Übersicht

Jan Lunze*

Vernetzte Abstandsregelung von Fahrzeugkolonnen

Networked distance control of vehicle platoons

<https://doi.org/10.1515/auto-2019-0071>

Empfangen 24. Juni 2019; angenommen 6. September 2019

Zusammenfassung: Der Beitrag gibt eine Übersicht über Methoden zur Strukturierung und zum Entwurf vernetzter Abstandsregler von Fahrzeugkolonnen. Aus fünf Güteforderungen an das Gesamtsystem werden vier Entwurfsforderungen abgeleitet, die individuell an allen beteiligten Fahrzeugen zu erfüllen sind. Wenn die durch ein Verzögerungsmaß charakterisierte Eigenschaft der geregelten Fahrzeuge nicht zum Zeitabstandskoeffizienten aus den Güteforderungen passt, müssen die Fahrzeugregler über ein Kommunikationsnetz miteinander in Verbindung treten. Die dafür notwendige Kommunikationsstruktur kann auf systematischem Wege abgeleitet werden.

Schlagwörter: Vernetzte Regelung, kooperative Regelung, Fahrzeugkolonne, extern positive Systeme

Abstract: The paper gives a survey of the methods for structuring and designing networked distance controllers of vehicle platoons. Starting with five specifications for the overall platoon, it derives four design objectives that are related to the individual vehicles and have to be satisfied when designing the vehicle controller. If the vehicles react too slowly on a changing velocity of its predecessor, which is characterised by a delay measure, the vehicle controllers have to be connected by a communication network the structure of which can be obtained by a systematic method described in the paper.

Keywords: networked control, cooperative control, vehicle platoon, externally positive systems

1 Entwurfsaufgabe und Regelungsstrukturen

1.1 Fahrzeugkolonnen als Multiagentensysteme

Die Abstandsregelung von Fahrzeugkolonnen wird seit vielen Jahren aus zwei Gründen intensiv untersucht. Einerseits bietet sie ein interessantes Anwendungsfeld für die methodische Forschung, wie die frühen Arbeiten [8, 16] zur optimalen Zustandsrückführung oder [1, 9] zur dezentralen Regelung zeigen. In den letzten Jahren sind neue Ergebnisse aus der Theorie der Multiagentensysteme hinzugekommen [14]. Betrachtet man die Abstandsregelung von Fahrzeugen als ein Synchronisationsproblem, so wird offensichtlich, dass die Beschränkung der Theorie auf asymptotische Synchronisation für die Anwendung nicht ausreicht, weil für die Garantie der Kollisionsfreiheit zusätzliche Güteforderungen an das Übergangsverhalten zu erfüllen sind.

Andererseits ist die Abstandsregelung mit oder ohne Kommunikation zu den benachbarten Fahrzeugen ein wichtiges Anwendungsgebiet, mit dem sich die Fahrzeugindustrie und angeschlossene Entwicklungsabteilungen nicht nur theoretisch [15, 20], sondern auch experimentell [17, 19, 22] beschäftigen.

Dieser Übersichtsbeitrag fasst die in den letzten Jahren erarbeiteten methodischen Grundlagen zusammen und zeigt, wie die Struktur der Regelung und die Entwurfskriterien systematisch aus den Forderungen an das Verhalten der Fahrzeugkolonne abgeleitet werden können. Dabei werden Verbindungen zwischen den bisher in Einzelveröffentlichungen beschriebenen Ergebnissen hergestellt, aber für die Beweise der Hauptergebnisse auf die Originalquellen verwiesen.

Die theoretische und die anwendungsorientierte Herangehensweise unterscheiden sich grundlegend, auch wenn sie in ihren wichtigsten Ergebnissen übereinstimmen. Die praktisch orientierten Arbeiten beginnen mit An-

*Korrespondenzautor: Jan Lunze, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, 44780 Bochum, Germany, E-Mail: Jan.Lunze@ruhr-uni-bochum.de

nahmen über die Fahrzeugmodelle und leiten daraus mögliche Reglerstrukturen und Entwurfsvorgehen ab. Ihre Ergebnisse sind damit unter den Modellannahmen unmittelbar praktisch einsetzbar, aber man darf keine übergreifenden, strukturellen Aussagen darüber erwarten, wie Abstandsregelungen im Allgemeinen aufgebaut werden sollen und welche Eigenschaften der geregelten Fahrzeuge dabei wichtig sind.

Der in den letzten Jahren entwickelte Multiagentenansatz andererseits fasst die Fahrzeugkolonne als ein vernetztes Regelungssystem auf, das bestimmte Güteforderungen erfüllen soll, und leitet daraus die gewünschten Fahrzeugeigenschaften und die für die Einhaltung der Güteforderungen notwendigen Kopplungsstrukturen ab. Dieser in der englischsprachigen Literatur als *network thinking* [14] bezeichnete Weg wird in dieser Übersichtsarbeit herausgestellt. Im Unterschied zu den anwendungsorientierten Arbeiten führt er auf einen direkten Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Einzelfahrzeuge und der kollektiven Dynamik der Fahrzeuge in der Kolonne und zeigt somit, unter welchen Bedingungen die betrachteten Güteforderungen eingehalten werden können. Wie dies dann unter Berücksichtigung der praktischen Randbedingungen für das jeweilige Fahrzeug realisiert wird, bleibt zunächst offen und zeigt den Gestaltungsspielraum für die Fahrzeugregelung, der in diesem Beitrag mit drei Reglerstrukturen umrissen wird.

Abb. 1: Fahrzeugkolonne mit dezentraler Abstandsregelung.

Die Entwurfsfreiheiten werden maßgebend durch die Kommunikationsstruktur der Regelung bestimmt, wobei die im ersten Teil dieses Beitrags behandelte dezentrale Abstandsregelung dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht, während die im zweiten Teil dargestellte vernetzte Regelung mit der Einführung einer Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation in den nächsten Jahren möglich wird. Entsprechend Bild 1 müssen sich die Fahrzeugregler C_i , ($i = 0, 1, \dots, N$) gegenwärtig auf Informatio-

nen beschränken, die lokal am Fahrzeug P_i gemessen werden können, wobei die im Bild eingetragene Kopplung der Fahrzeuge über die Geschwindigkeiten $v_i(t)$ aus physikalischen Gründen auftritt. Die Fahrzeuge zusammen mit ihren lokalen Reglern sind mit $\tilde{V}_i$ bezeichnet und beim Führungsfahrzeug beginnend durchnummeriert. $s_i(t)$ stellt die Fahrzeugposition und $d_i(t)$ den Abstand des i -ten vom $(i-1)$ -ten Fahrzeug dar. Aus Sicht des Gesamtsystems arbeiten die Regler dezentral und sie werden in der Literatur als *adaptive cruise controllers* (ACC) bezeichnet. Das Attribut „adaptiv“ bezieht sich hier entgegen der üblichen Nomenklatur auf die Anpassung der Abstandssollwerte an die Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend der später eingeführten Güteforderung (R3) und nicht auf eine Veränderung der Reglerparameter.

Da in den nächsten Jahren mit der Einführung funkbasierter Kommunikationsnetze zwischen den Fahrzeugen gerechnet wird, wird in der Literatur seit einiger Zeit intensiv über Erweiterungen der bisherigen dezentralen Regler zu vernetzten Reglern nachgedacht, die als *cooperative adaptive cruise controllers* (CACC) bezeichnet werden (Bild 2). Die Kooperation wird möglich durch die Übertragung wichtiger Informationen zwischen direkt oder indirekt benachbarten Fahrzeugen, wobei der Informationsübertragung von vorausfahrenden auf nachfolgende Fahrzeuge besondere Bedeutung zukommt. Mit Hilfe der zusätzlichen Informationen soll eine vorausschauende Fahrweise realisiert werden, durch die Kollisionen garantiert vermieden werden.

Abb. 2: Fahrzeugkolonne mit kooperativer Abstandsregelung.

Aus methodischer wie aus anwendungsorientierter Sicht ergeben sich aus diesem Vergleich mehrere wichtige Fragen:

- Welche Eigenschaften müssen die geregelten Fahrzeuge haben, damit die Fahrzeugkolonne mit der verwendeten Kopplungsstruktur die Güteforderungen einhält?
- Unter welchen Bedingungen braucht man die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation?
- Wenn ein Kommunikationsnetzwerk zur Verfügung steht, zwischen welchen Fahrzeugen sollen Verbindungen aufgebaut werden und was soll darüber übertragen werden?

Dieser Übersichtsbeitrag wird diese Fragen beantworten und damit auch den in der jeweiligen Situation notwendigen technischen Aufwand zeigen.

1.2 Güteforderungen

Die Regelungsaufgabe ist für ACC und CACC dieselbe: Gesucht sind lokale Regler C_i und gegebenenfalls ein Kommunikationsnetz $\hat{A}$, so dass die Geschwindigkeit $v_i(t)$ des eigenen Fahrzeugs der Geschwindigkeit der vorausfahrenden Fahrzeuge angepasst und der Fahrzeugabstand $d_i(t) = s_{i-1}(t) - s_i(t)$ auf einen vorgegebenen Sollwert $d_{\text{iref}}(t)$ gebracht wird. Das Führungsfahrzeug P_0 gibt die Sollgeschwindigkeit $v_0(t)$ vor.

Die **Güteforderungen** für die hier betrachtete Regelung beziehen sich auf fünf Eigenschaften der Fahrzeuge in der Kolonne:

- (R1) **Asymptotische Stabilität:** Bei der dezentralen Regelung und bei vernetzten Regelungen mit zyklischer Kommunikationsstruktur ist diese Forderung genau dann erfüllt, wenn alle lokalen Regelkreise stabil sind.
- (R2) **Asymptotische Sollwertfolge:** Sämtliche Fahrzeuge sollen sich stationär mit derselben Geschwindigkeit v_0 bewegen:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |v_i(t) - v_0| = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

- (R3) **Zeitabstand:** Der mit der Geschwindigkeit $v_i(t)$ ansteigende Sollabstand

$$d_{\text{iref}} = \alpha_i + \beta_i v_i(t) \quad (2)$$

soll bei konstanter Geschwindigkeit v_0 asymptotisch erreicht werden:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |d_i(t) - d_{\text{iref}}(t)| = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

Dabei beschreibt β_i den in Sekunden gemessenen Zeitabstand des i -ten vom $(i-1)$ -ten Fahrzeug und α_i den in Metern gemessenen Sicherheitsabstand in der stehenden Kolonne.

