

(19)



(11)

EP 3 937 151 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
12.01.2022 Patentblatt 2022/02

(51) Int Cl.:
G08G 1/081 (2006.01) G08G 1/01 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **20184746.4**

(22) Anmeldetag: **08.07.2020**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(72) Erfinder:
• **Schneider, Patrick**
1050 Wien (AT)
• **Falkner, Andreas**
1140 Wien (AT)

(74) Vertreter: **Maier, Daniel Oliver**
Siemens AG
Postfach 22 16 34
80506 München (DE)

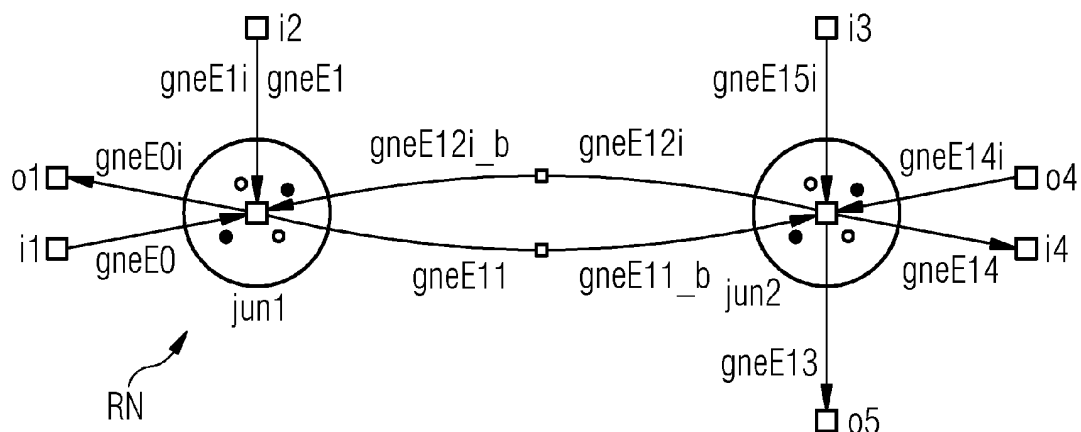
(71) Anmelder: **Siemens AG Österreich**
1210 Wien (AT)

(54) **VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR STEUERUNG EINES VERKEHRSFLUSSES IN EINEM VERKEHRSNETZ DURCH EINEN OPTIMALEN SIGNALPHASENPLAN**

(57) Verfahren zur Steuerung eines Verkehrsflusses in einem Verkehrsnetz (RN) durch einen optimalen Signalphasenplan (SPP), wobei das Verkehrsnetz (RN) durch einen Graphen (G_N) mit Knoten ($i1-i4, o1, o4, o5, jun1, jun2$), Kanten ($gneE0, gneE0i, gneE1, gneE1i, gneE11, gneE11_b, gneE12i, gneE12i_b, gneE13, gneE14, gneE14i, gneE15i$), Knoten-Beschriftungen, Kanten-Beschriftungen, Knoten-Durchsatz und Kanten-Kapazitäten in Form eines mesoskopischen Verkehrsfluss-modells beschrieben

wird, und ein erster, zeitabhängiger Simulationsfluss von Fahrzeuganzahlen sowie ein zweiter, zeitabhängiger Simulationsfluss von Signalphasen jeweils unter Berücksichtigung von Rahmenaxiomen und einer zeitlichen Abfolge bestimmt wird, wobei der optimale Signalphasenplan durch Anwendung von ASP auf den Graphen, den ersten Simulationsfluss und den zweiten Simulationsfluss durch eine Rechenvorrichtung ermittelt wird, und der optimale Signalphasenplan durch eine Steuervorrichtung mit Steuerelementen ausgeführt wird.

FIG 2



EP 3 937 151 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Steuerung eines Verkehrsflusses in einem Verkehrsnetz durch einen optimalen Signalphasenplan, wobei das Verkehrsnetz durch einen Graphen mit Knoten, Kanten, Knoten-Beschriftungen, Kanten-Beschriftungen, Knoten-Durchsatz und Kanten-Kapazitäten in Form eines mesoskopischen Verkehrsfluss-modells beschrieben wird, und ein erster, zeitabhängiger Simulationsfluss von Fahrzeuganzahlen sowie ein zweiter, zeitabhängiger Simulationsfluss von Signalphasen jeweils unter Berücksichtigung von Rahmenbedingungen und einer Abfolge von Simulations-Schritten bestimmt wird.

[0002] In der Verkehrsplanung für Verkehrsnetze kann es gewünscht sein, mehrere Verkehrs-Beeinflussungsanlagen, wie optische Signalanlagen, miteinander derart zu verknüpfen, sodass deren gemeinsame Ansteuerung einzelne Verkehrsflüsse beispielsweise hinsichtlich einer angestrebten maximalen Durchschnittsgeschwindigkeit optimiert.

[0003] Dabei kann aufgrund einer hohen Anzahl an Signalanlagen bei der Berechnung optimaler Signalphasen unter verschiedenen Rahmenbedingungen ein exponentiell steigender Aufwand entstehen, welcher entsprechende Rechenkapazitäten und Speicher benötigt.

[0004] Es ist die Aufgabe der Erfindung ein Verfahren bereitzustellen, welches den Rechenaufwand zur Ermittlung von optimalen Signalphasen gegenüber einer "off-the-shelf"-Lösung in einem mesoskopischen Modell verringert.

[0005] Die erfindungsgemäße Aufgabe wird durch ein Verfahren eingangs genannter Art gelöst, indem der optimale Signalphasenplan für das jeweilige mesoskopische Verkehrsfluss-Modell durch Anwendung von ASP auf den Graphen, den ersten Simulationsfluss und den zweiten Simulationsfluss durch eine Rechenvorrichtung ermittelt wird, und der optimale Signalphasenplan durch eine Steuervorrichtung mit Steuerelementen ausgeführt wird.

[0006] Dadurch wird erreicht, dass eine Kodierung des Verkehrsfluss-modells in "Answer Set Programming (ASP)" generiert werden kann, mit welchem insbesondere abstrakte Situationen konkreter Verkehrsflüsse in den "Answer Sets", die Modelle eines Programms, beschrieben werden können.

[0007] Auf diese Weise ist es möglich, auf eine abstrakte Weise Verkehrsströme zu ermitteln.

[0008] Die Abfolge von Simulations-Schritten bezieht sich vorzugsweise auf die zeitliche Abfolge.

[0009] Durch Anwendung von ASP bei der Bestimmung des optimalen Signalphasenplans mit einer Rechenvorrichtung lässt sich mit deutlich weniger erforderlichem Speicher ausführen. Die interne Arbeitsweise der Rechenvorrichtung kann dadurch erheblich verbessert werden und daher kann eine einfachere und kostengünstigere Rechenvorrichtung eingesetzt werden. Die Berechnung des optimalen Signalphasenplans kann folglich durch die Rechenvorrichtung wesentlich effizienter, schneller und kostengünstiger durchgeführt werden.

[0010] Mit anderen Worten erfolgt durch die Erfindung das Berechnen des optimalen Signalphasenplanes im mesoskopischen Modell unter der Berücksichtigung von einer definierten Optimierungsstrategie.

[0011] Außerdem erfolgt das Modellieren und Erfassen von solchen Strategien mit einer Regelsprache, wobei bestehende Strategien leicht erweitert oder neue Strategien definiert werden können.

[0012] In einer Weiterbildung der Erfindung ist es vorgesehen, dass eine Matrix, welche die Rot/Grünphasen eines Signalphasenplans repräsentiert, gebildet wird und folgende Schritte ausgeführt werden:

a) Entnehmen aller verbundener grünen Signalphasen für jede Fahrspur eines Kreuzung-Knotens aus der Matrix,

b) Schätzen einer Kürzung oder einer Verlängerung aus einem gewählten Einstell-Parameter,

c) Prüfen, ob die Schätzung die Bedingungen der Beziehungen erfüllt, falls ja, Anwenden der geschätzten Werte auf die jeweilige Signalphase.

[0013] Bei der Prüfung der Matrix können sicherheitstechnische Bedingung berücksichtigt werden, wie beispielsweise, dass gewisse Phasen nie gleichzeitig auf Grün geschaltet werden dürfen.

[0014] Dadurch wird auf eine einfache Weise eine Ausgangsmatrix für die Kodierung in ASP erzeugt, welche in speziellen Fällen eine bessere Lösung für die Kodierung in ASP erzielt, da sie speziell die Modellierungsleistung von ASP nützt.

[0015] Mit anderen Worten wird dadurch eine effiziente Optimierungs-Strategie angewendet.

[0016] In einer Weiterbildung der Erfindung ist es vorgesehen, dass zur Optimierung mittels ASP zumindest ein Qualitätsindikator bezüglich einer Anzahl an Fahrzeugen im Verkehrsnetz oder einer Anzahl von Zeitpunkten mit einem vorbestimmten Status, vorzugsweise mit dem Wert 1 für den Verkehrsfluss berücksichtigt wird.

[0017] Qualitätsindikatoren im mesoskopischen Modell, wie den Verkehrsdurchsatz oder die Anzahl Fahrzeug-Stopps, bilden die Grundlage für die Optimierung und können miteinander kombiniert werden, um besonders gute Ergebnisse bei der Anwendung der Strategien zu erreichen.

[0018] Die Erfindung wird auch durch eine Vorrichtung zur Steuerung eines Verkehrsflusses in einem Verkehrsnetz durch einen optimalen Signalphasenplan gelöst, umfassend eine Steuervorrichtung mit Steuerelementen und eine Re-

chenvorrichtung mit einem Speicher, wobei die Rechenvorrichtung dazu eingerichtet ist den optimalen Signalphasenplan durch das erfindungsgemäße Verfahren ermitteln und die Steuervorrichtung dazu eingerichtet ist, den optimalen Signalphasenplan auszuführen.

