung. Die Überlegungen zur Wahl der Diskretisierungs-Schrittweiten (entspricht dem in [40] verwendeten Begriff der „Diskretisierungsintervalle“) wurden bereits im Kontext der Zustandsraumbildung (vgl. Abschnitt 6.2) beschrieben. Der Ausschluss physikalisch nicht realisierbarer Zustände aus dem Optimierungsproblem wird an zwei Stellen vollzogen. Zunächst wird der Maximalgeschwindigkeitsverlauf vor Beginn der Berechnungen an Streckenbegebenheiten, die eine Geschwindigkeitsreduktion erforderlich machen, angepasst. Anschließend werden während der ersten Rekursion Zustandsübergänge, die die fahrzeugspezifischen Beschleunigungsgrenzen verletzen, ausgeschlossen. Die dritte Möglichkeit, durch eine mehrfach durchgeführte Optimierung mit schrittweiser Verkleinerung der Diskretisierungsintervalle bei gleichzeitiger Reduktion des Lösungsraumes die Berechnungsdauer zu reduzieren, soll hier keine Anwendung finden. Durch die damit verbundene iterative Suchraumeinschränkung kann es zu lokal optimalen Lösungen kommen, Bedingung für die vorliegende Anwendung ist jedoch die sichere Konvergenz zum globalen Optimum. Zuletzt bleibt noch die Möglichkeit, die Berechnungen durch Methoden der Informationstechnik wie zum Beispiel Anwendung paralleler Berechnungen oder Optimierung des Quellcodes zu beschleunigen. Derartige Maßnahmen wurden hier noch nicht getroffen.

Ein weiterer Punkt, der zu den eingangs erwähnten anwendungsspezifischen Faktoren zählt, ist die Dauer der Kostenberechnung für einen Zustandsübergang respektive Berechnung des Kantengewichts. Bei der Bildung der gewichteten Summe aus Kraftstoffverbrauch und Fahrdauer ist erstere Zielgröße von besonderer Relevanz, da sie häufig modellbasiert berechnet werden muss. Aufgrund der vereinfachenden Annahmen zur Formulierung des Optimierungsmodells sind die Aufwände für die Zeitberechnung und auch die Kraftstoffberechnung bei Schubetrieb und Gleitfahrt vernachlässigbar gering. Hier wurde die modellbasierte Verbrauchsberechnung so stark vereinfacht, dass ein angemessener Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Ergebnisqualität getroffen wird.

### **7.5.1. Rechenaufwand im Optimierungsverlauf**

Nach diesen Überlegungen zum Rechenaufwand im Allgemeinen bzw. der Lösungszeit für das gesamte Optimierungsproblem, soll nun noch eine kurze Betrachtung in Bezug auf den Lösungsaufwand der Teilprobleme im Kontext der Charakteristika der dynamischen Programmierung erfolgen.

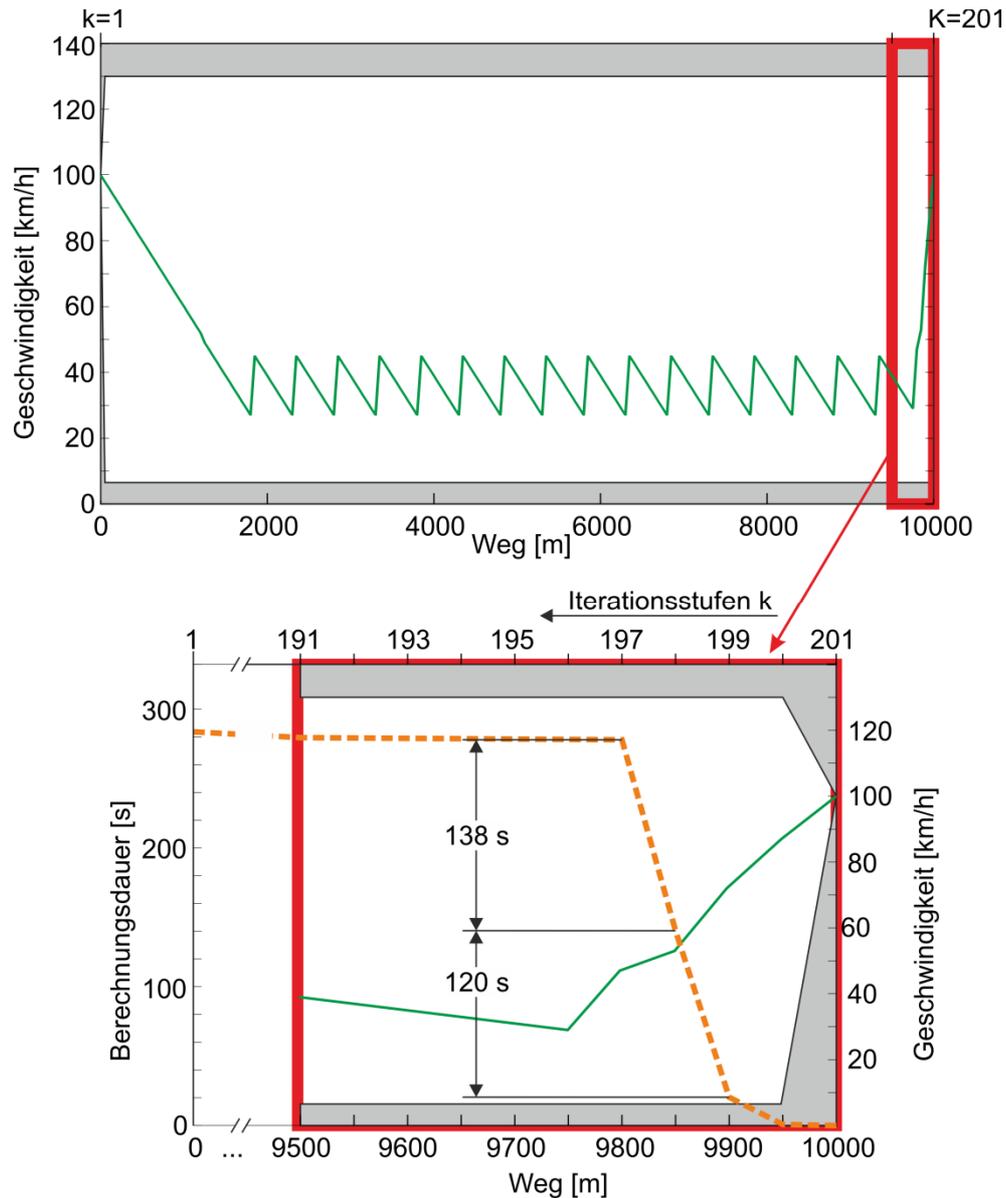


Bild 64: Abhängigkeit der abschnittswise Berechnungsdauer vom Gesamtfortschritt der Optimierung

Der zeitliche Verlauf der Optimierung variiert stark in Abhängigkeit der jeweiligen Iterationsstufen. Bedingt durch die Speicherung von Zwischenergebnissen (auch häufig unter dem Begriff „Memoization“ (en.) bzw. „Memoisation“ (dt.) in der Literatur zu finden, geprägt durch [41]) für die Teilstrategien für jeden Streckenabschnitt und die Möglichkeit, später statt erneuter Berechnung einer Teillösung für ein Teilproblem mit den selben Randbedingungen auf gespeicherte Ergebnisse zurückzugreifen, dauert die Berechnung auf den ersten Stufen recht lange und wird dann deutlich kürzer. Das in Bild 64 gezeigte Beispiel soll diesen Sachverhalt veranschaulichen. Dabei handelt es sich um das optimale Geschwindigkeitsprofil im bereits bekannten Szenario aus Unterkapitel 7.1 bei vollständig kraftstoffoptimaler Fahrt im nahezu unbeschränkten Zustandsraum. Oben ist der optimale Geschwindigkeitsverlauf über der gesamten Simulationsstrecke aufgetragen. Der Ausschnitt unten in Bild 64 zeigt die

letzten 500 m der Strecke. Diese wiederum entsprechen – bei einer Wegdiskretisierung von 50 m – im Programmablauf den ersten 10 Iterationsstufen. Wie in Kapitel 6 beschrieben, wird der Zustandsraum bei der dynamischen Programmierung zuerst in Rückwärtsrekursion durchschritten, d.h. begonnen wird mit der letzten Wegstützstelle im diskreten Raster. Neben dem Geschwindigkeitsprofil ist der Verlauf der kumulierten Berechnungsdauer (gestrichelte Kurve, linke Skala) über der Strecke bzw. den Iterationsstufen aufgetragen. Beim Start der Rekursion liegen keine gespeicherten Zwischenergebnisse vor. Die Berechnungsdauer ist mit ca. 0,8 s im vorliegenden Beispiel dennoch gering. Das ist darauf zurückzuführen, dass durch die Vorgabe einer Fahrzeug-Endgeschwindigkeit an der letzten Wegstützstelle nur ein Zustand betrachtet werden muss. Auf der nächsten Iterationsstufe ist die Dauer mit ca. 19,7 s schon deutlich größer, da die Zahl der möglichen Geschwindigkeitskombinationen zwischen  $k=199$  und  $k=200$  ebenfalls viel größer ist. Auf den nächsten beiden Stufen erreichen die jeweiligen Rechenzeiten mit 120 bzw. 138 s ihr Maximum. Sie sind erneut um ein Vielfaches größer als die Dauer für Stufe 2, obwohl die durch den Zustandsraum erlaubte Geschwindigkeitsspanne gleich groß ist. Grund hierfür ist, dass an der Stützstelle  $k=200$  deutlich weniger Geschwindigkeiten realisiert werden können, als es der Zustandsraum erlauben könnte. Es dürfen nämlich nur jene Zustände genutzt werden, aus denen in Abhängigkeit der im Fahrzeugmodell vorgegebenen Beschleunigungsgrenzen die eindeutige Geschwindigkeitsvorgabe an  $K=201$  erreicht werden kann. Im vorliegenden Beispiel sinkt die Berechnungsdauer ab der 5. Stufe ( $k=197\dots k=1$ ) massiv auf ca. 0,02 s pro Stufe. Dort ist also der Punkt erreicht, ab dem keine Zielgrößenberechnung (insb. des Kraftstoffverbrauchs) mehr erforderlich ist und stattdessen der Zugriff auf zuvor berechnete Werte erfolgt. Daher liegt die Gesamt-Berechnungsdauer für die vollständige Simulationsstrecke bei ca. 283 s, wobei die ersten 4 Stufen mit ca. 279 s etwa 98,5 % der Gesamtzeit in Anspruch nehmen.

Hier wurde bewusst ein einfaches Beispiel mit einem simplen und homogenen Zustandsraum gewählt, um einen besonders eindeutigen Zusammenhang zwischen der Simulationszeit und dem Berechnungsfortschritt herbeizuführen. In anderen Simulationen würden an Stellen, wo der Verlauf von Maximal- und Minimalgeschwindigkeit neue Geschwindigkeitskombinationen zuließe oder sich Strecken- bzw. Umgebungsparameter ändern, neue Zielgrößenberechnungen erforderlich. Zuvor gespeicherte Werte können natürlich nur bei exakt übereinstimmenden Randbedingungen genutzt werden.

Die als *MATLAB*®-Skript implementierten Simulationen der drei beispielhaft verwendeten Szenarien in den Unterkapiteln 7.1 bis 7.3 dauern mit einem aktuell handelsüblichen Desktop-Rechner einige Minuten. Die genauen Simulationszeiten bei einer niedrig gewählten Minimalgeschwindigkeit (grundlegende Relation zur Maximalgeschwindigkeit bei 10%) können der Tabelle 10 entnommen werden. Dabei va-

riert die Zeit geringfügig, etwa im einstelligen Prozentbereich, mit der Gewichtungsfaktor-Relation.

Tabelle 10: Simulationszeiten und Größe des Optimierungsproblems der drei Beispielszenarien

Szenario	Simulationszeit
Konstantfahrt 10 km	ca. 300 s
Stadtfahrt 6 km	ca. 300 s
Überlandfahrt 8 km	ca. 350 s

Die Größe des Optimierungsproblems kann in erheblichem Maß durch die Anhebung der Minimalgeschwindigkeit reduziert werden. Beispielsweise müssen bei der Optimierung des Überlandfahrt-Szenarios mit einer Minimalgeschwindigkeits-Relation  $f_{vmin}=0,1$  insgesamt 14993 Knoten berücksichtigt werden. Durch Anhebung auf  $f_{vmin}=0,3$  sinkt die Zahl der zulässigen Zustände auf 11948, was dazu führt, dass sich die Berechnungsdauer von ca. 350 s auf ca. 260 s verkürzt.

### 7.5.2. Rechenaufwand und Diskretisierungs-Schrittweiten

Es wurde bereits festgestellt, dass der Rechenaufwand erheblich von der Zahl der nutzbaren Knoten im Zustandsraum abhängt. Für die dynamische Programmierung im Allgemeinen gilt, je mehr Knoten zu betrachten sind, desto größer ist der Rechenaufwand. Neben der oben genannten Möglichkeit, die Knotenzahl durch Anhebung der unteren Zustandsraumbegrenzung zu reduzieren, bietet die Variation der Diskretisierungs-Schrittweiten viel Spielraum. Um zu zeigen, wie sich diese Maßnahme vor allem auf die Berechnungsdauer, aber auch auf die Ergebnisqualität auswirkt, sollen erneut Simulationsbeispiele mit konstant beschränktem Zustandsraum herangezogen werden. Dessen Länge ist jeweils 10 km, wobei höchstens 130 km/h erreicht werden dürfen und die Minimalgeschwindigkeit bei 10% des Maximums liegt. In allen vier Simulationen wird das kraftstoffoptimale Geschwindigkeitsprofil ( $g_V=1,0$ ) gesucht. Einziger Unterschied zwischen den Optimierungen sind die Diskretisierungs-Schrittweiten für die Zustandsraumbildung. Folgende Schrittweiten wurden parametrisiert:

- $\Delta s = 50$  m;  $\Delta v = 1$  km/h
- $\Delta s = 100$  m;  $\Delta v = 1$  km/h
- $\Delta s = 100$  m;  $\Delta v = 2$  km/h
- $\Delta s = 25$  m;  $\Delta v = 0,5$  km/h

Erstere Diskretisierung entspricht jener, die in allen bisher beschriebenen Fällen verwendet wurde. Im zweiten Fall wurde die Zahl der Wegstützstellen halbiert, die Geschwindigkeitsdiskretisierung jedoch beibehalten. Bei der dritten Simulation wurde auch die Schrittweite bei der Geschwindigkeit verdoppelt, so dass die Relation

$\Delta s/\Delta v$  wieder der der ersten Simulation entspricht. Im vierten Fall wurden beide Schrittweiten im Vergleich zum Ausgangs-Szenario halbiert, so dass auch hier die Relation der Schrittweiten gleich bleibt.

