



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 202 372.2**
(22) Anmeldetag: **10.03.2022**
(43) Offenlegungstag: **14.09.2023**

(51) Int Cl.: **G06Q 10/04 (2023.01)**
G06F 30/00 (2020.01)
G06F 17/10 (2006.01)
G08G 1/095 (2006.01)

(71) Anmelder:
ZF Friedrichshafen AG, 88046 Friedrichshafen, DE

(72) Erfinder:
Busse, Timon, 80339 München, DE

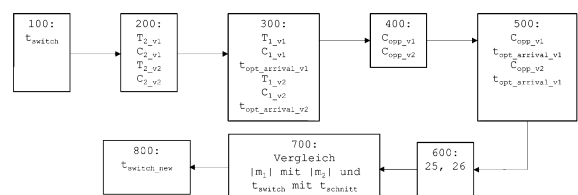
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bestimmung eines Umschaltzeitpunktes einer Ampel**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Bestimmung eines Umschaltzeitpunktes einer Ampel, wobei ein erstes Fahrzeug und ein zweites Fahrzeug jeweils einer durch modellbasierte prädiktive Regelung ermittelten Trajektorie folgen und aus unterschiedlichen Richtungen kommend auf dieselbe Ampel zu fahren. Das Verfahren umfasst die Schritte

- Ermitteln eines Umschaltzeitpunktes (t_{switch}) der Ampel,
- Ermitteln von Primärtrajektorien (T_{1_v1} , T_{1_v2}) und Sekundärtrajektorien (T_{2_v1} , T_{2_v2}) des ersten Fahrzeugs und des zweiten Fahrzeugs mittels modellbasierter Prädiktion, wobei der Umschaltzeitpunkt (t_{switch}) der Ampel einen Lösungsraum für das Ermitteln der Sekundärtrajektorien (T_{2_v1} , T_{2_v2}) der beiden Fahrzeuge derart verkleinert, dass die beiden Fahrzeuge gemäß der ermittelten Sekundärtrajektorie einen Bereich, innerhalb welchem sich die Ampel befindet, ausschließlich während einer Grünphase der Ampel durchfahren,
- Ermitteln von theoretischen Ankunftszeiten ($t_{\text{opt_arrival_v1}}$, $t_{\text{opt_arrival_v2}}$) beider Fahrzeuge an der Ampel unter der Voraussetzung, dass beide Fahrzeuge ihrer jeweiligen Primärtrajektorie (T_{1_v1} , T_{1_v2}) folgen, und
- Ermitteln eines neuen Umschaltzeitpunktes ($t_{\text{switch_new}}$) der Ampel basierend auf individuellen Kostenwerten (C_{1_v1} , C_{2_v1} ; C_{1_v2} , C_{2_v2}) der Primärtrajektorien (T_{1_v1} , T_{1_v2}) und der Sekundärtrajektorien (T_{2_v1} , T_{2_v2}) beider Fahrzeuge sowie basierend auf dem Umschaltzeitpunkt (t_{switch}) der Ampel und den ermittelten theoretischen Ankunftszeiten beider Fahrzeuge an der Ampel.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung eines Umschaltzeitpunktes einer Ampel, wobei ein erstes Fahrzeug und ein zweites Fahrzeug jeweils einer durch modellbasierte prädiktive Regelung (Im Englischen: Model Predictive Control oder abgekürzt: MPC) ermittelten Trajektorie folgen und aus unterschiedlichen Richtungen kommend auf dieselbe Ampel zu fahren.

[0002] Es ist bekannt, bei Abstandsregeltempomaten (im Englischen: Adaptive Cruise Control; abgekürzt: ACC) auch Effizienzkriterien bei der Planung von Geschwindigkeitstrajektorien zu berücksichtigen. Ein stark wachsender Ansatz hierbei ist die Trajektorien-Planung mit Hilfe eines sogenannten MPC-Solvers bzw. mittels eines MPC-Algorithmus'. Bei diesem Ansatz wird eine Vielzahl möglicher Trajektorien über einem virtuellen Horizont hinsichtlich Ihrer Gesamteffizienz bewertet. Hierbei haben unweigerlich auch Ampelsysteme und in zweiter Instanz andere Verkehrsteilnehmer, die auf das gleiche Ampelsystem zufahren, einen Einfluss auf die Effizienz der letztendlich ausgewählten Trajektorie. Dies ist z.B. der Fall, wenn ein zweites Fahrzeug aus einer anderen Richtung als ein erstes Fahrzeug (Ego-Fahrzeug) auf die gleiche Ampelkreuzung zufährt und das Ampelsystem aufgrund verfügbarer Informationen entscheidet, dem zweiten Fahrzeug Vorrang zu geben und das Ego-Fahrzeug hierdurch auf eine weniger optimale Trajektorie gezwungen wird.

[0003] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung kann darin gesehen werden, eine Phasenschaltung einer Ampel bereitzustellen, sodass Trajektorien zweier MPC-gesteuerter Fahrzeuge, die aus unterschiedlichen Richtungen kommend auf die Ampel zufahren, verbessert werden können. Die Aufgabe wird gelöst durch die Gegenstände der unabhängigen Patentansprüche. Vorteilhafte Ausführungsformen sind Gegenstand der Unteransprüche, der folgenden Beschreibung sowie der Figuren.

[0004] Gemäß der vorliegenden Erfindung wird angenommen, dass ein erstes Fahrzeug (Ego-Fahrzeug) und ein zweites Fahrzeug jeweils einer durch modellbasierte prädiktive Regelung ermittelten Trajektorie folgen. Das erste Fahrzeug und das zweite Fahrzeug fahren aus unterschiedlichen Richtungen kommend auf dieselbe Ampel zu.

[0005] Die vorliegende Erfindung schlägt einen gemeinsamen Optimierungsprozess der beiden MPC-gesteuerten Fahrzeuge sowie der Schaltung der Ampel vor. So wird eine Kommunikation mehrerer MPC-basierter Fahrzeuge hinsichtlich einer Opportunitätskostenverhandlung mit einem Ampelsystem vorgeschlagen. Insbesondere wird eine Inter-

aktion mehrerer MPC-Systeme mit dem Ampelsystem vorgeschlagen. Gegenstand der Erfindung ist hierbei ein Austausch zwischen den verschiedenen Fahrzeugen mit dem Ampelsystem hinsichtlich Opportunitätskosten, die durch eine Verkleinerung des Lösungsraums aufgrund der Ampelschaltung entstehen. Anschließend und darauf basierend erfolgt eine Verschiebung eines Umschaltzeitpunkts der Ampel. Die vorliegende Erfindung stellt diesbezüglich einen gemeinsamen Optimierungsprozess für zwei MPC-gesteuerte Fahrzeuge und eine Steuerung für das Ampelsystem bereit, wobei einerseits eine Summeneffizienz der beiden Fahrzeuge größer als im Vergleichsfall ist und wobei insbesondere eine intrinsische Gleichbehandlung der Verkehrsteilnehmer erreicht wird. Dazu wird den MPC-Systemen der beiden Fahrzeuge die Kommunikation mit dem Ampelsystem durch eine Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation (V2I) ermöglicht. Außerdem wird ein im Folgenden näher beschriebener Kommunikationsablauf sowie eine Optimierungslogik in der Ampel einheit vorgestellt.

[0006] In diesem Sinne stellt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Bestimmung eines Umschaltzeitpunktes einer Ampel bereit, wobei ein erstes Fahrzeug und ein zweites Fahrzeug jeweils einer durch modellbasierte prädiktive Regelung ermittelten Trajektorie folgen und aus unterschiedlichen Richtungen kommend auf dieselbe Ampel zu fahren. Unter dem Merkmal „Trajektorie“ kann ein Pfad verstanden werden, welchem das jeweilige Fahrzeug innerhalb eines vorausliegenden Prädiktionshorizonts folgen soll (Zeit-Weg-Datenpaare), z.B. innerhalb der nächsten Sekunden. Solch einem Pfad kann ein Geschwindigkeitsprofil zugeordnet sein, wobei das Geschwindigkeitsprofil für jeden Wegpunkt bzw. Diskretisierungspunkt entlang des Pfades eine Sollgeschwindigkeit für das Fahrzeug vorgeben kann. Diese Zuordnung aus Pfad und Geschwindigkeit ergibt eine Geschwindigkeitstrajektorie des Fahrzeugs.

[0007] Das Verfahren umfasst das Ermitteln eines Umschaltzeitpunktes der Ampel sowie das Ermitteln von Primärtrajektorien und Sekundärtrajektorien des ersten Fahrzeugs und des zweiten Fahrzeugs bzw. für das erste Fahrzeug und für das zweite Fahrzeug. Die Primärtrajektorien und die Sekundärtrajektorien werden dabei jeweils mittels einer modellbasierten Prädiktion ermittelt, sodass jeweils eine Kostenfunktion minimiert wird, die für jede der Primärtrajektorien und Sekundärtrajektorien einen individuellen Kostenwert annimmt. Der Umschaltzeitpunkt der Ampel verkleinert dabei nicht einen Lösungsraum für das Ermitteln der Primärtrajektorien der beiden Fahrzeuge. Dahingegen verkleinert der Umschaltzeitpunkt der Ampel einen Lösungsraum für das Ermitteln der Sekundärtrajektorien der beiden Fahrzeuge derart, dass die beiden Fahrzeuge

gemäß der ermittelten Sekundärtrajektorie einen Bereich, innerhalb welchem sich die Ampel befindet, ausschließlich während einer Grünphase der Ampel durchfahren und insbesondere nicht während einer Rotphase.