- (R4) **Einhalten eines Sicherheitsabstands:** Bei beliebigem Geschwindigkeitsprofil $v_0(t) \geq 0$ des Führungsfahrzeugs sollen die Fahrzeuge stets einen Mindestabstand einhalten:

$$d_i(t) \geq \alpha_i, \quad t \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

- (R5) **Kontinuierliche Progression:** Die Fahrzeuge sollen sich mit nichtnegativer Geschwindigkeit bewegen:

$$v_i(t) \geq 0, \quad t \geq 0, \quad i = 0, 1, \dots, N. \quad (5)$$

Diese Liste von Güteforderungen zeigt, dass die Abstandsregelung von Fahrzeugen im Prinzip ein Synchronisationsproblem lösen soll, das in der Literatur zu Multiagentensystemen ausführlich untersucht worden ist [14]. Die dort erarbeiteten Ergebnisse beziehen sich jedoch nur auf die asymptotische Synchronisation entsprechend Gl. (1), während für den hier untersuchten Anwendungsfall wichtige weitere Forderungen an die vernetzte Regelung gestellt werden und folglich die Theorie anwendungsorientiert erweitert werden muss.

Alle nachfolgenden Untersuchungen gehen davon aus, dass die geregelten Fahrzeuge $\tilde{V}_i$, ($i = 0, 1, \dots, N$) entsprechend (R1) asymptotisch stabil sind.

1.3 Vorgehensweise

Die Aufgabe, eine dezentrale oder vernetzte Abstandsregelung zu entwerfen, die die im Abschnitt 1.2 aufgeführten Güteforderungen erfüllt, ist aus zwei Gründen schwierig. Erstens betreffen die genannten Güteforderungen die Fahrzeugkolonne als Ganzes. Eine direkte Überprüfung der angeführten Bedingungen ist unmöglich, weil die Fahrzeugkolonnen in der Praxis beliebige Länge haben können und Fahrzeuge mit unterschiedlichen Eigenschaften in beliebiger Reihenfolge fahren können. Hier erweist sich der Ansatz, Fahrzeugkolonnen als Multiagentensysteme aufzufassen und die an das Gesamtsystem gestellten Güteforderungen schrittweise als Entwurfsforderungen für die Teilsysteme und als Bedingungen an die Kopplungsstruktur umzuformen, als ein effizienter Lösungsweg. Wenn die geregelten Fahrzeuge die im Abschnitt 3.4 angegebenen Eigenschaften besitzen, ist die Kollisionsfreiheit einer ansonsten beliebig zusammengesetzten Fahrzeugkolonne gesichert.

Die zweite Schwierigkeit der hier betrachteten Regelungsaufgabe entsteht aus den Ungleichungsforderungen (4) und (5) an das geregelte Gesamtsystem. Es ist generell problematisch, fest eingestellte Regler zu strukturieren und zu parametrieren, mit denen das Verhalten des Regelkreises Ungleichungen für ausgewählte Signale erfüllt und dies, wie in dem hier betrachteten Fall, für eine beliebige Eingangsgröße $v_{\text{ref}}(t) \geq 0$. Für die Lösung dieses Problems liegt der Schlüssel in der Wahl der Modellstruktur nach Bild 3, bei der nicht die Position der Fahrzeuge, sondern deren Geschwindigkeit als Koppelgröße verwendet wird. Wenn man für die Teilsysteme dieses Blockschaltbilds wie im Abschn. 3.3 fordert, dass sie für eine beliebige nichtnegative Koppelleingangsgröße mit einer nichtnegativen Koppelausgangsgröße reagieren, also extern positives Verhalten aufweisen, kann man die Einhaltung der beiden Ungleichungen beweisen. Die angegebene Kopplungsstruktur der Fahrzeugmodelle hat übrigens keine Konsequenzen auf die Signale, die eine vernetzte Regelung über das Kommunikationsnetz überträgt.

1.4 Literatur

Erste Arbeiten zur Abstandsregelung von Fahrzeugkolonnen in den 1960-iger Jahren führten auf zentrale Regler [8, 16], die zur damaligen Zeit aufgrund der fehlenden Kommunikationsmöglichkeiten nicht realisierbar waren und heute nicht eingesetzt werden, weil sie schwer an eine sich verändernde Zusammensetzung der Kolonne angepasst werden können. Die meisten späteren Untersuchungen bezogen sich deshalb auf dezentrale Regelungen, bei denen die lokalen Regler nur auf die am jeweiligen Fahrzeug messbaren Größen zugreifen [1, 9].

Um die Kollisionsfreiheit der Fahrzeugkolonne zu sichern, wurde in [28] der Begriff der *Kolonnenstabilität* eingeführt und in zahlreichen Arbeiten, darunter [2, 3, 23, 24, 27], untersucht. Die Kolonnenstabilität fordert, dass sich die Amplitude von sinusförmigen Geschwindigkeits- oder Abstandsänderungen entlang der Fahrzeugkolonne nicht vergrößert. Bereits in [2, 21] wurde aber an Simulationsstudien gezeigt, dass die Kolonnenstabilität nicht ausreicht, um die Kollisionsfreiheit entsprechend der Forderung (R4) zu sichern. Später wurde in [26] bewiesen, dass bei typischen Fahrzeugmodellen mit Doppelintegratordynamik die Forderung nach Kolonnenstabilität durch dezentrale Regler gar nicht eingehalten werden kann, wenn man einen konstanten Fahrzeugabstand vorschreibt. Diese und ähnliche Forderungen sind allerdings erfüllbar, wenn man Informationen von vorausfahrenden Fahrzeugen erhält,

beispielsweise die Geschwindigkeit $v_0(t)$ des Führungsfahrzeugs [7, 26], oder wenn man die Struktur einer kooperativen Regelung beliebig vorgeben kann [6, 15, 19, 20]. In diesem Zusammenhang wurden auch vernetzte Regelungen betrachtet, bei denen die Kommunikationsrichtung in und entgegen der Fahrtrichtung verläuft [5].

Die insgesamt sehr umfangreiche Literatur zur Dynamik von Fahrzeugkolonnen und zum Entwurf von Abstandsregelungen weist darauf hin, dass Fahrzeugkolonnen trotz ihrer einfachen Aufbaus als Reihenschaltung einzelner Fahrzeuge eine komplexe Dynamik besitzen können. Hinzu kommen die im letzten Abschnitt erläuterten Entwurfsschwierigkeiten durch Ungleichungsbedingungen, die die Abstandsregelung zu einem über mehrere Jahrzehnte betrachteten Entwurfsproblem gemacht haben.

2 Ideale Fahrzeugkolonne

Dieser Abschnitt zeigt, wie sich die geregelten Fahrzeuge idealerweise verhalten sollen, um die Güteforderungen (R1)–(R5) zu erfüllen. Um den Sollabstand (2) permanent einzuhalten

$$d_i(t) = \alpha + \beta_i v_i(t), \quad t \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

müssen sie diese Forderung zur Zeit $t = 0$ erfüllen

$$d_i(0) = \alpha + \beta_i v_i(0), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

was im Folgenden vorausgesetzt wird. Um die Gültigkeit von (6) auch zukünftig zu sichern, muss die Beziehung

$$\dot{d}_i(t) = \beta_i \dot{v}_i(t), \quad t \geq 0 \quad (8)$$

gelten. Für den Fahrzeugabstand

$$\begin{aligned} d_i(t) &= s_{i-1}(t) - s_i(t) \\ \dot{d}_i(t) &= v_{i-1}(t) - v_i(t). \end{aligned} \quad (9)$$

ist Gl. (8) erfüllt, wenn

$$\beta_i \dot{v}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t)$$

und

$$\bar{V}_i : \begin{cases} \dot{v}_i(t) = -\frac{1}{\beta_i} v_i(t) + \frac{1}{\beta_i} v_{i-1}(t), & v_i(0) = v_{i0} \\ d_i(t) = \beta_i v_i(t) + \alpha_i \end{cases} \quad (10)$$

($i = 1, 2, \dots, N$) gilt, womit folgender Satz bewiesen ist:

Satz 1 (Permanente Einhaltung des Zeitabstands). Eine Fahrzeugkolonne mit dem anfänglichen Fahrzeugabstand (7) erfüllt die Forderung (6) für einen beliebigen Geschwindigkeitsverlauf $v_0(t)$ des Führungsfahrzeugs genau dann, wenn alle geregelten Fahrzeuge $\bar{V}_i$ die Dynamik (10) haben.

Diese Fahrzeuge halten stets den Abstand $d_i(t) = d_{\text{ref}}(t)$ ein, so dass die in (R4) geforderte Kollisionsfreiheit der Fahrzeugkolonne für alle Zeitpunkte $t \geq 0$ gewährleistet ist. Da es sich bei Gl. (10) um ein System erster Ordnung mit positiver Zeitkonstante β_i handelt, sind die geregelten Fahrzeuge asymptotisch stabil, haben die statische Verstärkung $k_s = 1$ und erfüllen deshalb auch die Forderungen (R1)–(R3) und (R5). Somit beschreibt der Satz 1 das ideale Verhalten der geregelten Fahrzeuge in Bezug zu den im Abschn. 1.2 gestellten Güteforderungen.

Wenn man also keine technischen Randbedingungen einzuhalten hat, die aus der Fahrdynamik, der Dynamik des Antriebsstrangs der Fahrzeuge, den Verzögerungen der Kommunikationsverbindungen und weiteren technischen Umständen entstehen, muss man den Fahrzeugen die durch Gl. (10) beschriebene Dynamik aufprägen und kann damit die Kollisionsvermeidung garantieren. Gleichzeitig kann man den durch β_i beschriebenen Zeitabstand zwischen den Fahrzeugen soweit wie technisch möglich reduzieren. Die Herausforderungen für den Entwurf der Abstandsregler entstehen aus den bisher nicht betrachteten technischen Randbedingungen, die sich in den folgenden Abschnitten in den Modellannahmen der Fahrzeuge und in den Regeln niederschlagen.

3 Fahrzeugkolonnen mit dezentraler Abstandsregelung

3.1 Modell

Der nachfolgende Teil dieses Beitrags beschäftigt sich mit der dezentralen Abstandsregelung (ACC) und untersucht,

welche Anforderungen an die geregelten Fahrzeuge aus den Güteforderungen (R1) bis (R5) entstehen.

