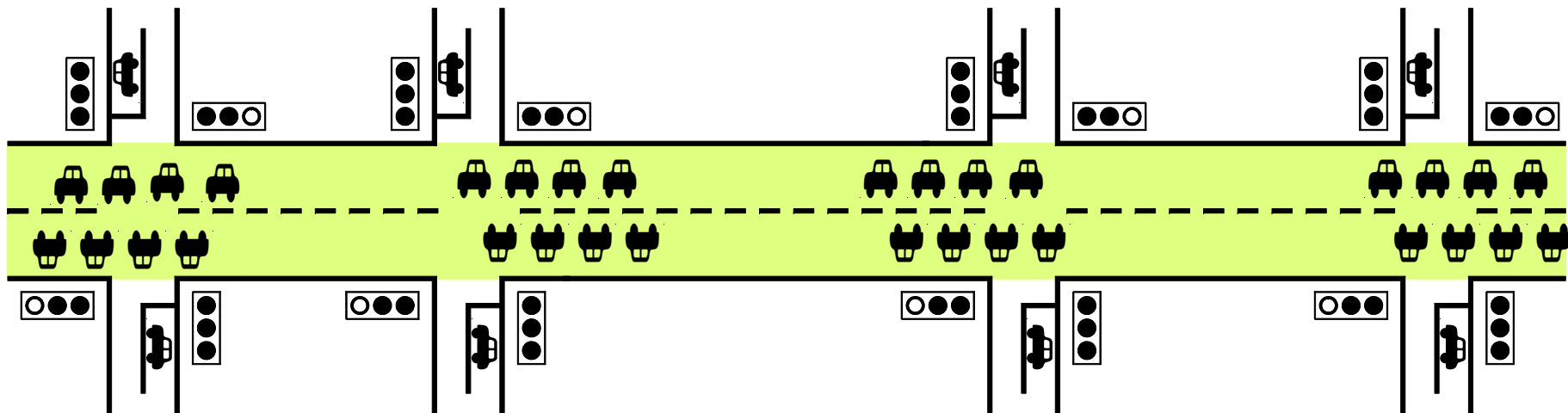


Bundesamt für Strassen, ASTRA

Forschungsauftrag 13/98 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS

Lichtsignalanlagen: Koordination in Strassenzügen



Inhalt

1. ZUSAMMENFASSUNG	2	8. RECHNERGESTÜTZTE VERFAHREN	23
RÉSUMÉ	2	9. ANHANG: ABLEITUNG VON WARTEZEITEN UND STAU	26
2. GEGENSTAND	3	9.1 Deterministische Anteile bei stationärem Verkehr	26
3. ZWECK	3	Unkoordinierter Zufluss	26
4. VORGEHEN	3	Koordinierter Zufluss, gleichförmiger Zufluss während der Rotzeit	26
5. ENTWURF DER KOORDINATION	4	Koordinierter Zufluss, ungleichförmiger Zufluss während der Rotzeit	26
5.1 Prinzip	4	9.2 Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastung	27
5.2 Teilpunktreserven, Koordination der Grünenden	7	Wartezeiten stochastisch bei stationärem Verkehr	27
5.3 Teilpunktreserven, Koordination der Grünanfänge	10	Wartezeiten deterministisch bei instationärem Verkehr	28
5.4 Beispiel für den Entwurf der Koordination	13	Transformation	29
6. ERMITTELN VON WARTEZEITEN UND STAU	18	Vergleich der Näherungen nach TRRL und Wu	31
6.1 Grundlagen	18	10. LITERATUR	32
6.2 Beispiel	19		
7. KOORDINATION UND PRIORITÄT	21		
7.1 Grundsätzliches	21		
7.2 Beispiel	22		

1. Zusammenfassung

Gegenstand des Forschungsberichts ist die Koordination benachbarter Lichtsignalanlagen in Strassenzügen, wo der Verkehrsfluss von Knoten zu Knoten prognostizierbar ist.

Die Koordination ist das zeitliche Abstimmen von Grünzeiten benachbarter lichtsignalgesteuerten Knoten, damit durchgehende Beziehungen des öffentlichen und des Individualverkehrs die Lichtsignalanlagen möglichst ohne Wartezeiten passieren können.

Zweck der Koordination ist das Optimieren der Nutzung von Strassen durch Reduktion von Wartezeiten, Stau und Abgasemissionen. Es wird eine optimale Lösung für die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs angestrebt. Sie resultiert beim Minimum der Personen- Wartezeiten im öffentlichen und im Individualverkehr.

Der Forschungsbericht befasst sich mit den Grundlagen zum Konzipieren und Evaluieren der Koordination von lichtsignalgesteuerten Knoten und dient damit auch zum Entscheid, ob eine Koordination vorteilhafter als eine isolierte Steuerung ist. Lässt sich keine Koordinations- Lösung finden, dann werden die kritischen Punkte deutlich, wo betriebliche, organisatorische oder bauliche Verbesserungen zu suchen sind.

Dazu wird ein zuerst Verfahren beschrieben zum

- Entwurf der Koordination (Prinzip, Teilpunktreserven, Beispiel)
- Ermitteln von Wartezeiten und Stau (Grundlagen, Beispiel).

Dann behandelt der Forschungsbericht

- Koordination und Priorität des öffentlichen Verkehrs (Grundsätzliches, Beispiel)
- Rechnergestützte Verfahren.

Auf diesen Grundlagen soll eine VSS- Norm zur Koordination von Lichtsignalanlagen erarbeitet werden.

Ableitungen der Formeln zum Ermitteln von Wartezeiten und Stau in lichtsignalgesteuerten Knoten bringt der Anhang:

- die deterministische Anteile bei stationärem Verkehr
- die Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastung.

Résumé

L'objet du rapport de recherche est la coordination d'installations de signalisation lumineuse contiguës, faisant partie d'une chaîne de carrefours, lorsque le déroulement du trafic entre les nœuds peut être pronostiqué.

La coordination consiste à cadencer les temps verts de nœuds voisins, gérés par une installation de signalisation lumineuse, afin de permettre au trafic individuel et collectif de les franchir, dans la mesure du possible, sans temps d'attente.