[0008] Weiterhin werden theoretische Ankunftszeiten beider Fahrzeuge an der Ampel ermittelt, und zwar unter der Voraussetzung, dass beide Fahrzeuge ihrer jeweiligen Primärtrajektorie folgen. Ferner wird ein neuer Umschaltzeitpunkt der Ampel ermittelt. Diese Ermittlung des neuen Umschaltzeitpunktes der Ampel erfolgt zum einen basierend auf den individuellen Kostenwerten der Primärtrajektorien und der Sekundärtrajektorien beider Fahrzeuge. Andererseits erfolgt die Ermittlung des neuen Umschaltzeitpunktes der Ampel auch basierend auf dem Umschaltzeitpunkt der Ampel und den ermittelten theoretischen Ankunftszeiten beider Fahrzeuge an der Ampel.

[0009] Dieser gemeinsame Optimierungsprozess erhöht die Schwarmeffizienz. Die Kostenfunktionen der MPC-Steuerungen der beiden Fahrzeuge liefern für die optimierten Trajektorien der beiden Fahrzeuge jeweils einen Kostenwert. Addiert man diese beiden Kostenwerte, so erhält man einen Gesamtkostenwert für die Trajektorien beider Fahrzeuge. Dieser Gesamtkostenwert kann reduziert werden, wenn der gemeinsame Optimierungsprozess gemäß der vorliegenden Erfindung angewendet wird (im Vergleich zu einer Ermittlung der Trajektorien ohne den gemeinsamen Optimierungsprozess). Der erfindungsgemäße gemeinsame Optimierungsprozess ermöglicht, dass beide Fahrzeuge von der Steigerung der Schwarmeffizienz profitieren, d.h. es kann sich eine Verbesserung hinsichtlich jedes lokal berechneten Optimums einstellen.

[0010] Für jedes der beiden Fahrzeuge kann ein Opportunitätskostenwert berechnet werden, insbesondere durch ein MPC-System des jeweiligen Fahrzeugs, wobei entsprechender Programmcode in einem MPC-Algorithmus des betreffenden MPC-Systems enthalten sein kann. Ein Opportunitätskostenwert des ersten Fahrzeugs wird dabei ermittelt, indem ein Kostenwert der Primärtrajektorie des ersten Fahrzeugs von einem Kostenwert der Sekundärtrajektorie des ersten Fahrzeugs subtrahiert wird. Analog wird ein Opportunitätskostenwert des zweiten Fahrzeugs ermittelt, indem ein Kostenwert der Primärtrajektorie des zweiten Fahrzeugs von einem Kostenwert der Sekundärtrajektorie des zweiten Fahrzeugs subtrahiert wird. Durch die ermittelten Opportunitätskostenwerte wird das Ermitteln des neuen Umschaltzeitpunktes der Ampel erleichtert.

[0011] Gemäß einer weiteren Ausführungsform werden ein erster linearer Opportunitätskostengraph mit einer ersten Steigung m_1 für das erste Fahrzeug und

ein zweiter Opportunitätskostengraph mit einer zweiten Steigung m_2 für das zweite Fahrzeug ermittelt. Die Berechnung der linearen Opportunitätskostengraphen erfolgt dabei basierend auf den Opportunitätskostenwerten, den theoretischen Ankunftszeiten an der Ampel und basierend auf dem Umschaltzeitpunkt der Ampel. Basierend auf einem Vergleich der ersten Steigung m_1 mit der zweiten Steigung m_2 sowie basierend auf einem Vergleich eines Schnittpunktes des ersten Opportunitätskostengraphen mit dem zweiten Opportunitätskostengraphen kann der neue Umschaltzeitpunkt der Ampel besonders einfach ermittelt werden.

[0012] Was den Verlauf der Opportunitätsgraphen angeht, so kann in einem ersten Fall der erste Opportunitätskostengraph mit einem positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1 steiler als der zweite Opportunitätskostengraph mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2 verlaufen. Somit ist in diesem ersten Fall der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 größer als der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten m_2 ($|m_1| > |m_2|$). Weiterhin liegt der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel in dem ersten Fall zeitlich nach dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunktes ($t_{\text{switch}} > t_{\text{schnitt}}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| > |m_2|$ und $t_{\text{switch}} > t_{\text{schnitt}}$) kann insbesondere eine Prozessoreinheit der Ampel in diesem ersten Fall vorteilhaft festlegen, dass der neue Umschaltzeitpunkt $t_{\text{switch_new}}$ der Ampel dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunktes entspricht. Durch diese Prüfung und Festlegung kann auf besonders effektive und effiziente Weise die Summeneffizienz und Gleichbehandlung der Verkehrsteilnehmer (d.h. der beiden Fahrzeuge) erhöht werden.

[0013] In einem zweiten Fall kann der zweite Opportunitätskostengraph mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2 steiler als der erste Opportunitätskostengraph verlaufen, der einen positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1 aufweist. Somit ist der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten m_2 größer als der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 ($|m_1| < |m_2|$). Weiterhin liegt in dem zweiten Fall der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel zeitlich vor dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunktes ($t_{\text{switch}} < t_{\text{schnitt}}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| < |m_2|$ und $t_{\text{switch}} < t_{\text{schnitt}}$) kann insbesondere die Prozessoreinheit der Ampel in diesem zweiten Fall vorteilhaft festlegen, dass der neue Umschaltzeitpunkt $t_{\text{switch_new}}$ der Ampel dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunktes 27 entspricht.

[0014] In einem dritten Fall verläuft der zweite Opportunitätskostengraph mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2 steiler als der erste Opportunitätskostengraph mit einem positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1 . Somit ist der Betrag des

zweiten Steigungskoeffizienten m_2 größer als der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 ($|m_1| < |m_2|$). Weiterhin liegt der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel zeitlich nach dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunkts ($t_{\text{switch}} > t_{\text{schnitt}}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| < |m_2|$ und $t_{\text{switch}} > t_{\text{schnitt}}$) kann insbesondere die Prozessoreinheit der Ampel festlegen, dass der neue Umschaltzeitpunkt $t_{\text{switch_new}}$ der Ampel sich wie folgt ergibt: Von dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} wird die Differenz aus dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} und dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunkts subtrahiert, wobei diese Differenz durch einen Divisor d geteilt wird. In einer Formel ausgedrückt ergibt sich daher für den neuen Umschaltzeitpunkt $t_{\text{switch_new}}$ Folgendes:

$$t_{\text{switch_new}} = t_{\text{switch}} - \frac{t_{\text{switch}} - t_{\text{schnitt}}}{d}$$

[0015] In einem vierten Fall verläuft der erste Opportunitätskostengraph mit einem positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1 steiler als der zweite Opportunitätskostengraph mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2 . Somit ist der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 größer als der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten m_2 ($|m_1| > |m_2|$). Weiterhin liegt der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel zeitlich vor dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunkts ($t_{\text{switch}} < t_{\text{schnitt}}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| > |m_2|$ und $t_{\text{switch}} < t_{\text{schnitt}}$) legt insbesondere die Prozessoreinheit der Ampel fest, dass der neue Umschaltzeitpunkt $t_{\text{switch_new}}$ der Ampel sich wie folgt ergibt: Zu dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} wird die Differenz aus dem Zeitwert t_{schnitt} des Graphenschnittpunkts und dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} addiert, wobei diese Differenz durch einen Divisor d geteilt wird. In einer Formel ausgedrückt ergibt sich daher für den neuen Umschaltzeit-

$$\text{punkt } t_{\text{switch_new}} = t_{\text{switch}} + \frac{t_{\text{schnitt}} - t_{\text{switch}}}{d}$$

[0016] In einer Ausführungsform wird für den Divisor ein Wert von größer als 1 festgelegt. Dadurch kann das sogenannte Togglen des Systems verhindert oder zumindest reduziert werden. Insbesondere kann für den Divisor der Wert 2 festgelegt werden. Durch die Wahl dieses Werts für den Divisor kann in dem dritten Fall und in dem vierten Fall mittels dieser Ausführungsform ein potentieller Zielkonflikt mit 2:1 zu Gunsten der Summeneffizienz gewichtet werden.

[0017] Die Verfahrensschritte des erfindungsgemäßen Verfahrens werden bevorzugt in einer vorgeschriebenen Taktung (z.B. jede Sekunde) während der Anfahrt auf das Ampelsystem wiederholt. Durch die beschriebene Vergleichsmechanik stellt sich dabei ein Verhalten ein, bei dem jeder weitere Iterationsschritt eine Verbesserung der Situation entsprechend den eingangs genannten Zielen der Summe-

neffizienz und Gleichbehandlung der Verkehrsteilnehmer darstellt.