Eine Fahrzeugkolonne mit dezentraler Regelung wird mit der Modellstruktur aus Bild 3 dargestellt. Das Modell (10) des geregelten Fahrzeugs $\bar{V}_i$ legt es nahe, die Geschwindigkeit $v_{i-1}(t)$ des vorausfahrenden Fahrzeugs als Koppelgröße zum i -ten Fahrzeug zu verwenden. Anstelle des Fahrzeugabstands $d_i(t)$ wird mit dem reduzierten Abstand

$$\tilde{d}_i(t) = d_i(t) - \alpha_i$$

gerechnet, bei dem α_i die Fahrzeuglänge beinhaltet.

Die Fahrzeuge sind durch Modelle der Form

$$\bar{V}_0 : V_0(s) = \bar{G}_0(s) V_{\text{ref}}(s) \quad (11)$$

$$\bar{V}_i : \begin{cases} V_i(s) = \bar{G}_i(s) V_{i-1}(s) \\ \tilde{D}_i(s) = \bar{F}_i(s) V_{i-1}(s), \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (12)$$

mit den Übertragungsfunktionen $\bar{G}_i(s)$ und $\bar{F}_i(s)$ und den Signalen $V_i(s) \longleftrightarrow v_i(t)$ und $\tilde{D}_i(s) \longleftrightarrow \tilde{d}_i(t)$ beschrieben. Die Laplacetransformation wird durch das Symbol $\longleftrightarrow$ gekennzeichnet und die Signale im Laplacebereich haben wie üblich große Buchstaben. Wegen Gl. (9) gilt

$$\bar{F}_i(s) = \frac{1}{s} (1 - \bar{G}_i(s)). \quad (13)$$

Im Unterschied zum Modell (10) können die geregelten Fahrzeuge $\bar{V}_i$ jetzt eine beliebige Dynamik $\bar{G}_i(s)$ besitzen. Das Modell (12) gilt allerdings nur für Fahrzeuge mit dem Anfangszustand

$$v_i(0) = 0, \quad \tilde{d}_i(0) = 0. \quad (14)$$

Entsprechend den Güteforderungen (R1) und (R2) müssen die Pole der Übertragungsfunktionen $\bar{G}_i(s)$ und $\bar{F}_i(s)$ negativen Realteil haben und für die statische Verstärkung muss gelten

$$\bar{G}_i(0) = 1. \quad (15)$$

Beides wird im Folgenden als erfüllt vorausgesetzt.

Abb. 3: Detailliertes Blockschaftbild einer Fahrzeugkolonne mit ACC.

3.2 Asymptotische Sollwertfolge

Entsprechend der Güteforderung (R3) sollen die geregelten Fahrzeuge stationär den Abstand (3) einnehmen. Um Bedingungen dafür anzugeben, wird das in [10] eingeführte Verzögerungsmaß

$$\Delta_i = \int_0^{\infty} (1 - \bar{h}_i(\tau)) d\tau \quad (16)$$

betrachtet, bei dem $\bar{h}_i(t)$ die zur Übertragungsfunktion $\bar{G}_i(s)$ gehörende Übergangsfunktion bezeichnet. Es kann entsprechend der Beziehung

$$\Delta_i = \bar{F}_i(0) \quad (17)$$

aus $\bar{F}_i(s)$ berechnet werden [14]. Die folgenden Untersuchungen werden zeigen, dass dieses Maß eine wichtige Rolle spielt, wenn man ein Beschleunigungsmanöver betrachtet, bei dem sich die Geschwindigkeit des $(i-1)$ -ten Fahrzeugs und damit die Eingangsgröße des i -ten Fahrzeugs vom Wert $\bar{v}_0$ auf den Wert $\bar{v}_1$ verändert:

$$v_{i-1}(t) = v_i(t) = \bar{v}_0, \quad t \leq 0 \quad (18)$$

$$v_{i-1}(t) = \bar{v}_1, \quad t \geq t_1 > 0. \quad (19)$$

Abb. 4: Interpretation des Verzögerungsmaßes Δ_i .

Entsprechend Bild 4 passt sich die Geschwindigkeit $v_i(t)$ dieser Veränderung an, allerdings mit einer Verzögerung, die durch Δ_i beschrieben wird. Für die im Bild grau hinterlegte Fläche gilt nämlich nach [13]

$$J_i = \int_0^{\infty} (v_{i-1}(\tau) - v_i(\tau)) d\tau = (\bar{v}_1 - \bar{v}_0)\Delta_i. \quad (20)$$

Diese Fläche bestimmt die Änderung des stationär erreichten Fahrzeugabstands für das Manöver (18), (19), denn aus den Gln. (9) und (20) erhält man

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} d_i(t) &= d_i(0) + \int_0^{\infty} (v_{i-1}(\tau) - v_i(\tau)) d\tau \\ &= d_i(0) + (\bar{v}_1 - \bar{v}_0)\Delta_i. \end{aligned}$$

Wenn der Sollabstand zur Zeit $t = 0$ eingehalten wird

$$d_i(0) = \alpha_i + \beta_i \bar{v}_0, \quad (21)$$

ist die Forderung (3) genau dann erfüllt, wenn das geregelte Fahrzeug $\bar{V}_i$ das Verzögerungsmaß

$$\Delta_i = \beta_i \quad (22)$$

besitzt.

Satz 2 (Asymptotische Einhaltung des Sollabstands [12]). Eine Kolonne dezentral geregelter Fahrzeuge mit der Eigenschaft $\bar{G}_i(0) = 1$ und dem Anfangsabstand (21) erfüllt die Güteforderung (3) genau dann, wenn alle geregelten Fahrzeuge das Verzögerungsmaß $\Delta_i = \beta_i$, $(i = 1, 2, \dots, N)$ besitzen.

Die dezentralen Fahrzeugregler können also getrennt voneinander mit dem Ziel (22) entworfen werden. Kolonnen, die aus beliebigen Fahrzeugen dieser Art zusammengesetzt sind, erfüllen dann die Güteforderung (R3). Darüber hinaus halten sie den Abstandssollwert $d_{i\text{ref}}(t)$ näherungsweise für alle Zeiten $t \geq 0$ ein, wenn sie sich ähnlich wie das Modell (10) verhalten.

3.3 Kollisionsfreiheit

Dieser Abschnitt zeigt, dass die geregelten Fahrzeuge auch die Güteforderungen (R4) und (R5) erfüllen, wenn sie eine extern positive Dynamik besitzen. Es wird zunächst der Begriff der positiven Systeme erläutert.

Extern positive Systeme. Ein lineares System mit der Übertragungsfunktion $\bar{G}(s)$ heißt *extern positiv*, wenn es aus dem Ruhezustand für beliebige nichtnegative Eingangsgrößen $u(t) \geq 0$ nichtnegative Ausgangsgrößen $y(t) \geq 0$ erzeugt:

$$u(t) \geq 0, \quad t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad y(t) \geq 0, \quad t \geq 0.$$

Wie in [4] gezeigt ist, ist ein lineares System $Y(s) = \bar{G}(s)U(s)$ genau dann extern positiv, wenn die Gewichtsfunktion $\bar{g}(t) \leftrightarrow \bar{G}(s)$ nichtnegativ ist:

$$\bar{g}(t) \geq 0, \quad t \geq 0. \quad (23)$$

Die zugehörige Übergangsfunktion $\bar{h}(t)$ erreicht ihren statischen Endwert $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{h}(t) = 1$ ohne Überspringen.

Da das geregelte Fahrzeug (12) zwei Ausgänge besitzt, ist es für die Überprüfung dieser Eigenschaft wichtig zu wissen, dass wegen Gl. (13) die externe Positivität bezüglich des Ausgangs $v_i(t)$ auch die externe Positivität bezüglich des Ausgangs $\bar{d}_i(t)$ nach sich zieht [14]:

$$\bar{g}_i(t) \geq 0, \quad t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{f}_i(t) \geq 0, \quad t \geq 0 \quad (24)$$

mit $\bar{g}_i(t) \leftrightarrow \bar{G}_i(s)$ und $\bar{f}_i(t) \leftrightarrow \bar{F}_i(s)$.

Kollisionsvermeidung und kontinuierliche Progression. Die Erfüllung der Güteforderungen (R4) und (R5) durch extern positive Fahrzeuge kann schnell bewiesen werden, wenn man die Fahrzeugschlange vom Führungsfahrzeug beginnend betrachtet. Für nichtnegative Funktionen $v_{\text{ref}}(t) \geq 0$ und $\bar{g}_0(t) \geq 0$ ist die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs nichtnegativ

$$v_0(t) = \bar{g}_0(t) * v_{\text{ref}}(t) \geq 0, \quad t \geq 0,$$

wobei der Stern die Faltungsoperation kennzeichnet. Damit erhält das Fahrzeug $\bar{V}_1$ eine nichtnegative Eingangsgröße und antwortet mit nichtnegativen Ausgängen

$$v_1(t) = \bar{g}_1(t) * v_0(t) \geq 0, \quad t \geq 0$$

$$\bar{d}_1(t) = \bar{f}_1(t) * v_0(t) \geq 0, \quad t \geq 0.$$

Dieselbe Überlegung gilt nacheinander für alle folgenden Fahrzeuge.

Satz 3 (Kollisionsvermeidung und korrektes Fahrverhalten [12]). *Eine Kolonne dezentral geregelter Fahrzeuge (12) erfüllt die Güteforderungen (R4) und (R5), wenn alle Fahrzeuge eine extern positive Dynamik besitzen.*

Die Forderung nach externer Positivität ist strenger als die nach Kolonnenstabilität. Sie ist in verschiedenen Situationen auch notwendig für die Einhaltung der Forderungen (R4) und (R5), beispielsweise, wenn alle Fahrzeuge dieselbe Dynamik aufweisen

$$\bar{G}_i(s) = \bar{G}(s) \quad \text{und} \quad \bar{F}_i(s) = \bar{F}(s), \quad i = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (25)$$

denn dann kann man andernfalls leicht eine Sollvorgabe $v_{\text{ref}}(t)$ finden, für die das Führungsfahrzeug rückwärts fährt oder der Abstand zwischen den ersten beiden Fahrzeugen negativ wird.

3.4 Zusammenfassung der Forderungen an die geregelten Fahrzeuge

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Bedingungen an die geregelten Fahrzeuge abgeleitet, unter denen Fahrzeugkolonnen mit ACC die Güteforderungen (R1) bis (R5) erfüllen. Diese Bedingungen können als Entwurfsforderungen für die Regelungen der individuellen Fahrzeuge formuliert werden:

- (D1) **Stabilität:** Jedes geregelte Fahrzeug $\bar{V}_i$ muss E/A-stabil sein.
- (D2) **Sollwertfolge:** Jedes geregelte Fahrzeug muss bezüglich des E/A-Paares $(v_{i-1}(t), v_i(t))$ die statische Verstärkung $\bar{G}_i(0) = 1$ haben.