Tabelle 11: Simulationszeiten bei Variation der Diskretisierungs-Schrittweiten

$\Delta s$ [m]	$\Delta v$ [km/h]	Anzahl Knoten	$t_{\text{sim}}$ [s]	
50	1	23.345	290	
100	1	11.622	577	198%
100	2	5.911	152	52%
25	0,5	93.119	532	183%

Die in Tabelle 11 zusammengefassten Simulationszeiten zeigen eine Auffälligkeit im zweiten Fall, wo – im Gegensatz zu den anderen drei Szenarien – nur die Schrittweite bei der Streckendiskretisierung erhöht wurde. Diese Reduktion der Anzahl der Wegstützstellen bei unveränderter Geschwindigkeitsdiskretisierung hat zwar im Vergleich zum Ausgangsszenario in etwa zu einer Halbierung der Knotenzahl geführt, aber nicht zu einer Reduktion der Berechnungsdauer. Entgegen der eigentlich zu erwartenden Verkürzung, die aus den für die dynamische Programmierung allgemein gültigen Charakteristika abzuleiten wäre, wurde die Berechnungsdauer beinahe verdoppelt. Das führt zu der Feststellung, dass im vorliegenden Fall anwendungsspezifische Einflüsse stärker auf die Berechnungsdauer wirken als nur die Größe des Optimierungsproblems, die an der Anzahl der zulässigen Zustände gemessen wird. Entscheidend ist hier anscheinend nicht nur die Knotenzahl, sondern vielmehr das Verhältnis der beiden Schrittweiten  $\Delta s/\Delta v$  zueinander. Durch eine Verdoppelung der Abstände zwischen zwei Wegstützstellen ohne Anpassung der Geschwindigkeitsdiskretisierung verdoppelt sich auch die Anzahl der Entscheidungen, deren Zielfunktionswerte in den ersten Iterationsstufen ausgewertet werden müssen. Wie schon in den in Unterkapitel 7.5.1 beschriebenen Simulationen sind auch hier besonders die Entscheidungen, die eine modellbasierte Verbrauchsberechnung erfordern, relevant. Da die Verdopplung ihrer Anzahl auch beinahe zur Verdopplung der Berechnungsdauer führt, kann also festgestellt werden, dass die Berechnungsdauer bei der vorliegenden Anwendung beinahe ausschließlich aus der Dauer für die modellbasierte Verbrauchsberechnung besteht und für alle anderen Rechenoperationen nur eine vernachlässigbar geringe Zeit aufgewendet werden muss. Die allgemeinen Regeln zur Abschätzung des Rechenaufwandes der dynamischen Programmierung werden also durch diesen anwendungsspezifischen Effekt überlagert.

## 7.6. Einfluss der Diskretisierungs-Schrittweiten auf die Ergebnisqualität

Um die Auswirkungen verschiedener Diskretisierungs-Schrittweiten auf die Ergebnisqualität zu zeigen, werden die Zielgrößen der vier unterschiedlichen kraftstoffop-

timalen Geschwindigkeitsprofile aus Tabelle 11 in Bild 65 verglichen. Um die absoluten Werte der Zielgrößen zu veranschaulichen, wurden sie in dieser Darstellung in den Kontext zu den Optima anderer Gewichtungen gesetzt (nicht-nummerierte Verläufe). Einerseits ist zu erkennen, dass sich die Resultate aus den drei Zustandsraum-Auflösungen, die immer die selbe Relation  $\Delta s/\Delta v$  aufweisen, deutlich unterscheiden. Andererseits fällt auf, dass die Ergebnisse aus den beiden Profilen mit dem Wegstützstellen-Abstand von  $\Delta s=100$  m (Nrn. (III) und (IV)) beinahe deckungsgleich sind. Die Erhöhung der Geschwindigkeits-Diskretisierung von  $\Delta v=1$  km/h auf  $\Delta v=2$  km/h hat also kaum negative Auswirkungen auf die Ergebnisqualität. In Anbetracht der Tatsache, dass sich bei letzterer Schrittweiten-Kombination ( $\Delta s=100$  m;  $\Delta v=2$  km/h) beinahe viermal so schnell ein Ergebnis berechnen lässt, ist diese – zumindest in diesem Beispiel – eindeutig vorzuziehen.

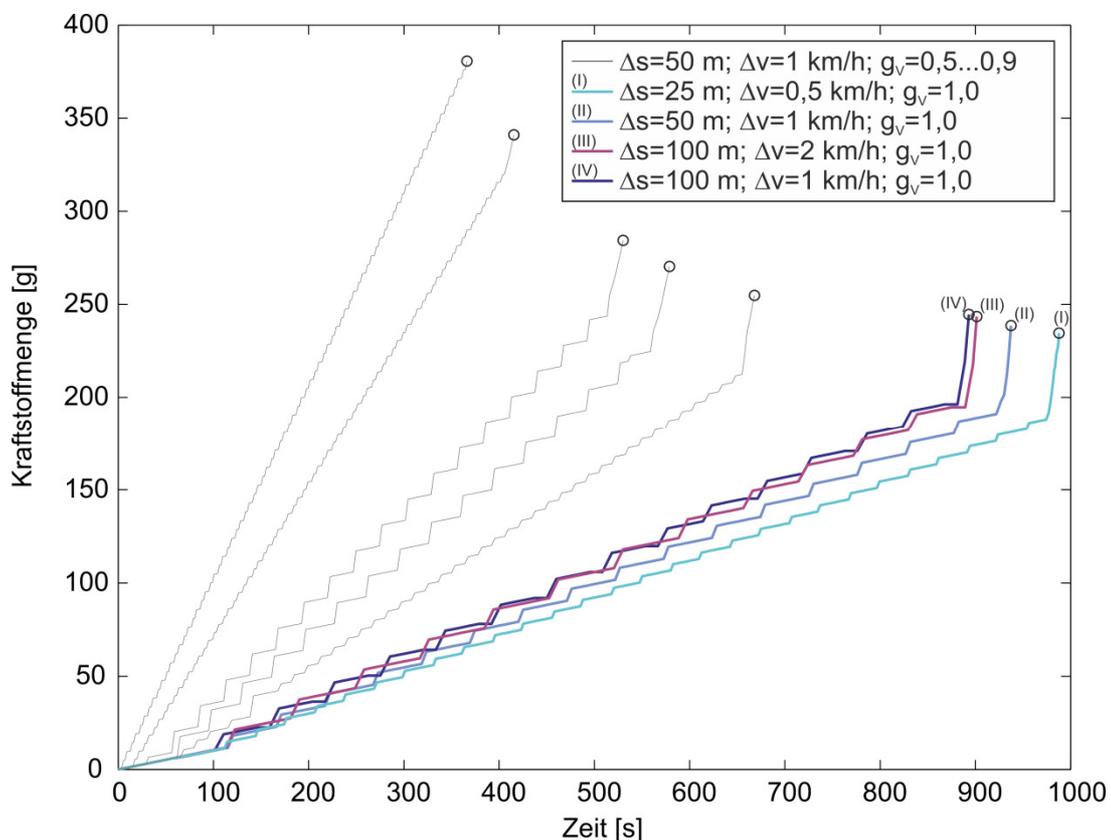


Bild 65: Zielgrößen kraftstoffoptimaler Geschwindigkeitsprofile auf Grundlage unterschiedlicher Diskretisierungs-Schrittweiten

Die deutlichen Unterschiede bei den Zielgrößen zwischen den Optima aus einem Diskretisierungsverhältnis von  $\Delta s/\Delta v= 50/1$  [m / km/h] erfordern eine nähere Betrachtung der zugehörigen Geschwindigkeitsprofile. Bereits in den in Unterkapitel 7.1 beschriebenen Analysen hat sich gezeigt, dass im kraftstoffoptimalen Oszillationsmuster immer ein Streckenabschnitt mit Beschleunigung einer Reihe von Streckenabschnitten mit Verzögerung in Gleitfahrt vorausgeht. Hierbei stellt sich die

Frage, ob diese Regelmäßigkeit erhalten bleibt, wenn die Länge der Streckenabschnitte verkürzt wird. Zur Beantwortung dieser Frage sollen weitere Simulationen dienen, bei denen die Streckendiskretisierung variiert wird, jedoch das Verhältnis der Diskretisierungs-Schrittweiten für die Geschwindigkeit von 50/1 erhalten bleibt.

Würde die Geschwindigkeitsdiskretisierung nicht angepasst, sondern konstant bei beispielsweise 1 km/h gehalten werden, würden sich mit Verringerung von  $\Delta s$  systembedingte Rundungsungenauigkeiten so stark auswirken, dass das Optimierungsergebnis fehlerhaft wird. In diesem Anwendungsbeispiel zeigt sich das konkret, indem das optimale Geschwindigkeitsprofil ab einer Schrittweite von  $\Delta s \leq 10\text{m}$  über die gesamte Simulationsstrecke konstant bei 100 km/h liegt. Durch die einseitige Verzerrung des Knotengitters vergrößert sich die Betriebsarten-Bestimmung auf einem einzelnen Streckenabschnitt so stark, dass die Verzögerung bei der verbrauchsarmen Gleitfahrt im vorliegenden Optimierungsmodell so gering ist, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit nach der Rundung auf den nächstliegenden diskreten Zustand nominell gleich bleibt. So kann die gesamte Strecke bei gleichbleibender Geschwindigkeit in der Betriebsart Gleitfahrt absolviert werden, was dann zu einem geringeren Verbrauch führt als ein oszillierendes Geschwindigkeitsprofil bei niedrigerer Geschwindigkeit. Dieser Sonderfall könnte natürlich durch eine entsprechende Abfrage im Quellcode abgefangen werden. Jedoch ist eine solches Missverhältnis der Knotenzahlen in den jeweiligen Dimensionen nicht wünschenswert. Dadurch würden nämlich nicht nur die Gleitfahrt, sondern auch alle anderen Betriebsarten-Bestimmungen und somit die gesamten Zielgrößenberechnungen sehr ungenau werden. So lassen sich kaum noch brauchbare Optimierungsergebnisse erzielen. Daher wurde an dieser Stelle in Kenntnis der Relevanz des Schrittweiten-Verhältnisses auf die Quellcode-Modifikationen zur Unterbindung dieser Effekte verzichtet.

Bild 66 zeigt die kraftstoffoptimalen Geschwindigkeitsprofile, die aus der Simulation mit fünf unterschiedlichen Zustandsraum-Diskretisierungen resultieren. Wie eingangs erläutert, werden die Schrittweiten-Relationen jeweils konstant gehalten.

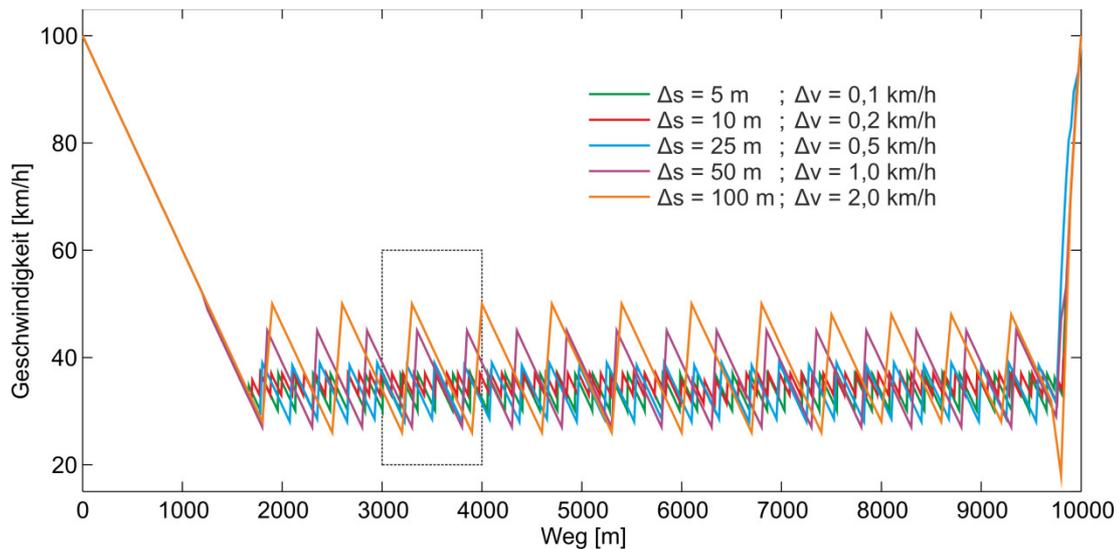


Bild 66: Kraftstoffoptimale Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen bei gleichbleibender Schrittweiten-Relation

Zur genaueren Betrachtung erfolgt in Bild 67 eine vergrößerte Darstellung des Bereiches zwischen 3000 m und 4000 m. Dieser Ausschnitt ist in Bild 66 mit einem gestrichelten Rahmen gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit aller Oszillationsmuster unabhängig von der Zustandsraum-Diskretisierung bei ca. 36 km/h erhalten bleibt. Außerdem haben alle Oszillationsmuster die Gemeinsamkeit, dass jeweils für 1  $\Delta s$  beschleunigt wird und anschließend eine Verzögerung bei Gleitfahrt bis zum Erreichen der unteren Grenzgeschwindigkeit des jeweiligen Musters erfolgt. Die Beschleunigungen, die innerhalb 1  $\Delta s$  realisiert werden, sind unterschiedlich groß. Daher sind auch die Steigungen der Beschleunigungsphasen in den jeweiligen Profilen verschieden. Die Verzögerungsphasen verlaufen jedoch parallel zueinander, da hier immer die selbe Verzögerung abgebildet wird. Eine weitere Regelmäßigkeit besteht darin, dass die Gesamtlänge eines Zyklus mit abnehmender Schrittweite auch kleiner wird. Erst bei der feinsten Diskretisierung ( $\Delta s = 5$  m) wird diese Korrelation unterbrochen. Während das Profil aus der nächstgrößeren Schrittweite ( $\Delta s = 10$  m) sich in Zyklen von 11  $\Delta s$  (entspricht 110 m) wiederholt, hat das Muster aus  $\Delta s = 5$  m eine Gesamtlänge von 35  $\Delta s$  und ist somit auch in der absoluten Länge mit 175 m deutlich größer. Dadurch wird die Vermutung, dass Amplitude und Länge der Oszillationsmuster mit zunehmender Verfeinerung der Diskretisierung immer kleiner werden und sich asymptotisch einer konstanten Geschwindigkeit bei ca. 36 km/h nähern, widerlegt. Vielmehr scheint es, als würde die untere Grenze für die Größe des Oszillationsmusters zwischen den Schrittweiten von 10 m und 5 m überschritten werden. Auf zusätzliche Untersuchungen mit weiterer Verkleinerung der Schrittweiten wurde an dieser Stelle verzichtet. Alle Berechnungsergebnisse resultieren aus Kennfeldern mit begrenzter Auflösung, daher wären Erkenntnisse aus noch detaillierteren Simulationen kaum noch aussagekräftig.

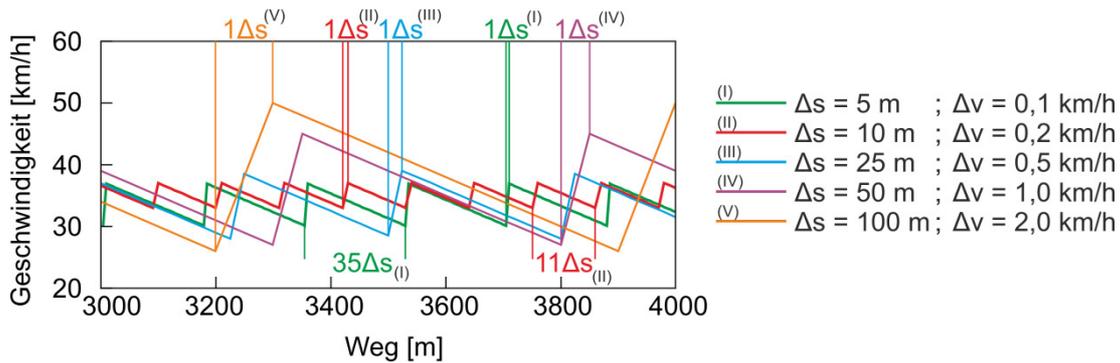


Bild 67: Detail-Ausschnitt kraftstoffoptimaler Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen

Die Zielgrößenwerte der fünf Geschwindigkeitsprofile sind in Bild 68 zu sehen. Im Gegensatz zu den Darstellungen in den vorangegangenen Ausführungen dieses Kapitels wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit statt der vollständigen Verläufe über die gesamte Simulationsstrecke nur der Bereich um ihre Endwerte dargestellt.