[0019] In einer Weiterbildung der Erfindung ist es vorgesehen, dass die Steuerelemente Verkehrs-Beeinflussungsanlagen wie Verkehrsampeln, dynamische Fahrspur-Sperranzeigen oder dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungsanlagen sind.

[0020] In einer Weiterbildung der Erfindung ist es vorgesehen, dass der optimale Signalphasenplan eine Konfiguration der Steuerelemente in Form von Verkehrsampeln betrifft, die im Verkehrsnetz eine grüne Welle in einer Verkehrsrichtung für Verkehrsteilnehmer ist.

[0021] Verkehrs-Beeinflussungsanlagen können beispielsweise statt optisch auch elektronisch signalisieren, beispielsweise durch Verwendung von Funktechnologie wie gemäß dem Standard IEEE 802.11p (WAVE) für ITS-G5 Anwendungen.

[0022] Verkehrsnetze können beispielsweise neben Straßennetzen auch Bahnnetze im Nah- und Fernverkehr sein.

[0023] Durch die Erfindung wird ein neues mesoskopisches Modell für den Verkehrsfluss bereitgestellt, welches erlaubt folgende Merkmale für eine Verkehrs-Signalisierung zu berücksichtigen:

- Knoten verschiedener Typen (Quell-, Link-, Schnittpunkt- und Senken-/Zielknoten),
- Verteilung von eingehenden zu ausgehenden Kanten über individuelle Raten und
- Verweigerungsbeschränkungen für (Kantenpaare) hinsichtlich des möglichen Status (insbesondere Signalphasen), um die Sicherheit zu gewährleisten.

[0024] Durch eine Codierung des Flussmodells in "Answer Set Programming" (ASP) können abstrakten Läufe konkreter Verkehrsflüsse in den Antwortsätzen der ASP-Codierung generieren werden. Auf diese Weise ist es möglich, sehr komplexe Verkehrsströme zu analysieren.

[0025] Für Konfigurationen von Signalphasenplänen (SPP) lassen sich mittels ASP-Codierung verschiedene Optimierungsstrategien generieren.

[0026] Es ist klar, dass die zuvor genannten Merkmale untereinander kombinierbar sind.

[0027] Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines in den beigefügten Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert. In den Zeichnungen zeigt:

Fig. 1 eine Darstellung eines Verkehrsmodells mit zwei Schnittpunkten im Simulationswerkzeug "SUMO",

Fig. 2 ein mesoskopisches Verkehrsfluss-Modell der Fig. 1,

Fig. 3 ein Berechnungsbeispiel für ein Verkehrsnetz,

Fig. 4 ein Beispiel für einen Signalisierungsplan,

Fig. 5 eine Matrix einer Kreuzung,

[0028] Zunächst werden allgemein die Eigenschaften der verwendeten Merkmale erläutert.

1. Allgemeines

1.1. Answer Set Programming

[0029] Zur Problemlösung und Optimierung kann das deklarative ASP-Paradigma (Answer Set Programming) eingesetzt werden, welches auf nicht-monotonen Logikprogrammen basiert, deren Kernregeln in folgender Form definiert sind:

$$a \leftarrow b_1, \dots, b_n, \text{ not } c_1, \dots, \text{ not } c_m$$

[0030] Wobei a und alle b_i, c_j Atome in einer Prädikatssprache erster Ordnung sind und "not" eine "schwache Negation" (engl. "negation as failure", NAF) ist.

[0031] Falls a fehlt, ergibt sich eine Einschränkung. Intuitiv kann auf a geschlossen werden, falls auf alle b_i und keine c_j gefolgert werden kann. Die stabilen Modelle, das heißt die "answer sets" eines Programms sind spezielle Herbrand Modelle, welche eine Fixpunkt Bedingung erfüllen.

[0032] In ASP werden Probleme zu Logikprogrammen P codiert, sodass die "answer sets" / deren Lösungen repräsentieren, beispielsweise durch "Raten und Prüfen", das heißt "Erzeugen und Testen".

[0033] Ein Logikprogramm P weist folgende Eigenschaften auf:

1. nicht deterministische Regeln mit nicht geschichteter Negation (oder Disjunktion in den Köpfen), um mögliche Lösungen zu generieren,
2. Einschränkungen, die prüfen, ob eine Kandidatenlösung geeignet ist, und
3. Hilfsregeln, die im ersten und zweiten Teil verwendet werden.

[0034] Optimale Lösungen können unter Verwendung spezieller Richtlinien bestimmt werden, beispielsweise *#maximize* V wählt eine Lösung, wobei V den größten Wert hat.

1.2. Verkehrsfluss-Modelle

[0035] Der Straßenverkehr kann grob anhand eines Verkehrsflusskonzepts beschrieben werden, welches anhand vordefinierter Variablen wie Geschwindigkeit und Dichte von Fahrzeugen an einem vordefinierten Ort über einen vordefinierten Zeitraum gemessen wird.

[0036] Der Verkehrsfluss selbst wird häufig durch die qualitativen Zustände des freien Flusses, des Staus und eines Zustands des synchronisierten Flusses beschrieben.

[0037] Vordefinierte Variablen können verwendet werden, um lokale (bzw. globale) Aspekte zu beschreiben, und als lokale (bzw. globale) Variablen bezeichnet werden.

[0038] Lokale Variablen werden an bestimmten Straßensegmenten und Zeitintervallen der Länge s_d oder der Zeitpunkte t gemessen, und können umfassen:

- Verkehrsfluss-Zähler:

$$q_s = \frac{n}{s_d}$$

wobei n die Anzahl an Fahrzeugen ist, die eine Kreuzung S während einer Zeitdauer s_d passieren.

- Durchschnittliche Geschwindigkeit:

$$s_X(t) = o$$

Wobei o die durchschnittliche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge auf einem Segment X zu einem bestimmten Zeitpunkt t ist.

[0039] Globale Variablen beschreiben das gesamte Netzwerk. Sie werden über einen längeren Zeitraum extrahiert und dienen als Grundlage für die Messung der Gesamtleistung, beispielsweise die Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrzeuge für einen Simulationslauf.

[0040] Ein leistungsfähigerer Ansatz, um Einblicke in die Verkehrskontrolle zu erhalten und Optimierung sind Verkehrsflussmodelle.

[0041] Eine gemeinsame Klassifizierung basiert auf der Repräsentationsdimension (Fahrzeug- oder Fluss-basiert) und der Granularität der Verhaltensregeln (mikroskopisch oder makroskopisch) .

Mesoskopische Verkehrsfluss-Modelle

[0042] Solche Modelle wurden entwickelt, um die Lücke zwischen makroskopischen und mikroskopischen Modellen zu schließen, in denen unterschiedliche Aggregationsebenen eingeführt werden, aber auch das Verhalten einzelner Fahrzeuge oder Verkehrssteuerungssysteme dargestellt werden.

[0043] Headway-Verteilungs-, Cluster- und Gas-Kinetik-Modelle können angewendet werden, um den mesoskopischen Fluss darzustellen.

2. Symbolisches Mesoskopisches Verkehrsfluss-Modell

[0044] Das weitere Modell umfasst die Elemente eines mikroskopischen und eines makroskopischen Verkehrsfluss-

Modells, wie beispielsweise:

1) das statische Verkehrsnetz und die Kreuzungstopologien,
 2) dynamische Zustände wie Fahrzeugzählungen und Signalphasenzustände sowie die Transformation von dynamischen Zuständen. Es besteht dementsprechend aus einer statischen Komponente, die das Straßennetz und die lokalen Topologien definiert, und einer dynamischen Komponente, die den Verkehrsfluss definiert, basierend auf

a) einem Zeitmodell unter Verwendung einer Zeitachse, Datenelementen von Aggregationen und Datenströmen,
 b) Verkehrsflusserzeugung für verschiedene Knotentypen, um die Anzahl der zu verschiedenen Zeitpunkten vorhandenen Fahrzeuge zu erfassen; und
 c) Signalphasenpläne, um die Erzeugung von Signalphasen zu verschiedenen Zeitpunkten zu erfassen.

[0045] Das Verkehrsfluss-Modell, sowie ein erfindungsgemäß ermittelter dynamischer Verkehrssteuerplan wie ein Signalphasenplan kann in einer entsprechenden Verkehrsfluss-Steuerungsvorrichtung, wie einer Ampel-Steuerung, in Form einer Software zur Ermittlung und Ansteuerung von Verkehrs-Beeinflussungsanlagen, beispielsweise für Ampeln, dynamische Fahrspur-Sperranzeigen oder dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungsanlagen eingesetzt werden.

2.1. Statischer Anteil

[0046] Das statische Verkehrsmodell beschreibt die Struktur des Straßennetzes einschließlich der Straßen, Fahrspuren, Kreuzungen, Kreuzungstopologien und Verkehrssteuerungsinstallationen wie Ampeln (engl. "traffic light", TL).

[0047] Verkehrssteuerungs-Installationen umfassen eine oder mehrere TL-Signalgruppen, welche von einer Ampelsteuerung verwaltet werden, die Signalphasen "rot" (für Stopp) und "grün" (für Start) ausgibt und zuweist.

[0048] Es ist sinnvoll, eine globale Ampelsteuerung einzusetzen, welche alle Kreuzungen verwaltet, wie in **Fig. 1** dargestellt.

[0049] Mehrere Ampeln TL1, TL2 in einem Straßennetz RN werden von einer Ampelsteuerung TLC (engl. "traffic light controller") angesteuert. Die Berechnung der Signalphasen erfolgt durch eine Rechenvorrichtung CD (engl. "calculation device") mit einem Speicher.