Le but de la coordination est d'optimiser l'utilisation de la voirie par la réduction des temps d'attente, des embouteillages et des émissions polluantes. Elle s'efforce d'apporter une solution optimale en termes de qualité multimodale de l'écoulement du trafic par l'obtention d'un temps d'attente minimum pour les usagers des transports individuels et collectifs.

Le rapport de recherche définit les principes pour la conception et l'évaluation de la coordination de nœuds gérés par une installation de signalisation lumineuse; il permet aussi de déterminer si une coordination est préférable à un fonctionnement isolé. Si aucune solution de coordination ne peut être trouvée, les points critiques à améliorer, touchant aussi bien l'exploitation, l'organisation ou la construction, sont alors clairement mis en évidence.

Pour cela, une procédure est tout d'abord décrite pour

- le projet de coordination (principe, réserve de points de partage, exemple)
- détermination des temps d'attente et des files d'attente (bases, exemple)

Le rapport de recherches traite alors les points:

- coordination et priorité des transport publics (principes, exemple)
- procédures assistées par ordinateur.

Sur ces bases, une norme VSS pour la coordination des installations de signalisation lumineuse sera élaborée.

En annexe figurent les abaques permettant de déterminer les temps d'attente et les files d'attentes dans les carrefours régulés:

- parts déterminantes en cas de trafic stationnaire
- parts pour les influences du hasard et les surcharges.

Gegenstand

Der Forschungsbericht behandelt die Koordination benachbarter Lichtsignalanlagen in Strassenzügen, wo der Verkehrsfluss von Knoten zu Knoten prognostizierbar ist.

Die Koordination ist das zeitliche Abstimmen von Grünzeiten in benachbarten Lichtsignalanlagen.

Die Grünzeiten benachbarter lichtsignalgesteuerten Knoten werden bei der Koordination so aufeinander abgestimmt, dass durchgehende Beziehungen des öffentlichen und des Individualverkehrs die Lichtsignalanlagen möglichst ohne Wartezeiten passieren können.

3. Zweck

Mit der Koordination soll die Nutzung von Strassen optimiert und der Verkehrsablauf effizient werden. Damit wird auch Ausweichverkehr vermieden und die Kanalisierung des Verkehrs auf Hauptverkehrsstrassen unterstützt.

Diese Aufgabenfelder erfüllt die Koordination von lichtsignalgesteuerten Knoten mit einer Reduktion von Wartezeiten, Stau und Abgasemissionen. Damit sinken mit einer Koordination die volkswirtschaftlichen und ökologischen Kosten des Verkehrs.

Es wird eine optimale Lösung für die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs angestrebt. Sie misst sich an den Wartezeiten aller Verkehrsteilnehmer sowohl im Individualverkehr wie im öffentlichen Verkehr und resultiert beim Minimum der Personen- Wartezeiten.

Der Nutzen der Koordination resultiert vor Allem aus dem monetären Quantifizieren von Zeitverlusten. Reduktionen von Kosten der Zeitverluste sind der wesentliche Faktor, denn Reduktionen der Betriebskosten von Fahrzeugen und der Schadstoffkosten sind wesentlich niedriger und gehen in eine Nutzen - Kosten - Schätzung kaum ein.

4. Vorgehen

Der Forschungsbericht bringt Grundlagen zum Konzipieren und Evaluieren der Koordination von lichtsignalgesteuerten Knoten und dient damit auch zum Entscheid, ob eine Koordination vorteilhafter als eine isolierte Steuerung ist. Lässt sich keine Koordinations- Lösung finden, dann werden die kritischen Punkte deutlich, wo betriebliche, organisatorische oder bauliche Verbesserungen zu suchen sind. Behandelt werden.

Behandelt werden in vier Arbeitsschritten:

Der Entwurf der Koordination

- das Prinzip
- die Teilpunktreserven für die Koordination der Grünenden
- die Teilpunktreserven für die Koordination der Grünanfänge
- ein Beispiel für den Entwurf der Koordination

Das Ermitteln von Wartezeiten und Stau

- die Grundlagen
- ein Beispiel zum Ermitteln von Wartezeiten und Stau

Koordination und Priorität des öffentlichen Verkehrs

- Grundsätzliches
- ein Beispiel mit und ohne Koordination bzw. mit und ohne Priorität

Rechnergestützte Verfahren.

Im Anhang werden die Formeln zum Ermitteln von Wartezeiten und Stau abgeleitet:

Die deterministische Anteile bei stationärem Verkehr

- bei unkoordiniertem Zufluss
- bei koordiniertem Zufluss und gleichförmigem Zufluss während der Rotzeit
- bei koordiniertem Zufluss und ungleichförmigem Zufluss während der Rotzeit

Die Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastung

- die Wartezeiten stochastisch bei stationärem Verkehr
- die Wartezeiten deterministisch bei instationärem Verkehr
- die Transformation der Wartezeiten
- der Vergleich von Näherungsformeln.

5. Entwurf der Koordination

5.1 Prinzip

Die Koordination von Lichtsignalanlagen lässt sich anschaulich in einem Zeit- Weg- Diagramm darstellen. Auf der Abszisse wird der Weg aufgetragen, auf der Ordinate die Zeit. Vertikale im Zeit- Weg- Diagramm im Abstand der koordinierten Knoten $L_K[m]$ bilden die Knotenlinien. Horizontale im Abstand der halben Zyklen sind die Halbzyklus-Linien.

Der koordinierte Verkehr fließt diagonal über das Zeit- Weg- Diagramm in gegenläufigen Grünbändern der Richtungen A und B. Die Phasenzeiten der Grünbänder betragen $GA[s]$ und $GB[s]$. Die Koordinations- Geschwindigkeit bestimmt die Neigung der Grünbänder.

Die Schnittpunkte der Grünenden bzw. der Grünanfänge der gegenläufigen Grünbänder liegen auf den Halbzyklus- Linien und sind die Teilpunkte. Vertikale im Zeit- Weg- Diagramm durch die Teilpunkte sind die Teilpunktlinien, sie liegen im Teilpunktabstand.