(D3) **Verzögerungsmaß:** Jedes geregelte Fahrzeug muss das Verzögerungsmaß β_i haben: $\Delta_i = \beta_i$.

(D4) **Extern positive Dynamik:** Jedes geregelte Fahrzeug muss eine extern positive Dynamik aufweisen: $\bar{g}_i(t) \geq 0$.

Diese Liste zeigt, dass man die Güteforderungen an die Fahrzeugkolonne aus dem Abschn. 1.2 in vier Forderungen überführen kann, die sämtliche Fahrzeuge in der Kolonne unabhängig voneinander erfüllen müssen. Geregelte Fahrzeuge, die den Forderungen (D1) bis (D4) genügen, können beliebig zu Kolonnen zusammengestellt werden und es ist stets die Kollisionsfreiheit bei beliebigem Fahrprofil $v_{\text{ref}}(t)$ des Führungsfahrzeugs gesichert.

Die abgeleiteten Bedingungen zeigen auch, wann dezentrale Fahrzeugregler (ACC) ausreichen. Der kritische Punkt ist die gemeinsame Erfüllung der Forderungen (D3) und (D4), die besagen, dass das Fahrzeug seine Geschwindigkeit mit einer durch β_i beschriebenen Verzögerung der Geschwindigkeit des Vorgängers anpassen muss und dabei nicht überschwingen darf. Es ist einerseits einfach, die externe Positivität dadurch zu erzeugen, dass der Regler sehr langsam eingestellt wird. Andererseits kann man die Forderung $\Delta_i = \beta_i$ dadurch erfüllen, dass sich die Übergangsfunktion $\bar{h}_i(t)$ schnell genug ihrem Endwert nähert. Beides gleichzeitig zu erfüllen, ist die eigentliche Herausforderung für den Reglerentwurf.

Ob man diese Herausforderung erfüllen kann entscheidet, ob eine dezentrale Regelung ausreicht oder ob man eine vernetzte Regelung braucht. Wie dann die Kommunikationsstruktur aussehen muss, beschreibt Abschn. 5.

4 Fahrzeugregler

4.1 Fahrzeugmodell

Dieser Abschnitt zeigt an drei Beispielen, mit welchen Reglerstrukturen man die Entwurfsforderungen (D1) bis (D4) erfüllen kann. Während die bisherigen Untersuchungen von einer beliebigen Struktur der geregelten Fahrzeuge $\bar{V}_i$ ausgingen und die Fahrzeuge einschließlich ihrer Regelung als Einheit betrachteten, wird nun untersucht, inwieweit man mit typischen Fahrzeugmodellen und typischen Reglerstrukturen den Entwurfsforderungen (D1)–(D4) genügen kann. Da die Untersuchungen für die Fahrzeuge einzeln durchgeführt werden, wird der Index i weggelassen.

Das Fahrzeug (ohne Regler) hat das Modell

$$V(s) = G(s)U(s) \quad (26)$$

mit $U(s)$ als Stellglied für den Antriebsstrang und $V(s)$ als Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Übertragungsfunktion $G(s)$ hat typischerweise integrales Verhalten

$$G(s) = \tilde{G}(s) \frac{1}{s} \quad \text{mit} \quad \tilde{G}(0) = 1, \quad (27)$$

wobei in der Literatur für $\tilde{G}(s)$ oft ein Verzögerungsglied erster Ordnung eingesetzt wird:

$$\tilde{G}(s) = \frac{1}{Ts + 1}. \quad (28)$$

Es wird jetzt für drei Regler untersucht, inwieweit die Entwurfsforderungen (D1) bis (D4) durch geeignete Parameterwahl erfüllt werden können.

4.2 Fahrzeuge mit Geschwindigkeitsregler

Im ersten Fall wird ein Geschwindigkeitsregler

$$C: U(s) = K_v(s)(V_{i-1}(s) - V(s)) \quad (29)$$

eingesetzt, der die Geschwindigkeit $V(s)$ des betrachteten Fahrzeugs der Geschwindigkeit $V_{i-1}(s)$ des vorausfahrenden Fahrzeugs anpasst. Für den proportionalen Anteil gelte die Beziehung $K_v(0) = k_v \neq 0$. Das Fahrzeugmodell (12) hat damit die Übertragungsfunktionen

$$\tilde{G}(s) = \frac{K_v(s)\tilde{G}(s)}{s + K_v(s)\tilde{G}(s)} \quad (30)$$

$$\bar{F}(s) = \frac{1}{s}(1 - \tilde{G}(s)) \quad (31)$$

$$= \frac{1}{s + K_v(s)\tilde{G}(s)}, \quad (32)$$

aus denen hervorgeht, dass die Entwurfsforderung (D2) für beliebige Reglerparameter eingehalten wird und die Forderung (D3) für $k_v = 1/\beta$. Die Forderung (D4) nach einem extern positiven Verhalten kann nicht allgemein überprüft werden, denn wie das folgende Beispiel zeigt ist hierfür eine zweckmäßige Wahl der Reglerparameter und gegebenenfalls eine zusätzliche Reglerdynamik erforderlich.

Beispiel 1 (Fahrzeug mit Geschwindigkeitsregler). Wenn der Antriebsstrang sehr schnell ist ($\tilde{G}(s) = 1$), erhält man für einen proportionalen Geschwindigkeitsregler $K_v(s) = k_v$ die Übertragungsfunktionen

$$\tilde{G}(s) = \frac{k_v}{s + k_v} \quad \text{und} \quad \bar{F}(s) = \frac{1}{s + k_v}, \quad (33)$$

die für $k_v = 1/\beta$ mit den Übertragungsfunktionen des idealen Fahrzeugs (10) übereinstimmen und damit den Forderungen (D1)–(D4) genügen. Eine Kolonne aus solchen Fahrzeugen erfüllt permanent die Güteforderungen (R1)–(R5).

Wenn der Antriebsstrang eine Dynamik (28) erster Ordnung aufweist, erhält man mit dem proportionalen Regler die Beziehungen

$$\tilde{G}(s) = \frac{k_v}{Ts^2 + s + k_v} \quad \text{und} \quad \bar{F}(s) = \frac{Ts + 1}{Ts^2 + s + k_v}. \quad (34)$$

Die geregelten Fahrzeuge sind E/A-stabil für alle $k_v > 0$ und haben die geforderte Verzögerung $D = \beta$ für $k_v = 1/\beta$. Um eine extern positive Dynamik zu erhalten, muss die Zeitkonstante T des Antriebsstrangs hinreichend klein sein. Die Schranke $T \leq \beta/4$ erhält man aus der Forderung, dass sämtliche Pole von $\tilde{G}(s)$ reell sind, was für ein positives Verhalten notwendig ist. Diese Ungleichung zeigt, dass für die Erfüllung der Entwurfsforderung (D4) der Antriebsstrang hinreichend schnell sein muss im Vergleich zum Zeitabstandskoeffizienten β .

Abb. 5: Gewichtsfunktion des Fahrzeugs und Fahrzeugabstand bei einem Bremsmanöver.

Der obere Teil von Bild 5 vergleicht die Gewichtsfunktion des geregelten Fahrzeugs mit der Zeitkonstanten $T = 0.5$ s und der Reglerverstärkung $k_v = 1/\beta = 0.51$ /s (durchgezogene Linie) mit der Gewichtsfunktion $\bar{g}^*(t)$ des idealen Fahrzeugs (10) (gestrichelte Linie). In beiden Fällen ist das Fahrzeug extern positiv. Wenn man die Zeitkonstante T erhöht, nimmt die durchgezogene Kurve negative Werte an und die Entwurfsforderung (D4) ist nicht mehr erfüllt. $\square$

Die Ergebnisse dieses Abschnitts zeigen, dass sämtliche Entwurfsforderungen an die Fahrzeugkolonne durch

eine Anpassung der Fahrzeuggeschwindigkeit an die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs erfüllt werden können. Allerdings gilt diese Aussage nur unter der Voraussetzung (14), dass die Fahrzeuge die Forderungen zum Zeitpunkt $t = 0$ einhalten. Mit den beiden nachfolgend betrachteten Reglern können auch anfängliche Abstandsfehler ausgeglichen werden.

4.3 Fahrzeuge mit Abstandsregler

Fahrzeuge mit Abstandsregler

$$C: U(s) = K_d(s)(\beta V(s) - \tilde{D}(s)) \quad (35)$$

haben die im Bild 6 gezeigte Struktur. Die Regelabweichung $E(s) = \beta V(s) - \tilde{D}(s)$ wird über den Regler $K_d(s)$ zurückgeführt. Bei der Implementierung kann man anstelle der Geschwindigkeit $v_{i-1}(t)$ des vorausfahrenden Fahrzeugs den Fahrzeugabstand $d_i(t)$ messen, aber das Blockschaltbild ist in der zuvor verwendeten Weise gezeichnet, bei der wie im Bild 3 die Geschwindigkeiten die Koppelgrößen der Fahrzeuge darstellen.

Abb. 6: Fahrzeug mit Abstandsregler.

Mit dem Regler (35) erhält man für das Modell (12) des geregelten Fahrzeugs die Übertragungsfunktionen

$$\tilde{G}(s) = \frac{-\tilde{G}(s)K_d(s)}{s^2 - s\tilde{G}(s)K_d(s)\beta - \tilde{G}(s)K_d(s)}$$

$$\tilde{F}(s) = \frac{s - \tilde{G}(s)K_d(s)\beta}{s^2 - s\tilde{G}(s)K_d(s)\beta - \tilde{G}(s)K_d(s)},$$

die zeigen, dass jeder Regler mit der Proportionalverstärkung $K_d(0) = k_d \neq 0$ die Entwurfsforderungen (D2) und (D3) erfüllt. Eine extern positive Dynamik kann man wie im folgenden Beispiel erhalten.