[0050] Die Signalphasen für jede Signalgruppe werden in einem "Standard"-Signalplan kodiert, in dem die grün/rot-Aufteilung einer vollen Phasenlänge definiert ist. Vereinfachenderweise ist jeder von zwei benachbarten eingehenden Fahrspuren eine Signalgruppe zugeordnet.

[0051] Für ein Straßennetz N mit mehreren Kreuzungen S kann für dessen statischen Anteil ein beschrifteter Graph G_N angegeben werden:

$$G_N = (V, E, l_V, l_E, R_V, C_V)$$

mit

$V...$ Knoten (engl. "vertex"): beschreiben reale (Kreuzungen) oder künstliche (Verbindungspunkte zu Gebieten außerhalb der Straßen) Kreuzungspunkte. Jeder Knoten $v \in V$ ist einem festen Typ $t_p \in \{src, snk, ins, lnk\}$ zugeordnet, bezeichnet durch $v:t_p$, mit

$src...$ Quellknoten (engl. "source")

$snk...$ Zielknoten (engl. "sink")

$ins...$ Kreuzungsknoten (engl. "intersection")

$lnk...$ Verbindungsknoten (engl. "link")

$E...$ Kante (engl. "edge"): entspricht ganzen Fahrspuren oder Segmenten von Fahrspuren und beschreibt den (möglichen) Verkehrsfluss im Straßennetz N durch Verbinden von Knoten.

$l_V...$ Knoten-Beschriftung (engl. "label"): stellt Kontext-Information bereit. Eine Funktion $l_V: V \rightarrow \mathbb{N}^+$ weist jedem Knoten eine "Flaschenhals"- oder "Engpass"-Kapazität zu und definiert dadurch den höchstmöglichen Durchfluss an Fahrzeugen zu einem einzelnen Zeitschritt.

$I_E \dots$ Kanten-Beschriftung: stellt Kontext-Information bereit. Eine Funktion μ weist jeder Kante eine "Aufnahme"-Kapazität zu und definiert dadurch eine höchstmögliche Kapazität an Fahrzeugen, die gleichzeitig an der Kante vorhanden sein können.

5 $R_V \dots$ Knoten-Beziehung (engl. "relation"): Eine Funktion $R_V \subseteq V \times E \times \mathbb{R}^+$ erfasst eine Verkehrsfluss-Verteilung, wobei $R_V = \{(v, e, w) | v \in V, v:ins, e = (v, v') \in E, 0 < w \leq 1\}$. Falls w nicht definiert ist, gibt es keinen Verkehrsfluss nach Außen zum Knoten e , und falls $w = 1$, so fließt der gesamte Verkehr zum Knoten e .
 Beispielsweise weist eine Kreuzung v_1 mit einer eingehenden Fahrspur $e_1 = (s_1, v_1)$ und zwei ausgehenden Fahrspuren $e_2 = (v_1, s_2)$ und $e_3 = (v_1, s_3)$ eine gerade Auftrennung des Verkehrsflusses auf, welcher durch $R_V = \{(v_1, e_2, 0.5), (v_1, e_3, 0.5)\}$ definiert ist.
 Die Beziehung $R_C \subseteq V \times E$ erfasst implizite Verweigerungsbeschränkungen (aus Sicherheitsgründen) für eine Kreuzung, um sicherzustellen, dass sich orthogonale Kreuzungsspuren nicht zum gleichen Zeitpunkt in einer grünen Phase befinden.

15 $C_V \dots$ Kanten-Kapazität (engl. "capacity")

Segmentierung.

20 **[0052]** Die statische Komponente wird durch Segmentierung aus einem bestimmten mikroskopischen Verkehrssimulationsmodell (wie z.B. das Simulationswerkzeug "SUMO") extrahiert, welches die Granularität des mesoskopischen Modelles und die Verlässlichkeit des berechneten Signalplanes beeinflusst.

[0053] Fig. 1 und Fig. 2 stellen einen einfachen Segmentierungsalgorithmus graphisch dar, welcher die folgenden Schritte umfasst:

- a) Gleichmäßiges Segmentieren des Straßennetzes, wie ganze Fahrspuren in einzelne Segmente gleicher Länge teilen,
- b) Reduzieren des Netzes auf gleich entfernte Kanten und Knoten, die den Graphen G_N darstellen,
- c) Erzeugen von Quell-/Senkenknoten (src, snk) für die Grenze des Netzwerks.

30 **[0054]** Der Schritt b) reduziert die Komplexität des Simulationsmodells wie folgt:

- b1) Reduziere jede Kreuzung ins zu einem einzelnen Knoten,
- b2) Generieren der Beziehung R_V aus der Schnittpunktopologie mit einer (Offline-) Verkehrsverteilungsstatistik zur Schätzung der Gewichte, und
- b3) Zusammenführen benachbarter eingehender bzw. ausgehender Fahrspuren zu einer einzelnen eingehenden bzw. ausgehenden Kante.

40 **[0055]** Die Fahrspuraufteilung in Schritt b1) ermöglicht es jeder Kante sowohl eine Basis-Kapazität, aber auch die aktuelle Verkehrsflusszahl für ein einheitliches Zeitintervall s_d zuzuweisen.

[0056] Die einheitliche Segmentierung ist diesen Ansatz von zentraler Bedeutung, da sie die Weitergabe des Datenverkehrs durch das Netzwerk in der dynamischen Komponente erheblich vereinfacht.

[0057] Fig. 1 zeigt dabei eine Darstellung von zwei Schnittpunkten in einem mikroskopischen Simulationswerkzeug SUMO und Fig. 2 ein mesoskopisches Verkehrsfluss-Modell der Fig. 1.

2.2. Dynamischer Anteil

[0058] Die Wirkung der dynamischen Komponente des Modells ist in Fig. 3 dargestellt. Sie erweitert die statische Komponente um zeitliche Informationen bezogen auf einzelne Simulationsschritte, auch Zeitpunkte genannt.

50 **[0059]** Das Beispiel zeigt für drei Berechnungsschritte für die Zeitpunkte T_1 , T_2 und T_3 .

[0060] Datenelemente mit der durchschnittlichen Geschwindigkeit $o = 3$ werden im Knoten $src1$ generiert und über den Knoten $lnk1$ zum Knoten $lnk2$ weitergegeben, wo sie aufgrund einer Engpasskapazität von 0 bis zur Belastbarkeitsgrenze von 10 gesammelt werden.

[0061] Die Weitergabe erfolgt über Kanten $src1-lnk1_I1$ beziehungsweise $lnk1-lnk2_I1$, für welche jeweilige maximale Kapazitäten definiert sind, die innerhalb eines rautenförmigen Symbols angegeben sind.

[0062] Ferner ist für jeden Knoten ein durchschnittlicher Durchsatz definiert, welcher jeweils innerhalb eines kreisförmigen Symbols angegeben ist.

[0063] Außerdem ist für jede Kante eine Anzahl an Fahrzeugen in einem Verkehrsfluss zu einem Zeitpunkt t festgelegt,

welcher jeweils innerhalb eines rechteckförmigen Felds angegeben ist. Mehrere Felder bilden eine Liste.

[0064] Die zeitliche Information besteht aus zwei Arten von Datenelementen, die sich in jedem Simulationsschritt ändern können. Zum einen sind die Anzahl der Fahrzeuge (NrV), das heißt die Anzahl der Fahrzeuge an einer bestimmten Kante, und zum anderen sind die Signalphasenzustände (engl. "signal phase states", SPS), das heißt der TL-Status bestimmter eingehender Fahrspuren auf (Kreuzungs-) Knoten zu einem bestimmten Zeitpunkt relevant.

Zeitmodell

[0065] Das zugrunde liegende Zeitmodell ist intervallbasiert und erfasst die Intervalllänge s_d (Dauer) eines einzelnen Simulationsschritts, die durch die Endzeit t_i des Simulationsschritts begrenzt ist.

[0066] Das verwendete Datenmodell ist jedoch punktbasiert und erfasst nur Zeitpunkte t_i wodurch ausgedrückt wird, dass ein Datenelement zwischen t_{i-1} und t_i gültig ist, wobei die Differenzdauer $s_d = t_i - t_{i-1}$ die Dauer ist.

[0067] Die Verwendung eines punktbasierten Modells führt nicht zu einem Informationsverlust, da eine einheitliche Segmentierung der Zeitachse angewandt wird, die nach Zeitpunkten erfasst werden kann.

[0068] Um die vollständige Verkehrssituation zu erfassen wird eine Zeitleiste $T = [0, l] \subset \mathbb{N}$ eingeführt, welche ein geschlossenes Intervall der Länge l ist, also sich auf eine Simulationslänge t_i bezieht.

[0069] Ein Simulationsfluss ist ein Paar $D = (T, f)$ der Zeitleiste T und einer Funktion $f: T \rightarrow 2^O$, welches zu jedem Element (Zeitpunkt) $t \in T$ eine Menge $f(t) \subseteq O$ von Datenpositionen zuweist, wobei O die Menge von Tupeln der Form

$\langle o, x \rangle$ ist, und $o \in \mathbb{R}$ und $x \in E$ ist.

[0070] Datenpositionen sind eine mögliche Abstraktionsform, wobei die Fahrzeuganzahl NrV oder Signalphasen (ausgedrückt durch Zahlen) über die Dauer s_d aggregiert werden.

[0071] Ein erster Simulationsfluss $D_{NrV} = (T, f_1)$ von Fahrzeuganzahlen weist für jede Funktion $f_1(i)$ Kantendatenpositionen auf. Auf diesem Weg wird die Fahrzeuganzahl NrV mit Kanten verbunden.

[0072] Ein zweiter Simulationsfluss $D_{SPS} = (T, f_2)$ von Signalphasenzuständen weist für jede Funktion $f_2(i)$ dementsprechend Kantendatenpositionen auf, wobei im Gegensatz zum ersten Simulationsfluss die beobachteten Werte o binäre Kodierungen der Signalzustände sind.