[0018] Im Folgenden werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der schematischen Zeichnung näher erläutert, wobei gleiche oder ähnliche Elemente mit dem gleichen Bezugszeichen versehen sind. Hierbei zeigt

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Fahrzeugs,

Fig. 2 eine Draufsicht auf ein erstes Fahrzeug und ein zweites Fahrzeug, die aus unterschiedlichen Richtungen kommend auf eine Ampel zufahren,

Fig. 3 ein Ausführungsbeispiel eines Ablaufs eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur modellbasierten prädiktiven Regelung der beiden Fahrzeuge sowie einer Steuerung der Ampel nach **Fig. 2**,

Fig. 4 ein erstes Zeit/Kosten-Diagramm für die zwei Fahrzeuge nach **Fig. 2**,

Fig. 5 ein zweites Zeit/Kosten-Diagramm für die zwei Fahrzeuge nach **Fig. 2** und

Fig. 6 ein drittes Zeit/Kosten-Diagramm für die zwei Fahrzeuge nach **Fig. 2**.

[0019] **Fig. 1** zeigt ein erstes Fahrzeug 1. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel handelt es sich bei dem ersten Fahrzeug 1 um ein Kraftfahrzeug, z.B. um einen Personenkraftwagen. Das erste Fahrzeug 1 umfasst ein MPC-System 2 zur modellbasierten prädiktiven Regelung des ersten Fahrzeugs 1. Das erste Kraftfahrzeug 1 umfasst weiterhin ein Fahrerassistenzsystem 16 mit einer Prozessoreinheit 19 und mit einer Kommunikationsschnittstelle 20. **Fig. 2** zeigt das erste Fahrzeug 1 auf einer Straße 21. Das erste Fahrzeug 1 fährt in dem gezeigten Ausführungsbeispiel in einer ersten Fahrtrichtung x_1 auf eine Lichtsignalanlage in Form einer Ampel 23 zu, welche sich im Bereich einer Straßenkreuzung 24 befindet. Ein zweites Fahrzeug 18 fährt ebenfalls auf der Straße 21. Das zweite Fahrzeug 18 fährt in dem gezeigten Ausführungsbeispiel in einer zweiten Fahrtrichtung x_2 , die in entgegengesetzter Richtung zu der ersten Fahrtrichtung x_1 verläuft, auf die Ampel 23 zu. Auch bei dem zweiten Fahrzeug 18 handelt es sich in dem gezeigten Ausführungsbeispiel um ein Kraftfahrzeug, z.B. ebenfalls um einen Personenkraftwagen. Das zweite Fahrzeug 18 weist in dem gezeigten Ausführungsbeispiel die gleichen Elemente und Funktionen auf wie das erste Fahrzeug 1. Insbesondere weist das zweite Fahrzeug 18 ebenfalls ein MPC-System 2 auf, wie dies im Folgenden näher im Zusammenhang mit dem ersten Fahrzeug nach **Fig. 1** beschrieben ist.

[0020] Das MPC-System 2 umfasst in dem gezeigten Ausführungsbeispiel eine Prozessoreinheit 3, eine Speichereinheit 4, eine Kommunikations-Schnittstelle 5 und eine Erfassungseinheit 6 zur Erfassung von das erste Kraftfahrzeug 1 betreffenden Umgebungsdaten und Zustandsdaten. Das erste Kraftfahrzeug 1 umfasst weiterhin einen Antriebsstrang 7, der beispielsweise eine elektrische Maschine 8, die als Motor und als Generator betrieben werden kann, eine Batterie 9 und ein Getriebe 10 umfassen kann. Die elektrische Maschine 8 kann im Motorbetrieb Räder des Kraftfahrzeugs 1 über das Getriebe 10 antreiben, das beispielsweise eine konstante Übersetzung aufweisen kann. Die dazu notwendige elektrische Energie kann die Batterie 9 bereitstellen. Die Batterie 9 kann durch die elektrische Maschine 8 aufgeladen werden, wenn die elektrische Maschine 8 im Generatorbetrieb betrieben wird (Rekuperation). Die Batterie 9 kann optional auch an einer externen Ladestation aufgeladen werden. Ebenfalls kann der Antriebsstrang des ersten Kraftfahrzeugs 1 optional einen Verbrennungskraftmotor 17 aufweisen, welcher alternativ oder zusätzlich zu der elektrischen Maschine 8 das Kraftfahrzeug 1 antreiben kann. Der Verbrennungskraftmotor 17 kann auch die elektrische Maschine 8 antreiben, um die Batterie 9 aufzuladen.

[0021] Auf der Speichereinheit 4 ist ein Computerprogrammprodukt 11 gespeichert. Das Computerprogrammprodukt 11 kann auf der Prozessoreinheit 3 ausgeführt werden, wozu die Prozessoreinheit 3 und die Speichereinheit 4 mittels der Kommunikations-Schnittstelle 5 miteinander verbunden sind. Wenn das Computerprogrammprodukt 11 auf der Prozessoreinheit 3 ausgeführt wird, leitet es die Prozessoreinheit 3 an, die im Zusammenhang mit der Zeichnung beschriebenen Funktionen zu erfüllen bzw. Verfahrensschritte auszuführen.

[0022] Das Computerprogrammprodukt 11 enthält einen MPC-Algorithmus 13. Der MPC-Algorithmus 13 wiederum enthält ein Längsdynamikmodell 14 des Antriebsstrangs 7 des ersten Kraftfahrzeugs 1. Weiterhin enthält der MPC-Algorithmus 13 eine zu minimierende Kostenfunktion 15. Die Prozessoreinheit 3 führt den MPC-Algorithmus 13 aus und ermittelt dabei Trajektorien des ersten Kraftfahrzeugs 1 basierend auf dem Längsdynamikmodell 14, sodass die Kostenfunktion 15 minimiert wird.

[0023] Als Output der Optimierung durch den MPC-Algorithmus 13 können sich beispielsweise eine optimale Drehzahl und ein optimales Drehmoment der elektrischen Maschine 8 für Diskretisierungspunkte im Vorausschauhorizont ergeben. Die Prozessoreinheit 3 kann dazu eine Eingangsgröße für die elektrische Maschine 8 ermitteln, sodass sich die optimale Drehzahl und das optimale Drehmoment einstellen. Die Prozessoreinheit 3 kann die elektrische

Maschine 8 basierend auf der ermittelten Eingangsgröße steuern. Weiterhin kann dies jedoch auch durch das Fahrerassistenzsystem 16 erfolgen.

[0024] Die Erfassungseinheit 6 kann aktuelle Zustandsgrößen des ersten Kraftfahrzeugs 1 messen, entsprechende Daten aufnehmen und dem MPC-Algorithmus 13 zuführen. Weiterhin können Streckendaten aus einer elektronischen Karte für einen Vorausschauhorizont bzw. Prädiktionshorizont (z.B. 400 m) vor dem Kraftfahrzeug 1 insbesondere zyklisch upgedated bzw. aktualisiert werden. Die Streckendaten können beispielsweise Steigungsinformationen, Kurveninformationen, und Informationen über Geschwindigkeitslimits beinhalten. Des Weiteren kann eine Kurvenkrümmung über eine maximal zulässige Querschleunigung in ein Geschwindigkeitslimit für das Kraftfahrzeug 1 umgerechnet werden. Außerdem kann mittels der Erfassungseinheit 6 eine Ortung des ersten Kraftfahrzeugs 1 erfolgen, insbesondere über ein von einem GNSS-Sensor 12 generiertes Signal zur genauen Lokalisierung auf der elektronischen Karte. Ferner kann die Erfassungseinheit 6 insbesondere zur Ermittlung der Position und/oder Geschwindigkeit von sich in einem äußeren Umgebungsbereich des ersten Fahrzeugs 1 befindlichen anderen Fahrzeugen 18 einen Radar-Sensor 22 aufweisen. Die Prozessoreinheit 3 kann auf Informationen der genannten Elemente beispielsweise über die Kommunikations-Schnittstelle 5 zugreifen. Diese Informationen können in das Längsmodell 14 des Kraftfahrzeugs 1 einfließen, insbesondere als Beschränkungen oder Nebenbedingungen.

[0025] Das stark vereinfachte zweidimensionale (Dimensionen x , y) Beispiel nach **Fig. 2** zeigt das erste Kraftfahrzeug 1 auf der Straße 21. Das erste Kraftfahrzeug 1 fährt unterstützt durch die vorstehend beschriebene Fahrerassistenzfunktion autonom mit einer ersten Geschwindigkeit v_1 in der ersten Fahrtrichtung x_1 . Das zweite Kraftfahrzeug 18 fährt mit einer zweiten Geschwindigkeit v_2 in der zweiten Fahrtrichtung x_2 . In dem gezeigten Ausführungsbeispiel verläuft die Straße 21 gerade und die erste Fahrtrichtung x_1 des ersten Kraftfahrzeugs 1 verläuft entgegengesetzt zu der zweiten Fahrtrichtung x_2 des zweiten Kraftfahrzeugs 18. Dies ist jedoch rein beispielhaft und nicht zwingend. Die erste Geschwindigkeit v_1 des ersten Kraftfahrzeugs 1 kann der zweiten Geschwindigkeit v_2 des zweiten Kraftfahrzeugs 18 entsprechen ($v_1 = v_2$), was jedoch ebenfalls rein beispielhaft und nicht zwingend ist. Die erste Geschwindigkeit v_1 des ersten Kraftfahrzeugs 1 kann auch von der zweiten Geschwindigkeit v_2 des zweiten Kraftfahrzeugs 18 abweichen ($v_1 \neq v_2$).