Beispiel 2 (Fahrzeug mit Abstandsregler). Für einen schnellen Antriebsstrang mit $\tilde{G}(s) = 1$ und dem häufig in der Literatur eingesetzten PD-Abstandsregler

$$K_d(s) = k_D s + k_P \quad (36)$$

hat das geregelte Fahrzeug das Modell

$$\tilde{G}(s) = \frac{-k_D s - k_P}{(1 - k_D \beta)s^2 - (k_P \beta + k_D)s - k_P}$$

$$\tilde{F}(s) = \frac{(1 - k_D \beta)s - k_P \beta}{(1 - k_D \beta)s^2 - (k_P \beta + k_D)s - k_P}.$$

Es ist für die Parameterbereiche $k_D \leq 0$, $k_P < 0$ stabil, erfüllt die Forderungen (D2) und (D3) und erzeugt eine extern positive Dynamik für geeignet gewählte Reglerparameter, wobei für $k_D = -5$ und $k_P = -1.5$ wieder fast ideales Verhalten nach Gl. (10) entsteht. Für Antriebsstränge mit nicht vernachlässigbarer Verzögerung (28) muss der Regler die externe Positivität des Fahrzeugs herstellen, was nur bei hinreichend kleinen Zeitkonstanten möglich ist.

Abb. 7: Fahrzeugabstände in einer Kolonne mit Abstandsreglern.

Bild 7 zeigt das Fahrverhalten von identischen Fahrzeugen mit Abstandsregler. Der Geschwindigkeitssollwert des Führungsfahrzeugs steigt von $v_{\text{ref}}(t) = 20$ km/h für $t < 0$ auf $v_{\text{ref}}(t) = 30$ km/h für $t \geq 0$. Die Fahrzeugabstände sind anfangs zu groß, werden aber durch die Abstandsregler an die gestrichelt dargestellte Sollgröße $\tilde{d}_i(t) = 2v_i(t)$ herangeführt. In dieser Eigenschaft erweist sich der Abstandsregler dem Geschwindigkeitsregler aus dem vorhergehenden Abschnitt als überlegen. $\square$

4.4 Fahrzeuge mit kombiniertem Geschwindigkeits-Abstandsregler

Die Kombination beider zuvor dargestellter Regler führt auf die Struktur im Bild 8, wobei der Block G_v das Fahrzeug mit dem Geschwindigkeitsregler $K_v(s)$ enthält und das Signal $\tilde{v}_s$ den Sollwert dieses Reglers vorgibt. Der kombinierte Regler hat das Reglergesetz

$$U(s) = K_v(s)(\tilde{V}_s(s) - V(s)) + K_v(s)K_d(s)(\beta V(s) - \tilde{D}(s)). \quad (37)$$

Abb. 8: Fahrzeug mit Geschwindigkeits-Abstandsregler.

Der Regelkreis mit den Übertragungsfunktionen

$$\tilde{G}(s) = \frac{sG_v(s) - G_v(s)K_d(s)}{s(1 - G_v(s)K_d(s)\beta) - G_v(s)K_d(s)}$$

$$\tilde{F}(s) = \frac{1 - G_v(s)(1 + K_d(s)\beta)}{s(1 - G_v(s)K_d(s)\beta) - G_v(s)K_d(s)}$$

erfüllt wieder die Forderungen (D2) und (D3), sofern für den Geschwindigkeitsregelkreis die Beziehung $G_v(0) = 1$ gilt. Dies ist auch dann der Fall, wenn proportionale Regler $K_v(s) = k_v > 0$ und $K_d(s) = k_p$ verwendet werden, wobei derartige Regler bei schnellen Antriebssträngen auch ausreichen, um die externe Positivität der geregelten Fahrzeuge zu erzeugen.

Wenn der Geschwindigkeitsregelkreis $G_v(s)$ näherungsweise das ideale Verhalten aus Gl. (10) hat, entstehen nur kleine Signalwerte $v_d(t)$ und der Abstandsregelkreis ist wenig wirksam. Andererseits beeinflusst der Regler $K_d(s)$ das Fahrzeugverhalten entscheidend, wenn $G_v(s)$ vom idealen Verhalten erster Ordnung stark abweicht oder wenn sich der Fahrzeugabstand zur Zeit $t = 0$ stark vom Sollwert (2) unterscheidet.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur dezentralen Abstandsregelung

Der erste Teil des Beitrags hat auf systematischem Wege die Entwurfsforderungen für die Fahrzeugregler abgeleitet, mit denen Kollisionsfreiheit in Fahrzeugkolonnen beliebiger Zusammensetzung und bei beliebigem Geschwindigkeitsprofil des Führungsfahrzeugs garantiert ist. Wenn die geregelten Fahrzeuge die Forderungen (D1) bis (D4) erfüllen, können sie in beliebiger Weise zu Fahrzeugkolonnen zusammengesetzt werden und erfüllen gemeinsam die Güteforderungen (R1) bis (R5).

Das Verhalten derartiger Kolonnen wird in den Bildern 9 und 10 für Fahrzeuge veranschaulicht, die zum Zeitpunkt $t = 0$ stehen und deren Führungsfahrzeug die durch die gestrichelte Linie im oberen Teil vom Bild 9 gezeigte Sollgeschwindigkeit $v_{\text{ref}}(t)$ erhält. Die nachfolgen-

Abb. 9: Geschwindigkeit und Fahrzeugabstände von 30 Fahrzeugen.

Abb. 10: Position der 30 Fahrzeuge aus Bild 9.

den Fahrzeuge folgen der Bewegung des ersten ohne Überschwüngen und haben deshalb immer einen positiven Abstand.

5 Kooperative Abstandsregelung

5.1 Ziel der Vernetzung der Regelung

Dieser Abschnitt zeigt, dass man durch eine Vernetzung der bisher betrachteten Fahrzeuge Kolonnen zusammenstellen kann, in denen die Fahrzeuge mit einem Sollabstand fahren, dessen Abstandskoeffizient β_i kleiner ist als die Verzögerung Δ_i der Fahrzeuge. Es geht also darum, aus langsamen Fahrzeugen Kolonnen mit engem Abstand herzustellen, ohne die Sicherheit zu gefährden. Durch die kommunizierten Informationen sollen die Fahrzeuge früher über Geschwindigkeitsänderungen informiert werden und deshalb wie ein vorausschauend fahrender Fahrer früher auf Störungen reagieren können.

Die jetzt erläuterte Vorgehensweise ist immer dann hilfreich, wenn Fahrzeuge aufgrund ihres beschränkten Beschleunigungsvermögens der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs nicht schnell genug folgen können und somit die im Bild 4 grau hinterlegte Fläche größer als β_i wird. In dieser Situation überschreitet der Fahrzeugabstand nach einem Beschleunigungsmanöver den Sollwert und unterschreitet ihn bei einem Bremsmanöver. Vor allem die zweite Situation ist sicherheitskritisch und muss durch eine kooperative Fahrweise verhindert werden.

So haben die Experimente in [19] gezeigt, dass die Beschleunigung von Personenfahrzeugen bei etwa $1,8 \text{ m/s}^2$ begrenzt ist. Bezogen auf die hier verwendeten linearen Modelle führt diese Limitierung auf eine untere Grenze für das Verzögerungsmaß Δ_i . Durch die Vernetzung der Regler soll erreicht werden, dass Fahrzeuge mit einem kleineren Sicherheitsabstand β_i fahren können, als es ihr durch Δ_i beschriebenes Beschleunigungsvermögen zulässt.

5.2 Kumulative Verzögerung in Fahrzeugkolonnen

Die durch die Wolke im Bild 2 verdeutlichte Vernetzung der Fahrzeuge wird dadurch dargestellt, dass die Koppel-eingangssgröße $v_{i-1}(t)$ des i -ten Fahrzeugs in den Bildern 1 und 3 durch die lokale Referenzgröße $v_{si}(t)$ ersetzt wird, die aus den über das Kommunikationsnetz übermittelten Geschwindigkeiten $v_j(t)$ benachbarter Fahrzeuge berechnet wird:

$$v_{si}(t) = \sum_{j=0}^{i-1} \hat{a}_{ij} v_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (38)$$

Die in dieser Gleichung stehenden die Koeffizienten $\hat{a}_{ij} \geq 0$ sind die Elemente der Adjazenzmatrix des Kommunikationsgraphen, die die Beziehungen

$$\sum_{j=0}^{i-1} \hat{a}_{ij} = 1 \quad \text{und} \quad \hat{a}_{ij} = 0, \quad j \geq i \quad (39)$$

erfüllen und von denen i. Allg. wenige von null verschieden sind. Die Summation geht bis $i-1$, weil nur von vorausfahrenden Fahrzeugen Informationen verwendet werden sollen.

Die in den Abschnitten 4.2 bis 4.4 beschriebenen Regler erhalten demzufolge anstelle des Eingangssignals $v_{i-1}(t)$ jetzt die Referenzgröße $v_{si}(t)$ aus Gl. (38) und die Regelungsstruktur wird damit für alle beschriebenen Regler wie im Bild 11 gezeigt erweitert.

Abb. 11: Vernetzte Fahrzeugregelung.

Abb. 12: Verkürzte Fahrzeugkolonne.

Die nachfolgenden Erläuterungen dienen der Wahl der normierten Adjazenzmatrix $\hat{\mathbf{A}}$, so dass die Fahrzeuge mit vorgegebenen Abstandskoeffizienten β_i fahren. Aufgrund der Vernetzung reicht es nicht mehr aus, das i -te Fahrzeug isoliert für sich zu betrachten, sondern es muss die vom ersten bis zum i -ten Fahrzeug *verkürzte Fahrzeugkolonne* untersucht werden (Bild 12). Dieses System hat ein ähnliches Modell wie das isolierte Fahrzeug (12):

$$\bar{V}_{i0} : \begin{cases} V_i(s) = \bar{G}_{i0}(s) V_0(s) \\ \bar{D}_{i0}(s) = \bar{F}_{i0}(s) V_0(s), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (40)$$

mit

$$\bar{F}_{i0}(s) = \frac{1}{s} (1 - \bar{G}_{i0}(s)), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (41)$$

Es beschreibt den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit $v_0(t)$ des Führungsfahrzeugs und der Geschwindigkeit $v_i(t)$ des i -ten Fahrzeugs bzw. dem Abstand $d_{i0}(t)$ des i -ten Fahrzeugs vom Führungsfahrzeug. Jedes Fahrzeug in der Kolonne folgt jetzt dem Modell

$$\bar{V}_i : \begin{cases} V_i(s) = \bar{G}_i(s) V_{si}(s) \\ \bar{D}_i(s) = \bar{F}_i(s) V_{si}(s), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (42)$$

in dem im Unterschied zu Gl. (12) die lokale Referenzgröße $v_{si}(t)$ als Eingangsgröße steht, aber $V_i(s)$ und $\bar{D}_i(s)$ weiterhin die Geschwindigkeit und den Abstand des i -ten Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug beschreiben. Die Gln. (38) und (42) führen auf die folgenden Beziehungen für die Übertragungsfunktionen der verkürzten Fahrzeugkolonne (40):

$$\begin{aligned} \bar{G}_{00}(s) &= 1 \\ \bar{G}_{i0}(s) &= \bar{G}_i(s) \cdot \sum_{j=0}^{i-1} \hat{a}_{ij} \bar{G}_{j0}(s), \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (43)$$

Die Übertragungsfunktionen $\bar{F}_{i0}(s)$ ergeben sich daraus entsprechend Gl. (41).