[0073] So entspricht "rot" dem Wert 0 und "grün" dem Wert 1.

[0074] Die Funktion $f_2(i)$ weist Datenpositionen $\langle o, e \rangle$ auf, wobei eine eingehende Kante $e = (v', v)$ zu einem Kreuzungsknoten v weist. Daher werden SPS Daten nur zu eingehenden Kanten einer Kreuzung zugewiesen, was die Absicht von Signalphasenplänen erfasst.

[0075] Zur Vereinfachung kann für die Bezeichnung der Funktion f_i die Notation $x@t$ verwendet werden, falls $x \in f_i(t)$, wie beispielsweise $\langle o_1, e_1 \rangle @ t_1$ und $\langle o_2, e_2 \rangle @ t_2$.

Berechnung des Verkehrsflusses

[0076] Die Berechnung des Verkehrsflusses (TF) dient dazu, Dynamik in das Modell zu bringen, indem der Fahrzeugfluss erfasst wird. Es werden NrV -Datenpositionen basierend auf den genannten Knoten generiert und zum nächsten Zeitpunkt Kanten im Netzwerk zugewiesen.

[0077] Abflussknoten spielen eine besondere Rolle und akkumulieren die eingehenden Datenelemente, generieren jedoch keine Datenelemente selbst.

[0078] Zu jedem Zeitpunkt t_i wird eine TF-Berechnung durchgeführt und für jede Kante $e_j \in E$ im Netzwerk werden die neuen Datenpositionen für den ersten Simulationsfluss D_{NrV} hinzugefügt.

[0079] Es basiert entweder auf den eingehenden Kanten (für Kreuzungs- und Verbindungsknoten) oder auf einer vordefinierten Generierungsfunktion (für Quellknoten).

[0080] Das Ergebnis der Berechnung jedes Knotens sind neue Datenpositionen, die an die ausgehenden Kanten weitergegeben werden und deren Status aktualisieren.

[0081] Der Zustand einer Kante wird durch die Menge von Datenpositionen erfasst, die zu einem bestimmten Zeitpunkt t_i an sie angehängt sind.

[0082] In der Fig. 2 ist das Verkehrsnetz RN der Fig. 1 als gerichteter Graph gezeigt, wobei Kreuzungen jun1, jun2, sowie Verkehrs-Eingänge i1, i2, i3, i4 und Verkehrs-Ausgänge o1, o4, o5 abgebildet sind.

[0083] Die Elemente sind über gerichtete Kanten gneE0, gneE0i, gneE1, gneE1i, gneE11, gneE11_b, gneE12i, gneE12i_b, gneE13, gneE14, gneE14i, gneE15i verbunden.

[0084] Fig. 3 zeigt drei Berechnungsschritte für drei Zeitpunkte, die durch die gepunkteten Pfeile dargestellt werden. Am einfachsten ist die Berechnung von Verbindungsknoten, da eine eingehende NrV -Datenposition eine einzelne ausgehende Datenposition generiert.

[0085] Kreuzungsknoten sind schwieriger zu handhaben, da eingehende Datenpositionen entsprechend den ausgehenden Kanten in mehr ausgehende Datenpositionen aufgeteilt werden müssen.

Quellknoten

[0086] Ein Quellknoten $v:src$ erzeugt für jeden Zeitpunkt NrV -Datenpositionen gemäß folgender Funktion:

$$f_{src}(v, e, t_j) = \langle \min(l_E(e), f_D(t_{j+1})), e \rangle @ t_{j+1}$$

wobei $e = (v, v')$ eine ausgehende Kante ist, und eine Werterzeugungsfunktion $f_D(t_{j+1})$ eine stochastische Funktion ist, welche basierend auf einem vordefinierten Verteilungsmodelles einen neuen Wert für jeden Zeitpunkt t_{j+1} erzeugt.

[0087] Der Zweck der Werterzeugungsfunktion $f_D(t_{j+1})$ ist die Replikation der Anforderungsmodellierungsfunktionalität von Verkehrssimulationen mit beispielsweise konstanter Erzeugung der gleichen NrV -Datenposition für jeden Zeitpunkt t_j .

Verbindungsknoten

[0088] Ein Verbindungsknoten $v:lnk$ leitet, ausgehend von einer Quellkante $e_1 = (v_1, v)$ zu einer Zielkante $e_2 = (v, v_2)$, eine NrV -Datenposition für jeden Simulationsschritt wie folgt weiter:

$$f_{lnk}(v, e_1, t_j) = \langle \min(l_V(v), l_E(e_2), f_{lnk'}(e_1, t_j)), e_2 \rangle @ t_{j+1}$$

[0089] Wobei die Funktion $f_{lnk'}(e_1, t_j)$ den Wert o in $\langle o, e \rangle @ t$ zurückgibt, welcher aus dem ersten Simulationsfluss D_{NrV} entnommen wurde.

[0090] Für Verbindungsknoten sind nur eingehende und ausgehende Kanten zulässig, ansonsten würde die Segmentierung eine Kreuzungsknoten erzeugen.

Kreuzungsknoten

[0091] Ein Kreuzungsknoten $v:ins$ aggregiert verschiedene NrV -Datenpositionen von eingehenden Kanten und verteilt diese zu ausgehenden Kanten gemäß vordefinierter Verhältnisse der Beziehung R_V .

[0092] Für jede ausgehende Kante $e = (v, v')$ des Kreuzungsknotens v kann angegeben werden:

$$f_{ins}(v, e, t_j) = \langle \min(l_V(v), l_E(e_2), f_{ins'}(v, e, t_j)), e \rangle @ t_{j+1}$$

mit

$$f_{ins'}(v, e, t_j) = \sum_{e_i=(v_i, v) \in E} \langle o_i, e_i \rangle @ t_j \cdot w_{v,e} \cdot f_{SPS}(v, e_i, S_v, t_j)$$

wobei $w_{v,e}$ durch $R_V(v, e, w_{v,e})$ gegeben ist.

[0093] Die Funktion $f_{ins'}$ wird angewandt, obwohl die Tupel $\langle o_i, e_i \rangle$ nicht zusammengefasst und multipliziert werden, sondern lediglich ihre Werte o_i .

[0094] Die Funktion f_{SPS} gibt das Signalzustands-Tupel mit $o'_i = 0$ oder $o'_i = 1$ für die Kante e_i zum Zeitpunkt t_j zurück und ignoriert somit eingehende Fahrspuren, die sich im Zustand 0 befinden.

[0095] Die Beziehung R_V ist wichtig, da sie die "Gewichte" für ausgehenden Werte definiert, die summiert werden. Es könnte auch zum temporären Schließen von Fahrspuren verwendet werden, indem die jeweiligen Gewichte auf 0 gesetzt werden.

Senkenknoten/Zielknoten

[0096] Ein Senkenknoten $v:snk$ generiert keine eigenen Werte, sondern sammelt zu jedem Zeitpunkt alle NrV -Daten-

position eingehender Kanten. Ziel ist es, die Anzahl der Fahrzeuge zu erfassen, die das Netzwerk verlassen haben.

[0097] Der Zielknoten erzeugt folgende Ergebnistupel:

$$f_{snk}(v, t_j) = \langle f_{snk'}(v, t_j), v \rangle @ t_{j+1}$$

mit

$$f_{snk'}(v, t_j) = \sum_{e_i=(v_i,v) \in E} \langle o_i, e_i \rangle @ t_j$$

[0098] Zielknoten spielen eine zentrale Rolle zur Berechnung von Modell-Qualitätsindikatoren, da der Nutzen eines verbesserten Signalplans unter Verwendung der akkumulierten Zielknoten bestimmt werden kann.

Erzeugung der Signalphasen

[0099] Ströme von Signalphasenzuständen (SPS) sind TF-Strömen ähnlich, berücksichtigen jedoch nur SPS-Datenelemente, das heißt von

$$O_{SPS} = \{ \langle o, e \rangle | o \in \{0,1\}, e = (v', v) \in E \wedge (v: ins) \in V \}$$

[0100] Signalphasenzustände, kurz Signalzustände, werden für alle Ampeln in Signalphasenplänen definiert, wobei jeder Kreuzung ein einzelner Plan zugewiesen ist, der alle Signalgruppen und Fahrspuren der Kreuzung abdeckt.

[0101] Fig. 4 zeigt ein Beispiel für einen Signalisierungsplan, wie dieser im Simulationswerkzeug SUMO verwendet wird.

[0102] Ein Plan bestimmt die Länge eines vollständigen Zyklus, welcher die Summe der Dauern ist, in diesem Beispiel 60.

[0103] Jeder Signalgruppenzustand wird in einem Zustand angezeigt, in dem "r" bzw. "g" steht für rote bzw. grüne Phasen für die Dauer.

[0104] Es ist zu beachten, dass bei dieser Codierung jede Position einem Index entspricht und den Zustand einer Signalgruppe zuweist, das heißt die erste Position definiert den Zustand der Signalgruppe für Fahrspur eins.

[0105] Der Plan zeigt auch implizite Einschränkungen, wie die Gruppen an den Positionen 1-4 und 5-12 nicht gleichzeitig grün sein sollten.

[0106] Daraus kann geschlossen werden, dass ein formaler Signalplan die folgenden Komponenten enthalten muss, wie eine feste Zykluslänge und eine Zeitleiste, die die Phasenzeit für jede Signalgruppe abdeckt, wobei die rot/grün-Zustände abwechselnde Zeitschlitze und eine Liste mit Paaren von Verweigerungsbeschränkungen (Fahrspurwechsel) aufweisen.

[0107] Formell kann ein Signalplan durch eine $n \times m$ Matrix S repräsentiert werden, wobei die Spalten n Zeitpunkte und die Zeilen m Fahrspuren sind. Zustände $s_{i,j}$ können entweder 0 (rote Phase) oder 1 (grüne Phase) sein.