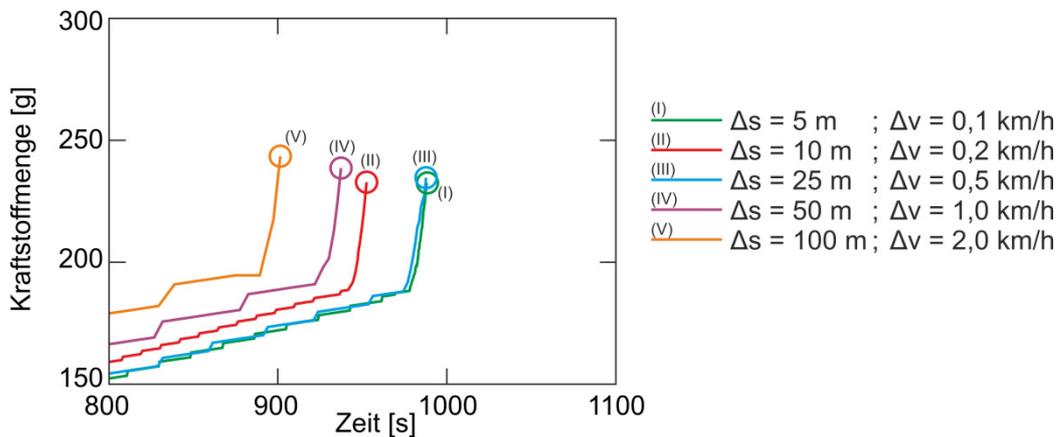


Bild 68: Zielgrößen der kraftstoffoptimalen Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen

Die Zielgröße Zeit hängt unmittelbar von Form und Lage des jeweiligen Oszillationsmusters ab. Im Vergleich zum Kraftstoffverbrauch sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeiten relativ groß, sie verteilen sich auf einer Spanne von ca. 9% der Gesamtzeit. Beim Kraftstoffverbrauch liefert die Streckendiskretisierung  $\Delta s = 10 \text{ m}$  das geringste Ergebnis, es unterscheidet sich kaum von dem aus der noch kleineren Schrittweite  $\Delta s = 5 \text{ m}$ . Insgesamt misst die Spanne beim Verbrauch zwischen allen fünf Ergebnissen 9 g, was knapp 4% des Gesamtverbrauches entspricht. Diese Verbesserung der Ergebnisqualität beim Kriterium Verbrauch, die durch das engmaschigere Knotengitter im Zustandsraum erzielt werden kann, ist also vernachlässigbar gering. Im Gegensatz dazu wiegen die jeweiligen Kosten bei der Simulationsdauer relativ schwer. Wie aus den Berechnungszeiten in Bild 69 zu erkennen ist, dauert die Optimierung bei einem Wegstützstellen-Abstand von 5 m etwa 14 mal länger als die Optimierung mit der hier standardmäßig verwendeten Schrittweite von 50 m.

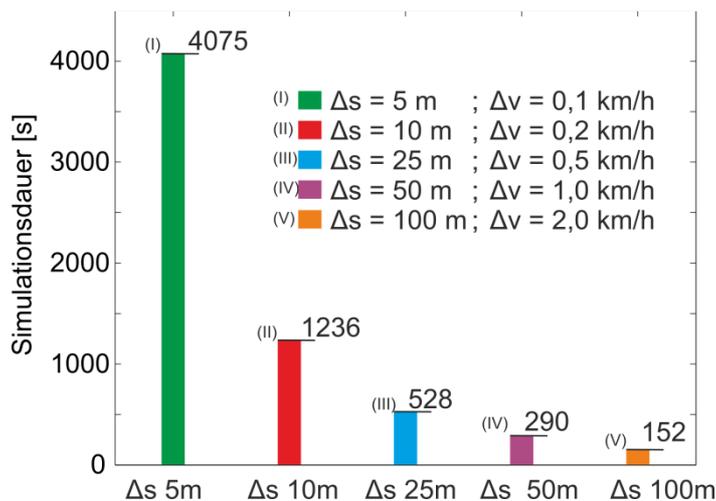


Bild 69: Simulationsdauer für kraftstoffoptimale Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen

Aus diesen Erkenntnissen wird abgeleitet, dass bei den hier beschriebenen Simulationsbeispielen im mittelfristigen Planungshorizont eine Zustandsraum-Diskretisierung mit den Schrittweiten von 50 m bei der Strecke und 1 km/h bei der Geschwindigkeit einen angemessenen Kompromiss zwischen Berechnungsdauer und Ergebnisqualität darstellt.

## 7.7. Nachbearbeitung von Geschwindigkeitsprofilen

Alle hier gezeigten Simulationen haben zu Ergebnissen geführt, die oszillierende Geschwindigkeitsverläufe unterschiedlich starker Ausprägung aufweisen. Lediglich vollständig zeitoptimale Profile enthalten Phasen mit konstanter Geschwindigkeit. An dieser Stelle kommt ein Konflikt zwischen theoretisch optimalen Verhaltensweisen und deren praktischer Umsetzung auf. Abgesehen von psychologischen Auswirkungen auf andere Verkehrsteilnehmer, die sich durch häufige Geschwindigkeitsänderungen eines vorausfahrenden Fahrzeuges gestört fühlen würden oder dadurch irritiert wären, führt ein individuell optimales Verhalten unter Umständen auch dazu, dass andere Fahrzeuge ihr eigentlich mögliches Optimum nicht mehr erreichen können. Ein Beispiel für eine solche Situation wurde in Unterkapitel 7.4 gezeigt. Dieses Problem wird in der Praxis noch zusätzlich verschärft durch die Tatsache, dass die hier gezeigten Oszillationsmuster jeweils ausschließlich für eine bestimmte Fahrzeugparametrierung vorteilhaft sind. Wird also beispielsweise ein Fahrwiderstandsparameter wie das Fahrzeuggewicht, die Schaltstrategie oder das Motorkennfeld verändert, würde auch das optimale Muster völlig anders verlaufen. In einer Fahrzeugkolonne müssten also relativ große Abstände gehalten werden, damit jedes Kolonnenfahrzeug sein individuelles Oszillationsmuster umsetzen könnte.

Eine weitere Lösungsalternative wäre die Nachbearbeitung der optimalen Geschwindigkeitsverläufe in Form einer nachträglichen Glättung. Bei der Optimierung selbst könnte eine Glättung während der zweiten Rekursion erfolgen, indem die Teilstrate-

gien nicht nur aufgrund der Summe der Zielfunktionswerte in den einzelnen Streckenabschnitten bewertet werden. Hier müsste dann noch ein Summand zur Bestrafung häufiger Beschleunigungsänderungen hinzukommen, wodurch sich die Dimension des Zustandsraumes und mit ihr auch der Rechenaufwand erhöhen würde. Eine weitere Möglichkeit zur Glättung der Geschwindigkeitsprofile könnte außerhalb der Optimierung bei der Realisierung der Vorgabe durch das ACC vorgesehen werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass sich der Kraftstoffverbrauch dadurch erheblich erhöhen würde. Das wurde anhand des Beispiels in Abschnitt 7.1.2 gezeigt. Bevor hier eine abschließende Empfehlung gegeben werden kann, muss eine Abschätzung getroffen werden, die das Verhältnis zwischen der individuellen Verschlechterung beim Verbrauch und dem Gewinn, den das Kollektiv aus der Homogenisierung der Geschwindigkeitsprofile einzelner Fahrzeuge erzielen kann, beziffert.



## 8. Dynamische Informationen

Die Bildung des Zustandsraumes für die Geschwindigkeitsprofil-Optimierung basiert bislang ausschließlich auf Informationen, deren Ausprägungen im mittel- bis langfristigen Planungshorizont konstant sind. Sie werden in dieser Arbeit als statische Informationen bezeichnet. Beispiele für statische Informationen sind Geschwindigkeitsbeschränkungen, Besonderheiten in der Streckenführung, Steigungen etc. In der Realität beeinflussen jedoch auch zeitlich veränderliche Gegebenheiten den Spielraum für eine Optimierung des Geschwindigkeitsprofils in hohem Maße. Dazu zählen beispielsweise Signalanlagen wie Ampeln, aber auch Einschränkungen durch andere Verkehrsteilnehmer. Während Ampelschaltungen in einem gewissen Horizont vorhersehbar sind, können Behinderungen durch hohes Verkehrsaufkommen im Vorfeld nur bedingt eingeschätzt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der Fokus auf den Möglichkeiten zur Einbindung detaillierter und planbarer dynamischer Informationen liegen, da die Optimierung von Geschwindigkeitsprofilen in der vorliegenden Form einer Steuerung entspricht. Die Struktur des Programmablaufes ist auf einen mittel- bis langfristigen Planungshorizont ausgelegt. Schwer bzw. nur grob prognostizierbare Ereignisse erfordern jedoch kurzfristige Anpassungen der Verhaltensweise. Dies wäre eher im Rahmen eines Systems vorzusehen, das die Optimierung in dem hier erstellten Vorausschau-Assistenten überlagert.

Ein Anwendungsbeispiel mit hoher Praxisrelevanz für das vorausschauende Fahren unter Berücksichtigung dynamischer Informationen ist die Anpassung der eigenen Verhaltensweise an Ampelschaltungen. Insbesondere bei Stadtfahrten kann dadurch hohes Optimierungspotential ausgeschöpft werden. Ortskundige Fahrer beispielsweise nutzen ihre Erfahrungswerte bezüglich der Ampelschaltungen auf bekannten Strecken, um idealerweise passend zum Umschalt-Zeitpunkt von rot auf grün bei der Ampel einzutreffen. Es ist naheliegend, dass sich Wartezeiten immer negativ auf die Zielgrößen auswirken. Das betrifft in erster Linie den Kraftstoffverbrauch, aber in geringem Maß auch die Fahrzeit. Da beinahe alle modernen Fahrzeuge mit einer Start-Stopp-Automatik ausgerüstet sind, fällt zwar während Wartezeiten kein Kraftstoffverbrauch an. Das Halten jedoch erfordert einen zusätzlichen, verbrauchserhöhenden Beschleunigungsvorgang, der nicht nötig wäre, wenn das Fahrzeug auf eine grüne Ampel treffen würde und mit unveränderter Geschwindigkeit passieren könnte. Auch die Fahrzeit ist bei Ankunft an einer grünen Ampel geringfügig kürzer. Beides gilt jedoch nur, wenn sich nicht vor der Ampel eine Warteschlange vorausfahrender Fahrzeuge gebildet hat. Wenn dies der Fall ist, verschiebt sich der ideale Zeitpunkt des Erreichens der Ampel entsprechend nach hinten, bis sich die Warteschlange nach dem Umschaltzeitpunkt aufgelöst hat. Maßgeblich und daher Ziel der Be-

rücksichtigung von Schaltzeitpunkten an Ampeln ist also eine verzögerungsfreie Fahrt.

Voraussetzung für deren Einbindung in die vorausschauende Geschwindigkeitsprofil-Optimierung ist die Kenntnis darüber, zu welchen Zeiten welches Signal gezeigt wird. An dieser Stelle wird für weitere Erläuterungen das bereits bekannte Stadtfahrtszenario aus Unterkapitel 7.2 aufgegriffen. An der Wegstützstelle bei 2200 m wird nun eine Ampel eingefügt, die vorher dort vorgesehene kurzzeitige Geschwindigkeitsreduktion entfällt dafür. Je nachdem, ob die Ampel rot oder grün ist, hat der Zustandsraum nun zwei unterschiedliche Ausprägungen. Welche der beiden in Bild 70 dargestellten Ausprägungen gilt, ist von den Schaltzeitpunkten abhängig. Bei roter Ampel weist der Zustandsraum an der betreffenden Wegstützstelle  $s = 2200$  m nur noch einen zulässigen Zustand, nämlich  $v = 0$  km/h, auf. Daher führt die optimale Strategie zwangsläufig über diesen Zustand. Das wiederum führt nach dem Bellman'schen Optimalitätsprinzip dazu, dass die Teil-Probleme auf den Strecken von  $s = 0$  m bis  $s = 2200$  m und von  $s = 2200$  m bis  $s = 6000$  m unabhängig voneinander optimiert werden können und anschließend aus der Verkettung der beiden optimalen Teilstrategien automatisch die optimale Lösung des Gesamtproblems entsteht.

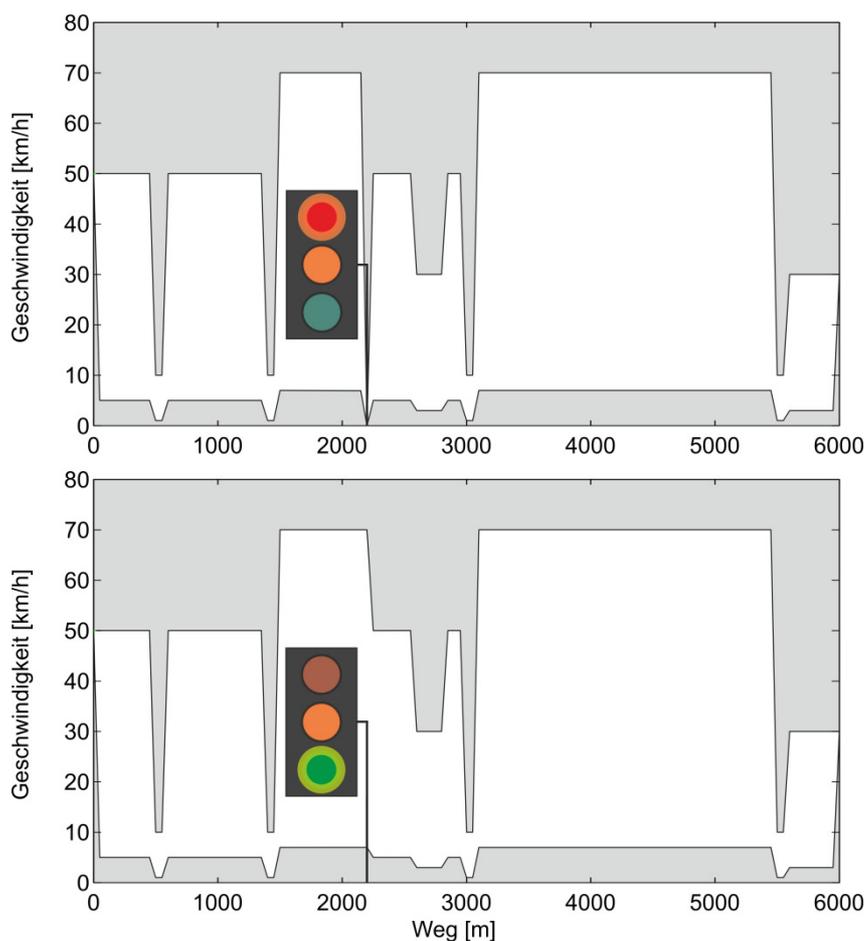


Bild 70: Zustandsraum des Simulationsszenarios einer Stadtfahrt in Abhängigkeit des Ampelsignals (oben rot, unten grün)

## 8.1. Verbesserungspotential durch Einbindung dynamischer Informationen

Bevor auf die Einbindung der Informationen über die Schaltzeitpunkte eingegangen wird, soll die erreichbare Verbesserung oben beschriebenen Beispiel beziffert werden. Dazu werden die jeweiligen Optima für fünf unterschiedliche Gewichtungsfaktor-Relationen in beiden möglichen Ausprägungen des Zustandsraums (siehe Bild 70) berechnet. Die Ergebnisse für den Fall der grünen Ampel sind in Bild 71 und Bild 72 dargestellt. Abgesehen von der leicht abgeänderten Zustandsraum-Begrenzung entsprechen die Geschwindigkeitsprofile den in Unterkapitel 7.2 gezeigten. Da die Ampel grün ist, wird sie bei der Optimierung ignoriert, das Fahrzeug kann die betreffende Wegstützstelle passieren, ohne die Geschwindigkeit zu verringern.