Das Modell (40) wird nun in Analogie zum Abschn. 3.2 verwendet um herauszufinden, unter welchen Bedingungen die Fahrzeuge asymptotisch die geforderten Abstände einhalten. Dafür wird die Definition (16) für das Verzögerungsmaß auf dieses Modell angewendet und als *kumulative Verzögerungsmaß* bezeichnet

$$\Delta_{i0} = \int_0^{\infty} (1 - \bar{h}_{i0}(\tau)) d\tau,$$

in dem mit $\bar{h}_{i0}(t)$ die zur Übertragungsfunktion $\bar{G}_{i0}(s)$ gehörende Übergangsfunktion steht. Δ_{i0} beschreibt die Verzögerung, mit der das i -te Fahrzeug dem Führungsfahrzeug folgt. Es kann in Analogie zu Gl. (17) aus

$$\Delta_{i0} = \bar{F}_{i0}(0), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (44)$$

berechnet werden. Verwendet man nun die Gln. (41) und (43) zur Darstellung von $\bar{F}_{i0}(s)$, so erhält man für die kumulativen Verzögerungen die Beziehungen

$$\begin{aligned} \Delta_{00} &= 0 \\ \Delta_{i0} &= \Delta_i + \sum_{j=0}^{i-1} \hat{a}_{ij} \Delta_{j0}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (45)$$

wobei Δ_i wieder das Verzögerungsmaß des i -ten Fahrzeugs ist und $\hat{a}_{ij}$ die Elemente der normierten Adjazenzmatrix $\hat{A}$ sind. Mit der Gl. (45) kann man schrittweise die kumulativen Verzögerungsmaße aller Fahrzeuge entlang der Kolonne ermitteln.

5.3 Strukturentwurf der kooperativen Geschwindigkeitsregelung

Da der mit dem Modell (40) berechnete Abstand $\tilde{d}_{i0}(t)$ die Summe der Abstände zwischen allen vorausfahrenden Fahrzeugen darstellt

$$\tilde{d}_{i0}(t) = \sum_{j=1}^i \tilde{d}_j(t), \quad (46)$$

bewegen sich die Fahrzeuge asymptotisch mit dem geforderten Abstand $d_{\text{ref}}(t)$ nach Gl. (2), wenn für die kumulativen Verzögerungen die Beziehungen

$$\Delta_{i0} = \sum_{j=1}^i \beta_j, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (47)$$

gelten. Es wird im Folgenden gezeigt, wie die Elemente der Adjazenzmatrix $\hat{A}$ so bestimmt werden, dass diese Bedingungen erfüllt sind. Dabei wird die Fahrzeugkolonne schrittweise mit dem ersten Folgefahrzeug beginnend betrachtet und es wird sich herausstellen, dass zu jedem Fahrzeug von höchstens zwei vorausfahrenden Fahrzeugen Informationen übertragen werden müssen.

Aus den Gln. (45) und (47) erhält man die Forderung

$$\sum_{j=1}^i \beta_j - \Delta_i = \sum_{j=1}^{i-1} \hat{a}_{ij} \Delta_{j0}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (48)$$

die nur erfüllt werden kann, wenn die Verzögerungen Δ_i der Fahrzeuge den Ungleichungen

$$\beta_1 = \Delta_1 \quad (49)$$

$$\beta_i \leq \Delta_i \leq \sum_{j=1}^i \beta_j, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (50)$$

genügen. Da das erste Fahrzeug Informationen nur vom Führungsfahrzeug bekommen kann, muss es die Bedingung (49) für eine dezentrale Regelung erfüllen, die man auch so interpretieren kann, dass der Sollabstand mit dem durch $\beta_1 = \Delta_1$ gegebenen Abstandskoeffizienten festgelegt ist. Für die weiteren Fahrzeuge gibt es Spielräume in dem Sinne, dass Verzögerungen Δ_i , die größer als die zugehörigen Abstandskoeffizienten β_i sind, durch Kommunikation „verkleinert“ werden können. Für das zweite Fahrzeug muss entsprechend Gl. (50) die Ungleichung

$$\beta_2 \leq \Delta_2 \leq \beta_1 + \beta_2$$

gelten. Für $\beta_2 = \Delta_2$ wählt man $\hat{a}_{21} = 1$ und $\hat{a}_{20} = 0$ wie bei einer dezentralen Regelung (ACC), um die Beziehung (47) zu erfüllen, denn dann gilt entsprechend Gl. (45)

$$\Delta_{20} = \Delta_2 + \sum_{j=0}^1 \hat{a}_{2j} \Delta_{j0} \quad (51)$$

und, wie gefordert,

$$\Delta_{20} = \beta_1 + \beta_2. \quad (52)$$

Für $\Delta_2 > \beta_2$ und $\Delta_2 \leq \beta_1 + \beta_2$ kann man die Koeffizienten $\hat{a}_{21}$ und $\hat{a}_{20}$ folgendermaßen berechnen. Gleichung (51) wird mit Δ_{20} aus (52) in

$$\begin{aligned} \beta_1 + \beta_2 - \Delta_2 &= \hat{a}_{20} \Delta_{00} + \hat{a}_{21} \Delta_{10} \\ &= \hat{a}_{21} \beta_1 \\ \hat{a}_{21} &= \frac{\beta_1 + \beta_2 - \Delta_2}{\beta_1} \end{aligned}$$

umgeformt, was immer eine positive Zahl ergibt, und mit Hilfe von (39) durch

$$\hat{a}_{20} = 1 - \hat{a}_{21} = \frac{\Delta_2 - \beta_2}{\beta_1}$$

komplettiert.

Wenn man in dieser Weise für die nächsten Fahrzeuge fortfährt, kommt man zu dem folgenden Ergebnis:

Satz 4 (Verhalten von Fahrzeugkolonnen mit kooperativer Regelung [11, 13]). *Betrachtet wird eine Fahrzeugkolonne, deren geregelte Fahrzeuge $\bar{V}_i$ die Forderungen (49) und (50) erfüllen. Wenn die vernetzte Regelung die Geschwindigkeits-sollwerte entsprechend Gl. (38) mit den Koeffizienten*

$$\hat{a}_{10} = 1 \quad (53)$$

$$\hat{a}_{il_i} = \frac{\sum_{j=l_i}^i \beta_j - \Delta_i}{\beta_{l_i}}, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (54)$$

$$\hat{a}_{i,l_i-1} = 1 - \hat{a}_{il_i}, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (55)$$

$$\hat{a}_{ij} = 0, \quad j \neq l_i, j \neq l_i - 1, \quad (56)$$

bildet, wobei der Index l_i die Beziehung

$$0 \leq \sum_{j=l_i}^i \beta_j - \Delta_i \leq \beta_{l_i}, \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (57)$$

erfüllt, dann erreichen alle Fahrzeuge asymptotisch ihren Abstandssollwert (2).

Dieser Satz ist auch für die Theorie vernetzter Regelungen insgesamt sehr interessant, denn er zeigt, dass man in einem wichtigen Anwendungsfeld die Kommunikationsstruktur des Reglers auf systematische Weise aus den geforderten Eigenschaften des Gesamtsystems und den Eigenschaften der geregelten Teilsysteme ableiten kann. Es muss weder ein ganzzahliges Optimierungsproblem gelöst werden, um die unter allen möglichen Kommunikationsstrukturen zweckmäßigste Lösung herauszusuchen, noch

muss man heuristische Kriterien bemühen, um die Komplexität einer derartigen Aufgabe einzuschränken. Gleichzeitig wird die bereits früher beschriebene Notwendigkeit einer Vernetzung der Regelung herausgestellt. Jedes Fahrzeug, das die Beziehung $\Delta_i = \beta_i$ erfüllt, braucht nur von seinem unmittelbaren Vorgänger Informationen, während sich langsamere Fahrzeuge auch mit den davor fahrenden Fahrzeugen verbinden müssen.

Beispiel 3 (Fahrzeugkolonne mit vernetzter Regelung). Sechs Folgefahrzeuge mit den Verzögerungsmaßen

$$\Delta_1 = 2, \quad \Delta_2 = 3, \quad \Delta_3 = 4, \quad \Delta_4 = 2, \quad \Delta_5 = 4.5, \quad \Delta_6 = 3$$

sollen sich stationär mit einem einheitlichen Abstand (2) mit $\beta_i = 2$, ($i = 1, \dots, 6$) bewegen. Die Bedingungen (49) und (50) sind erfüllt. Für die Ermittlung der Kommunikationsstruktur wird die Beziehung (57) zur Bestimmung des Indexes l_i umgeformt

$$0 \leq (i - l_i)\beta - \Delta_i \leq l_i\beta, \quad i = 2, 3, \dots, N,$$

so dass l_i die kleinste ganze Zahl ist, die größer als $i - \frac{\Delta_i}{\beta}$ ist (dritte und vierte Spalte der Tabelle). Dann ergeben sich die Elemente der Adjazenzmatrix aus den Gln. (53)–(56).

i	Δ_i	$i - \frac{\Delta_i}{\beta}$	l_i	$\hat{a}_{il_i}$	$\hat{a}_{i,l_i-1}$
1	2				$\hat{a}_{10} = 1$
2	3	$2 - 1.5 = 0.5$	1	$\hat{a}_{21} = 0.5$	$\hat{a}_{20} = 0.5$
3	4	$3 - 2 = 1$	1	$\hat{a}_{31} = 1$	$\hat{a}_{30} = 0$
4	2	$4 - 1 = 3$	3	$\hat{a}_{43} = 1$	$\hat{a}_{42} = 0$
5	4.5	$5 - 2.25 = 2.75$	3	$\hat{a}_{53} = 0.75$	$\hat{a}_{52} = 0.25$
6	3	$6 - 1.5 = 4.5$	5	$\hat{a}_{65} = 0.5$	$\hat{a}_{64} = 0.5$

Bild 14 zeigt die auf diese Weise ermittelte Struktur der vernetzten Regelung.