[0026] Die Ampel 23 kann beispielsweise abwechselnd die Wechsellichtzeichen „grün“ g und „rot“ r anzeigen. Auch das Anzeigen des Wechsellichtzei-

chens „gelb“ ist möglich. Gelbphasen und Rotgelbphasen werden typischerweise der Rotphase r zugeordnet, sodass nur von zwei Phasen gesprochen wird. Es gibt aber auch Ansätze, einen Umschaltzeitpunkt nach der halben Zeit der Gelb- und Gelbrotphasen zu allokalieren. Beide Ansätze sind mit dem hier beschriebenen Verfahren bzw. System realisierbar. Die Ampel 23 kann eine Prozessoreinheit 3' und eine Kommunikationsschnittstelle 5' umfassen. Mittels ihrer Kommunikationsstelle 5' kann die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 in einem ersten Verfahrensschritt 100 (**Fig. 3**) einen Umschaltzeitpunkt t_{switch} (vgl. insbesondere **Fig. 4** bis **Fig. 6**) an die Prozessoreinheiten 3 des ersten Fahrzeugs 1 und des zweiten Fahrzeugs 18 übermitteln, z.B. dass die Ampel 23 in 5 Sekunden von „rot“ auf „grün“ umschaltet.

[0027] Die Prozessoreinheit 3 des ersten Fahrzeugs 1 führt in einem zweiten Verfahrensschritt 200 (**Fig. 3**) den MPC-Algorithmus 13 des MPC-Systems 2 des ersten Fahrzeugs 1 aus und ermittelt dabei basierend auf dem Längsdynamikmodell 14 für das erste Fahrzeug 1 und unter Minimierung der Kostenfunktion 15 des MPC-Algorithmus' 13 des MPC-Systems 2 des ersten Fahrzeugs 1 eine Sekundärtrajektorie T_{2_v1} des ersten Fahrzeugs 1 bzw. für das erste Fahrzeug 1 sowie einen individuellen Kostenwert, welchen die Kostenfunktion 15 für die Sekundärtrajektorie T_{2_v1} des ersten Fahrzeugs 1 annimmt. Bei der Sekundärtrajektorie T_{2_v1} handelt es sich insbesondere um eine Geschwindigkeitstrajektorie des ersten Fahrzeugs 1. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel wird dieser individuell für die Sekundärtrajektorie T_{2_v1} des ersten Fahrzeugs 1 berechnete Kostenwert als Sekundärkostenwert C_{2_v1} des ersten Fahrzeugs 1 bezeichnet. Zur Ermittlung bzw. Berechnung der Sekundärtrajektorie T_{2_v1} des ersten Fahrzeugs 1 wird der Umschaltzeitpunkt t_{switch} derart berücksichtigt, dass der Lösungsraum auf diejenigen Trajektorien eingeschränkt bzw. beschränkt wird, bei denen das erste Fahrzeug 1 die Straßenkreuzung 24 während einer Grünphase der Ampel 23 durchfahren kann.

[0028] Analog führt die Prozessoreinheit 3 des zweiten Fahrzeugs 1 in dem zweiten Verfahrensschritt 200 (**Fig. 3**) den MPC-Algorithmus 13 des MPC-Systems 2 des zweiten Fahrzeugs 18 aus und ermittelt dabei basierend auf dem Längsdynamikmodell 14 für das zweite Fahrzeug 18 und unter Minimierung der Kostenfunktion 15 des MPC-Algorithmus' 13 des MPC-Systems 2 des zweiten Fahrzeugs 18 eine Sekundärtrajektorie T_{2_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 bzw. für das erste Fahrzeug 18 sowie einen individuellen Kostenwert, welchen die Kostenfunktion 15 für die Sekundärtrajektorie T_{2_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 annimmt. Bei der Sekundärtrajektorie T_{2_v2} handelt es sich insbesondere um eine Geschwindigkeitstrajektorie des zweiten Fahrzeugs

18. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel wird dieser individuell für die Sekundärtrajektorie T_{2_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 berechnete Kostenwert als Sekundärkostenwert C_{2_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 bezeichnet. Zur Ermittlung bzw. Berechnung der Sekundärtrajektorie T_{2_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 wird der Umschaltzeitpunkt t_{switch} derart berücksichtigt, dass der Lösungsraum auf diejenigen Trajektorien eingeschränkt bzw. beschränkt wird, bei denen das zweite Fahrzeug 18 die Straßenkreuzung 24 während einer Grünphase der Ampel 23 durchfahren kann.

[0029] Die Prozessoreinheit 3 des ersten Fahrzeugs 1 führt in einem dritten Verfahrensschritt 300 (**Fig. 3**) den MPC-Algorithmus 13 des MPC-Systems 2 des ersten Fahrzeugs 1 erneut aus (zusätzlicher Solveraufruf) und ermittelt dabei basierend auf dem Längsdynamikmodell 14 des ersten Fahrzeugs 1 und unter Minimierung der Kostenfunktion 15 des MPC-Algorithmus' 13 des MPC-Systems 2 des ersten Fahrzeugs 1 eine Primärtrajektorie T_{1_v1} des ersten Fahrzeugs 1 bzw. für das erste Fahrzeug 1 sowie einen individuellen Kostenwert, welchen die Kostenfunktion 15 für die Primärtrajektorie T_{1_v1} des ersten Fahrzeugs 1 annimmt. Bei der Primärtrajektorie T_{1_v1} handelt es sich insbesondere um eine Geschwindigkeitstrajektorie des ersten Fahrzeugs 1. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel wird dieser individuell für die Primärtrajektorie T_{1_v1} des ersten Fahrzeugs 1 berechnete Kostenwert als Primärkostenwert C_{1_v1} des ersten Fahrzeugs 1 bezeichnet. Zur Ermittlung bzw. Berechnung der Primärtrajektorie T_{1_v1} des ersten Fahrzeugs 1 wird der Umschaltzeitpunkt t_{switch} nicht berücksichtigt, sodass der Lösungsraum nicht auf diejenigen Trajektorien eingeschränkt bzw. beschränkt wird, bei denen das erste Fahrzeug 1 die Straßenkreuzung 24 während einer Grünphase der Ampel 23 durchfahren kann. Mit anderen Worten wird die Phasenschaltung der Ampel 23 zur Berechnung der Primärtrajektorie T_{1_v1} des ersten Fahrzeugs 1 außer Acht gelassen, sodass auch erlaubt ist, dass das erste Fahrzeug 1 die Ampel 23 während einer Rotphase überquert. Weiterhin wird in dem dritten Verfahrensschritt 300 eine theoretische Ankunftszeit $t_{\text{opt_arrival_v1}}$ (vgl. insbesondere **Fig. 4** bis **Fig. 6**) des ersten Fahrzeugs 1 an der Ampel 23 berechnet, und zwar unter der Voraussetzung, dass das erste Fahrzeug 1 seiner Primärtrajektorie T_{1_v1} folgt.

[0030] Analog führt die Prozessoreinheit 3 des zweiten Fahrzeugs 1 in dem dritten Verfahrensschritt 300 (**Fig. 3**) den MPC-Algorithmus 13 des MPC-Systems 2 des zweiten Fahrzeugs 18 erneut aus (zusätzlicher Solveraufruf) und ermittelt dabei basierend auf dem Längsdynamikmodell 14 des zweiten Fahrzeugs 18 und unter Minimierung der Kostenfunktion 15 des MPC-Algorithmus' 13 des MPC-Systems 2 des zweiten Fahrzeugs 18 eine Primärtrajektorie T_{1_v2} des

zweiten Fahrzeugs 18 bzw. für das zweite Fahrzeug 18 sowie einen individuellen Kostenwert, welchen die Kostenfunktion 15 für die Primärtrajektorie T_{1_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 annimmt. Bei der Primärtrajektorie T_{1_v2} handelt es sich insbesondere um eine Geschwindigkeitstrajektorie des zweiten Fahrzeugs 18. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel wird dieser individuell für die Primärtrajektorie T_{1_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 berechnete Kostenwert als Primärkostenwert C_{1_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 bezeichnet. Zur Ermittlung bzw. Berechnung der Primärtrajektorie T_{1_v2} des zweiten Fahrzeugs 18 wird der Umschaltzeitpunkt t_{switch} nicht berücksichtigt, sodass der Lösungsraum nicht auf diejenigen Trajektorien eingeschränkt bzw. beschränkt wird, bei denen das zweite Fahrzeug 18 die Straßenkreuzung 24 während einer Grünphase der Ampel 23 durchfahren kann. Mit anderen Worten wird die Phasenschaltung der Ampel 23 zur Berechnung der Primärtrajektorie T_{1_v2} des zweiten Fahrzeugs 1 außer Acht gelassen, sodass auch erlaubt ist, dass das zweite Fahrzeug 18 die Ampel 23 während einer Rotphase überquert. Weiterhin wird in dem dritten Verfahrensschritt 300 eine theoretische Ankunftszeit $t_{\text{opt_arrival_v2}}$ (vgl. insbesondere Fig. 4 bis Fig. 6) des zweiten Fahrzeugs 18 an der Ampel 23 berechnet unter der Voraussetzung, dass das zweite Fahrzeug 18 seiner Primärtrajektorie 28 folgt.