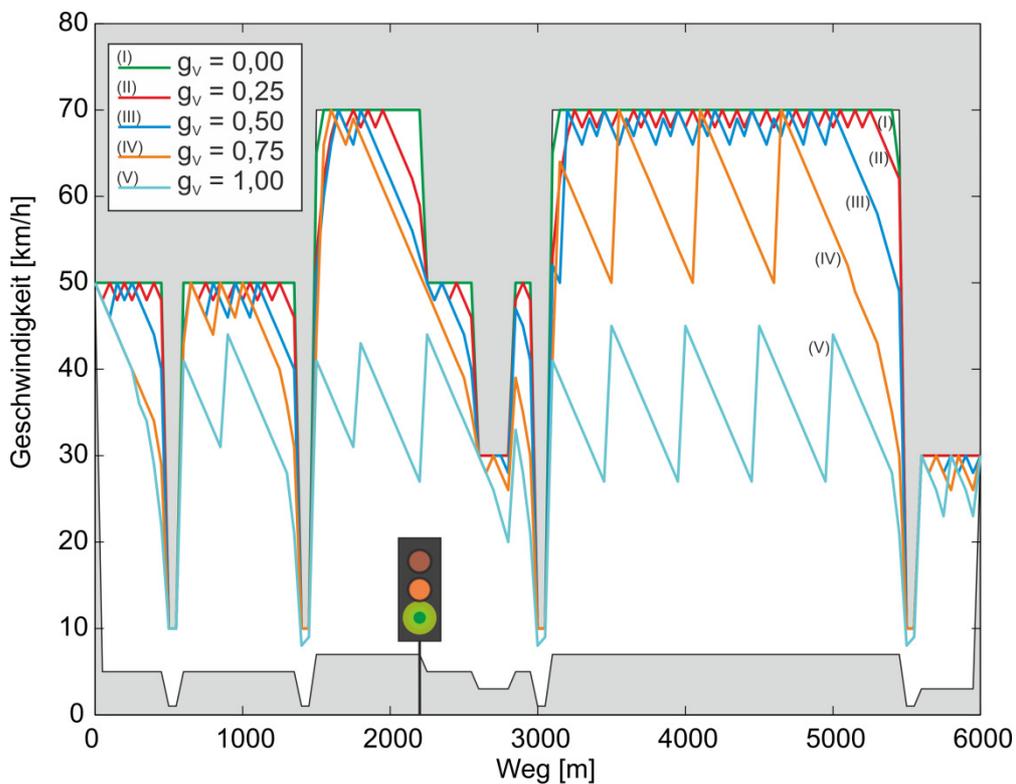


Bild 71: Optimale Geschwindigkeitsprofile bei grüner Ampel

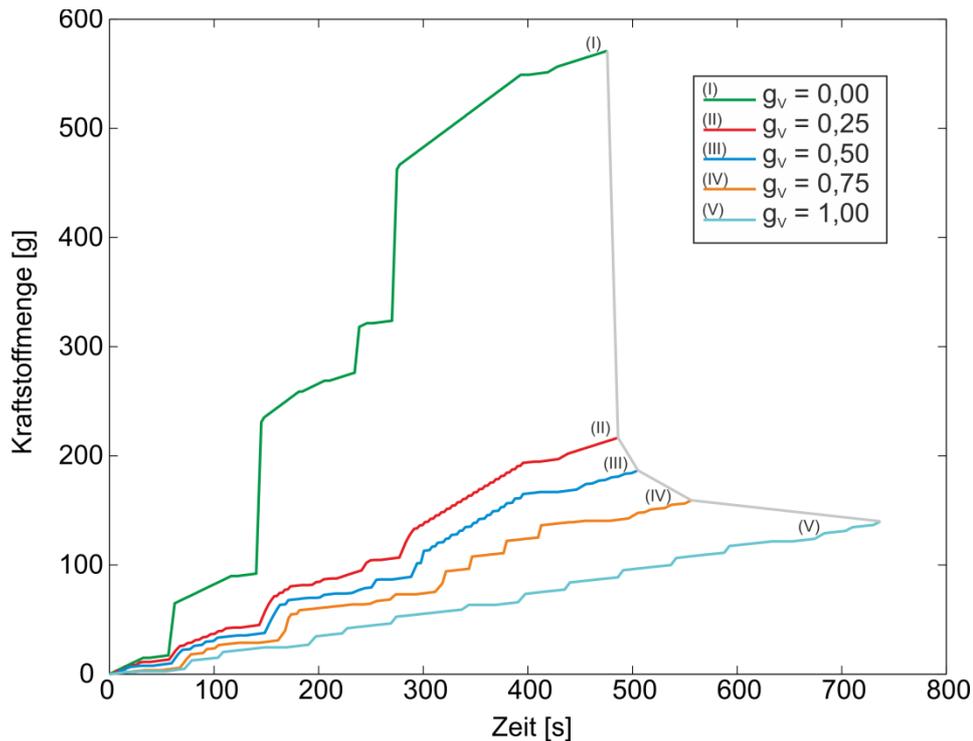


Bild 72: Zielgrößen bei grüner Ampel

Im ersten Schritt zur Bezifferung des Verbesserungspotentials soll identifiziert werden, wie sich allein der zusätzliche Beschleunigungsvorgang durch das Halten an der Ampel auf die Zielgrößen auswirkt. Eine Wartezeit wird hier noch nicht vorgesehen, um die unterschiedlichen Einflüsse bei späteren Analysen trennen zu können, statt sie bereits hier gemischt eingehen zu lassen. Auf die Realität bezogen würde dies zu einem Simulationsszenario führen, bei dem im Zustandsraum in Bild 72 die Ampel durch ein Stoppschild ersetzt wird.

Die entsprechenden optimalen Geschwindigkeitsprofile sind in Bild 73 zu sehen, während Bild 74 die Verläufe der Zielgrößen zeigt. Die Zielgrößenwerte, die bis zum Erreichen der Wegstützstelle am Stoppschild anfallen, sind dort mit einem Kreuz markiert. Alle Verläufe enthalten vor dem Kreuz ein kurzes waagrechtes Stück, da bei der Verzögerung bis zum Haltepunkt kein Kraftstoffverbrauch anfällt. Seine Länge hängt von der jeweiligen Verbrauchsgewichtung ab.

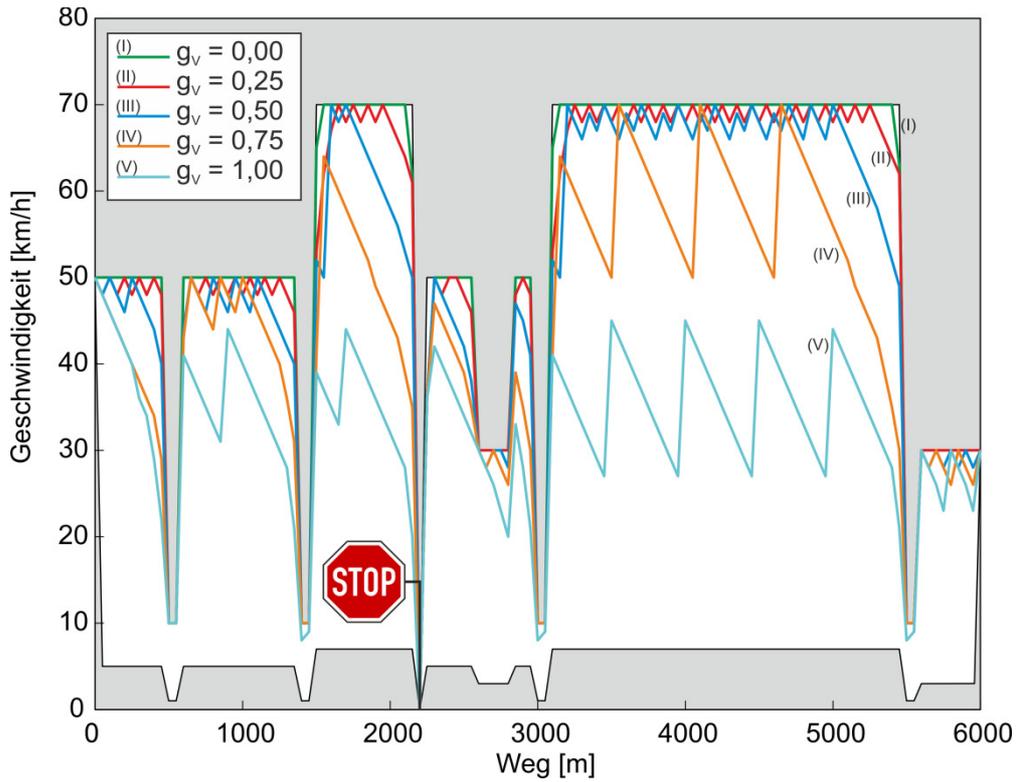


Bild 73: Optimale Geschwindigkeitsprofile bei Fahrt auf einer Strecke mit Halt, ohne Wartezeit

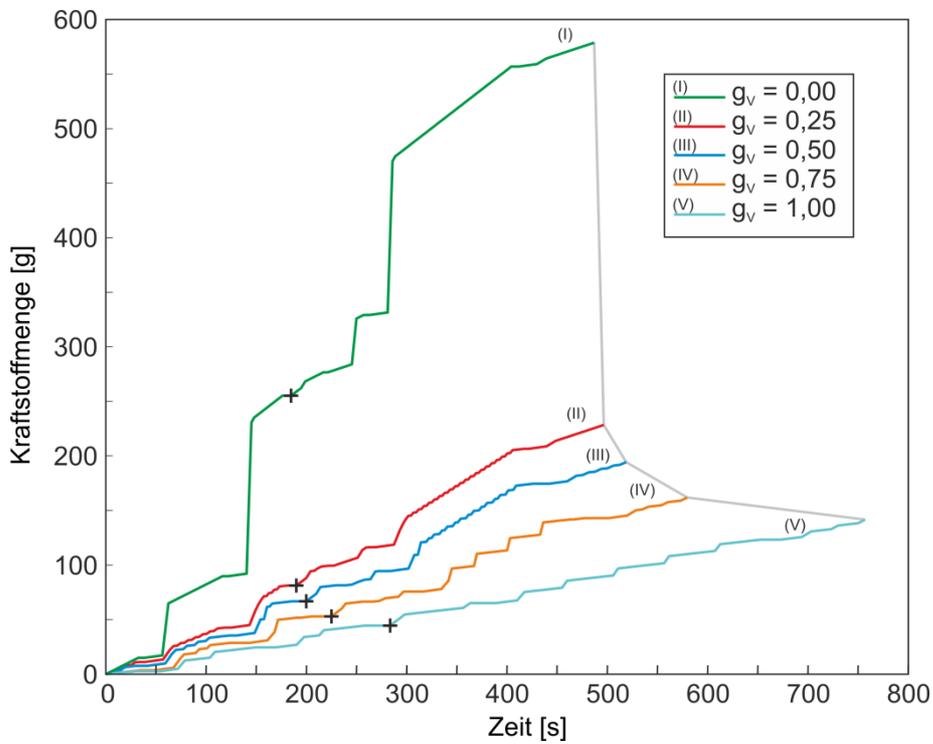


Bild 74: Zielgrößen bei Fahrt auf einer Strecke mit Halt, ohne Wartezeit

Bild 75 zeigt den direkten Vergleich zwischen den Zielgrößen der Fahrten mit und ohne Halt auf der Beispielstrecke. Letztere werden dort durch gepunktete Linien dar-

gestellt. Es ergeben sich zwei Paretofronten, deren Abstand zueinander die durch das Halten verursachte Zielgrößenverschlechterung in beiden Kriterien zeigt.

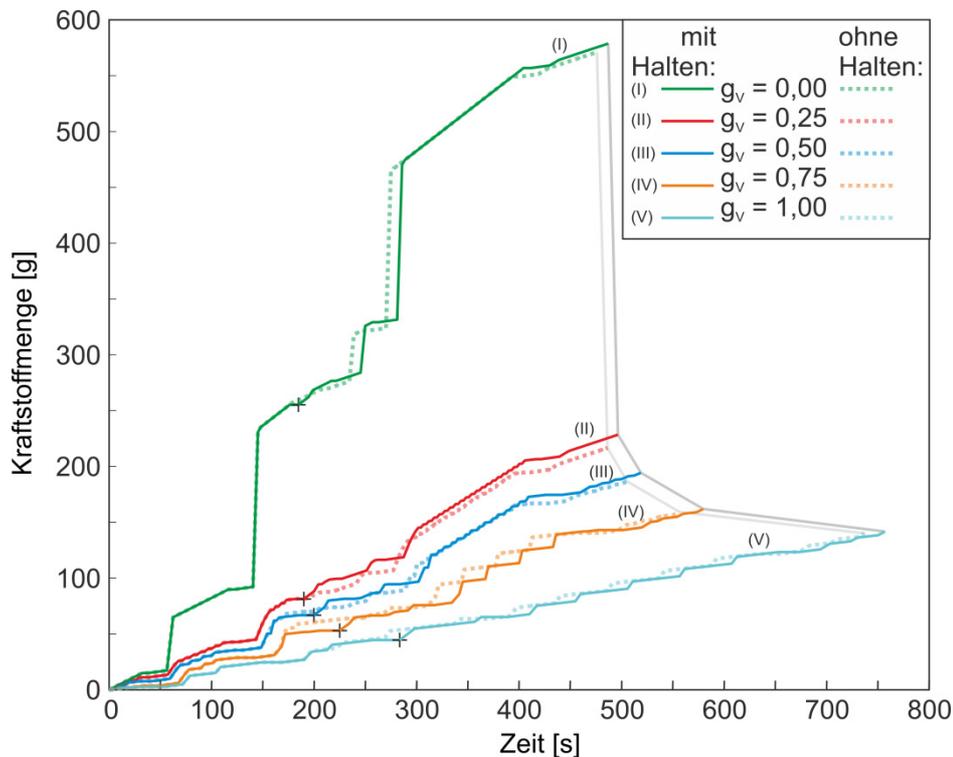


Bild 75: Vergleich der Zielgrößen zwischen der Fahrt mit und ohne Halt auf der Simulationsstrecke

Im zweiten Schritt wird nun eine Wartezeit in das Szenario einbezogen, um das Beispiel einer Strecke mit Ampel anstelle des Stoppschildes anzupassen. Dazu wird angenommen, dass die Ampel zunächst rot sei und bei  $t_{Schalt} = 250$  s grün wird. Dies ist entsprechend in der Zielgrößendarstellung in Bild 76 gekennzeichnet. Im Vergleich zum einfachen Halten ohne Wartezeit (Verläufe mit dünnen Linien) verschieben sich die Paretopunkte entsprechend auf der Zeitachse, so dass die Paretofront gestaucht wird. Lediglich der aus der kraftstoffoptimalen Fahrt resultierende Zielgrößenverlauf bleibt unverändert, da das Fahrzeug in diesem Fall deutlich nach  $t_{Schalt}$  bei der Ampel eintrifft. Deshalb wird auch der Paretopunkt nicht verschoben.

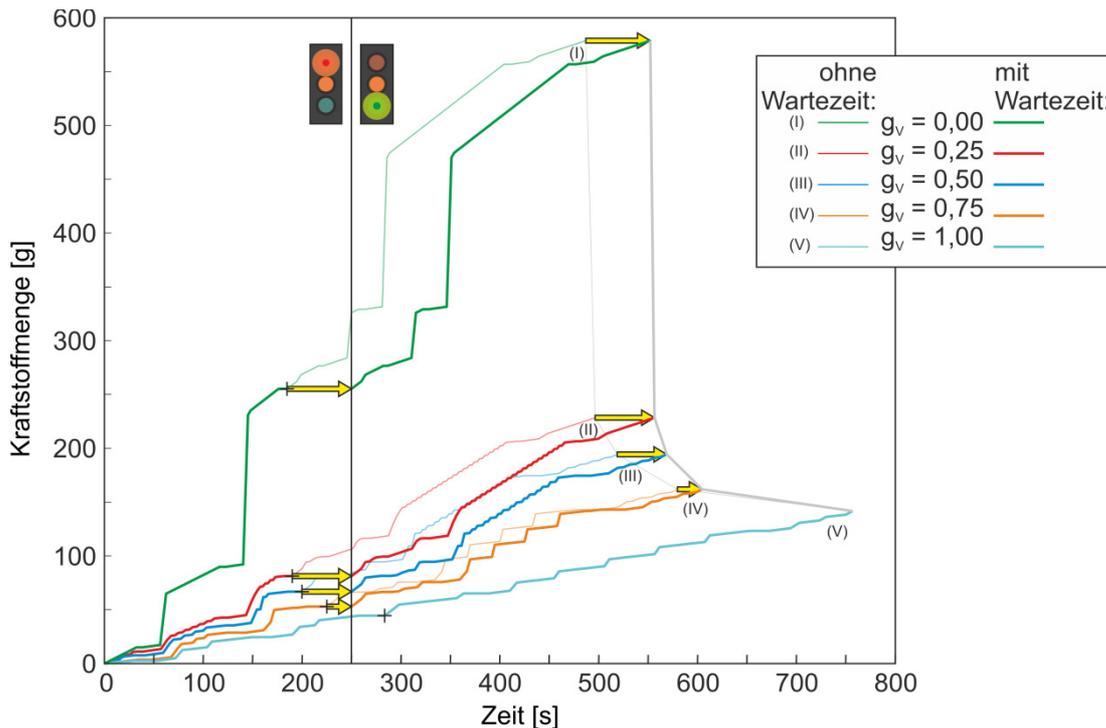


Bild 76: Vergleich der Zielgrößen bei einer Stadtfahrt mit und ohne Wartezeiten nach dem Halten an einem Stoppschild bzw. einer Ampel

## 8.2. Berücksichtigung von Schaltzeitpunkten zum Erreichen einer Grünphase

Durch Kenntnis des Schaltzeitpunktes können die Geschwindigkeitsprofile, die ohne Berücksichtigung dynamischer Informationen eine Wartezeit enthalten würden, angepasst werden, damit sich ihre Zielgrößen verbessern. Dazu sind zwei voneinander entkoppelte Optimierungsaufgaben zu lösen, nämlich zum Ersten die Strecke vom Ausgangspunkt bis zur Ampel ( $s = 0$  bis  $s = 2200$  m) und zum Zweiten die für die Strecke von der Ampel bis zum Ziel ( $s = 2200$  bis  $s = 6000$  m). Die jeweils gültigen Zustandsräume zeigt Bild 77. Entsprechend der obigen Erläuterungen muss an der letzten Wegstützstelle des ersten Streckenteils ein eindeutiger Zustand bestimmt werden, der dann gleichzeitig der Ausgangszustand für die zweite Teilaufgabe sein wird. Nur so können die beiden Teilstrategien zu einer zulässigen und optimalen Gesamtlösung kombiniert werden. Bedingung bei der Lösung der ersten Teilaufgabe ist nun, eine Wartezeit zu vermeiden und stattdessen genau zum oder möglichst bald nach dem Schaltzeitpunkt von rot auf grün einzutreffen.