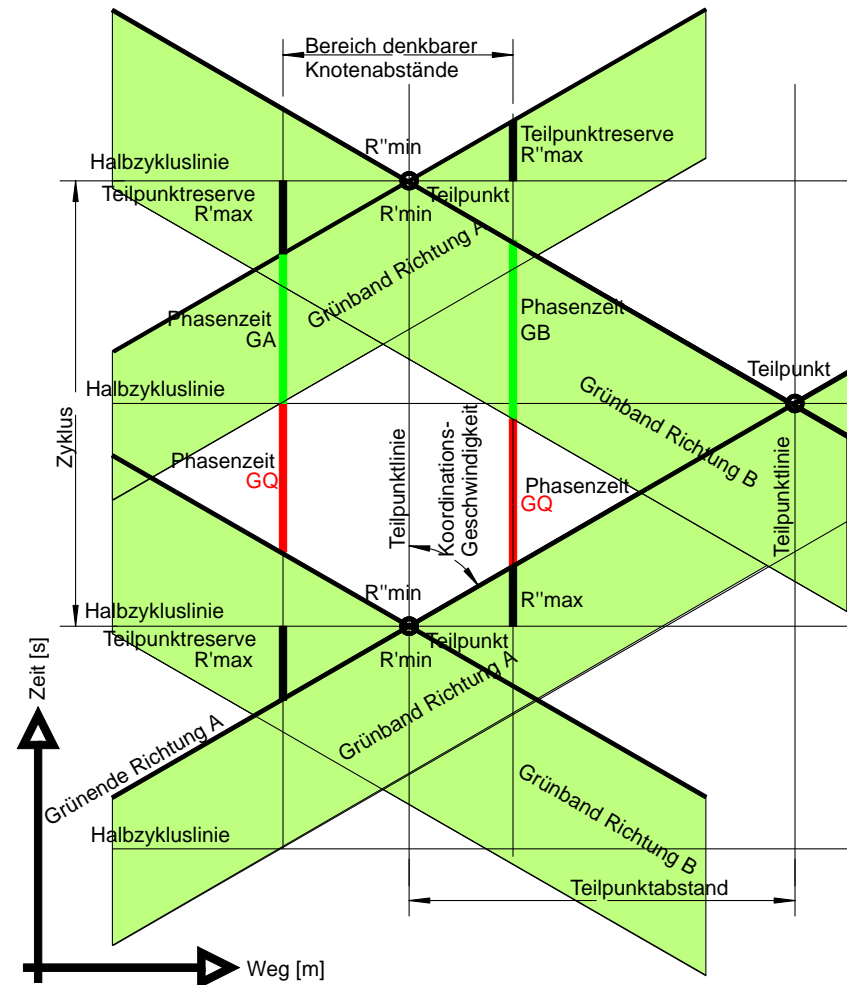
Zwischen	$Z[s]$	Zyklus
	$L_T[m]$	Teilpunktabstand
	$v_K[m/s]$	Koordinations- Geschwindigkeit

gilt die Beziehung $Z = \frac{L_T}{\frac{1}{2} \cdot v_K}$. Beim Entwurf der Koordination ist die

Koordinations- Geschwindigkeit gegeben, der Zyklus und der Teilpunktabstand sind zu bestimmen.

Im Teilpunkt bleibt neben den Phasenzeiten $GA[s]$ und $GB[s]$ für die Grünbänder die grösste Phasenzeiten $GQ[s]$ für den Querverkehr übrig. Knotenlinien müssen aber nicht mit den Teilpunktlinien der Koordination übereinstimmen. Nahezu jeder Knoten weist Teilpunktreserven auf. Teilpunktreserven sind die zulässigen bzw. die nötigen Abstände eines Knotens von der Teilpunktlinie. Neben der Koordinations- Geschwindigkeit bestimmen die Teilpunktreserven den Entwurf der Koordination.

Das Zeit- Weg- Diagramm zeigt grafisch die angeführten Begriffe:

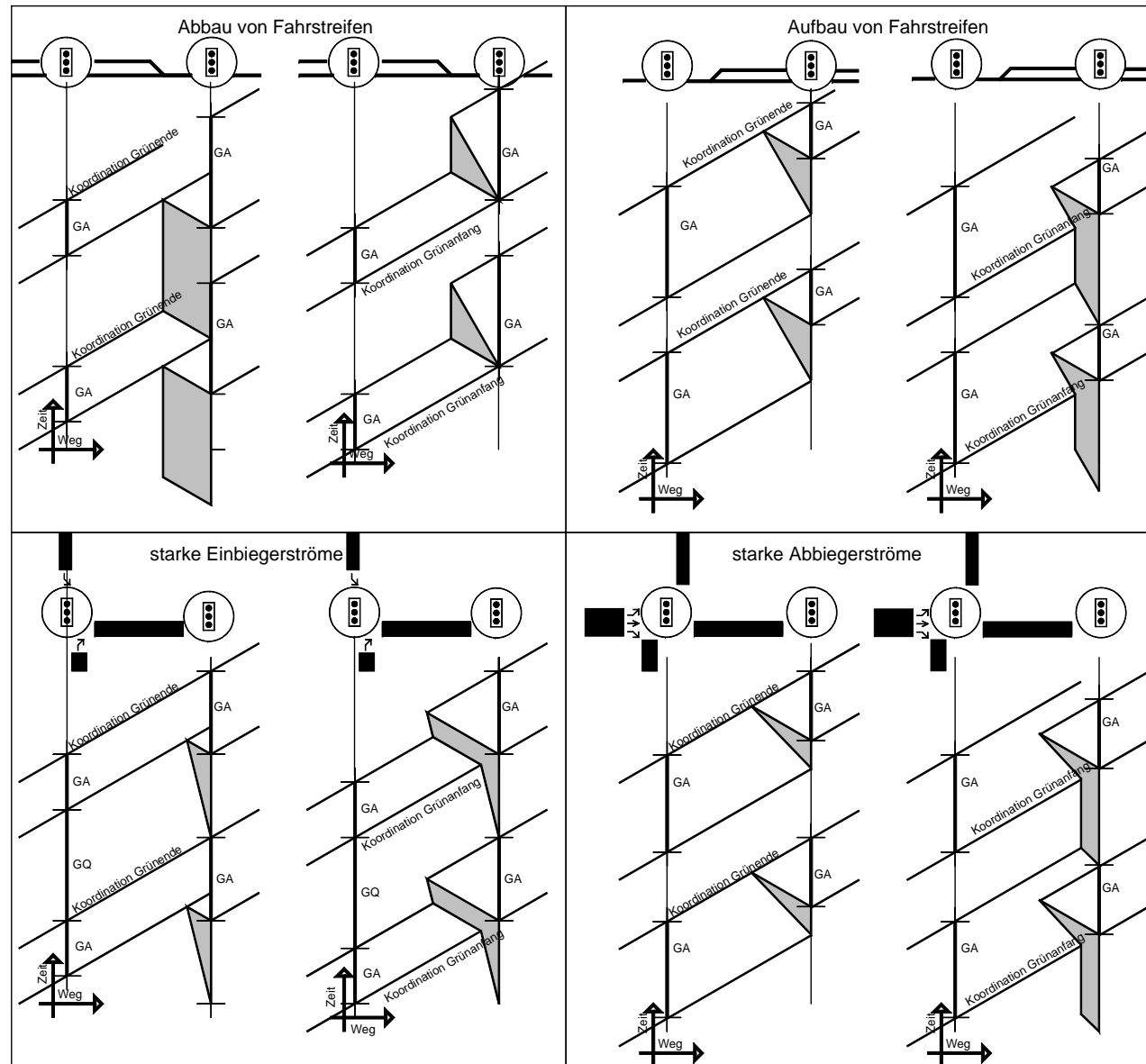


- Die Teilpunktreserven R' und R'' resultieren
- bei einem Basisablauf ohne Linksabbieger des koordinierten Verkehrs im Knoten aus dem Spielraum für die Koordination, den die Phasenzeiten $GA[s]$ bzw. $GB[s]$ der durchgehenden Grünbänder und die Phasezeit $GQ[s]$ des Querverkehrs bieten
 - bei Linksabbiegern $GLA[s]$ bzw. $GLB[s]$ des koordinierten Verkehrs im Knoten zusätzlich aus den Zeiten, während denen sich die gegenläufigen Grünbänder nicht überlappen - diese werden für koordinierte oder teilkoordinierte Vorläufe bzw. Nachläufe der Linksabbieger genutzt.

Eine Koordination des Grünendes bzw. des Grünanfangs führt zu unterschiedlichen Teilpunktreserven:

- Eine Koordination des Grünendes ist vorteilhaft bei einer hohen Auslastung, aber auch bei einem Aufbau von Fahrstreifen und bei starken Einbieger- oder Abbiegerströmen im Verlauf der Grünbänder.
- Eine Koordination des Grünanfangs ist einzig vorteilhaft bei einer niedrigen Auslastung bzw. bei einem Abbau von Fahrstreifen im Verlauf der Koordination.

Das nebenstehende Diagramm zeigt dazu jeweils eine Koordination des Grünendes bzw. des Grünanfangs mit den entstehenden Wartezeiten für einen Abbau bzw. Aufbau von Fahrstreifen und für starke Einbieger- bzw. Abbiegerströmen



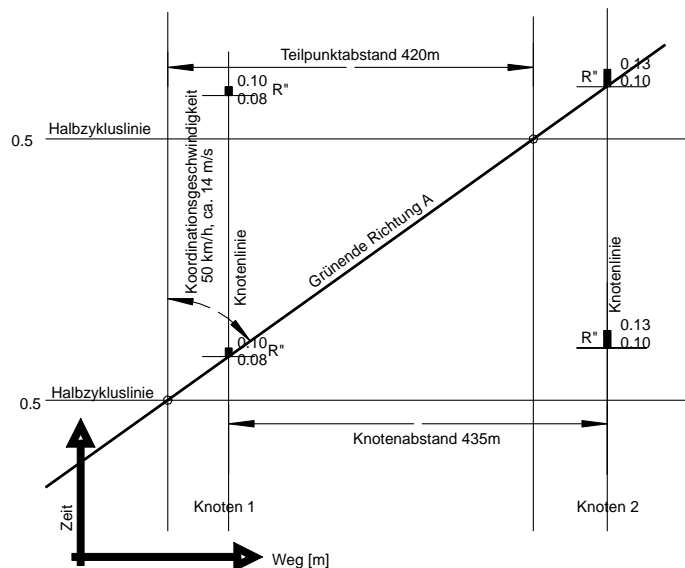
Beim Entwurf der Koordination werden die Teilpunktreserven für die Richtung A für jeden Knoten ermittelt und in einem Zeit- Weg- Diagramm auf den Knotenlinien aufgetragen. Dabei liegen die Teilpunktreserven R'' über und die Teilpunktreserven R' unter jeder Halbzykluslinie. Weil der Zyklus der Koordination noch nicht bekannt ist, wird bei den Teilpunktreserven mit einem Zyklus $Z=1$ und mit Phasenanteilen anstatt mit Phasenzeiten gerechnet. (Die folgenden Seiten ermitteln die Teilpunktreserven).

Das gesuchte koordinierte Grünende bzw. der koordinierte Grünanfang der Richtung A muss mit der gegebenen Koordinations- Geschwindigkeit durch Teilpunktreserven aller Knoten führen. Es gilt dann für den

$$\text{Teilpunkt Abstand } L_T = \frac{\sum L_K}{2 \begin{pmatrix} n \cdot 0.5 + R'_a & -R'_z \\ -R''_a & +R''_z \end{pmatrix}}$$

mit den Teilpunktreserven R_a bzw. R_z im ersten bzw. letzten Knoten.