[0031] In einem vierten Verfahrensschritt 400 (Fig. 3) wird ein Opportunitätskostenwert für jedes der Fahrzeuge berechnet, in dem gezeigten Ausführungsbeispiel für das erste Fahrzeug 1 und für das zweite Fahrzeug 18. Diese Berechnung kann insbesondere durch das MPC-System 2 des jeweiligen Fahrzeugs 1, 18 erfolgen, wobei entsprechender Programmcode in dem MPC-Algorithmus 13 des MPC-Systems 2 des jeweiligen Fahrzeugs 1, 18 enthalten sein kann. Ein Opportunitätskostenwert $C_{\text{opp_v1}}$ des ersten Fahrzeugs 1 wird ermittelt, indem der Primärkostenwert C_{1_v1} (der beispielsweise den Wert „8“ annehmen kann) des ersten Fahrzeugs 1 von dem Sekundärkostenwert C_{2_v1} (der beispielsweise den Wert „10“ annehmen kann) des ersten Fahrzeugs 1 abgezogen wird. Somit nimmt der Opportunitätskostenwert für das erste Fahrzeug 1 in dem genannten Zahlenbeispiel den positiven Wert „2“ an ($C_{\text{opp_v1}} = C_{2_v1} - C_{1_v1} = 10 - 8 = 2$). Ein Opportunitätskostenwert $C_{\text{opp_v2}}$ des zweiten Fahrzeugs 18 wird analog ermittelt, indem der Primärkostenwert C_{1_v2} (der beispielsweise den Wert „9“ annehmen kann) des zweiten Fahrzeugs 18 von dem Sekundärkostenwert C_{2_v2} (der beispielsweise den Wert „10“ annehmen kann) des zweiten Fahrzeugs 18 abgezogen wird. Somit nimmt der Opportunitätskostenwert $C_{\text{opp_v2}}$ für das zweite Fahrzeug 18 in dem genannten Zahlenbeispiel den positiven Wert „1“ an ($C_{\text{opp_v2}} = C_{2_v2} - C_{1_v2} = 10 - 9 = 1$).

[0032] In einem fünften Verfahrensschritt 500 (Fig. 3) werden die Opportunitätskostenwerte $C_{\text{opp_v1}}$ und $C_{\text{opp_v2}}$ beider Fahrzeuge 1, 18 sowie die theoretischen Ankunftszeiten $t_{\text{opt_arrival_v1}}$ und $t_{\text{opt_arrival_v2}}$ beider Fahrzeuge 1, 18 an der Ampel 23 an die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 übermittelt, z.B. mittels der Kommunikations-Schnittstellen 5 der beiden Fahrzeuge 1, 18.

[0033] In einem sechsten Verfahrensschritt 600 wird jeweils ein linearer Opportunitätskostengraph für die beiden Fahrzeuge 1, 18 berechnet bzw. ermittelt. Die Berechnung der linearen Opportunitätskostengraphen erfolgt basierend auf den Opportunitätskostenwerten $C_{\text{opp_v1}}$ und $C_{\text{opp_v2}}$, den theoretischen Ankunftszeiten $t_{\text{opt_arrival_v1}}$ und $t_{\text{opt_arrival_v2}}$ an der Ampel 23 und dem Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23. So wird ein erster linearer Opportunitätskostengraph 25 für das erste Fahrzeug 1 basierend auf dem Opportunitätskostenwert $C_{\text{opp_v1}}$ des ersten Fahrzeugs 1, der theoretischen Ankunftszeit $t_{\text{opt_arrival_v1}}$ des ersten Fahrzeugs 1 an der Ampel 23 und basierend auf dem Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 berechnet. Analog wird ein zweiter linearer Opportunitätskostengraph 26 für das zweite Fahrzeug 18 basierend auf dem Opportunitätskostenwert $C_{\text{opp_v2}}$ des zweiten Fahrzeugs 18, der theoretischen Ankunftszeit $t_{\text{opt_arrival_v2}}$ des zweiten Fahrzeugs 18 an der Ampel 23 und basierend auf dem Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 berechnet.

[0034] Fig. 4 bis Fig. 6 zeigen jeweils Diagramme, deren x-Achse die Zeit t und deren y-Achse die Opportunitätskosten C_{opp} angeben. Dargestellt sind jeweils ein erster linearer Opportunitätskostengraph 25 für das erste Fahrzeug 1 und ein zweiter linearer Opportunitätskostengraph 26 für das zweite Fahrzeug 18. Die linearen Opportunitätskostengraphen 25, 26 folgen grundsätzlich der Formel $f(t) = m \cdot t + c$. Dabei ist m ein Steigungskoeffizient des jeweiligen Opportunitätskostengraphen 25, 26 und c ein Schnittpunkt des jeweiligen Opportunitätskostengraphen 25, 26 mit der Opportunitätskostenachse (y-Achse). Die theoretische Ankunftszeit $t_{\text{opt_arrival_v1}}$ des ersten Fahrzeugs 1 an der Ampel 23 entspricht einem Schnittpunkt des ersten linearen Opportunitätskostengraphen 25 mit der Zeitachse t . Die theoretische Ankunftszeit $t_{\text{opt_arrival_v2}}$ des zweiten Fahrzeugs 18 an der Ampel 23 entspricht einem Schnittpunkt des zweiten linearen Opportunitätskostengraphen 26 mit der Zeitachse t . Der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 liegt im Ursprung bzw. im Nullpunkt des x/y-Koordinatensystems, d.h. dort, wo die Opportunitätskostenachse die Zeitachse schneidet. Der erste lineare Opportunitätskostengraph 25 für das erste Fahrzeug 1 und der zweite lineare Opportunitätskostengraph 26 für das zweite Fahrzeug 18 bzw. eine Verlängerung der beiden Graphen 25, 26 schneiden sich jeweils in einem Graphenschnittpunkt 27 mit dem Zeitwert t_{schnitt} .

[0035] In einem siebten Verfahrensschritt 700 vergleicht die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 einen Betrag eines ersten Steigungskoeffizienten m_1 des ersten Opportunitätskostengraphs 25 mit einem Betrag eines zweiten Steigungskoeffizienten m_2 des zweiten Opportunitätskostengraphs 26, was zu einem ersten Vergleichsergebnis führt. Weiterhin vergleicht die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 den Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 mit dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27, was zu einem zweiten Vergleichsergebnis führt. Basierend auf dem ersten Vergleichsergebnis und basierend auf dem zweiten Vergleichsergebnis ermittelt die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 in einem achten Verfahrensschritt 800 einen neuen Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 bzw. für die Ampel 23.

[0036] Fig. 4 zeigt ein erstes Beispiel, wie sich der neue Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 ergeben kann. In dem durch Fig. 4 gezeigten Beispiel verläuft der erste Opportunitätskostengraph 25 (mit einem positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1) steiler als der zweite Opportunitätskostengraph 26 (mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2). Somit ist der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 größer als der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten m_2 ($|m_1| > |m_2|$). Weiterhin liegt der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 zeitlich nach dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 ($t_{switch} > t_{schnitt}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| > |m_2|$ und $t_{switch} > t_{schnitt}$) legt die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 in dem achten Verfahrensschritt 800 fest, dass der neue Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 entspricht.

[0037] Fig. 5 zeigt ein zweites Beispiel, wie sich der neue Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 ergeben kann. In dem durch Fig. 5 gezeigten Beispiel verläuft der zweite Opportunitätskostengraph 26 (mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2) steiler als der erste Opportunitätskostengraph 25 (mit einem positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1). Somit ist der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten m_2 größer als der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 ($|m_1| < |m_2|$). Weiterhin liegt der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 zeitlich vor dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 ($t_{switch} < t_{schnitt}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| < |m_2|$ und $t_{switch} < t_{schnitt}$) legt die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 in dem achten Verfahrensschritt 800 fest, dass der neue Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 entspricht.