Im Bild 13 ist links das Verhalten der Fahrzeugschlange mit der hier ermittelten vernetzten Regelung dargestellt, wobei für die Fahrzeugdynamik ein Modell zweiter

Abb. 13: Verhalten der Fahrzeugschlange mit CACC (links) und ACC (rechts).

Abb. 14: Kommunikationsgraph der kooperativen Fahrzeugregelung.

Ordnung mit den angegebenen Verzögerungsmaßen angeordnet wurde. Die Fahrzeuge stehen zur Zeit $t = 0$ im Abstand $\alpha = 1$ m voneinander entfernt und folgen dem Fahrprofil des Führungsfahrzeugs. Der gleichmäßige, durch den Faktor $\beta_i = 2$ s beschriebene Abstand entsteht aufgrund der Vernetzung der Fahrzeuge.

Zum Vergleich zeigt der rechte Teil von Bild 13 das Verhalten mit dezentraler Regelung. Die Sollabstände müssen bei dieser Regelung mit den Faktoren $\beta_i = \Delta_i$ gebildet werden und sind deshalb unterschiedlich groß. Dabei folgen insbesondere die Fahrzeuge 3 und 5 ihren Vorgängern mit sehr großem Abstand. $\square$

Die kooperative Regelung der Kolonne setzt sich aus dezentralen Teilreglern zusammen, die für beliebige Fahrzeugreihenfolgen zu einer vernetzten Regelung verbunden werden können. Das Ausscheiden von Fahrzeugen aus der Kolonne oder das Hinzukommen weiterer Fahrzeuge ist problemlos möglich und erfordert lediglich die Ankopplung der neuen Teilregler entsprechend dem hier vorgestellten Verfahren, womit die Skalierbarkeit der Regelung sichergestellt ist. Das Vorgehen ist anwendbar, ohne das ein Fahrzeug oder Elemente der Infrastruktur koordinierend eingreifen muss.

5.4 Überprüfung der Kollisionsfreiheit

Im vorhergehenden Abschnitt wurde nur das stationäre Verhalten der Fahrzeuge für die Wahl der Kommunikationsstruktur der vernetzten Regelung herangezogen. Es muss noch überprüft werden, ob die Güteforderungen (R4) und (R5) nach Kollisionsfreiheit und korrektem Fahrverhalten bei beliebiger extern positiver Eigendynamik der Fahrzeuge erfüllt sind.

Da der kooperative Regler nach Satz 4 nur von zwei vorausfahrenden Fahrzeugen Informationen erhält, kann die Beziehung (43) folgendermaßen vereinfacht werden

$$\bar{G}_{00}(s) = 1 \quad (58)$$

$$\bar{G}_{10}(s) = \bar{G}_1(s) \quad (59)$$

$$\bar{G}_{i0}(s) = \bar{G}_i(s)(\hat{a}_{i,i}\bar{G}_{i,0}(s) + \hat{a}_{i,i-1}\bar{G}_{i-1,0}(s)) \quad (60)$$

($i = 2, 3, \dots, N$) und für den Fahrzeugabstand erhält man die Gleichung

$$\tilde{D}_i(s) = \frac{1}{s}(\bar{G}_{i-1,0}(s) - \bar{G}_{i0}(s))V_0(s). \quad (61)$$

Daraus erkennt man:

Satz 5 (Kollisionsfreiheit in Fahrzeugkolonnen mit kooperativer Regelung [13]). *Betrachtet wird eine Fahrzeugkolonne, deren geregelte Fahrzeuge $\bar{V}_i$ die Forderungen (D1), (D2) und (D4) sowie (49) und (50) erfüllen und deren Regler entsprechend Satz 4 verkoppelt sind. Wenn die Fahrzeuge zur Zeit $t = 0$ den Abstand $\bar{d}_i(0) = \beta_i v_i(0)$ haben und die Übertragungsfunktionen*

$$G_{di}(s) = \frac{1}{s}(\bar{G}_{i-1,0}(s) - \bar{G}_{i0}(s)), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (62)$$

der verkürzten Fahrzeugkolonnen extern positive Systeme beschreiben, dann erfüllt die Fahrzeugkolonne die Güteforderungen (R4) und (R5).

Beispiel 4 (Test der Kollisionsfreiheit). Die sieben Fahrzeuge aus dem Beispiel 3 werden durch die Modelle

$$\bar{G}_i(s) = \frac{1}{T_i \Delta_i s^2 + \Delta_i s + 1} = \frac{1}{N_i(s)}, \quad i = 0, 1, \dots, 6 \quad (63)$$

mit den bereits angegebenen Verzögerungen beschrieben. Um die Bedingung aus Satz 5 zu überprüfen, werden nach Gln. (58)–(60) die Übertragungsfunktionen

$$\begin{aligned} \bar{G}_{00}(s) &= 1 \\ \bar{G}_{10}(s) &= \frac{1}{N_1(s)} \\ \bar{G}_{20}(s) &= \frac{1}{N_2(s)} \left(\frac{\hat{a}_{21}}{N_1(s)} + \hat{a}_{20} \right) \\ \bar{G}_{30}(s) &= \frac{1}{N_3(s)} \frac{\hat{a}_{31}}{N_1(s)} \\ &\text{usw.} \end{aligned}$$

gebildet und daraus die zu testenden Funktionen bestimmt:

$$\begin{aligned} G_{d1}(s) &= \frac{1}{s} \left(1 - \frac{1}{N_1(s)} \right) = \frac{T_1 \Delta_1 s + \Delta_1}{T_1 \Delta_1 s^2 + \Delta_1 s + 1} \\ G_{d2}(s) &= \frac{0.5(T_1 \Delta_1 s + \Delta_1)}{(T_1 \Delta_1 s^2 + \Delta_1 s + 1)(T_2 \Delta_2 s^2 + \Delta_2 s + 1)} \\ &\text{usw.} \end{aligned}$$

Bild 15 zeigt, dass die Gewichtsfunktionen zu den Übertragungsfunktionen $G_{di}(s)$, ($i = 2, \dots, 6$) für die einheitlich gewählte Zeitkonstante $T_i = 0.4$ s nichtnegativ sind und damit die Bedingung aus Satz 5 für die Kollisionsfreiheit der vernetzten Fahrzeugkolonne erfüllt ist. $\square$

Abb. 15: Gewichtungsfunktionen zu den Übertragungsfunktionen (62), ($i = 2, \dots, 6$).

Vereinfachter Test bei identischen Fahrzeugen. Entsprechend Satz 5 muss die Übertragungsfunktion $G_{di}(s)$ aus den Modellen der verkürzten Fahrzeugkolonnen gebildet werden. Da man einerseits daran interessiert ist, lokale Kriterien zu bekommen, in denen nur Informationen über das i -te Fahrzeug und über wenige Vorgänger vorkommen, und andererseits eine die Einzelfahrzeuge betreffende Bedingung anschaulicher ist, wird im Folgenden die Aussage von Satz 5 für Kolonnen mit identischen Fahrzeugen vereinfacht. An den Größen $\bar{G}(s)$, Δ und β werden deshalb die Indizes weggelassen.

Es werden Fahrzeuge betrachtet, die die Ungleichung

$$\beta < \Delta \leq 2\beta \quad (64)$$

erfüllen und folglich eine vernetzte Regelung benötigen. Gleichung (57) mit $l_i = i - 1$ führt auf die Ungleichung

$$0 \leq 2\beta - \Delta \leq \beta, \quad (65)$$

die unter der Annahme (64) erfüllt ist. Der kooperative Abstandsregler arbeitet folglich mit den Referenzsignalen

$$\begin{aligned} v_{s1}(t) &= v_0(t) \\ v_{si}(t) &= \hat{a}_1 v_{i-1}(t) + \hat{a}_2 v_{i-2}(t), \quad i = 2, 3, \dots, N \end{aligned} \quad (66)$$

mit den Koeffizienten

$$\hat{a}_1 = \hat{a}_{i,i-1} = 2 - \frac{\Delta}{\beta} \quad \text{und} \quad \hat{a}_2 = \hat{a}_{i,i-2} = \frac{\Delta}{\beta} - 1, \quad (67)$$

($i = 2, 3, \dots, N$). Die angegebenen Koeffizienten sind für alle Folgefahrzeuge dieselben, so dass man sie ohne Index i schreiben kann. Alle Fahrzeuge bis auf das erste Folgefahrzeug haben den durch β festgelegten Sollabstand, das erste Folgefahrzeug den größeren durch Δ bestimmten Abstand vom Führungsfahrzeug.

Satz 6 (Kollisionsfreiheit von identischen Fahrzeugen [13]). *Betrachtet wird eine Fahrzeugkolonne mit identischen Fahrzeugen, die die Forderung (65) erfüllen, die extern positiv sind und deren Regler entsprechend Gln. (66), (67) verkoppelt sind. Wenn die Fahrzeuge zur Zeit $t = 0$ den Abstand $\bar{d}_i(0) = \beta v_i(0)$ haben, erfüllt die Fahrzeugkolonne die Güteforderungen (R4) und (R5).*

5.5 Schrittweise Vernetzung einer Fahrzeugkolonne

Die in den vorhergehenden Abschnitten angegebenen Bedingungen und Entwurfsvorgehen müssen unter der praktischen Randbedingung eingesetzt werden, dass eine Fahrzeugkolonne keine koordinierende Einheit besitzt, die beispielsweise die Bedingungen für die Kollisionsfreiheit überprüft, sondern dass alle Bedingungen durch einzelne Fahrzeuge geprüft werden müssen. Die folgenden Betrachtungen gehen von der Situation aus, dass eine Fahrzeugkolonne beginnend mit dem Führungsfahrzeug schrittweise aufgebaut wird, wobei nach und nach neue Fahrzeuge die Kolonne nach hinten verlängern. Dabei wird vorausgesetzt, dass die geregelten Fahrzeuge die Entwurfsforderungen (D1), (D2) und (D4) erfüllen und ihr Verzögerungsmaß Δ_i kennen.

Um anschaulich darzustellen, dass die Struktur und die Parameter der vernetzten Regelung in der Entwurfsphase schrittweise durch die Fahrzeuge festgelegt werden, bevor die Regelung aktiviert wird, wird angenommen, dass jedes Fahrzeug einen *Entwurfsagenten* besitzt, also eine Einheit, die die im Folgenden angegebenen Modellinformationen sowie Algorithmen besitzt, um die angegebenen Bedingungen zu überprüfen und Reglerparameter festzulegen.