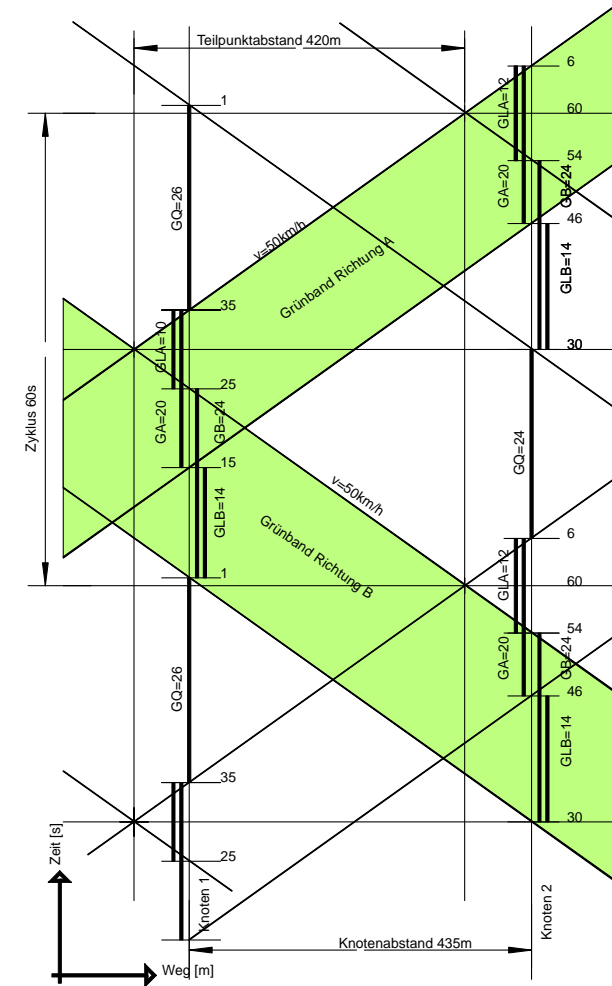
Das nebenstehende Beispiel geht von errechneten Teilpunktreserven für die Koordination der Grünenden in zwei Knoten aus und trägt sie in einem Zeit- Weg- Diagramm auf.



Im Beispiel resultiert für die Koordinations- Geschwindigkeit von 50 km/h eine Lösung mit den Teilpunktreserven $R_1''=0.08$ und $R_2''=0.10$. Der Teilpunkt Abstand wird deshalb zu

$$L_T = \frac{L_K}{2(0.5 - R_1'' + R_2'')} \sim 420m, \text{ der Zyklus zu } Z = \frac{L_T}{\frac{1}{2} \cdot v_K} \sim 60s.$$

Das nebenstehende Zeit- Weg- Diagramm zeichnet die resultierende Koordination auf. Das Grünende der Richtung B liegt spiegelbildlich zu jenem der Richtung A. Die Phasenzeit ist das Produkt des Phasenanteils mit dem ermittelten Zyklus.



5.2 Teilpunktreserven, Koordination der Grünenden

Die untenstehende Tabelle und das nebenstehende Zeit- Weg- Diagramm leiten die Teilpunktreserven R' und R'' bei einem Basisablauf ohne Linksabbieger des koordinierten Verkehrs im Knoten für eine Koordination der Grünenden ab.

Basis sind die Phasenzeiten $GA[s]$ bzw. $GB[s]$ der durchgehenden Grünbänder und die Phasenzeit $GQ[s]$ des Querverkehrs.

KOORDINATION GRÜNENDE

Gegeben:

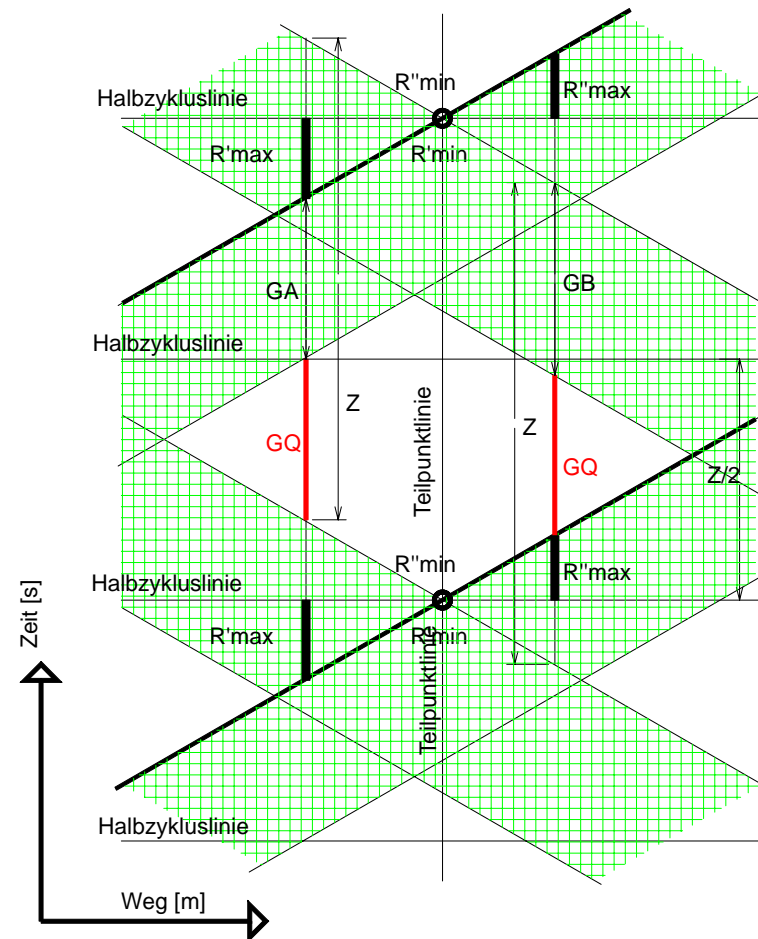
➔ GA
➔ GB
⬆ GQ
Z

Teilpunktreserven	Randbed.
-------------------	----------

Basisablauf

$R''_{max}=0.5*(Z-GQ-GB)$	$R''_{max}>R''_{min}$
$R''_{min}=0$	$Z>GQ+GA$
$R'_{min}=0$	$R'_{max}>R'_{min}$
$R'_{max}=0.5*(Z-GQ-GA)$	$Z>GQ+GB$

Basisablauf



Die Tabelle und das Zeit- Weg- Diagramm leiten die Teilpunktreserven R' und R'' bei Linksabbiegern GLA[s] bzw. GLB[s] des koordinierten Verkehrs im Knoten für eine Koordination der Grünenden ab.