[0108] Fig. 5 zeigt eine Matrix S_v einer Kreuzung v mit m eingehenden Fahrspuren über eine Simulationslänge n , wobei $t_1 \dots t_n$ Zeitpunkte und $l_1 \dots l_m$ Fahrspuren sind.

[0109] Der zur Kreuzung v dazugehörige Signalplanmatrix S_v kann auch durch eine Funktion dargestellt werden, welche die Kreuzung v mit irgendeiner eingehenden Kante $e = (v', v)$ mit einem Signalzustand zu einem spezifischen Zeitpunkt verknüpft:

$$f_{SPS}(v, S_v, e, t_j) = \langle pos(S_v, t_{j+1}, e), v, e \rangle @ t_{j+1}$$

wobei die Funktion $f_{SPS}(S_v, t, e)$ den Zustand (0 oder 1) von der Matrix S_v entnimmt, abhängig von der Position, das heißt der Lage des Zeitpunkts t und der Kante e in der Matrix S_v .

2.3. Rahmenaxiom und Reihenfolge der Auswertung

[0110] Die obigen Definitionen decken die Fälle ab, in denen "freier" Fluss von Fahrzeugen vorliegt.

[0111] Sie decken jedoch nicht den Fall ab, in dem aufgrund einer roten Signalphase oder einer in l_v definierten geringen Engpasskapazität keine oder weniger Bewegungen (in NrV-Datenposition) vorliegen.

[0112] Wenn dieser Fall nicht berücksichtigt wird, würden im nächsten Zeitschritt ein Verlust an *NrV*-Datenpositionen auftreten. Daher müssen auch *NrV*-Datenpositionen für Nichtbewegungen generiert werden.

[0113] Zu diesem Zweck werden zwei Funktionen f_{fr1} und f_{fr2} eingeführt, welche nicht verschobene *NrV*-Datenpositionen beibehalten.

[0114] Die Funktion f_{fr1} ist für einen ausgehenden Knoten $e(v',v)$ einer Kreuzung v und einer *NrV*-Datenposition $\langle o_N, e \rangle @ t_k$ wie folgt definiert:

$$f_{fr1}(e, v, o_N, t_k) = \begin{cases} \langle \min(0, o_N - l_V(v)), e \rangle @ t_{k+1} & \text{für } o_S = 1 \text{ von } \langle o_S, v \rangle @ t_{k+1} \\ \langle o_N, e \rangle @ t_{k+1} & \text{für } o_S = 0 \text{ von } \langle o_S, v \rangle @ t_{k+1} \end{cases}$$

[0115] Im ersten Fall ist die Signalphase grün, so wird die maximale *NrV*-Datenpositionen, die sich bewegen könnte, das heißt die Engpasskapazität, von der *NrV*-Datenposition bei t_k subtrahiert, um die verbleibende *NrV*-Datenposition bei t_{k+1} zu berechnen.

[0116] Im zweiten Fall ist die Signalphase rot, daher liegt keine Bewegung vor und die vorhandene *NrV*-Datenposition an der Kante e bei t_k ist immer noch an der Kante e bei t_k .

[0117] Die Funktion f_{fr2} ist geht in dieselbe Richtung für einen ausgehenden Knoten $e = (v',v)$ mit einem Kreuzungsknoten v und einer *NrV*-Datenposition $\langle o_N, e \rangle @ t_k$ definiert:

$$f_{fr2}(e, v, o_N, t_k) = \langle \min(0, o_N - l_V(v)), e \rangle @ t_{k+1}$$

[0118] Die oben genannten Funktionen ähneln Rahmenaxiomen in der logikbasierten KI-Planung: Sie decken die Fälle ab, in denen die Engpasskapazität von l_V den maximalen Fluss begrenzt.

[0119] Wenn der tatsächliche Durchfluss kleiner ist, da die Aufwärtsströmungskanten zum nächsten Zeitpunkt bereits gesättigt sind, gehen *NrV*-Datenposition verloren.

[0120] Dieser Verlust ist ein Effekt der Abstraktion in unserem mesoskopischen Modell, bei dem eine Sättigung nicht auf Abwärtskanten zurückfließt.

[0121] Das Hinzufügen des letzteren, das in mikroskopischen Modellen berücksichtigt wird kann, ist insbesondere bei zyklischen Verkehrsströmen eine Herausforderung.

[0122] Eine Anwendung der Funktionen f_{src} , f_{lnk} , f_{ins} , f_{fr1} und f_{fr2} über alle Knoten in V und Zeitpunkte in T , welche durch die Simulationslänge t_l begrenzt sind, führt zu einem Datenstrom:

$$D_{NrV} = \{ \langle o_1, e_1 \rangle @ t_1, \dots, \langle o_j, e_k \rangle @ t_l \}$$

[0123] Dementsprechend führt die Funktion f_{SPS} über alle Knoten in V und Zeitpunkte bis zu t_l zu einem Datenstrom:

$$D_{SPS} = \{ \langle o_1, e_1 \rangle @ t_1, \dots, \langle o_j, e_k \rangle @ t_l \}$$

[0124] Die einzige Anforderung in der Bewertungsreihenfolge der obigen Funktionen ist die zeitliche Reihenfolge, in der alle Funktionen des Zeitpunkts t_j ausgewertet werden, bevor die Funktionen von t_{j+1} beginnen.

3. ASP-basierte Problemlösung und Optimierung

[0125] Das mesoskopische Flussmodell beschreibt die Qualität eines Netzwerks mit einem festen Signalphasenplan (SPP), bei dem die Qualität über eine vordefinierte Anzahl von Zeitschritten berechnet wird, indem die Ziel-/Senkenknoten zum letzten Zeitpunkt zusammengefasst werden.

[0126] Dieses abstrakte Flussmodell enthält jedoch keine Strategie zur Verbesserung solcher Pläne, was zu unserem Hauptziel führen sollte, den Verkehrsfluss durch Anpassung der SPPs zu optimieren.

3.1. Allgemeine Strategien zur Problemlösung

[0127] Ein vollständiger Satz zugewiesener Zustände in der Matrix S_v für eine Kreuzung v wird als "SPP-Konfiguration" bezeichnet, wobei alle Zustände entweder 0 für Rot oder 1 für Grün sind. Lösungsstrategien zielen darauf ab, "gute" Kandidaten für SPP-Konfigurationen basierend auf der Matrix S_v unter den Bedingungen der Beziehungen R_C aus dem

statischen Anteil zu finden.

S1: SPP Kürzung/Verlängerung

[0128] In der Strategie S1 wird davon ausgegangen, dass bereits vorhandene, von Benutzer erstellte SPPs vorhanden sind, jedoch aufgrund von Änderungen in den Verkehrsmustern zeitliche Anpassungen erforderlich sind.

[0129] Das generischste SPP ist eine gleichmäßige Verteilung der Signalphasen über die eingehenden Fahrspuren.

[0130] Ausgehend von einer gefüllten Matrix S_v , einem Basis-SPP, welches den aktuellen Plan für den Kreuzung v erfasst, werden die folgenden Schritte ausgeführt, unter der Annahme, dass $c = [c_n, c_p]$ ein vorgegebener Einstell-Parameter ist:

S1.1) Entnehmen aller verbundener grünen Signalphasen $GP_{ij} = \{gp_1, \dots, gp_k\}$ für jede Fahrspur I_j der Kreuzung v aus der Matrix S_v ,

S1.2) Schätze aus dem Einstell-Parameter c zwei Werte c_i^b und c_i^e für jede Phase gp_i , beginnend mit dem Wert c_i^b und endend mit dem Wert c_i^e , wobei ein negativer Wert Kürzung und ein positiver Wert Verlängerung bedeutet,

S1.3) Prüfe, ob die Schätzung die Bedingungen der Beziehungen R_C erfüllt, falls ja, dann wende die Werte c_i^b und c_i^e auf die Phase gp_i an.

[0131] Es ist zu beachten, dass die Strategie S1 einen vernünftigen Bereich für das Intervall von c benötigt, da sie die Anzahl an Konfigurationen doppelt betrifft, nämlich zu Beginn und am Ende der Phase gp_i .

S2: Vorlagen mit SPP Kürzung/Erweiterung

[0132] Die Strategie S1 funktioniert nicht gut, wenn der zugrunde liegende SPP ineffizient ist. Eine Möglichkeit, dies zu überwinden, besteht darin, die Strategie S2 mit SPP-Vorlagen unterschiedlicher Struktur zu erweitern.

[0133] Ausgehend von einer vorgegebenen Vorlagen-Menge $ST = \{st_1, \dots, st_k\}$ wird eine Vorlage st_i aus der Menge ST ausgewählt und die Länge der Vorlage st_i entsprechend der Simulationslänge l angepasst. Anschließend wird gemäß der Strategie S1 fortgefahren.

3.2. Problemgröße und Optimierung

[0134] Die Problemgröße $size(S)$ einer Strategie S ist die Anzahl aller möglichen Konfigurationskandidaten, die von S erzeugt werden.

[0135] Die Parameter sind die SPP-Matrix $M = n \times m$, der Zustandsraum von $\{0, 1\} = 2$ und weitere, je nach Strategie.

[0136] Für die genannten Strategien gilt:

- $size(P_{S1}) = 2^{(2 \cdot |c| \cdot m)}$, wobei $c = [c_n, c_p]$ der Einstell-Parameter für Signalphasen ist, beispielsweise $c = [-1, 1]$ mit $|c| = 3$ und zwei Fahrspuren zu $2^{(2 \cdot 3 \cdot 2)} = 4,096$ Kandidaten führt,
- $size(P_{S2}) = I_{st} \cdot 2^{(2 \cdot |c| \cdot m)}$ wobei $|c| = 3$ und I_{st} die Anzahl an Vorlagen ist, ergeben sich 8,192 Kandidaten.