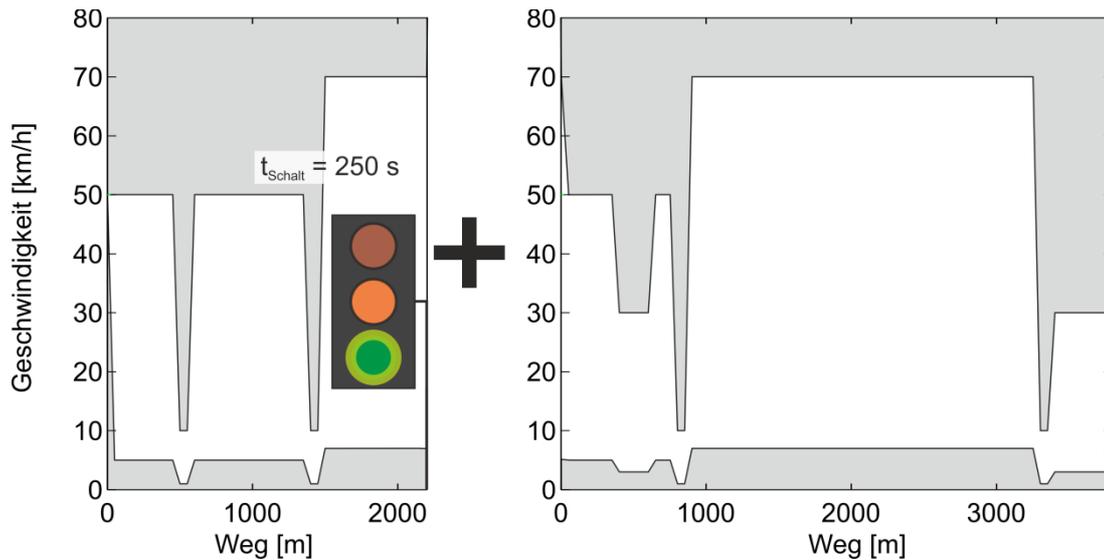


Bild 77: Zustandsräume der entkoppelten Optimierungsaufgabe bei Kenntnis des Schaltzeitpunktes

Bedingt durch die hier umgesetzte Formulierung des Optimierungsproblems ist die einzige Variable, die zur Beeinflussung der Geschwindigkeitsprofile genutzt werden kann, das Verhältnis der Gewichtungsfaktoren. Die vier vom Schaltzeitpunkt betroffenen Geschwindigkeitsprofile resultieren aus einer Verbrauchsgewichtung  $g_V \leq 0,75$ . Für den ersten Streckenteil ist demnach das (eine) Gewichtungsverhältnis zu ermitteln, dessen Geschwindigkeitsprofil die Soll-Zeit (in diesem Beispiel  $t_{soll} = t_{Schalt} = 250$  s) erzielt. Alle vier Profile nutzen dann im ersten Streckenteil diese Gewichtung. Nach dem Passieren der Ampel werden die ursprünglichen Gewichtungen wieder aufgenommen und im zweiten Streckenteil umgesetzt.

Um sich der optimalen Gewichtung (die möglichst genau auf  $t_{soll}$  führt) für den ersten Streckenteil zu nähern, können die oben beschriebenen Ergebnisse für den Fall der grünen Ampel genutzt werden. Sie werden nochmals in Bild 78 gezeigt, wobei in dieser Darstellung die Zielgrößen bis zum Erreichen der Ampelposition hervorgehoben sind. Daraus ist zu erkennen, dass die optimale Gewichtung für den ersten Streckenteil bei  $0,75 < g_{V,Teil I} < 1,0$  liegen muss.

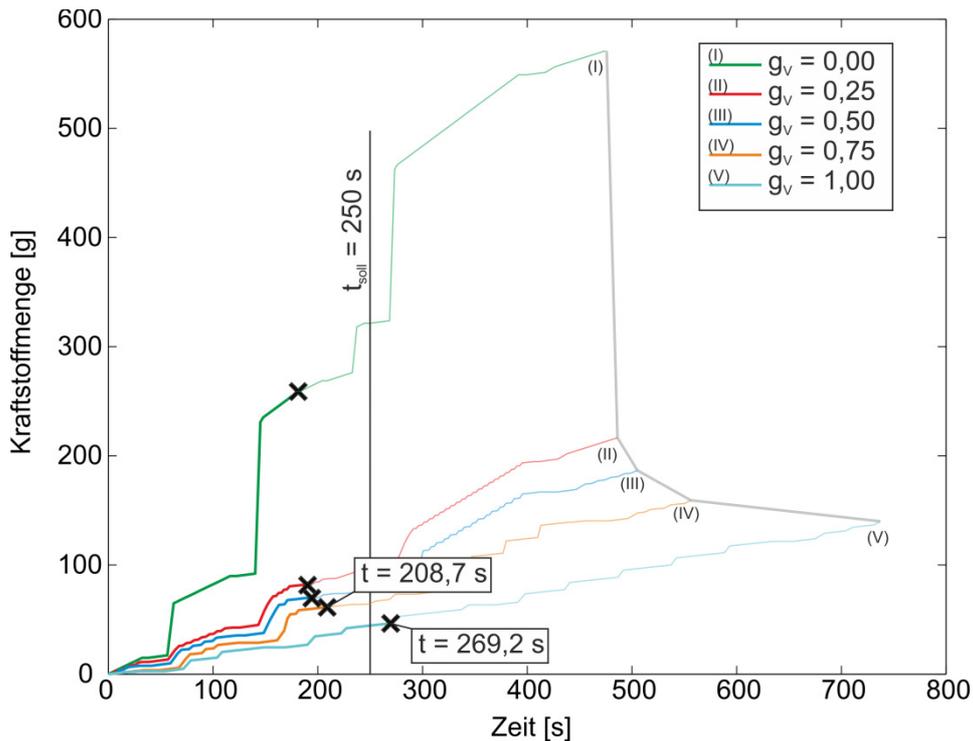


Bild 78: Zielgrößen bis zur Ampelposition bei unbeschränkter Fahrt

Da das genaue Treffen der Sollzeit eine hohe Zahl von Iterationen verursachen würde, wird hier der Einfachheit halber ein Toleranzbereich von 2 Sekunden definiert, innerhalb dessen die Lösung des ersten Streckenteils liegen darf:

$$0 \leq t(s=2200\text{m}) - t_{\text{soll}} \leq 2$$

Diese Bedingung scheint zunächst recht grob gewählt, selbstverständlich könnten die Änderungen der Gewichtungen in beliebig kleinen Schritten vorgenommen werden. Jedoch ist die hier gewählte zulässige Abweichung von ca. 1% im Hinblick auf den Rechenaufwand ausreichend genau.

Die der Sollzeit nächstgelegene Gewichtung, und somit die Startlösung für die Optimierung der Gewichtung, ist  $g_v=1,0$ . Von dieser ausgehend wird nun in 0,1-Schrittweiten die Zeit  $t(s=2200\text{m})$  der nächstkleineren Gewichtung berechnet, bis entweder das Abbruchkriterium durch Einhaltung des Toleranzbereichs erfüllt oder  $t_{\text{soll}}$  unterschritten wird. Im zweiten Fall wird dann durch Erhöhung von  $g_v$  mit kleinerer Schrittweite weiter gesucht, bis entweder das Abbruchkriterium erfüllt oder der Toleranzbereich überschritten wird. Diese Schritte werden abwechselnd wiederholt, bis die optimale Gewichtung im ersten Streckenteil gefunden wird.

Im vorliegenden Beispiel führt obige Vorgehensweise, wie in Tabelle 12 dargestellt, nach zwei Schritten zu einer Lösung. Die entsprechenden Geschwindigkeitsprofile und Zielgrößen sind in Bild 79 zu sehen.

Tabelle 12: Schrittweise Ermittlung der optimalen Gewichtung für den ersten Streckenteil bei roter Ampel

Schritt	$g_v$	$t(s=2200\text{m})$ [s]	$v(s=2200\text{m})$ [km/h]
0	1,0	269,2	27
1	0,9	228,6	46
2	<b>0,95</b>	<b>250,3</b>	<b>46</b>

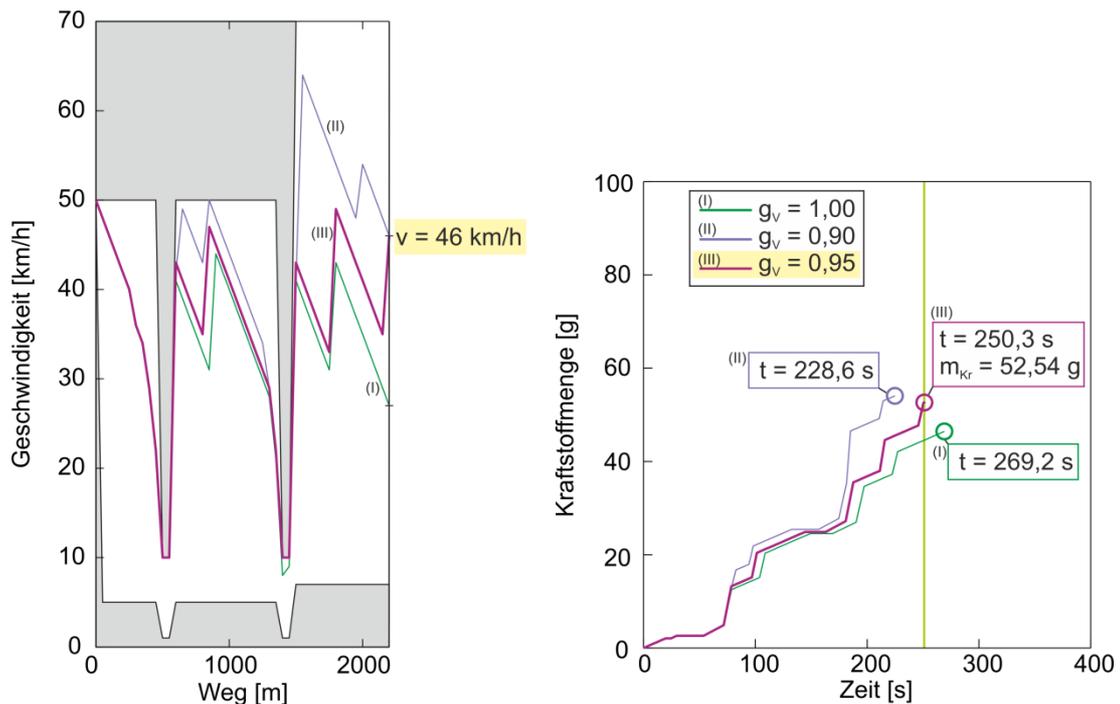


Bild 79: Geschwindigkeitsprofile und Zielgrößen der schrittweisen Ermittlung der optimalen Gewichtung für den ersten Streckenteil

Mit einer Gewichtung von  $g_v=0,95$  erreicht das Fahrzeug die Wegstützstelle bei  $s=2200$  m zum Zeitpunkt  $t = 250,3$  s nach Beginn der Fahrt mit einer Geschwindigkeit von  $v = 46$  km/h. Führt man nun das Ausgangsbeispiel weiter, müssen alle Geschwindigkeitsprofile mit einer Gewichtung von  $g_v \leq 0,75$  für den zweiten Streckenteil neu berechnet werden, wobei dazu an  $s = 2200$  m die einheitliche Startgeschwindigkeit von  $v = 46$  km/h zu parametrieren ist. In Bild 80 sind die Geschwindigkeitsprofile, die unter Berücksichtigung des Schaltzeitpunktes optimal sind und dazu ggf. jeweils aus verschiedenen Gewichtungen für die Teilstrecken vor und nach der Ampel resultieren, zu sehen. Dort ist zu erkennen, dass im Bereich vor der Ampel im Vergleich zu den ursprünglich fünf Gewichtungen nur noch zwei genutzt werden, da andernfalls Wartezeiten anfallen würden. An der Wegstützstelle  $s=2200$  m gliedert sich das Profil aus der optimalen Gewichtung für den ersten Streckenteil wieder in vier verschiedene Profile auf, die dann jeweils die ursprünglich vom Fahrer gewünschte Gewichtung umsetzen.

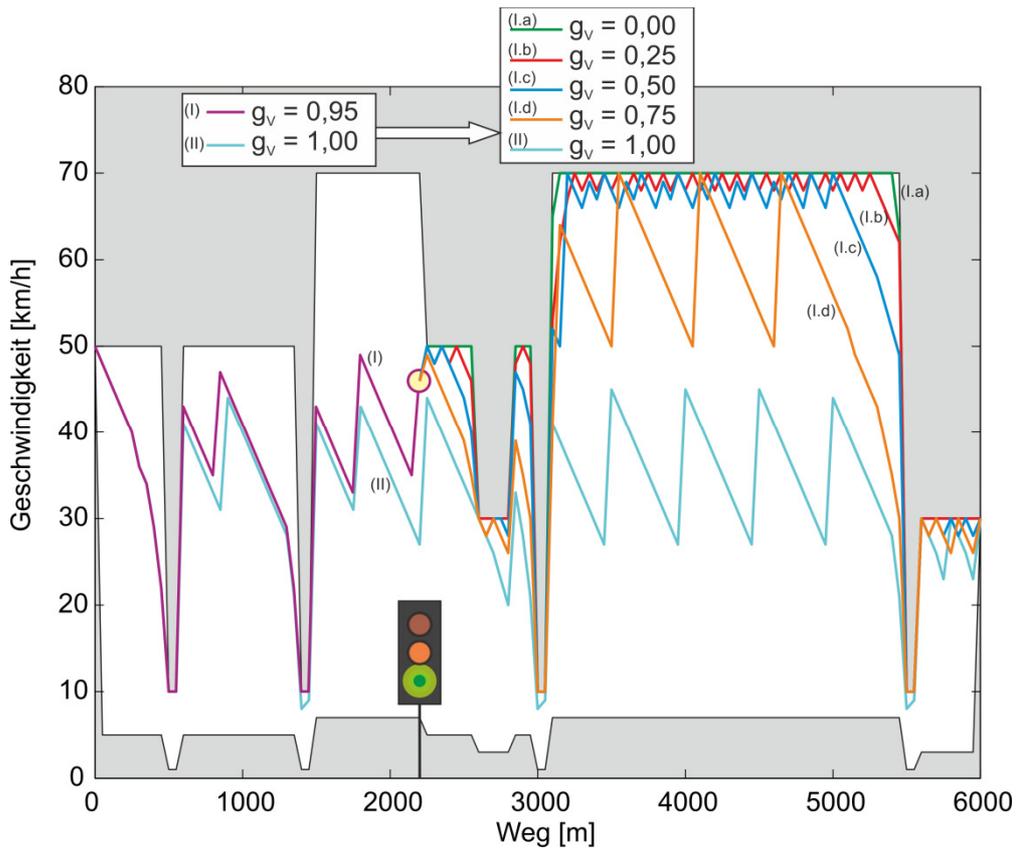


Bild 80: Optimale Geschwindigkeitsprofile vor und nach einer Ampel unter Berücksichtigung des Schaltzeitpunktes

Wie sich der Wegfall der Wartezeiten auf die Zielgrößen und die Paretofront auswirkt, zeigt Bild 81. Zum Vergleich sind dort die Verläufe, die sich ohne Berücksichtigung des Schaltzeitpunktes wie oben beschrieben ergeben hätten, durch die gepunkteten Linien dargestellt. Wie erwartet haben sich die Verläufe aus den von Wartezeiten betroffenen Gewichtungen unterschiedlich stark im Kriterium Verbrauch verbessert. Außerdem ist auch eine leichte Verkürzung der Fahrzeit eingetreten, da das Fahrzeug nun nicht mehr zum Stillstand kommt. Im Extremfall des zeitoptimalen Geschwindigkeitsprofils kann die Fahrzeit durch die Einbindung dynamischer Informationen in diesem Beispiel um 6,5 s (= 1,2 %) gesenkt werden, während sich der Verbrauch sogar um 211,1 g (= 36,5 %) reduziert.