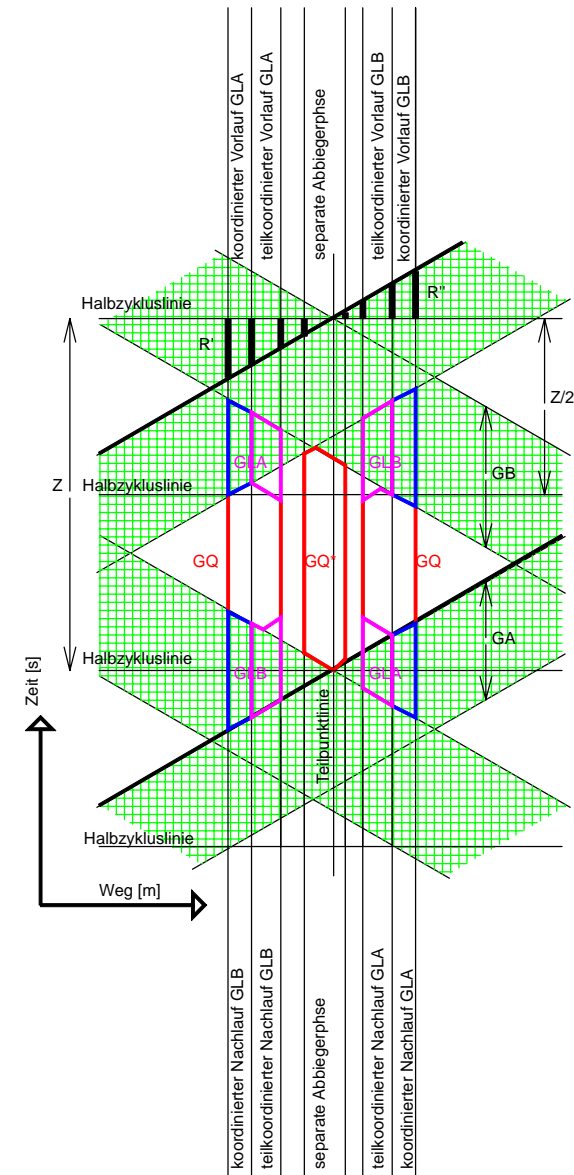
Basis sind die Phasenzeiten GA[s] bzw. GB[s] der durchgehenden Grünbänder, die Phasenzeiten GLA[s] bzw. GLB[s] der Linksabbieger des koordinierten Verkehrs und die Phasenzeit GQ[s] des Querverkehrs. Bei einer separaten Linksabbieger- Phase wird die Phasenzeit GQ[s] zu $GQ^*[s] = GQ + GLA$ oder $GQ^*[s] = GQ + GLB$, der grössere Wert ist massgebend.

Die Teilpunktreserven gelten für koordinierte oder teilkkoordinierte Vorläufe bzw. Nachläufe der Linksabbieger, bzw. für eine separate Linksabbieger- Phase.

KOORDINATION GRÜNENDE

Gegeben:	
	GA
	GLA
	GB
	GLB
	GQ
	Z

Teilpunktreserven	Randbed.
koordinierter Nachlauf GLA koordinierter Vorlauf GLB	
$R''_{max}=0.5*(Z-GQ-GB)$ $R''_{min}=0.5*(GLB+GA-GB)$ $R''_{min}=0.5GLA$ grösserer Wert massgebend	$R''_{max}>R''_{min}$
$R'_{min}=0.5*GLB$ $R'_{min}=0.5*(GLA-GA+GB)$ grösserer Wert massgebend $R'_{max}=0.5*(Z-GQ-GA)$	$R'_{max}>R'_{min}$
koordinierter Vorlauf GLA koordinierter Nachlauf GLB	
$GQ^*=GQ+GLA$ $GQ^*=GQ+GLB$ grösserer Wert massgebend	
teilkordinierter Nachlauf GLA teilkordinierter Vorlauf GLB	
$R'_{max}=0.5*(GLB+GA-GB)$ $R'_{max}=0.5GLA$ grösserer Wert massgebend $R'_{min}=0.5*(Z-GQ^*-GB)>0$ $R'_{min}=0.5*(GQ+GA+GLA+GLB-Z)$ grösserer Wert massgebend	$R'_{max}>R'_{min}$ $Z>GQ+GA+GLB$
$R'_{min}=0.5*(Z-GQ^*-GA)>0$ $R'_{min}=0.5*(GQ+GB+GLA+GLB-Z)$ grösserer Wert massgebend $R'_{max}=0.5*GLB$ $R'_{max}=0.5*(GLA-GA+GB)>0$ grösserer Wert massgebend	$R'_{max}>R'_{min}$ $Z>GQ+GB+GLA$
teilkordinierter Vorlauf GLA teilkordinierter Nachlauf GLB	
separate Abbiegerphase	
$R'_{max}=0.5*(Z-GQ^*-GB)$ $R'_{min}=0$	$R'_{max}>R'_{min}$ $Z>GQ^*+GA$
$R'_{min}=0$ $R'_{max}=0.5*(Z-GQ^*-GA)$	$R'_{max}>R'_{min}$ $Z>GQ^*+GB$
separate Abbiegerphase	



Die Tabelle stellt die Ermittlung der Teilpunktreserven für den Entwurf der Koordination der Grünenden zusammen.