[0038] Fig. 6 zeigt ein drittes Beispiel, wie sich der neue Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 ergeben kann. In dem durch Fig. 6 gezeigten Bei-

spiel verläuft der erste Opportunitätskostengraph 25 (mit einem positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1) steiler als der zweite Opportunitätskostengraph 26 (mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2). Somit ist der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 größer als der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten m_2 ($|m_1| > |m_2|$). Weiterhin liegt der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 zeitlich vor dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 ($t_{switch} < t_{schnitt}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| > |m_2|$ und $t_{switch} < t_{schnitt}$) legt die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 in dem achten Verfahrensschritt 800 fest, dass der neue Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 sich wie folgt ergibt: Zu dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} wird die Differenz aus dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 und dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} addiert, wobei diese Differenz durch einen Divisor d geteilt wird. In einer Formel ausgedrückt ergibt sich daher für den neuen Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} Folgendes:

$$t_{switch_new} = t_{switch} + \frac{t_{schnitt} - t_{switch}}{d}$$

[0039] Der Divisor d wird auf einen Wert gesetzt, der größer als 1 ist, um das sogenannte Togglen des Systems zu verhindern. In dem durch Fig. 6 gezeigten Ausführungsbeispiel wird $d = 2$ festgelegt. Durch die Wahl dieses Divisors d werden die Ziele im Fall eines Zielkonflikts mit 2:1 zu Gunsten der Summeneffizienz gewichtet.

[0040] Das dritte Beispiel nach Fig. 6 kann derart abgewandelt werden, dass der zweite Opportunitätskostengraph 26 (mit einem negativen zweiten Steigungskoeffizienten m_2) steiler als der der Opportunitätskostengraph 25 (mit einem positiven ersten Steigungskoeffizienten m_1) verläuft. Somit ist der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten m_2 größer als der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten m_1 ($|m_1| < |m_2|$). Weiterhin liegt der Umschaltzeitpunkt t_{switch} der Ampel 23 zeitlich nach dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 (vgl. Fig. 4; $t_{switch} > t_{schnitt}$). Basierend auf diesen beiden Vergleichsergebnissen ($|m_1| < |m_2|$ und $t_{switch} > t_{schnitt}$) legt die Prozessoreinheit 3' der Ampel 23 in dem achten Verfahrensschritt 800 fest, dass der neue Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} der Ampel 23 sich wie folgt ergibt: Von dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} wird die Differenz aus dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt t_{switch} und dem Zeitwert $t_{schnitt}$ des Graphenschnittpunkts 27 subtrahiert, wobei diese Differenz durch einen Divisor d geteilt wird. In einer Formel ausgedrückt ergibt sich daher für den neuen Umschaltzeitpunkt t_{switch_new} Folgendes:

$$t_{switch_new} = t_{switch} - \frac{t_{switch} - t_{schnitt}}{d}$$

[0041] Der Divisor d wird auf einen Wert gesetzt, der größer als 1 ist, um das sogenannte Togglen des Systems zu verhindern. In dem durch **Fig. 6** gezeigten Ausführungsbeispiel wird d = 2 festgelegt. Durch die Wahl dieses Divisors d werden die Ziele im Fall eines Zielkonflikts mit 2:1 zu Gunsten der Summeffizienz gewichtet.

		V ₁	Geschwindigkeit des ersten Fahrzeugs
		V ₂	Geschwindigkeit des zweiten Fahrzeugs
		x ₁	Fahrtrichtung des ersten Fahrzeugs
		x ₂	Fahrtrichtung des zweiten Fahrzeugs
		1	erstes Fahrzeug
	Bezugszeichen	2	MPC-System
C _{1_v1}	Primärkostenwert des ersten Fahrzeugs	3	Prozessoreinheit des ersten Fahrzeugs
C _{1_v2}	Primärkostenwert des zweiten Fahrzeugs	3'	Prozessoreinheit der Ampel
C _{2_v1}	Sekundärkostenwert des ersten Fahrzeugs	4	Speichereinheit
C _{2_v2}	Sekundärkostenwert des zweiten Fahrzeugs	5	Kommunikationsschnittstelle
C _{opp_v1}	Opportunitätskostenwert des ersten Fahrzeugs	5'	Kommunikationsschnittstelle der Ampel
		6	Erfassungseinheit
C _{opp_v2}	Opportunitätskostenwert des zweiten Fahrzeugs	7	Antriebsstrang
		8	elektrische Maschine
		9	Batterie
g	Wechsellichtzeichen grün	10	Getriebe
		11	Computerprogrammprodukt
r	Wechsellichtzeichen rot	12	GNSS-Sensor
T _{1_v1}	Primärtrajektorie des ersten Fahrzeugs	13	MPC-Algorithmus
T _{1_v2}	Primärtrajektorie des zweiten Fahrzeugs	14	Längsdynamikmodell
T _{2_v1}	Sekundärtrajektorie des ersten Fahrzeugs	15	Kostenfunktion
T _{2_v2}	Sekundärtrajektorie des zweiten Fahrzeugs	16	Fahrerassistenzsystem
t _{opt_arrival_v1}	Ankunftszeit des ersten Fahrzeugs an der Ampel	17	Verbrennungskraftmotor
		18	zweites Fahrzeug
		19	Prozessoreinheit des Fahrerassistenzsystems
t _{opt_arrival_v2}	Ankunftszeit des zweiten Fahrzeugs an der Ampel	20	Kommunikationsschnittstelle des Fahrerassistenzsystems
t _{schnitt}	Zeitwert Schnittpunkt der Opportunitätskostengraphen	21	Straße
t _{switch}	Umschaltzeitpunkt der Ampel	22	Radarsensor
		23	Ampel
t _{switch_new}	neuer Umschaltzeitpunkt der Ampel	24	Straßenkreuzung

25	erster linearer Opportunitätskostengraph	opp_v1, C_opp_v2) der beiden Fahrzeuge (1, 18) in die Ermittlung des neuen Umschaltpunktes (t_switch_new) der Ampel (23) einfließen und
26	zweiter linearer Opportunitätskostengraph	- die Opportunitätskostenwerte (C_opp_v1, C_opp_v2) der beiden Fahrzeuge (1, 18) berechnet werden, indem jeweils der Kostenwert (C_1_v1, C_1_v2) der Primärtrajektorie (T_1_v1, T_1_v2) von dem Kostenwert (C_1_v1, C_1_v2) der Sekundärtrajektorie (T_2_v1, T_2_v2) subtrahiert wird.
27	Graphenschnittpunkt	
100 bis 800	Verfahrensschritte	

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung eines Umschaltzeitpunktes einer Ampel, wobei ein erstes Fahrzeug (1) und ein zweites Fahrzeug (18) jeweils einer durch modellbasierte prädiktive Regelung ermittelten Trajektorie folgen und aus unterschiedlichen Richtungen kommend auf dieselbe Ampel (23) zu fahren, das Verfahren umfassend die Schritte

- Ermitteln eines Umschaltpunktes (t_switch) der Ampel (23),

- Ermitteln von Primärtrajektorien (T_1_v1, T_1_v2) und Sekundärtrajektorien (T_2_v1, T_2_v2) des ersten Fahrzeugs (1) und des zweiten Fahrzeugs (18), wobei

- die Primärtrajektorien (T_1_v1, T_1_v2) und Sekundärtrajektorien (T_2_v1, T_2_v2) jeweils mittels einer modellbasierten Prädiktion ermittelt werden, sodass jeweils eine Kostenfunktion (15) minimiert wird, die für jede der Primärtrajektorien (T_1_v1, T_1_v2) und Sekundärtrajektorien (T_2_v1, T_2_v2) einen individuellen Kostenwert (C_1_v1, C_2_v1; C_1_v2, C_2_v2) annimmt,

- der Umschaltpunkt (t_switch) der Ampel (23) einen Lösungsraum für das Ermitteln der Primärtrajektorien (T_1_v1, T_1_v2) der beiden Fahrzeuge (1, 18) nicht verkleinert,

- der Umschaltpunkt (t_switch) der Ampel (23) einen Lösungsraum für das Ermitteln der Sekundärtrajektorien (T_2_v1, T_2_v2) der beiden Fahrzeuge (1, 18) derart verkleinert, dass die beiden Fahrzeuge (1, 18) gemäß der ermittelten Sekundärtrajektorie (31) einen Bereich (24), innerhalb welchem sich die Ampel (23) befindet, ausschließlich während einer Grünphase der Ampel (23) durchfahren,

- Ermitteln von theoretischen Ankunftszeiten (t_opt_arrival_v1, t_opt_arrival_v1) beider Fahrzeuge (1, 18) an der Ampel (23) unter der Voraussetzung, dass beide Fahrzeuge (1, 18) ihrer jeweiligen Primärtrajektorie (T_1_v1, T_1_v2) folgen,

- Ermitteln eines neuen Umschaltpunktes (t_switch_new) der Ampel (23) basierend auf

- den individuellen Kostenwerten (C_1_v1, C_2_v1; C_1_v2, C_2_v2) der Primärtrajektorien (T_1_v1, T_1_v2) und der Sekundärtrajektorien (T_2_v1, T_2_v2) beider Fahrzeuge (1, 18) und

- dem Umschaltpunkt (t_switch) der Ampel (23) und den ermittelten theoretischen Ankunftszeiten (t_opt_arrival_v1, t_opt_arrival_v1) beider Fahrzeuge (1, 18) an der Ampel (23).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei

- die individuellen Kostenwerte (C_1_v1, C_2_v1; C_1_v2, C_2_v2) in Form von Opportunitätskostenwerten (C