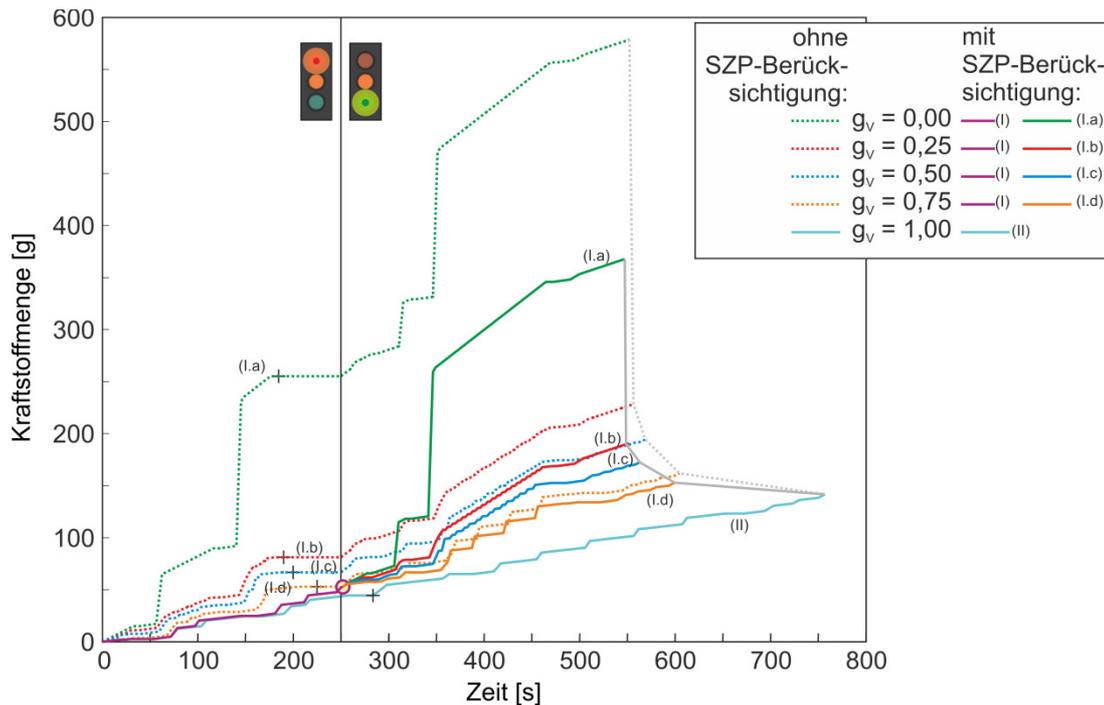


Bild 81: Vergleich der Zielgrößen auf einer Strecke mit Ampel mit und ohne Berücksichtigung der Ampelschaltung

### 8.3. Berücksichtigung von Schaltzeitpunkten zur Vermeidung einer Rotphase

Die im obigen Beispiel beschriebene Anpassung von Geschwindigkeitsprofilen durch die Bestimmung optimaler Gewichtungen zur Vermeidung von Wartezeiten kann auch für andere Anwendungsfälle adaptiert werden.

Analog zu einer nach unten beschränkten Fahrzeit vor einer Ampel, die von rot auf grün schaltet, wäre die Festlegung einer oberen Schranke beim Umschalten von grün auf rot erforderlich. Im Gegensatz zu ersterem Fall kann hierbei jedoch nicht allgemeingültig davon ausgegangen werden, dass die Vermeidung von Wartezeiten erstrebenswert ist. Wenn beispielsweise kraftstofflastige Gewichtungen dazu führen, dass das Fahrzeug zu spät bei der Ampel eintrifft und die Grünphase verpasst, müsste die Verbrauchsgewichtung auf der Strecke vor der Ampel reduziert werden. Dabei muss wiederum abgewogen werden, ob der dadurch verursachte Zusatzverbrauch durch die Einsparung des Halte- und Wartevorgangs gerechtfertigt wird.

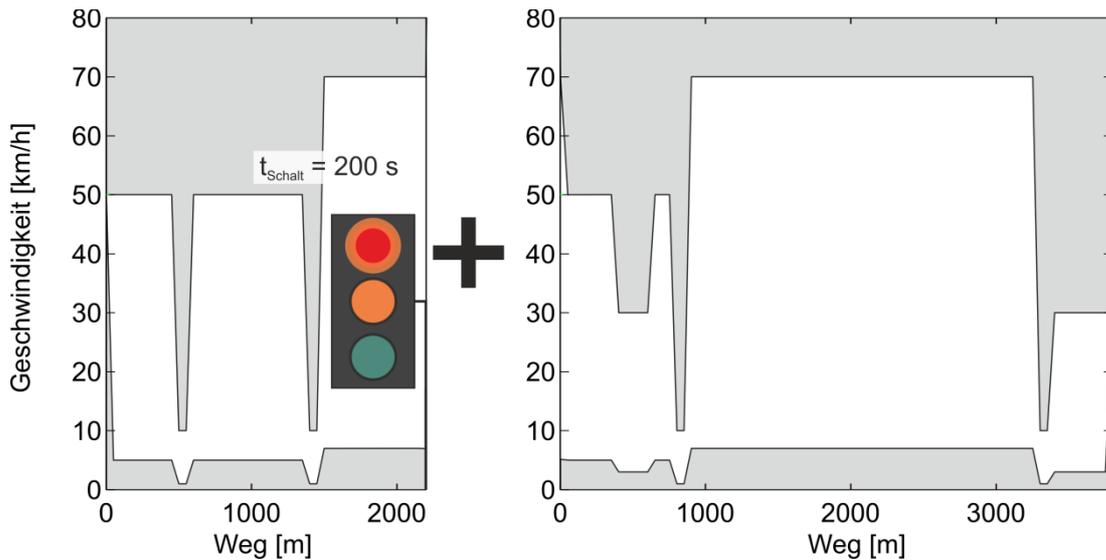


Bild 82: Geteilter Zustandsraum für die Anpassung an den Umschaltzeitpunkt von grün auf rot

Nimmt man nun an, dass im Gegensatz zum Szenario aus Bild 77 die Ampel zunächst grün ist und der Umschaltzeitpunkt auf rot bei  $t_{Schalt} = 200$  s liegt, wären die beiden Geschwindigkeitsprofile aus  $g_V=0,75$  und  $g_V=1,0$  nicht rechtzeitig vor Beginn der Rotphase bei der Ampel. Nach der in 8.2 beschriebenen Vorgehensweise wäre für diese Profile im ersten Streckenteil (links in Bild 82) ein optimales  $g_V$ , Teil I zu suchen, das das Kriterium

$$0 \leq t_{soll} - t(s=2200m) \leq 2 \quad \text{mit} \quad t_{soll} = t_{Schalt} = 200 \text{ s}$$

erfüllt. Wie den Werten aus Tabelle 13 zu entnehmen ist, sollte  $g_V=0,5$  als Startlösung für eine iterative Näherung gewählt werden, da die daraus resultierende Fahrzeit die geringste Differenz zum Toleranzbereich vor  $t_{soll}$  aufweist.

Tabelle 13: Zielgrößen bis zur Ampelposition bei unbeschränkter Fahrt

$g_V$	$t(s=2200m)$ [s]	$m_{Kr}(s=2200m)$ [g]
1,0	269,2	46,45
0,75	208,7	61,34
0,5	194,2	69,9

In diesem Beispiel liegt das Resultat nach dem dritten Näherungsschritt vor. Wie den Werten aus Tabelle 14 entnommen werden kann, erreicht das aus einer Gewichtung von  $g_V=0,65$  berechnete Geschwindigkeitsprofil die Ampelposition nach 199,8 Sekunden und somit innerhalb des Toleranzbereiches und rechtzeitig vor dem Umschalten auf rot. An der Wegstützstelle bei  $s = 2200$  m liegt eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 53 km/h vor. Dieser Zustand fungiert als Start-Zustand für die anschließende Fahrt im zweiten Streckenteil unter Wiederaufnahme der ursprünglichen Gewichtung von  $g_V=0,75$  bzw.  $g_V=1,0$ .

Tabelle 14: Schrittweise Ermittlung der optimalen Gewichtung für den ersten Streckenteil bei grüner Ampel

Schritt	$g_v$	$t(s=2200m)$ [s]	$m_{Kr}(s=2200m)$ [g]	$v(s=2200m)$ [km/h]
0	0,5	194,2	69,9	
1	0,6	197,4	67,24	
2	0,7	203,5	63,64	
<b>3</b>	<b>0,65</b>	<b>199,8</b>	<b>65,77</b>	<b>53</b>

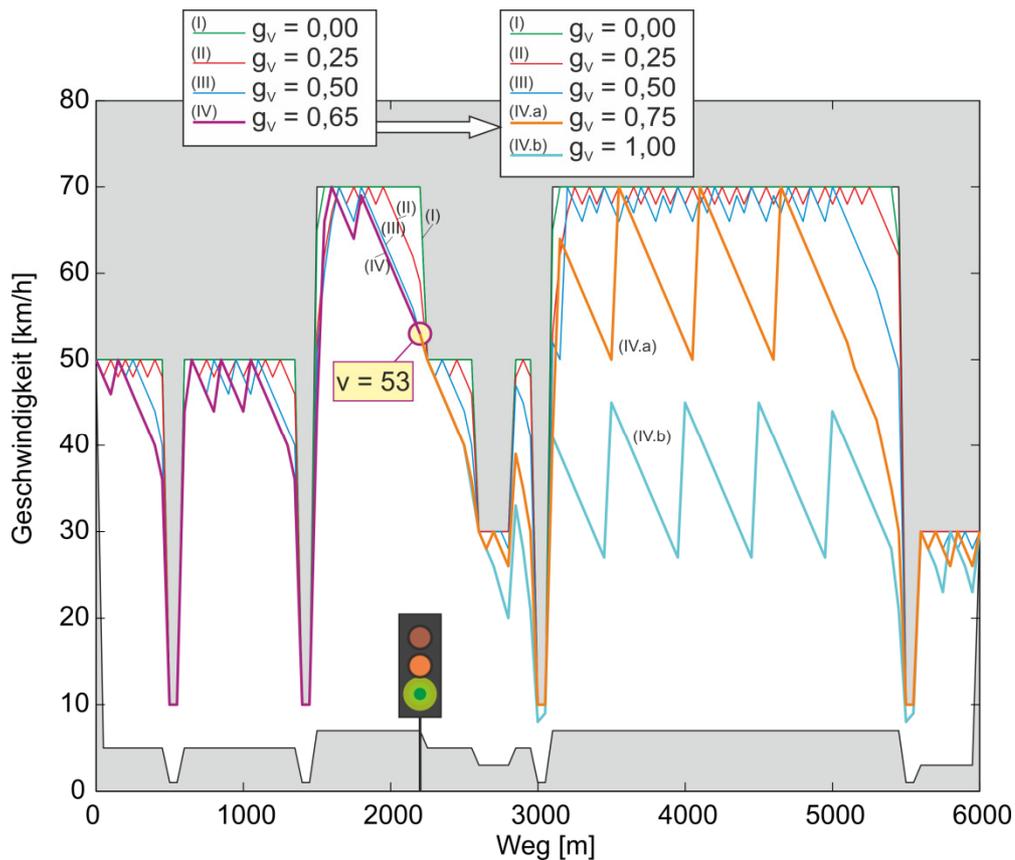


Bild 83: Optimale Geschwindigkeitsprofile unter Berücksichtigung des Umschaltzeitpunktes von grün auf rot

Analog zum Beispiel aus Unterkapitel 8.2 ist auch hier im ersten Teil des Zustandsraumes in Bild 83 die Anzahl der Geschwindigkeitsprofile geringer, da die beiden kraftstofflastigen Gewichtungen das gleiche Profil nutzen. Ab der Ampelposition findet dann erneut die Verzweigung durch Wiederaufnahme der eingangs parametrisierten Gewichtungen statt. Dies ist auch bei den Zielgrößenverläufen in Bild 84 zu sehen. Zum Vergleich sind dort zusätzlich die Zielgrößen für den Fall, dass keine Gewichtungsanpassung stattfindet, abgebildet. Sie werden durch die gepunkteten Linien repräsentiert. Um einen konkreten Vergleich zu ermöglichen, wurde das Beispielszenario erweitert, indem nicht nur der Beginn, sondern auch die Dauer der Rotphase festgelegt wurde. Die Annahme für das Rechenbeispiel ist also eine Dauer von 100 Sekunden, so dass bei den beiden kraftstofflastigen Profilen ohne Schalt-

zeitpunkt-Berücksichtigung entsprechende Wartezeiten anfallen (Markierung durch Pfeile).