Basis sind die Phasenanteile. Weil der Zyklus der Koordination noch nicht bekannt ist, wird bei den Teilpunktreserven mit Phasenanteilen anstatt mit Phasenzeiten gerechnet:

- GA Phasenanteil des durchgehenden koordinierten Verkehrs der Richtung A
- GLA Phasenanteil der Linksabbieger der Richtung A
- GB Phasenanteil des durchgehenden koordinierten Verkehrs der Richtung B
- GLB Phasenanteil der Linksabbieger der Richtung B
- GQ Phasenanteil des Querverkehrs

Die Phasenanteile ergeben theoretisch sich zu:

$$G_i = \frac{Q_i}{S_i} + \frac{t_{zi}}{Z} \text{ mit}$$

$G_i [PWE/h]$ Phasenanteile der kritischen Fahrstreifen

$Q_i [PWE/h]$ Belastungen der kritischen Fahrstreifen

$S_i [PWE/h]$ Sättigungsraten der kritischen Fahrstreifen

$t_z [s]$ Zwischenzeiten zwischen den kritischen Fahrstreifen

$Z [s]$ Zyklus.

Für einen unbekanntem Zyklus gilt dann für die Phasenanteile angenähert:

$$G_i \cong \frac{Q_i}{1800} + \frac{1}{15} \cdot \text{Vereinfachend wird angenommen, dass Phasenanteile und Teilpunktreserven unabhängig von der Umlaufzeit sind.}$$

KOORDINATION GRÜNENDE

Gegeben:		Gegeben:	
➡ GA		➡ GA	
➡ GB		↕ GLA	
↕ GQ		➡ GB	
Z=1		↕ GLB	
		↕ GQ	
		Z=1	
Teilpunktreserven	Randbedingung	Teilpunktreserven	Randbedingung
Basisablauf		koordinierter Nachlauf GLA koordinierter Vorlauf GLB	
R''max=0.5*(1-GQ-GB) R''min=0	R''max>R''min, 1>GQ+GA	R''max=0.5*(1-GQ-GB) R''min=0.5*(GLB+GA-GB) R''min=0.5GLA größerer Wert massgebend	R''max>R''min
R''min=0		R''min=0.5*GLB R''min=0.5*(GLA-GA+GB) größerer Wert massgebend	
R''max=0.5*(1-GQ-GA)	R''max>R''min, 1>GQ+GB	R''max=0.5*(1-GQ-GA)	R''max>R''min
Basisablauf		koordinierter Vorlauf GLA koordinierter Nachlauf GLB	
		GQ*=GQ+GLA GQ*=GQ+GLB größerer Wert massgebend	
		teilkordinierter Nachlauf GLA teilkordinierter Vorlauf GLB	
		R''max=0.5*(GLB+GA-GB) R''max=0.5GLA größerer Wert massgebend	R''max>R''min 1>GQ+GA+GLB
		R''min=0.5*(1-GQ*-GB)>0 R''min=0.5*(GQ+GA+GLA+GLB-1) größerer Wert massgebend	
		R''min=0.5*(1-GQ*-GA)>0 R''min=0.5*(GQ+GB+GLA+GLB-1) größerer Wert massgebend	R''max>R''min 1>GQ+GB+GLA
		R''max=0.5*GLB R''max=0.5*(GLA-GA+GB)>0 größerer Wert massgebend	
		teilkordinierter Vorlauf GLA teilkordinierter Nachlauf GLB	
		separate Abbiegerphase	
		R''max=0.5*(1-GQ*-GB) R''min=0	R''max>R''min, 1>GQ*+GA
		R''min=0	
		R''max=0.5*(1-GQ*-GA) R''min=0	R''max>R''min, 1>GQ*+GB
		R''min=0	
		separate Abbiegerphase	

5.3 Teilpunktreserven, Koordination der Grünanfänge

Die untenstehende Tabelle und das nebenstehende Zeit- Weg- Diagramm leiten die Teilpunktreserven R' und R'' bei einem Basisablauf ohne Linksabbieger des koordinierten Verkehrs im Knoten für eine Koordination der Grünanfänge ab.

Basis sind die Phasenzeiten $GA[s]$ bzw. $GB[s]$ der durchgehenden Grünbänder und die Phasenzeit $GQ[s]$ des Querverkehrs.

KOORDINATION GRÜNANFANG

Gegeben:

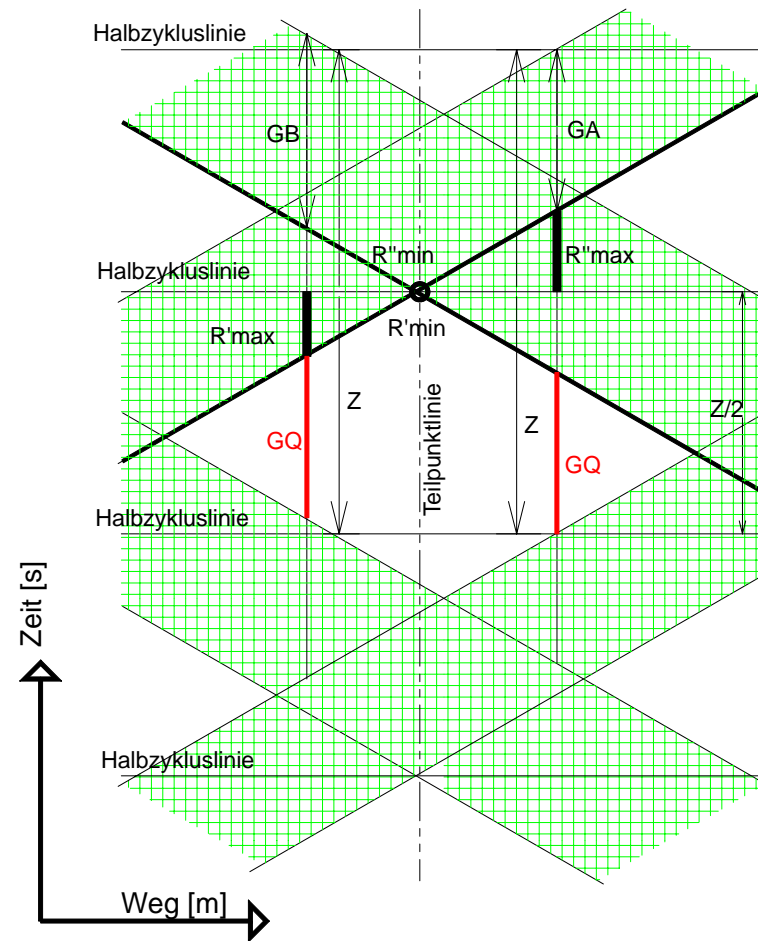
➔ GA
➔ GB
⬇ GQ
Z

Teilpunktreserven	Randbedingung
-------------------	---------------

Basisablauf

$R''_{max}=0.5*(Z-GQ-GA)$	$R''_{max}>R''_{min}$
$R''_{min}=0$	$Z>GQ+GB$
$R'_{min}=0$	$R'_{max}>R'_{min}$
$R'_{max}=0.5*(Z-GQ-GB)$	$Z<GQ+GA$