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei

- ein erster linearer Opportunitätskostengraph (25) mit einer ersten Steigung (m_1) für das erste Fahrzeug (1) und ein zweiter Opportunitätskostengraph (26) mit einer zweiten Steigung (m_2) für das zweite Fahrzeug (18) ermittelt werden,

- die beiden Opportunitätskostengraphen (25, 26) basierend auf den Opportunitätskostenwerten (C_opp_v1, C_opp_v2) der beiden Fahrzeuge (1, 18), den theoretischen Ankunftszeiten (t_opt_arrival_v1, t_opt_arrival_v1) der beiden Fahrzeuge (1, 18) an der Ampel (23) und basierend auf dem Umschaltzeitpunkt (t_switch) der Ampel (23) ermittelt werden,

- der neue Umschaltpunkt (t_switch_new) der Ampel (23) basierend auf einem Vergleich der ersten Steigung (m_1) mit der zweiten Steigung (m_2) sowie basierend auf einem Vergleich eines Schnittpunktes (t_schnitt) des ersten Opportunitätskostengraphen (25) mit dem zweiten Opportunitätskostengraphen (26) ermittelt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei der Umschaltzeitpunkt (t_switch_new) der Ampel (23) ermittelt wird, indem der (Zeitwert t_schnitt) des Graphenschnittpunkts (27) als der neue Umschaltzeitpunkt (t_switch_new) der Ampel (23) festgelegt wird, wenn

- der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten (m_1) größer ist als der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten (m_2) und

- der Umschaltzeitpunkt (t_switch) der Ampel (23) zeitlich nach dem Zeitwert (t_schnitt) des Graphenschnittpunkts (27) liegt.

5. Verfahren nach Anspruch 3, wobei der Umschaltzeitpunkt (t_switch_new) der Ampel (23) ermittelt wird, indem der (Zeitwert t_schnitt) des Graphenschnittpunkts (27) als der neue Umschaltzeitpunkt (t_switch_new) der Ampel (23) festgelegt wird, wenn

- der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten (m_2) größer ist als der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten (m_1) und

- der Umschaltzeitpunkt (t_switch) der Ampel (23) zeitlich vor dem Zeitwert (t_schnitt) des Graphenschnittpunkts (27) liegt.

6. Verfahren nach Anspruch 3, wobei der Umschaltzeitpunkt (t_switch_new) der Ampel (23) ermittelt wird, indem von dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt (t_switch) eine Differenz aus dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt (t_switch) und dem Zeitwert (t_schnitt)

des Graphenschnittpunkts (27) subtrahiert wird, wobei die Differenz ($t_{\text{switch}} - t_{\text{schnitt}}$) durch einen Divisor (d) geteilt wird, wenn

- der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten (m_2) größer ist als der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten (m_1) und
- der Umschaltzeitpunkt (t_{switch}) der Ampel (23) zeitlich nach dem Zeitwert (t_{schnitt}) des Graphenschnittpunkts (27) liegt.

7. Verfahren nach Anspruch 3, wobei der Umschaltzeitpunkt ($t_{\text{switch_new}}$) der Ampel (23) ermittelt wird, indem zu dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt (t_{switch}) eine Differenz aus dem Zeitwert (t_{schnitt}) des Graphenschnittpunkts (27) und dem ursprünglichen Umschaltzeitpunkt (t_{switch}) addiert wird, wobei die Differenz ($t_{\text{switch}} - t_{\text{schnitt}}$) durch einen Divisor (d) geteilt wird, wenn

- der Betrag des zweiten Steigungskoeffizienten (m_2) kleiner ist als der Betrag des ersten Steigungskoeffizienten (m_1) und
- der Umschaltzeitpunkt (t_{switch}) der Ampel (23) zeitlich vor dem Zeitwert (t_{schnitt}) des Graphenschnittpunkts (27) liegt.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, wobei für den Divisor ein Wert von größer als 1 festgelegt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei für den Divisor der Wert 2 festgelegt wird.

10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Verfahrensschritte in einer festgelegten Taktung wiederholt werden, während sich die beiden Fahrzeuge (1, 18) auf die Ampel (23) zubewegen.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