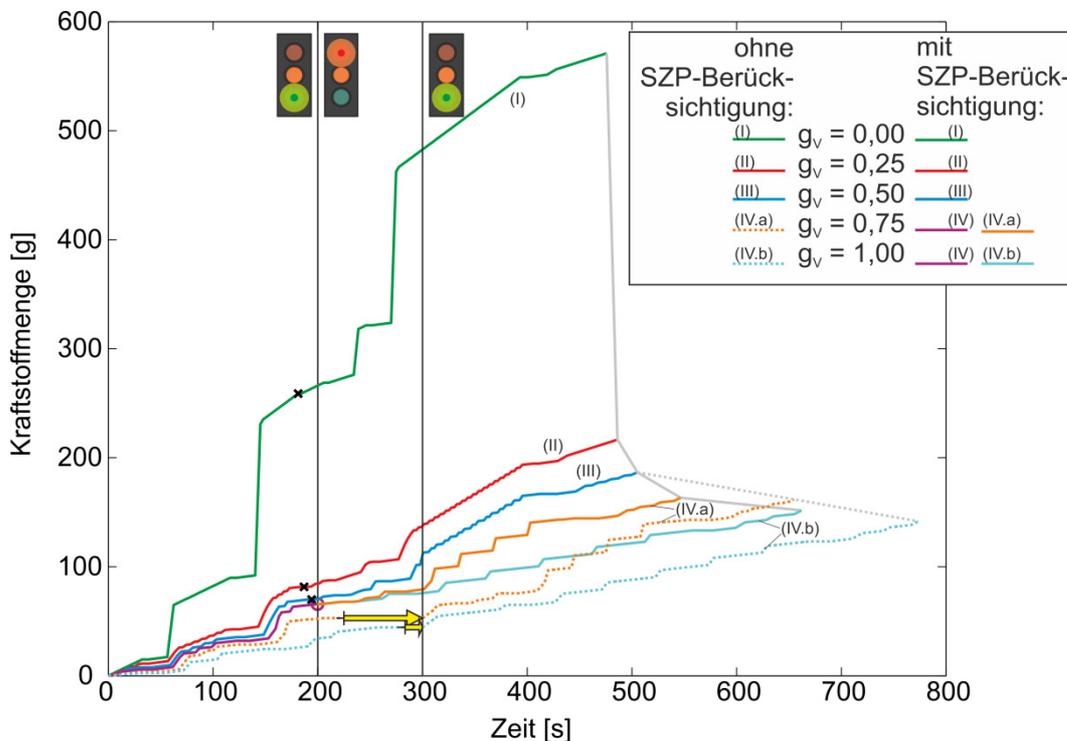


Bild 84: Vergleich der Zielgrößen mit und ohne Berücksichtigung der Umschaltzeitpunkte zu einer Rotphase

Greift man die eingangs beschriebene Abwägung zwischen Vor- und Nachteilen einer Schaltzeitpunkt-Berücksichtigung wieder auf, so überwiegen bei diesem Beispiel eindeutig die Vorteile. Bei der Verbrauchsgewichtung  $g_V = 0,75$  wurde neben der zeitlichen Verbesserung auch etwas weniger Kraftstoff verbraucht, so dass der Paretopunkt mit Schaltzeitpunkt-Berücksichtigung eindeutig besser ist als der ohne. Beim Profil aus  $g_V = 1,0$  wird durch die Absenkung der Verbrauchsgewichtung im ersten Streckenteil insgesamt zwar etwas mehr Kraftstoff benötigt als bei einer Fahrt unter Beibehaltung der ursprünglichen Gewichtung. Diese leichte Verschlechterung ist jedoch angesichts des vergleichsweise hohen Zeitgewinns annehmbar.

#### 8.4. Weitere Anwendungsmöglichkeiten dynamischer Informationen

Die in den beiden obigen Beispielen angewendete Vorgehensweise kann auf zahlreiche Anwendungen in ähnlichen Situationen angepasst werden. Bei einer realen Fahrt durch ein Stadtgebiet müssen in der Regel mehrere Ampeln nacheinander passiert werden. So entstünde bei der Berücksichtigung derer Schaltzeitpunkte eine Reihenschaltung bzw. Verkettung optimaler Geschwindigkeitsprofile für die entsprechende Anzahl von Teilstrecken. Auch kurzfristige Behinderungen durch hohes Verkehrs-

aufkommen können, vorausgesetzt Zeitpunkt und Dauer ihres Auftretens lassen sich mit einer gewissen Verlässlichkeit einschätzen, so in die Geschwindigkeitsprofil-Optimierung einbezogen werden.

Alternativ zur oben beschriebenen schrittweisen Näherung einer optimalen Gewichtung könnte eine Umformulierung der Optimierungsaufgabe Anwendung finden. Für die Optimierung anpassungsbedürftiger Geschwindigkeitsprofile kann, auf die obigen Beispiele bezogen, das Mehrziel-Optimierungsproblem auf den Streckenteilen vor Ampeln auf ein Problem mit einer Zielgröße und einer Nebenbedingung reduziert werden. Konkret hieße das im ersten Fall, dem Umschalten von rot auf grün, dass die Zeit eine untere Schranke hat. Einziges Optimierungsziel ist dann, mit minimalem Verbrauch möglichst kurz nach dieser Mindestzeit zur Ampel zu gelangen. Im zweiten Fall wäre die Zeit nach oben beschränkt. Ziel der Optimierung wäre auch hier die Verbrauchsminimierung, um möglichst kurz vor Ablauf der Höchstzeit bei der Ampelposition einzutreffen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass eine solche Umformulierung des Optimierungsproblems bzw. -modells mit einem hohen Aufwand zur Anpassung des Programmablaufes verbunden wäre. Daher scheint die hier vorgeschlagene Lösung praktikabler.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Einbindung dynamischer Informationen eine erhebliche Verbesserung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung ermöglicht. Außerdem erschließen sich so auch Anwendungen im Bereich kooperativer Verhaltensweisen und der Kollektiv-Optimierung. Da der Vorausschau-Assistent wie hier beschrieben jedoch im mittel- bis langfristigen Horizont plant, bedarf es einer ergänzenden Instanz, die kurzfristige Reaktionen auf Änderungen der Randbedingungen bzw. unvorhergesehene Ereignisse ermöglicht. Dies ist auch im Hinblick auf die benötigte Rechenzeit zu berücksichtigen.

## 9. Resümee und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines neuartigen Fahrerassistenzsystems für vorausschauendes Fahren beschrieben. Im mittel- bis langfristigen Planungshorizont werden dabei auf einer vorgegebenen Fahrstrecke pareto-optimale Geschwindigkeitsprofile berechnet. Dabei werden im vorliegenden Fall die konkurrierenden Zielgrößen Fahrdauer und Energieverbrauch entsprechend der individuellen Gewichtung des Fahrers minimiert.

Eingangsgrößen für die Optimierung sind Informationen über die Strecke, das Fahrzeugumfeld und das Fahrzeug selbst, anhand derer die Beschränkung des Lösungsraumes erfolgt. Um die Berechnung echtzeitfähig zu gestalten und gleichzeitig die sichere Konvergenz zum globalen Optimum zu gewährleisten, wurde die dynamische Programmierung als Optimierungsverfahren ausgewählt. Die Bestimmung der Zielgrößenerfüllungswerte erfolgt teilweise modellbasiert. Dazu wurde ein einfaches Fahrzeugmodell erstellt und validiert, das bezüglich seines Detaillierungsgrades einen angemessenen Kompromiss zwischen Ergebnisgenauigkeit und Rechenaufwand aufweist. Die Gestaltung der Ergebnisausgabe schließlich erfolgt zum einen in Form des Verlaufes der optimalen Geschwindigkeit über der Planungsstrecke, was wiederum als Soll-Vorgabe für die fahrzeuginterne Geschwindigkeitsregelung dient und somit die autonome Ausführung erlaubt. Zum anderen erhält der Fahrer die Rückmeldung über die aus seiner Gewichtungsvorgabe resultierenden Zielgrößenwerte, so dass er seine Präferenzen ggf. anpassen kann. Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und zu Simulationszwecken wurde die hier beschriebene Methodik in einem Quellcode algorithmisch umgesetzt.

Zur Ergebnisanalyse wurden praxisnahe Simulationsszenarien ausgearbeitet, die besonders markante Eigenschaften der Methodik hervorheben. Die Ergebnisse zeigen sowohl die qualitativen als auch die quantitativen Verbesserungen, die durch den Einsatz der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung erzielt werden können. Besonders hervorgehoben wurde hier auch der Effekt aus der Berücksichtigung von dynamischen Informationen. Bei der vorliegenden Implementierung bestehen die Möglichkeiten, die Geschwindigkeitsprofil-Optimierung mit oder ohne Berücksichtigung dynamischer Informationen durchzuführen. Im Zuge der Ergebnisanalyse wurden die Methodik und die Möglichkeiten für ihren praktischen Einsatz kritisch diskutiert.

Besonders vorteilhaft an der vorliegenden Umsetzung ist die Unabhängigkeit von der technologischen Plattform, auf der das beschriebene System umgesetzt wird. Sowohl durch Gestaltung der Schnittstellen als auch durch die innere Struktur des Programmablaufes ist gewährleistet, dass sich das System mit geringem Anpassungsaufwand an unterschiedlichste Fahrzeug- und Antriebstypen adaptieren lässt. Es fügt sich außerdem nahtlos in die informationstechnische Infrastruktur, wie sie bei aktuellen Serienfahrzeugen üblicherweise vorliegt, ein. In den hier ausgearbeiteten Beispie-

len wurde ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor modelliert. Falls das System in einem Fahrzeug mit Elektro- bzw. Hybridantrieb eingesetzt wird, könnte es wertvolle Informationen für Batterie-Ladestrategien oder für die Entscheidungen, wann welcher Antrieb einzusetzen ist, liefern. Verzichtet man auf die hier zugrundegelegte Plattformunabhängigkeit und die Einfachheit der Schnittstellen, so lassen sich weitere Potenziale zur Verbrauchseinsparung erschließen. Z.B. könnte man die Schaltstrategie des Automatikgetriebes oder im Fall eines Hybridantriebs die Betriebsstrategie mit in die Optimierung einbeziehen, was zu zusätzlichen diskreten Optimierungsvariablen führen würde. Dem vor allem bei der Beeinflussung der Hybridbetriebsstrategie zu erwartenden Nutzen stehen allerdings ein deutlich erhöhter Rechenaufwand und eine komplexere Systemarchitektur gegenüber.

Durch die geringe Berechnungsdauer und die daraus resultierende Möglichkeit, bei Bedarf durch das Auftreten unvorhergesehener Ereignisse schnelle Neuplanungen durchzuführen, weist das System eine ausreichend hohe Robustheit gegen das Auftreten unvorhergesehener Ereignisse auf. Außerdem bildet es die Basis für Systeme, die übergeordnete Strategien für Verkehrsflüsse berechnen. Es ermöglicht die Kompromissfindung, so dass Differenzen zwischen individuell-optimalen und kollektiv-optimalen Fahrstrategien minimiert oder gar eliminiert werden können.

Im Zuge der Entwicklung und der Analyse der Ergebnisse der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung haben sich konkrete Ansatzpunkte für Weiterentwicklungen ergeben. In der vorliegenden Implementierung werden zwei Zielgrößen berücksichtigt. Durch die Verwendung einer gewichteten Summe und der damit verbundenen Skalarisierung des Optimierungsziels ist die Zahl der einzelnen Zielgrößen grundsätzlich unbeschränkt. Es könnte beispielsweise noch ein Maß für den Fahrkomfort, der aus dem jeweiligen Geschwindigkeitsprofil resultiert, bei der Optimierung berücksichtigt werden. Bei der Zustandsraumbildung wurden bisher äquidistante Schrittweiten vorgesehen. Durch den Einsatz variierender Schrittweiten könnten weitere Verbesserungen der Ergebnisse erzielt werden. Denkbar wäre eine Verkürzung der Abstände zwischen den Wegstützstellen im mittelfristigen Planungshorizont oder an Stellen, wo häufige Änderungen der Geschwindigkeitsvorgaben vorliegen. In der Dimension Geschwindigkeit könnte eine mit der absoluten Höhe der Geschwindigkeit zunehmende Länge der Schrittweite vorteilhaft sein.

Durch die Einbindung des individuellen Fahrzeuges in die Optimierung von Verkehrs-Kollektiven würden sich auch neue Möglichkeiten zur Ausarbeitung kooperativer Verhaltensweisen bieten. Dann wäre das Optimierungsziel nicht nur darauf beschränkt, die individuellen Interessen möglichst ohne Abstriche zu koordinieren, sondern die individuellen Ziele könnten durch die geschickte Integration in einen Verkehrsverbund sogar verbessert werden. Als Beispiel kann hier eine Konvoi-Fahrt angeführt werden.

---

Langfristig ist eine Erprobung der hier entwickelten theoretischen bzw. modellbasierten Betrachtungen am realen System wünschenswert. Dazu ist eine Portierung des aktuellen Quellcodes auf die demensprechende Plattform erforderlich. Im Zuge dessen kann der Quellcode im Hinblick auf die Berechnungsdauer weiter verbessert werden.



## 10. Literaturverzeichnis

- [1] ADAC e.V. Ressort Verkehr, „ADAC-Fachinformation: Prognose der Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs bis zum Jahr 2025 in Deutschland,“ September 2010. [Online]. Available: [www.adac.de/verkehrs-experten](http://www.adac.de/verkehrs-experten). [Zugriff am 12. Juni 2012].
- [2] Dornieden, B., Junge, L. und Pascheka, P., „Vorausschauende energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung,“ *atz*, Nr. 03/2012, 114. Jahrgang, 2012.
- [3] Schnieder, L. und Lemmer, K., „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität - eine Plattform für die verkehrswissenschaftliche Forschung und die Entwicklung intelligenter Mobilitätsdienste,“ *Internationales Verkehrswesen*, 04/2012.
- [4] Roth, M., Radke, T., Lederer, M., Frey, M., Steinbrecher, C., Schröter, J. und Goslar, M., „Porsche InnoDrive - An Innovative Approach for the Future of Driving,“ in *20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, 2011.
- [5] Goppelt, G., „Energieeffizientes Fahren 2014: Das Auto lernt, mit seiner Energie zu haushalten,“ 23. Dezember 2011. [Online]. Available: [www.atzonline.de](http://www.atzonline.de). [Zugriff am 20. Juni 2012].
- [6] Hellström, E., Aslund, J. und Nielsen, L., „Horizon Length and Fuel Equivalents for Fuel-optimal Look-ahead Control,“ in *IFAC Symposium Advances in Automotive Control*, München, 12.-14.07.2010.
- [7] Luu, H.T., Nouveliere, L. und Mammari, S., „Dynamic Programming for fuel consumption optimization on light vehicle,“ in *IFAC Symposium Advances in Automotive Control*, München, 12.-14.07.2010.
- [8] Gasser, T.M., „Ergebnisse der Arbeitsgruppe zu den rechtlichen Aspekten des automatisierten Fahrens,“ in *13. Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Keynote-Vortrag, Braunschweig, 08.02.2012.
- [9] United Nations Treaty Collection, „United Nations Conference on Road Traffic,“ Vienna, 08. November 1968. [Online]. Available: [http://treaties.un.org/doc/Treaties/1977/05/19770524%2000-13%20AM/Ch\\_XI\\_B\\_19.pdf](http://treaties.un.org/doc/Treaties/1977/05/19770524%2000-13%20AM/Ch_XI_B_19.pdf). [Zugriff am 02.10.2013].

- [10] „Automatisiertes Fahren auf der Autobahn,“ 5. Juni 2012. [Online]. Available: [www.focus.de](http://www.focus.de). [Zugriff am 15. Juni 2012].
- [11] „BMW fährt ohne Fahrer auf der Autobahn,“ 27. August 2011. [Online]. Available: [www.focus.de](http://www.focus.de). [Zugriff am 15. Juni 2012].
- [12] rom/Reuters, „Autonomes Fahren: Google-Auto erhält Straßenzulassung,“ 8. Mai 2012. [Online]. Available: [www.spiegel-online.de](http://www.spiegel-online.de). [Zugriff am 14. Juni 2012].
- [13] Bruns, T., Trajektorienplanung mittels Diskretisierung und kombinatorischer Optimierung am Beispiel des autonomen Kreuzungsmanagements für Kraftfahrzeuge, Bd. 299, Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, 2011 (Zugleich Dissertation an der Universität Paderborn, Mai 2011).
- [14] Bley, O., Kutzner, R., Friedrich, B., Saust, F., Wille, M., Maurer, M., Niebel, W., Naumann, S., Wolf, F., Schüler, T., Bogenberger, K., Junge, M. und Langenberg, J., „Kooperative Optimierung von Lichtsignalsteuerung und Fahrzeugführung,“ in *Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig, 09.-10.02.2011.
- [15] Pander, J., „Projekt Sartre: Hände weg vom Steuer!,“ 13. Juni 2012. [Online]. Available: [www.spiegel-online.de](http://www.spiegel-online.de). [Zugriff am 15. Juni 2012].
- [16] Chavez Grunewald, M.G., Abel, D. und Gasper, R., „Energy-Based Control for a Platoon of Nonholonomic Vehicles,“ in *8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, Bologna, Italy, 1.-3.09.2010.
- [17] Chavez Grunewald, M.G., Ben Makhlof, I., Diab, H., Mut, V., Kowalewski, S. und Abel, D., „Regelung und Sicherheitsanalyse einer Gruppe Massenpunktfahrzeuge mit Hilfe energiebasierter Methoden,“ *at - Automatisierungstechnik*, Nr. 58(04), 2010.
- [18] Gausemeier, S., Jäker, K.P. und Trächtler, A., „Multi-objective Optimization of a Vehicle Velocity Profile by Means of Dynamic Programming,“ in *IFAC Symposium Advances in Automotive Control*, München, 12.-14.07.2010.
- [19] Timpe, K.-P. und Gevatter, H.-J. (Hrsg.), *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil*, Springer Verlag, 2006.
- [20] Donges, E., „Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen“, *Automobil-Industrie* 27, 1982.