[0137] In Kombination mit der zuvor ausgeführten ASP Lösung lässt die jeweils gewählte Strategie daher einen Signalphasenplan entscheidend schneller und mit deutlich weniger erforderlichem Speicher in der Rechenvorrichtung bei der Berechnung bestimmen, indem die möglichen Signal-Kombinationen signifikant reduziert werden können.

[0138] Dadurch kann die interne Arbeitsweise der Rechenvorrichtung erheblich verbessert werden. Die Berechnung kann insgesamt wesentlich effizienter und schneller durchgeführt werden.

[0139] In der Gesamtstruktur des Graphen durch Knoten und Kanten, dessen Eigenschaften und Zuständen zum Konfigurieren des Signalphasenplans verwendet werden, stellt ein Knoten eine Signalisierungs-Funktion mit verschiedenen Zuständen im Verkehrsnetz dar.

[0140] Eine Kante bildet einen aktuellen, aber auch einen virtuellen, durch eine Simulation gebildeten Verkehrszustand ab. Daher repräsentieren Knoten und Kanten konkrete Realisierungen beziehungsweise Zustände im Verkehrsnetz.

[0141] Eine entsprechende Simulation kann von einer Rechenvorrichtung mit einem Speicher durchgeführt werden,

wobei die Anzahl an Simulationsläufen für jeweilige Konfigurationen beziehungsweise Signalphasenpläne so gering als möglich gehalten werden soll. Dies wird durch die Anwendung von ASP bei der Berechnung der optimalen Lösung erreicht.

[0142] Ein optimaler Signalphasenplan kann für eine Verbesserung des Verkehrsflusses, kürzere Verkehrszeiten, geringere Stauzeiten, eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs und umweltschädlicher Emissionen sorgen.

Optimierungen

[0143] Selbst mit der effizientesten Strategie S2 ist es nicht möglich, alle Konfigurationskandidaten aufzulisten, um die optimale Lösung für ein bestimmtes mesoskopisches Modell zu finden.

[0144] Qualitätsindikatoren können daher verwendet werden, um zum einen die Suche zu leiten, um Lösungen mit nicht-zwingenden (engl. "weak") Einschränkungen (engl. "constraints") schneller zu finden, und zum anderen den Suchraum mithilfe zwingender (engl. "hard") Einschränkungen einzuschränken.

[0145] Wie zuvor erwähnt, behalten die Ziele im mesoskopischen Verkehrsfluss-Modell die NrV -Datenpositionen für alle Zeitpunkte bei. Ein Qualitätsindikator Q_{NrV} für den Verkehrsfluss ist somit definiert als:

$$Q_{NrV} = \sum_{i=0, v_i: snk}^l \langle o_i, v_i \rangle @ t_i$$

[0146] Ein weiterer Indikator, der aus der SPP-Matrix $M = n \times m$ erhalten wird, ist die Anzahl der Zeitpunkte mit dem SP-Status 1, das heißt grün.

[0147] Dieser misst die Länge aller grünen SPs, deren Maximierung beispielsweise den Verkehrsfluss erhöhen kann.

[0148] Der Qualitätsindikator Q_{SPS} für eine Matrix S ist definiert als:

$$Q_{SPS} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m s_{i,j}$$

[0149] Die beiden Indikatoren können mithilfe von Optimierungsanweisungen und starken Einschränkungen (für den Cut-Off) wie folgt kombiniert werden:

- a. Q_{NrV} maximieren, dann Q_{SPS} maximieren,
- b. Q_{SPS} maximieren, dann Q_{NrV} maximieren,
- c. Maximieren von Q_{NrV} und Abschneiden von Q_{SPS} , und
- d. Maximieren von Q_{SPS} und Abschneiden von Q_{NrV} .

[0150] In den Fällen a. und b. können Gewichte verwendet werden, um einen der Indikatoren zu priorisieren (nicht-zwingende Einschränkung), und in den Fällen c. und d. muss ein angemessener Grenzwert für die zwingenden Einschränkungen geschätzt werden damit nicht zu viele Lösungskandidaten a-priori wegfallen.

3.3. ASP Codierung von Strategie S2

[0151] Die Kodierung ist in zwei Unter-Programme unterteilt, nämlich eine Datenkodierung P_I und eine Problemkodierung P_G , welches die Kodierung für das Schätzen und Prüfen enthält.

Datenkodierung (P_I)

[0152] Das Programm P_I muss für jedes Szenario einer mikroskopischen Verkehrssimulation angepasst werden und umfasst die statischen Komponenten des Flussmodells, die Materialisierung aller generierten NrV -Datenpositionen im Zeitverlauf und die Materialisierung der Matrix M , das den anfänglichen SPP über die Zeit hält.

[0153] Die ASP-Codierung sieht eine Abbildung des (Verkehrs-) Netzwerkgraphen $G_N = (V, E, I_V, I_E, R_V, R_C)$ vor, wobei V durch die Prädikate *node_src* (für Quelle), Senke, Verbindung und Kreuzungsknoten dargestellt wird.

[0154] Dabei definiert das Prädikat *edge* die Kanten von E , und das Prädikat *link* den Graphen basierend auf den Kanten, welche die Knoten verbinden.

[0155] Als Beispiel kann eine Kodierung für fünf Knoten $n_1, \dots, n_5$ und vier Kanten, die linear verbunden sind:

$node_src(n_1). node_ins(n_2). node_lnk(n_3). node_snk(n_4).$
 $node_snk(n_5). link(n_1, n_2, we). link(n_2, n_3, we).$
 $link(n_3, n_3, we). link(n_2, n_5, we)$

5 **[0156]** Die Beschriftungsfunktionen I_V und I_E werden vereinfacht so angegeben, dass die Flaschenhals- und Last-Kapazitäten gleichförmig sind, beispielsweise $I_V()=16$ und $I_E() = 10$. Dies kann durch Konstanten in ASP ausgedrückt werden:

$\#const maxflow = 10$

Und

10 $\#const maxcap = 16$

[0157] Die Beziehung R_V beschreibt die Verkehrsverteilung der Kreuzungen in Verkehrsnetz, wozu das Prädikat $link_ratio(n_1, n_2, r)$ verwendet wird, mit n_1 als Kreuzungsknoten und n_2 eine ausgehende Kante $e = (n_1, n_2)$ mit n_1 bildet, sowie r die Perzentile von Fahrzeugen, welche sich auf der Kante e entfernen.

[0158] Beispielsweise ist eine gleichmäßige Verteilung von ausgehenden Fahrspuren von n_2 definiert durch:

15 $link_ratio(n_2, n_3, 50). link_ratio(n_2, n_5, 50).$

[0159] Die Beziehung R_C ist als $conflict_tl(J, X, Y)$ kodiert, wobei sie aussagt, dass zwei Kanten (J, X) und (J, Y) es nicht zulassen, dass sie gleichzeitig grüne Phasen haben. Sollen beispielsweise (n_2, n_3) und (n_2, n_5) zueinander im Konflikt stehen, so lautet die Kodierung:

20 $conflict_tl(n_1, e_2, n_3).$

$conflict_tl(J, X, Y) \leftarrow conflict_tl(J, X, Y).$

[0160] Die zweite Regel wird verwendet um sicherzustellen, dass die Beziehung R_C symmetrisch ist.

25 **[0161]** Neben statischen Fakten wird im Programm P_i auch der zeitliche Horizont durch Zeit $time(0 \dots t_i)$ definiert, wobei $0 \dots t_i$ für alle Zeitpunkte zwischen 0 und der Simulationslänge t_i steht.

[0162] Zum Beispiel setzt $time(0 \dots 15)$ die Simulationslänge auf 15.

[0163] Ein weiteres wichtiges zeitliches Prädikat ist $tl_plan_red(X, Y, T_1, T_2)$, welches alle roten Phasen bis zur Simulationslänge t_i materialisiert.

30 **[0164]** Das Tupel (X, Y) ist eine eingehende Kante zu einer Kreuzung Y , und (T_1, T_2) ist ein (maximales) Intervall roter Phasen.

[0165] In Beispiel können für den Schnittpunkt n_2 und seine eingehende Kante (n_1, n_2) rote Phasenintervalle der Länge 5 definiert werden durch:

35 $tl_plan_red(n_1, n_2, 1, 5). tl_plan_red(n_1, n_2, 11, 15).$

[0166] Dies impliziert, dass zwischen 6 und 10 eine grüne Signalphase vorliegt.

Problemkodierung (P_G)

40 **[0167]** Das Programm P_G ist generisch und ändert sich nur, wenn Parameter angepasst oder eine neue Strategie entwickelt werden müssen.

[0168] Im Weiteren wird der "Guess and Check" Problemlösungsansatz von ASP für SPP-Konfigurationen nach der Strategie S1, sowie die Codierung des dynamischen Teils des mesoskopischen Verkehrsfluss-Modells beschrieben.

45 **[0169]** Zunächst werden mit einer nicht deterministischen Regel alle möglichen SPP-Konfigurationen erzeugt, welche gemäß der Strategie S1 die Intervalle $c = [c_n, c_p]$ zum Kürzen/Verlängern einer roten Signalphase auf einer eingehenden Spur sind.

[0170] Das folgende Beispiel veranschaulicht dies für $c = [-1, 1]$, wobei eine eingehende Spur als Tupel (X, Y) angegeben wird:

50 $\{change_red(X, Y, -1 \dots 1, -1 \dots 1)\} = 1 \leftarrow tl_plan_red(X, Y, _, _)$

[0171] Die Intervalle von c werden so verwendet, dass der Anfang mit c_n und das Ende mit c_p eines SP verkürzt/verlängert werden können.