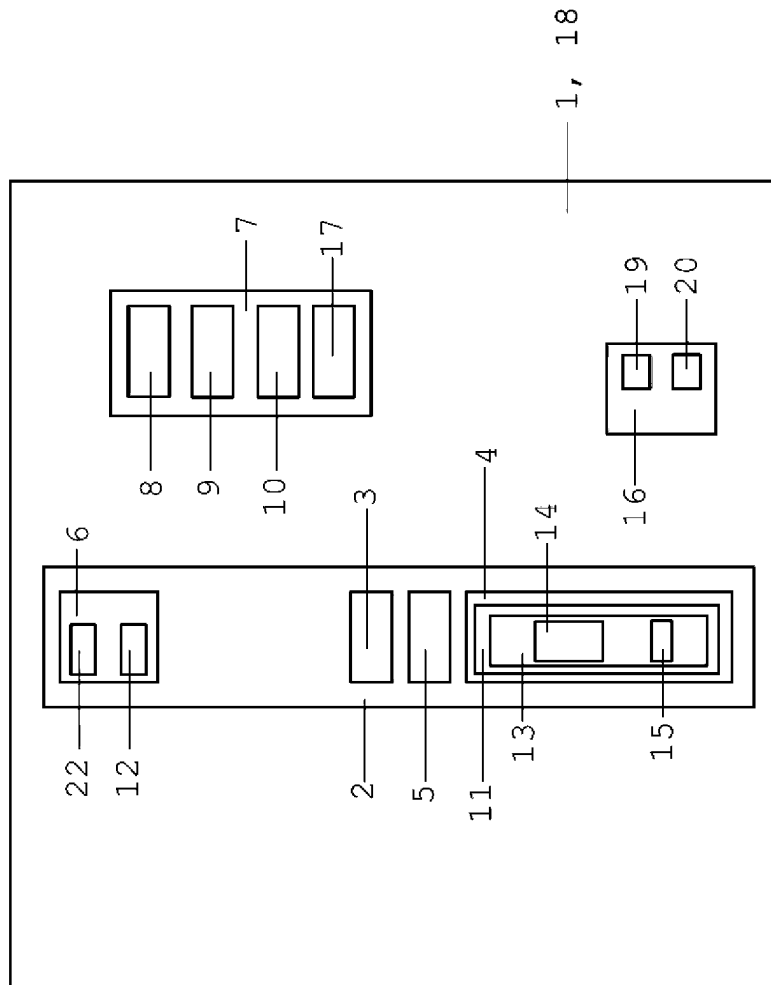


Fig. 2

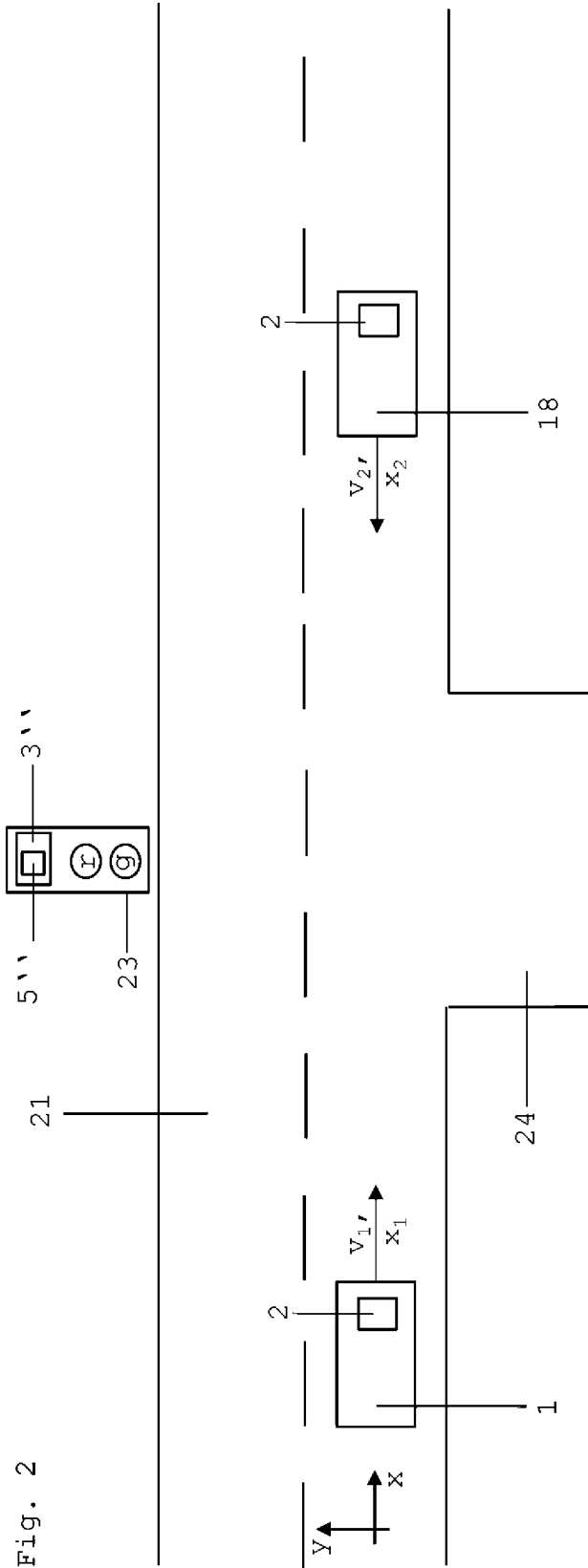


Fig. 3

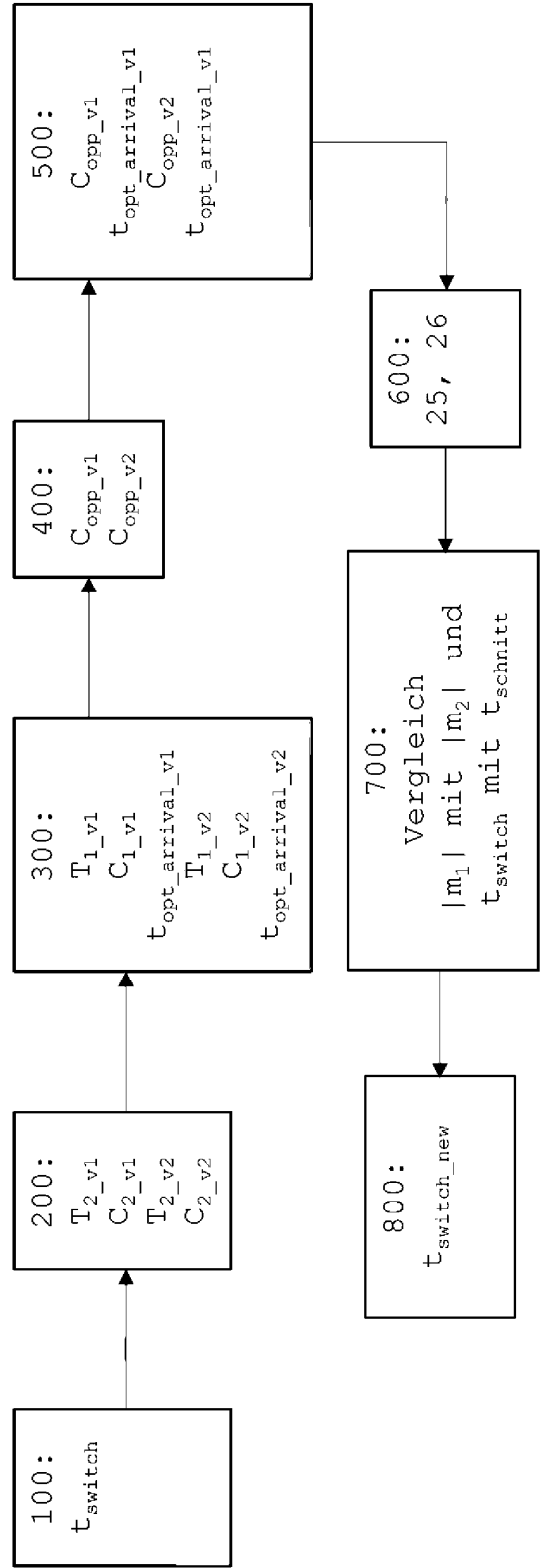


Fig. 4

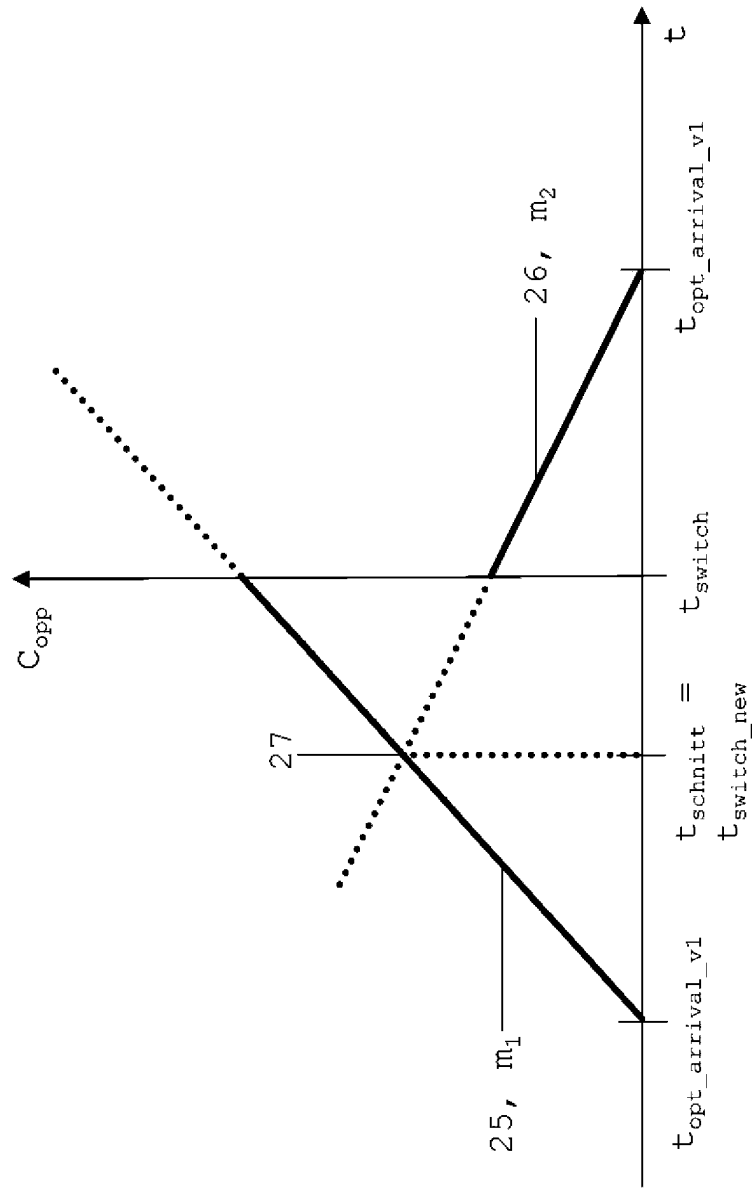


Fig. 5

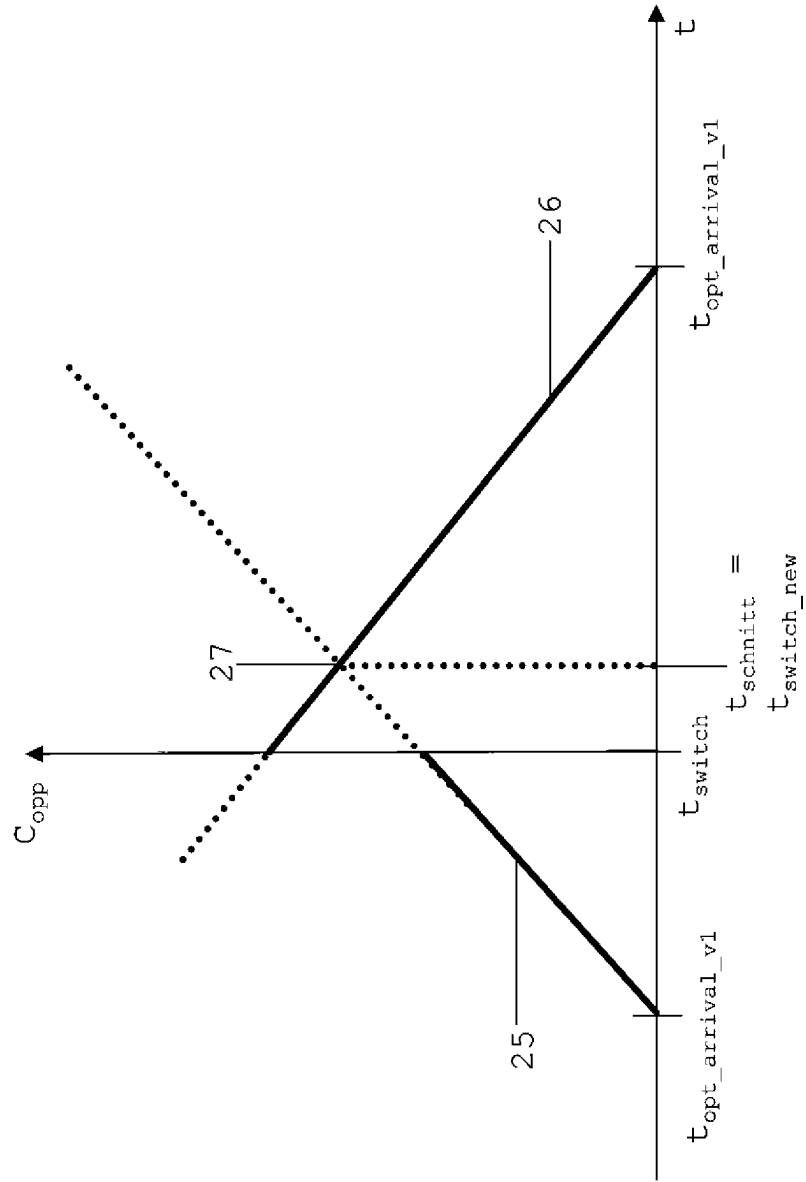


Fig. 6