- [21] Winner, H. (Hrsg.) et al., Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012.
- [22] Rasmussen, J., „Skills, Rules and Knowledge - Signals, Signs and Symbols and other Distinctions in Human Performance Models,“ *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC 13, No. 3, 1983.
- [23] Schnieder, E. (Hrsg.), Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [24] Reif, K. (Hrsg.), Bosch Autoelektrik und Autoelektronik; Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme, Vieweg + Teubner Verlag, 6. Aufl. 2011.
- [25] Grote, C., „BMW Connected Drive; Effizienz, Komfort und Sicherheit durch Vernetzung,“ in *13. Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig, 8.-9.2.2012.
- [26] Bian, N., Gamulescu, C. und Haas, T., „Fusion von Fahrzeug- und Umgebungssensorik,“ *atz*, Nr. 112(9), 2010.
- [27] S. Rauch, A. Savkin, T. Schaller und P. Hecker, „Hochgenaue Fahrzeuglokalisierung und kollektives Erlernen hochgenauer digitaler Karten,“ in *13. Braunschweiger Symposium Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, Braunschweig, 8.-9.2.2012.
- [28] Heißling, B., Ersoy, M. und Gies, S. (Hrsg.), Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 3. Aufl. 2011.
- [29] Korte, B. und Vygen, J., Kombinatorische Optimierung - Theorie und Algorithmen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2. Aufl. 2012.
- [30] Hromkovi, J., Theoretische Informatik - Formale Sprachen, Berechenbarkeit, Komplexitätstheorie, Algorithmik, Kommunikation und Kryptographie, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 4. Aufl. 2011, p. 262 ff..
- [31] Vahrenkamp, R. und Mattfeld, D.C., Logistiknetzwerke - Modelle für Standortwahl und Tourenplanung, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007, p. 289 ff..
- [32] Suhl, L. und Mellouli, T., Optimierungssysteme - Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Aufl. 2009, pp. 138 ff., 253.

- [33] Wegele, S., Echtzeitoptimierung für die Disposition im Schienenverkehr, VDI-Verlag, Bd. 601; Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, 2005 (Zugleich Dissertation an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Januar 2005).
- [34] Hartmann, P., Mathematik für Informatiker, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 5. Aufl. 2012.
- [35] Domschke, W. und Drexl, A., Einführung in Operations Research, Springer-Verlag Berlin, 7. Aufl. 2006.
- [36] Merker, G.P. und Schwarz, Ch., Grundlagen Verbrennungsmotoren: Simulation der Gemischbildung, Verbrennung, Schadstoffbildung und Aufladung, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 4. Aufl. 2009.
- [37] Pischinger, R., Kell, M. und Sams, T., Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine - Der Fahrzeugantrieb, Springer-Verlag Wien, 3. Aufl. 2009.
- [38] Rill, G., Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling, CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- [39] Mitschke, M. und Wallentowitz, H., Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer-Verlag Berlin, 4. Aufl. 2004.
- [40] Papageorgiou, M., Leibold, M. und Buss, M., Optimierung - Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Aufl. 2012.
- [41] D. Michie, „Memo" Functions and Machine Learning,“ *Nature*, Vol. 218, 6. April 1968.

## A. Anhang

### A.I. Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Definition von Automatisierungsgraden, Quelle: Abgewandelte Darstellung aus [8].....	6
Bild 2: Das System Fahrer-Fahrzeug als Mensch-Maschine-System, aus [19], vom Autor verändert. ....	11
Bild 3: Einordnung des Vorausschau-Assistenten in die informationstechnische Infrastruktur des Fahrzeugs .....	14
Bild 4: Beispielhafte Übersicht der Sensorik aktueller Serienfahrzeuge, aus [24], S. 230 .....	16
Bild 5: Übersicht des Prozessablaufes innerhalb des Vorausschau-Assistenten....	22
Bild 6: Allgemeine Vorgehensweise zur Sensordatenfusion.....	23
Bild 7: Verwendung erweiterter Kartendaten zur Erstellung des Lösungsraumes... 24	
Bild 8: Beispielhafte Darstellung von Urbild- und Bildraum der konkurrierenden Zielgrößen bei der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung .....	28
Bild 9: Beispielhafte Darstellung von Mehrziel-Optimierungs-Methoden im Bildraum .....	30
Bild 10: Beispielhafte Lösung eines Mehrziel-Optimierungsproblems mit der gewichteten Summe .....	31
Bild 11: Lösungsraum der vorausschauenden Geschwindigkeitsprofil-Optimierung	38
Bild 12: Diskretisierung durch Bildung von Geschwindigkeitsknoten auf Wegstützstellen .....	38
Bild 13: Modellierung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung als Graph (1/3) .....	39
Bild 14: Modellierung der Geschwindigkeitsprofil-Optimierung als Graph (2/3) .....	40
Bild 15: Modellierung der Geschwindigkeitsprofiloptimierung als Graph (3/3) .....	40
Bild 16: Schrittweisen-Variation bei der Strecken-Diskretisierung .....	49
Bild 17: Schrittweisen-Variation bei der Geschwindigkeits-Diskretisierung.....	49
Bild 18: Qualitativer Verlauf der Geschwindigkeit über Zeit und über Strecke .....	51
Bild 19: Reduktion der Kantenzahl durch Berücksichtigung von Beschleunigungsgrenzen.....	54
Bild 20: Übersicht über die Dateistruktur und den Programmablauf der Geschwindigkeitsprofiloptimierung.....	56
Bild 21: Initialer Maximalgeschwindigkeits-Verlauf bei der Zustandsraumbildung ..	59
Bild 22: Bearbeitung des Maximalgeschwindigkeits-Verlaufes im Rahmen der Zustandsraumbildung .....	60
Bild 23: Erster Bearbeitungsschritt zur Definition der Minimalgeschwindigkeit bei der Zustandsraumbildung .....	62
Bild 24: Ausschluss kurzer Geschwindigkeitserhöhungen im Minimalgeschwindigkeitsverlauf .....	63

Bild 25: Modifikation des Verlaufs der Minimalgeschwindigkeit durch Angleichsgeraden .....	64
Bild 26: Zustandsraum vor Beginn der ersten Rekursion der dynamischen Programmierung .....	64
Bild 27: Übersicht der Schleifen im Quellcode der Rückwärtsrechnung der dynamischen Programmierung.....	65
Bild 28: Maximalbeschleunigung und Verzögerungen bei Gleitfahrt und Schubbetrieb, jeweils in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit.....	67
Bild 29: Bestimmung der Beschleunigungsgrenzen zur Zuordnung der Betriebsarten .....	68
Bild 30: Realisierbare Kombinationen von Ausgangs- und Folgegeschwindigkeit auf einem Streckenabschnitt der Länge 50 m sowie die entsprechenden Fahrzeug- Betriebsarten.....	69
Bild 31: Vorgehensweise bei der modellbasierten Verbrauchsberechnung.....	71
Bild 32: Wahl der Schaltstufen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrpedal-Stellung im Antriebsfall.....	75
Bild 33: Wahl der Schaltstufen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrpedal-Stellung bei negativen Beschleunigungen.....	75
Bild 34: Abhängigkeit der Schubverzögerung von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Schaltstufe .....	76
Bild 35: Getriebeverlustmoment im 3. Gang über Last und Drehzahl bei Betriebstemperatur.....	79
Bild 36: Kennfeld für den Kraftstoffmassenstrom in Abhängigkeit von effektivem Mitteldruck und Drehzahl des Motors .....	80
Bild 37: Unterlagerte Diskretisierung bei der modellbasierten Verbrauchsberechnung .....	81
Bild 38: Kosten für Zeit und Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit der Ausgangs- und Folgegeschwindigkeiten auf einem Streckenteilstück .....	83
Bild 39: Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Geschwindigkeitskombinationen auf einem Streckenteilstück, resultierend aus unterschiedlichen Zielfunktions- Parametern .....	84
Bild 40: Vergleich zwischen Geschwindigkeitsprofilen aus Testfahrt und der diskreten Soll-Vorgabe für die Simulation.....	86
Bild 41: Vergrößerte Darstellungen aus Bild 40.....	87
Bild 42: Vergleich zwischen dem Kraftstoffverbrauch einer Testfahrt und dem modellbasiert berechneten .....	87
Bild 43: Elemente des Vektors zur Ergebnisspeicherung.....	90
Bild 44: Schrittweise Eliminierung nichtoptimaler Teillösungen.....	90
Bild 45: Bildung des optimalen Geschwindigkeitsprofils in Vorwärtsrekursion .....	93
Bild 46: Übersicht der Oszillationsmuster bei unbeschränktem Zustandsraum mit verschiedenen Gewichtungsfaktor-Relationen.....	97

Bild 47: Zielgrößenwerte der Oszillationsmuster bei unbeschränktem Zustandsraum mit verschiedenen Gewichtungsfaktor-Relationen .....	99
Bild 48: Motordrehzahl und -mitteldruck während der Beschleunigungsphase im Oszillationsmuster der kraftstoffoptimalen Fahrt .....	101
Bild 49: Kennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs mit Betriebspunkten des Oszillationsmusters bei vollständig kraftstofflastiger Gewichtung .....	102
Bild 50: Einordnung der Konstantfahrt in die Lösungsmenge des Simulationsszenarios .....	103
Bild 51: Zustandsraum im Simulationsszenario Stadtfahrt .....	104
Bild 52: Optimale Geschwindigkeitsprofile für elf unterschiedliche Zielgrößengewichtungen im Simulationsszenario Stadtfahrt .....	105
Bild 53: Zielgrößenwerte 11 verschiedener Geschwindigkeitsprofile im Simulationsszenario Stadtfahrt .....	106
Bild 54: Direktvergleich zwischen dem kraftstoff- bzw. zeitoptimalen Geschwindigkeitsprofil und seinem jeweils nächsten Nachbarprofil aus leichter Gewichtungsverschiebung auf Fahrdauer bzw. auf Kraftstoffverbrauch .....	107
Bild 55: Zielgrößenveränderung in Abhängigkeit der Verschiebung des Gewichtungsschwerpunktes .....	108
Bild 56: Zustandsraum im Simulationsszenario Überlandfahrt .....	110
Bild 57: Optimale Geschwindigkeitsprofile für elf unterschiedliche Zielgrößengewichtungen im Simulationsszenario Überlandfahrt .....	111
Bild 58: Zielgrößenwerte elf verschiedener Geschwindigkeitsprofile im Simulationsszenario Überlandfahrt .....	112
Bild 59: Einschränkung des Zustandsraumes für ein Folgefahrzeug durch ein vorausfahrendes Fahrzeug mit oszillierendem Geschwindigkeitsprofil .....	113
Bild 60: Optimale Geschwindigkeitsprofile bei Einschränkung des Zustandsraumes durch ein vorausfahrendes Fahrzeug mit oszillierender Geschwindigkeit .....	113
Bild 61: Zielgrößen bei Einschränkung des Zustandsraums durch ein vorausfahrendes Fahrzeug mit oszillierender Geschwindigkeit .....	114
Bild 62: Geschwindigkeitsprofile im erweiterten Zustandsraum mit freier Fahrt vor und nach der Einschränkung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug .....	115
Bild 63: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile mit kraftstofflastiger Gewichtung in den Zustandsräumen mit und ohne Erweiterung der Simulationsstrecke .....	116
Bild 64: Abhängigkeit der abschnittswiseen Berechnungsdauer vom Gesamtfortschritt der Optimierung .....	118
Bild 65: Zielgrößen kraftstoffoptimaler Geschwindigkeitsprofile auf Grundlage unterschiedlicher Diskretisierungs-Schrittweiten .....	122
Bild 66: Kraftstoffoptimale Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen bei gleichbleibender Schrittweiten-Relation .....	124
Bild 67: Detail-Ausschnitt kraftstoffoptimaler Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen .....	125

Bild 68: Zielgrößen der kraftstoffoptimalen Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen .....	125
Bild 69: Simulationsdauer für kraftstoffoptimale Geschwindigkeitsprofile aus unterschiedlichen Diskretisierungen .....	126
Bild 70: Zustandsraum des Simulationsszenarios einer Stadtfahrt in Abhängigkeit des Ampelsignals (oben rot, unten grün) .....	130
Bild 71: Optimale Geschwindigkeitsprofile bei grüner Ampel .....	131
Bild 72: Zielgrößen bei grüner Ampel .....	132
Bild 73: Optimale Geschwindigkeitsprofile bei Fahrt auf einer Strecke mit Halt, ohne Wartezeit .....	133
Bild 74: Zielgrößen bei Fahrt auf einer Strecke mit Halt, ohne Wartezeit .....	133
Bild 75: Vergleich der Zielgrößen zwischen der Fahrt mit und ohne Halt auf der Simulationsstrecke .....	134
Bild 76: Vergleich der Zielgrößen bei einer Stadtfahrt mit und ohne Wartezeiten nach dem Halten an einem Stoppschild bzw. einer Ampel .....	135
Bild 77: Zustandsräume der entkoppelten Optimierungsaufgabe bei Kenntnis des Schaltzeitpunktes .....	136
Bild 78: Zielgrößen bis zur Ampelposition bei unbeschränkter Fahrt .....	137
Bild 79: Geschwindigkeitsprofile und Zielgrößen der schrittweisen Ermittlung der optimalen Gewichtung für den ersten Streckenteil.....	138
Bild 80: Optimale Geschwindigkeitsprofile vor und nach einer Ampel unter Berücksichtigung des Schaltzeitpunktes.....	139
Bild 81: Vergleich der Zielgrößen auf einer Strecke mit Ampel mit und ohne Berücksichtigung der Ampelschaltung.....	140
Bild 82: Geteilter Zustandsraum für die Anpassung an den Umschaltzeitpunkt von grün auf rot.....	141
Bild 83: Optimale Geschwindigkeitsprofile unter Berücksichtigung des Umschaltzeitpunktes von grün auf rot.....	142
Bild 84: Vergleich der Zielgrößen mit und ohne Berücksichtigung der Umschaltzeitpunkte zu einer Rotphase .....	143

## A.II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der fahrzeugspezifischen Parameter zur Kostenberechnung..	58
Tabelle 2: Variablen im Programmablauf der Rückwärtsrekursion.....	91
Tabelle 3: Simulationsparameter für die Optimierung im unbeschränkten Zustandsraum.....	95
Tabelle 4: Charakterisierung der Oszillationsmuster durch Längen und Geschwindigkeiten.....	97
Tabelle 5: Durchschnittsgeschwindigkeiten und -verbräuche der Oszillationsmuster.....	98
Tabelle 6: Charakteristische Betriebspunkte in den Beschleunigungsphasen des kraftstoffoptimalen Oszillationsmusters.....	101
Tabelle 7: Parameter im Simulationsszenario Stadtfahrt.....	104
Tabelle 8: Zielgrößenwerte der Profile aus den Extrema der Gewichtungsrelationen im Vergleich zu ihren jeweils nächsten Nachbarprofilen .....	108
Tabelle 9: Parameter im Simulationsszenario Überlandfahrt.....	109
Tabelle 10: Simulationszeiten und Größe des Optimierungsproblems der drei Beispielszenarien.....	120
Tabelle 11: Simulationszeiten bei Variation der Diskretisierungs-Schrittweiten.....	121
Tabelle 12: Schrittweise Ermittlung der optimalen Gewichtung für den ersten Streckenteil bei roter Ampel.....	138
Tabelle 13: Zielgrößen bis zur Ampelposition bei unbeschränkter Fahrt .....	141
Tabelle 14: Schrittweise Ermittlung der optimalen Gewichtung für den ersten Streckenteil bei grüner Ampel .....	142