[0172] Diese "Guess"-Regel ist eine ASP-spezifische Codierung für Nichtdeterminismus, welche angibt, dass für eine Kante (X, Y) , die durch den $tl_plan_red(X, Y, _, _)$ gespeichert ist (beispielsweise (n_2, n_3) alle möglichen Kombinationen (c_1, c_2) von $\{-1, 0, 1\} \times \{-1, 0, 1\}$ generiert werden.

55 **[0173]** Da viele der oben generierten SPP-Konfigurationen ungültig sind, kann eine "Check"-Regel eingeführt werden, die über die Beziehung R_C definierten zwingenden (Fahrspurwechsel-) Einschränkungen festlegt.

[0174] Eingehende Fahrspuren werden für Kreuzungen J als (X, J) und (Y, J) definiert, was zu der folgenden Einschrän-

kung führt:

$\leftarrow \text{conflict_tl}(J, X, Y), \text{time}(T), \text{not tl_calc_red}(X, J, T), \text{not tl_calc_red}(Y, J, T)$

[0175] In den vorher genannten Einschränkungen wird das Prädikat $\text{tl_calc_red}(X, J, T)$ zum Materialisieren des Effekts von change_red auf den SPP wie folgt verwendet:

$\text{tl_calc_red}(X, J, T) \leftarrow \text{tl_plan_red}(X, J, T_1, T_2), \text{time}(T),$

$\text{change_red}(X, J, V_1, V_2), T \geq (T_1 + V_1), T \leq (T_2 + V_2)$

[0176] Die weiteren Regeln zur Berechnung des Verkehrsflusses lauten nun wie folgt, wobei der Term $\text{on}(x, y)$ ausdrückt, dass das Datenelement x am Knoten y liegt.

[0177] Das Prädikat $\text{move}(X, Z, D, T)$ wird dazu verwendet, um die nächste Verschiebung von Datenelementen unter Berücksichtigung des SPP zu generieren, wobei X ein Datenelement, Z ein neu zugewiesener Knoten, D die Flussrichtung und T der aktuelle Zeitpunkt ist.

$\text{move}(X, Z, D, T) \leftarrow \text{pos}(\text{on}(X, Z), D, T-1), \text{link}(Y, Z, D),$

$\text{not tl_calc_red}(Y, Z, T), \text{time}(T)$

[0178] Das Prädikat $\text{pos}(\text{on}(X, Y), D, T)$ stellt jenen Zustand dar, nachdem das Datenelement D bewegt wurde oder auf dem Ort verbleibt, wobei $\text{on}(X, Y)$ das Datenelement mit dem neuen oder demselben Ort verknüpft:

$\text{pos}(\text{on}(X, Y), D, T) \leftarrow \text{move}(X, Y, D, T), T \leq \text{steps}$

$\text{pos}(\text{on}(X, Z), D, T) \leftarrow \text{pos}(\text{on}(X, Z), D, T-1), \text{not moved}(X, D, T), T \leq \text{steps}$

[0179] Das Prädikat $\text{load}(\text{on}(X, Y), V, T)$ kodiert die Verkehrsfluss-Funktionen f_{link} , f_{ins} und f_{fr1} .

[0180] Die definierenden Funktionen sind extern berechnete Funktionen, wie sie beispielsweise von fortgeschrittenen ASP-Solvern wie Clingo bereitgestellt werden. Solche Funktionen, die einen @-Präfix aufweisen, erlauben die Verwendung von Python-Programmcode zur Nutzung noch komplexerer Funktionen des Verkehrsfluss-Modells.

[0181] Jedes Fluss-Modell kann durch eine einfache Regel mit load am Kopf der Regel dargestellt werden, wobei die Funktion @flns die Funktion f_{ins} implementiert.

$\text{load}(\text{on}(X, Z), \text{@flns}(V, Y, Z, T, \text{maxflow}, \text{maxcap}), T) \leftarrow \text{moved}(X, D, T),$

$\text{load}(\text{on}(X, Y), V, T-1), \text{link}(Y, Z, D), \text{pos}(\text{on}(X, Y), D, T-1),$

$\text{link_ratio}(Y, Z, D, _), T \leq \text{steps},$

Optimierungen

[0182] Optimierungen basierend auf den Indikatoren Q_{Nrv} und Q_{SPS} können direkt in ASP mithilfe von Aggregations-, Maximierungsanweisungen und Grenzwerten über zwingende Einschränkungen realisiert werden.

[0183] Die Prädikate sum_traffic und sum_tl_red werden für die Aggregation wie folgt verwendet:

$\text{sum_traffic}(M) \leftarrow M = \# \text{sum}\{V, X: \text{load_end}(X, V, T), T == \text{steps}\}$

[0184] Die Aggregationsregel für die sum_tl_red ist ähnlich. Die Maximierung und der Grenzwert für die obigen Aggregationen sind wie folgt definiert:

$\# \text{maximize } M: \text{sum_traffic}(M)$

$\leftarrow \text{sum_tl_red}(M), M \geq \text{threshold_red}$

[0185] Die erste Anweisung bewirkt eine geordnete Aufzählung der Antwortsätze durch Erhöhen des Werts von M , während die harte Einschränkung alle Antwortsätze fallen lässt, bei denen M unter dem Schwellenwert threshold_red liegt.

[0186] Die Regeln zur Maximierung der sum_tl_red und zur Einschränkung des sum_traffic sind sehr ähnlich.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung eines Verkehrsflusses in einem Verkehrsnetz (RN) durch einen optimalen Signalphasenplan, wobei das Verkehrsnetz (RN) durch einen Graphen (G_N) mit Knoten (V , i1-i4, o1, o4, o5, jun1, jun2), Kanten (E , gneE0, gneE0i, gneE1, gneE1i, gneE11, gneE11_b, gneE12i, gneE12i_b, gneE13, gneE14, gneE14i, gneE15i), Knoten-Beschriftungen (I_V), Kanten-Beschriftungen (I_E), Knoten-Durchsatz (R_V) und Kanten-Kapazitäten (C_V) in Form eines mesoskopischen Verkehrsfluss-modells beschrieben wird,
und ein erster, zeitabhängiger Simulationsfluss (D_{NrV}) von Fahrzeuganzahlen (NrV) sowie ein zweiter, zeitabhängiger Simulationsfluss (D_{SPS}) von Signalphasen jeweils unter Berücksichtigung von Rahmenbedingungen und einer Abfolge von Simulations-Schritten bestimmt wird,
dadurch gekennzeichnet, dass der optimale Signalphasenplan für das jeweilige mesoskopische Verkehrsfluss-Modell durch Anwendung von ASP auf den Graphen (G_N), den ersten Simulationsfluss (D_{NrV}) und den zweiten Simulationsfluss (D_{SPS}) durch eine Rechenvorrichtung (CD) ermittelt wird, und der optimale Signalphasenplan durch eine Steuervorrichtung (TLC) mit Steuerelementen (TL1, TL2) ausgeführt wird.
2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei eine Matrix (S_V), welche die Rot/Grünphasen eines Signalphasenplans repräsentiert, gebildet wird und folgende Schritte ausgeführt werden:
 - a) Entnehmen aller verbundener grünen Signalphasen ($gp_1, \dots, gp_k$) für jede Fahrspur (I_j) eines Kreuzung-Knotens (v) aus der Matrix (S_V),
 - b) Schätzen einer Kürzung oder einer Verlängerung aus einem gewählten Einstell-Parameter (c),
 - c) Prüfen, ob die Schätzung die Bedingungen der Beziehungen (R_c) erfüllt, falls ja, Anwenden der geschätzten Werte auf die jeweilige Signalphase ($gp_1, \dots, gp_k$).
3. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Matrix (S_V) gebildet wird, indem aus einer vorgegebenen Vorlagen-Menge (ST) ausgewählt wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Optimierung mittels ASP zumindest ein Qualitätsindikator bezüglich einer Anzahl an Fahrzeugen (NrV) im Verkehrsnetz (RN) oder einer Anzahl von Zeitpunkten mit einem vorbestimmten Status, vorzugsweise mit dem Wert 1 (Q_{NrV} , Q_{SPS}) für den Verkehrsfluss berücksichtigt wird.
5. Vorrichtung zur Steuerung eines Verkehrsflusses in einem Verkehrsnetz (RN) durch einen optimalen Signalphasenplan (SPP), umfassend eine Steuervorrichtung (TLC) mit Steuerelementen (TL1, TL2) und eine Rechenvorrichtung (CD) mit einem Speicher,
dadurch gekennzeichnet, dass die Rechenvorrichtung (CD) dazu eingerichtet ist den optimalen Signalphasenplan (SPP) durch das Verfahren nach einem der vorhergehenden Schritte ermitteln und die Steuervorrichtung (TLC) dazu eingerichtet ist, den optimalen Signalphasenplan auszuführen.
6. Vorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Steuerelemente (TL1, TL2) Verkehrs-Beeinflussungsanlagen wie Verkehrsampeln, dynamische Fahrspur-Sperranzeigen oder dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungsanlagen sind.
7. Vorrichtung nach Anspruch 7, wobei der optimale Signalphasenplan (SPP) eine Konfiguration der Steuerelemente (TL1, TL2) in Form von Verkehrsampeln betrifft, die im Verkehrsnetz (RN) eine grüne Welle in einer Verkehrsrichtung für Verkehrsteilnehmer ist.