Die Entwurfsagenten der bereits in der Fahrzeugkolonne eingeordneten Fahrzeuge mit dem Index j , ($j = 0, 1, \dots, i - 1$) sollen über die folgenden Modellinformationen verfügen:

- Fahrzeugmodell mit den Übertragungsfunktionen $\bar{G}_j(s)$ und $\bar{F}_j(s)$,
- Verzögerungsmaß Δ_j ,
- Zeitabstandskoeffizient β_j ,
- Übertragungsfunktion $\bar{G}_{j0}(s)$.

Die Ankopplung des i -ten Fahrzeugs an die bestehende Fahrzeugschlange erfolgt dann in den folgenden Schritten:

- **Voraussetzung:** Der Entwurfsagent des i -ten Fahrzeugs besitzt die folgenden Modellinformationen: $\bar{G}_i(s)$, $\bar{F}_i(s)$, Δ_i , β_i .

1. **Festlegung der Kommunikationsstruktur:** Der Entwurfsagent des i -ten Fahrzeugs bestimmt den Index l_i aus Satz 4. Beginnend bei $l_i = i - 1$ erfragt er schrittweise vom Entwurfsagenten der vorausfahrenden Fahrzeuge den Parameter β_{l_i} und überprüft die Ungleichung (57), bis diese erfüllt ist.

2. **Festlegung der Wichtungsfaktoren:** Der Entwurfsagent legt die Elemente $\hat{a}_{ij}$, ($j = 0, 1, \dots, i - 1$) der Adjazenzmatrix entsprechend der Gln. (53)–(56) fest.
3. **Bestimmung der Übertragungsfunktion $\hat{G}_{i0}(s)$:** Zur Anwendung von Gl. (43) muss der Entwurfsagent des i -ten Fahrzeugs entsprechend Gl. (60) von den Entwurfsagenten der Fahrzeuge l_i und $l_i - 1$ die entsprechenden Übertragungsfunktionen erfragen.
4. **Überprüfung der Kollisionsfreiheit:** Der Entwurfsagent des i -ten Fahrzeugs berechnet die Übertragungsfunktion $G_{di}(s)$ mit Gl. (62) und überprüft diese entsprechend Satz 5.

Wenn im letzten Schritt eine Übertragungsfunktion $G_{di}(s)$ entsteht, die kein extern positiv System repräsentiert, muss der Zeitabstandskoeffizient β_i , mit dem sich das i -te Fahrzeug an das letzte Fahrzeug der bisherigen Kolonne anschließen will, vergrößert werden. „Spätestens“ für $\beta_i = \Delta_i$ ist der Test erfolgreich, weil das i -te Fahrzeug dann mit einer dezentralen Regelung fährt, für die die Kollisionsfreiheit nach Satz 3 gesichert ist.

6 Zusammenfassung

Der Beitrag hat eine Übersicht über die Methoden zur Strukturierung und zum Entwurf von vernetzten Abstandsregelungen gegeben und dabei betont, dass unter praktischen Randbedingungen derartige Regelungen an den Einzelfahrzeugen entworfen und realisiert werden müssen und dabei Kriterien zu erfüllen sind, die Fahrzeugkolonnen mit beliebiger Reihung der Fahrzeuge nachweislich kollisionsfrei fahren lässt. Die in der Theorie der Multiagentensysteme häufig angewendete Vorgehensweise, die Güteforderungen an das Gesamtsystem in Forderungen an die geregelten Teilsysteme und an die Kommunikationsstruktur zu zerlegen, hat von den Güteforderungen (R1) bis (R5) für die Fahrzeugkolonne auf die vier Entwurfsforderungen (D1) bis (D4) geführt.

Ein wichtiges Ergebnis, auch für die Theorie der vernetzten Regelungssysteme, besteht in der im Abschn. 5 beschriebenen Methode zur systematischen Auslegung der Kommunikationsstruktur, die aus den Güteforderungen und den durch das eingeführte Verzögerungsmaß dargestellten Fahrzeugeigenschaften abgeleitet wird. Dabei zeigt sich, unter welchen Bedingungen überhaupt eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugreglern notwendig ist und, wenn dies so ist, zwischen welchen Fahrzeugen eine Kommunikationsverbindung aufzubauen ist.

Die hier betrachtete Abstandsregelung kann mit weiterführenden Steuerungssystemen zusammengeführt werden, beispielsweise mit Algorithmen zur kooperativen Einfädelung von Fahrzeugen an Fahrbahnzusammenführungen [18, 25].

Literatur

1. Chu, K. C.: Decentralized control of high-speed vehicular strings, *Transportation Science* 8 (1972), pp. 361–384.
2. Cremer, M.: On convoy-stable control laws for automatically driven vehicle clusters, *Conf. on Road Transport Informatics: Intelligent Vehicle Highway Systems* 1992, pp. 253–260.
3. Eyre, J.; Yanakiev, D.; Kanellakopoulos, I.: A simplified framework for string stability analysis of automated vehicles, *Vehicle System Dynamics* 30 (1998), pp. 374–405.
4. L. Farina; S. Rinaldi: *Positive Linear Systems: Theory and Applications*, New York: J. Wiley and Sons 2000.
5. Herman, I.; Martinec, D.; Hurak, Z.; Sebek, M.: Harmonic instability of asymmetric bidirectional control of a vehicular platoon, *American Contr. Conf.* 2014, pp. 5396–5401.
6. Klinge, S.; Middleton, R. H.: Time headway requirements for string stability of homogeneous linear unidirectionally connected systems, *IEEE Conf. on Decision and Control*, 2009.
7. Lestas, I.; Vinnicombe, G.: Scalability in heterogeneous vehicle platoons, *American Control Conf.*, New York 2007, pp. 4678–4683.
8. Levine, W.; Athans, M.: On the optimal error regulation of a string of moving vehicles, *IEEE Trans. on Autom. Contr.* AC-11 (1966), pp. 355–361.
9. Lunze, J.: *Feedback Control of Large Scale Systems*, Prentice Hall, Hemel Hempstead 1992.
10. Lunze, J.: A method for designing the communication structure of networked controllers, *Intern. J. Control* 86 (2013), pp. 1489–1502.
11. Lunze, J.: Ein neues Konzept zur kooperativen Regelung von Fahrzeugkolonnen, *Automatisierungstechnik* 65 (2017), S. 672–682.
12. Lunze, J.: Adaptive cruise control with guaranteed collision avoidance, *IEEE Trans. on Intell. Transp. Syst.* 20 (2019), pp. 1897–1907.
13. Lunze, J.: Design of the communication structure of cooperative adaptive cruise controllers, *IEEE Trans. on Intell. Transp. Syst.* 21 (2020) (accepted).
14. Lunze, J.: *Networked Control of Multi-Agent Systems*, BookmundoDirect 2019, ISBN 9789463867139.
15. Maschuw, J. P.; Keßler, G. C.; Abel, D.: Kriterien und Methoden zur längsdynamischen Führung von Fahrzeugkolonnen, *Automatisierungstechnik* 57 (2009), S. 245–252.
16. Melzer, S. M.; Kuo, B. C.: A closed-form solution for the optimal error regulation of a string of moving vehicles, *IEEE Trans. on Autom. Contr.* AC-16 (1971), pp. 50–52.
17. Milanes, V.; Shladover, S. E.; Spring, J.; Nowakowski, C.; Kawazoe, H.; Nakamura, M.: Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations, *IEEE Trans. on Int. Transp. Syst.* 15 (2014), pp. 296–305.

18. Mosebach, A.; Röchner, S.; Lunze, J.: Merging control of cooperative vehicles, *IFAC Symposium on Advances in Automotive Control*, Norrköping 2016, pp. 173–179.
19. Naus, G. J. L.; Vugts, R. P. A.; von de Molengraft, M. J. G.; Steinbuch, M.: String-stable CACC design and experimental validation: a frequency-domain approach, *IEEE Trans. on Vehicular Technology* 59 (2010), 4268–4279.
20. Öncü, S.; Ploeg, J.; van de Wouw, N.; Nijmeijer, H.: Cooperative adaptive cruise control: network-aware analysis of string stability, *IEEE Trans. on Intelligent Transp. Syst.* 15 (2014), pp. 1527–1537.
21. Peppard, L.: String stability of relative-motion PID vehicle control systems, *IEEE Trans. on Autom. Contr.* AC-19 (1974), pp. 579–581.
22. Ploeg, J.; Scheepers, B. T. M.; van Nunen, E.; van de Wouw, N.; Nijmeijer, H.: Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control, *IEEE Conf. on Intell. Transp. Syst.*, Washington 2011, pp. 260–265.
23. Ploeg, J.; van de Wouw, N.; Nijmeijer, H.: $\mathcal{L}_p$ string stability of cascaded systems: Application to vehicle platooning, *IEEE Trans. on Control Systems Technology* 22 (2014), pp. 786–793.
24. Ploeg, J.; Shukla, D. P.; van de Wouw, N.; Nijmeijer, H.: Controller synthesis for string stability of vehicle platoons, *IEEE Trans. on Intell. Transp. Syst.* 15 (2014), pp. 854–865.
25. Schwab, A.; Lunze, J.: Kooperative Steuerung vernetzter Fahrzeuge, 9. *VDI/VDE-Fachtagung AUTOREG*, Mannheim 2019, in: VDI-Berichte Nr. 2349, S. 353–366.
26. Seiler, P.; Pant, A.; Hedrick, K.: Disturbance propagation in vehicle strings, *IEEE Trans. on Autom. Contr.* 49 (2004), pp. 1835–1841.
27. Stotsky, A.; Chien, C. C.; Ioannou, P.: Robust platoon-stable controller design for autonomous intelligent vehicles, *Conf. on Decision and Contr.*, Lake Buena Vista 1994, pp. 2431–2436.
28. Swaroop, D.; Hedrick, J. K.: String stability of interconnected systems, *IEEE Trans. on Autom. Contr.* 41 (1996), pp. 349–357.

Autoreninformationen

Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für
Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik, 44780 Bochum,
Germany
Jan.Lunze@ruhr-uni-bochum.de

Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze ist Leiter des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik der Ruhr-Universität Bochum. Arbeitsgebiete: vernetzte Regelungen, hybride dynamische Systeme, fehlertolerante Steuerungen, ereignisdiskrete Systeme.