FIG 1

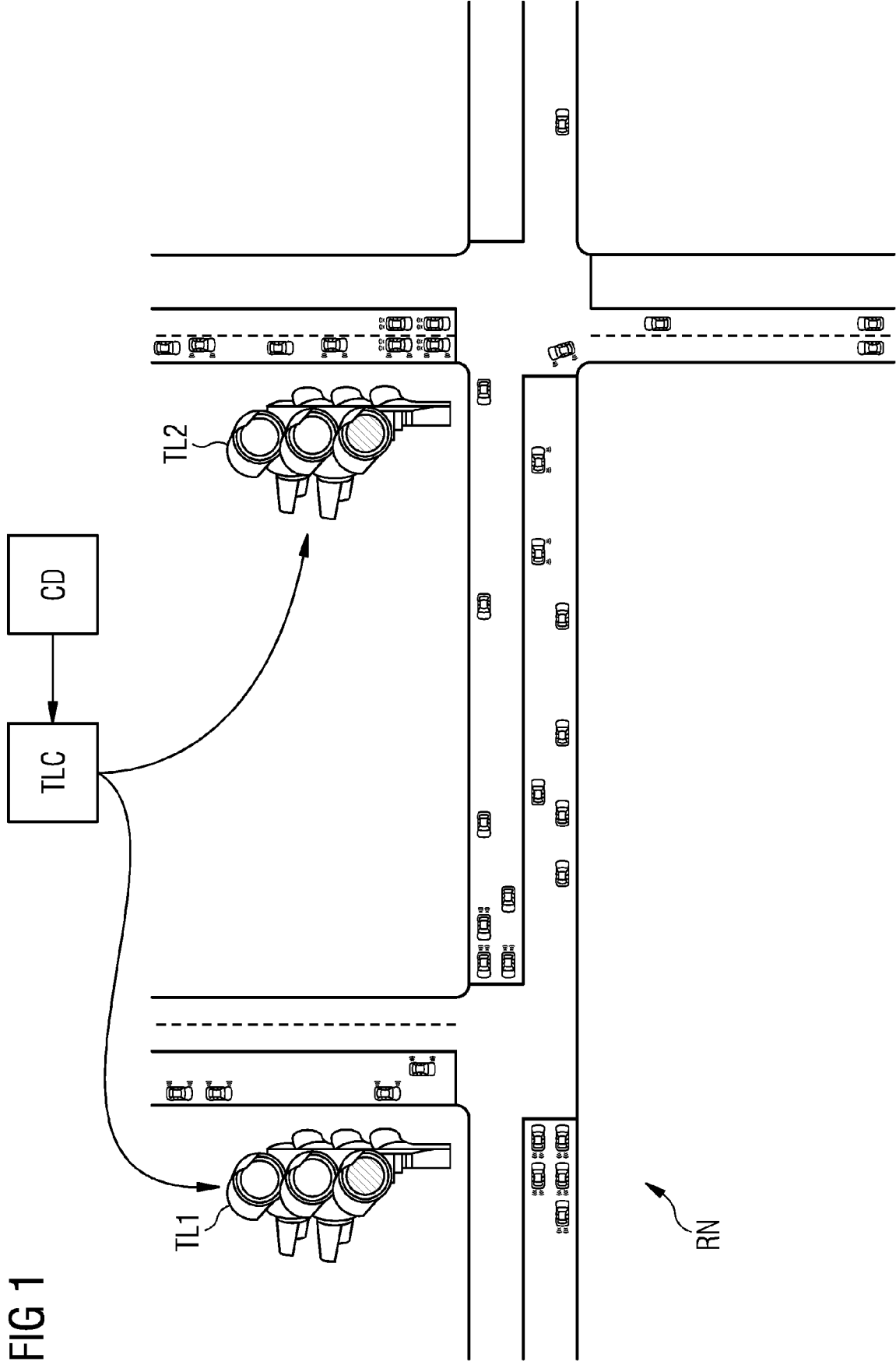


FIG 2

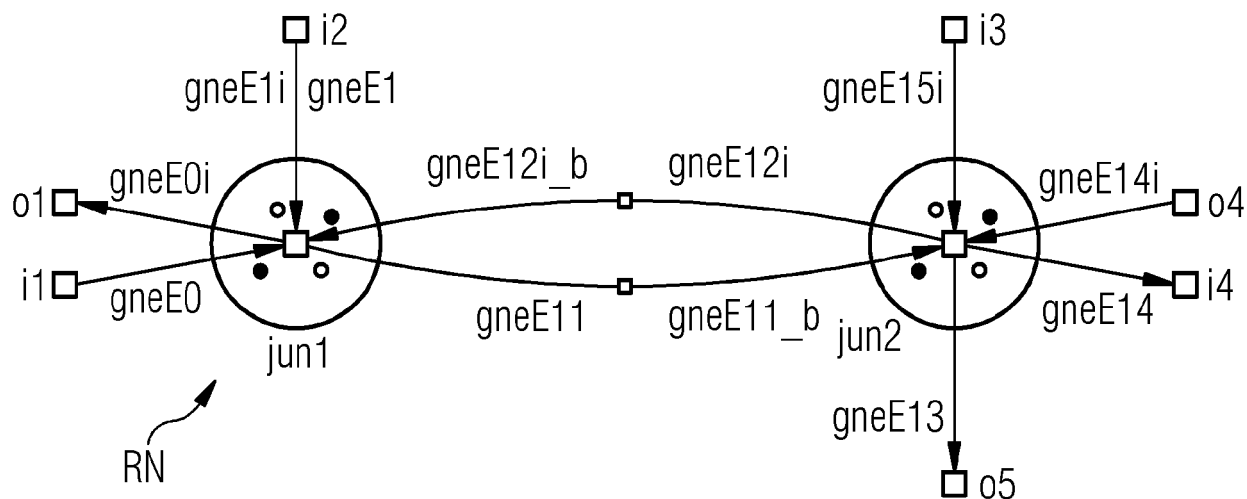


FIG 3

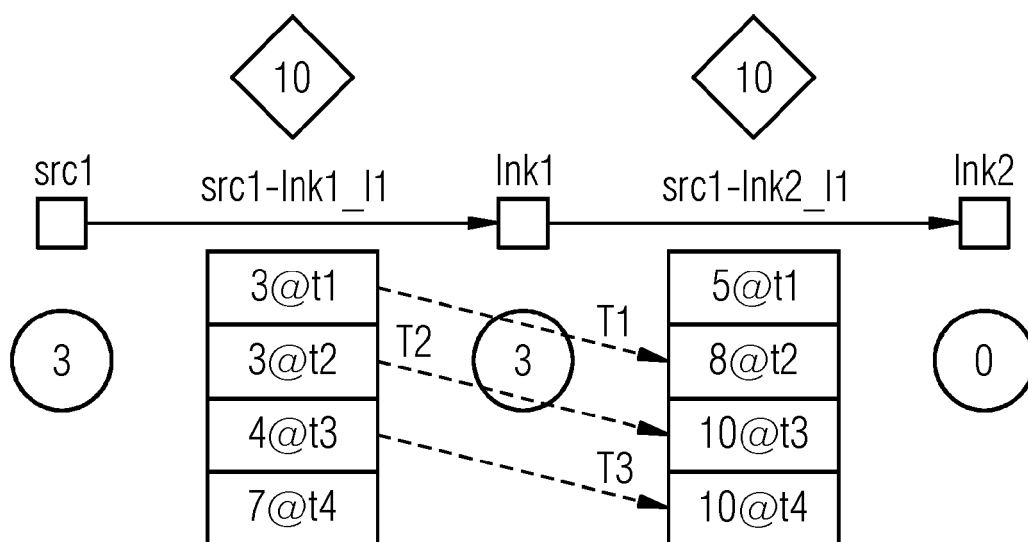


FIG 4

```

<tlLogic id="l1" type="static" programID="0" offset="0">
  <phase duration="30" state="rrrrGGGGGGGG"/>
  <phase duration="30" state="GGGGGrrrrrrr"/>
</tlLogic>
</tlLogic id="l2" type="static" programID="0" offset="0">
  <phase duration="30" state="GGGGGGrrrrrrGGGGGGrrrrrr"/>
  <phase duration="30" state="rrrrrrGGGGGGrrrrrrGGGGGG"/>
</tlLogic>

```

FIG 5

	t_1	t_2	$\dots$	t_n
l_1	$s_{1,1}$	$s_{2,1}$	$\dots$	$s_{n,1}$
$\dots$				
l_m	$s_{1,m}$	$s_{2,m}$	$\dots$	$s_{n,m}$



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 20 18 4746

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
Y	US 2015/088406 A1 (BLANDIN SEBASTIEN [SG] ET AL) 26. März 2015 (2015-03-26) * Zusammenfassung; Abbildungen * * Absätze [0007] - [0012], [0022] - [0024], [0028], [0030], [0035] - [0045] *	1-7	INV. G08G1/081 G08G1/01
Y	VALLATI M ET AL: "Efficient macroscopic urban traffic models for reducing congestion: A PDDL+ planning approach", 30TH AAAI CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AAAI 2016 - 30TH AAAI CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AAAI 2016 2016 AAAI PRESS USA, 2016, Seiten 3188-3194, XP002801551, * das ganze Dokument *	1-7	
Y	EP 2 790 165 A1 (SWARCO TRAFFIC SYSTEMS GMBH [DE]) 15. Oktober 2014 (2014-10-15) * Zusammenfassung; Abbildungen * * Absätze [0009] - [0013], [0096] - [0107], [0202] - [0205] *	1-7	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) G08G
A	US 2016/042641 A1 (SMITH STEPHEN F [US] ET AL) 11. Februar 2016 (2016-02-11) * Zusammenfassung; Abbildungen * * Absätze [0006], [0007]; Ansprüche *	1-7	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 22. Dezember 2020	Prüfer Roost, Joseph
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 20 18 4746

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

22-12-2020

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
	US 2015088406	A1	26-03-2015	US 2015088406	A1	26-03-2015
				US 2016171887	A1	16-06-2016
				US 2018005520	A1	04-01-2018
15	-----			-----		
	EP 2790165	A1	15-10-2014	KEINE		
	-----			-----		
	US 2016042641	A1	11-02-2016	KEINE		
20	-----			-----		
25						
30						
35						
40						
45						
50						
55						

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82