Basisablauf



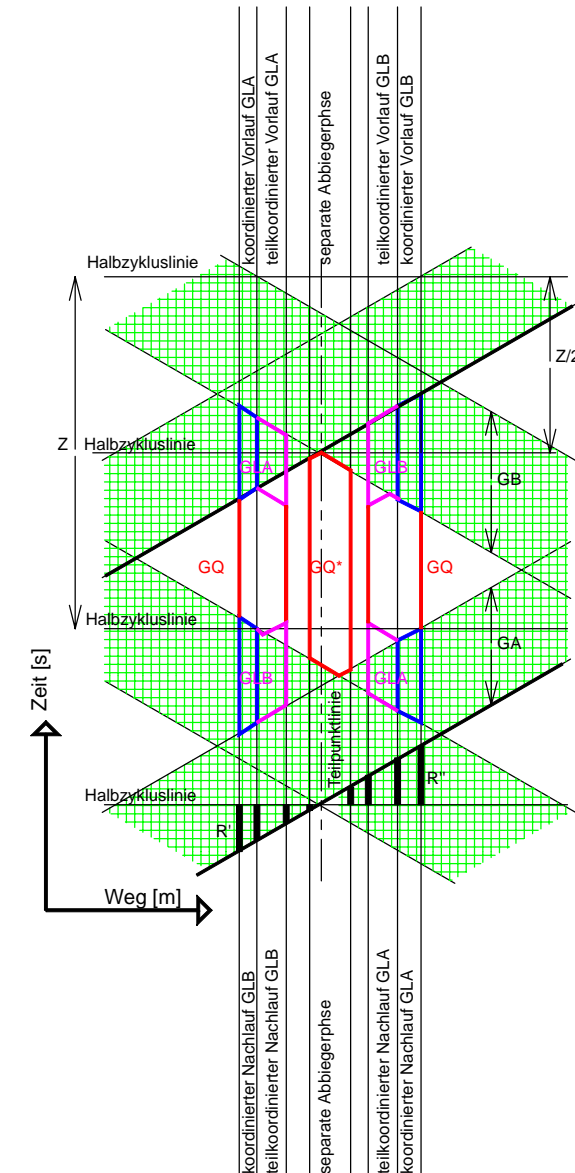
Die Tabelle und das Zeit- Weg- Diagramm leiten die Teilpunktreserven R' und R'' bei Linksabbiegern GLA[s] bzw. GLB[s] des koordinierten Verkehrs im Knoten für eine Koordination der Grünanfänge ab.

Basis sind die Phasenzeiten GA[s] bzw. GB[s] der durchgehenden Grünbänder, die Phasenzeiten GLA[s] bzw. GLB[s] der Linksabbieger des koordinierten Verkehrs und die Phasenzeit GQ[s] des Querverkehrs. Bei einer separaten Linksabbieger- Phase wird die Phasenzeit GQ[s] zu $GQ^*[s] = GQ + GLA$ oder $GQ^*[s] = GQ + GLB$, der grössere Wert ist massgebend.

Die Teilpunktreserven gelten für koordinierte oder teilkoordinierte Vorläufe bzw. Nachläufe der Linksabbieger, bzw. für eine separate Linksabbieger- Phase.

KOORDINATION GRÜNFANG

Teilpunktreserven		Randbed.
Gegeben: → GA ↙ GLA ← GB ↘ GLB ⬆ GQ Z		
koordinierter Nachlauf GLA koordinierter Vorlauf GLB		
$R''_{max} = 0.5 \cdot (Z - GQ - GA)$ $R''_{min} = 0.5 \cdot (GLA - GA + GB)$ $R''_{min} = 0.5 \cdot GLB$ grösserer Wert massgebend	$R''_{max} > R''_{min}$	
$R'_{min} = 0.5 \cdot GLA$ $R'_{min} = 0.5 \cdot (GLB - GB + GA)$ grösserer Wert massgebend $R'_{max} = 0.5 \cdot (Z - GQ - GB)$	$R'_{max} > R'_{min}$	
koordinierter Vorlauf GLA koordinierter Nachlauf GLB		
$GQ^* = GQ + GLA$ $GQ^* = GQ + GLB$ grösserer Wert massgebend		
teilkoordinierter Nachlauf GLA teilkoordinierter Vorlauf GLB		
$R''_{max} = 0.5 \cdot (GLA - GA + GB)$ $R''_{max} = 0.5 \cdot GLB$ grösserer Wert massgebend $R''_{min} = 0.5 \cdot (Z - GQ^* - GA) > 0$ $R''_{min} = 0.5 \cdot (GQ + GB + GLA + GLB - Z)$ grösserer Wert massgebend	$R''_{max} > R''_{min}$ $Z > GQ + GB + GLA$	
$R'_{min} = 0.5 \cdot (Z - GQ^* - GB)$ $R'_{min} = 0.5 \cdot (GQ + GA + GLA + GLB - Z)$ grösserer Wert massgebend $R'_{max} = 0.5 \cdot GLA$ $R'_{max} = 0.5 \cdot (GLB - GB + GA) > 0$ grösserer Wert massgebend	$R'_{max} > R'_{min}$ $Z > GQ + GA + GLB$	
teilkoordinierter Vorlauf GLA teilkoordinierter Nachlauf GLB		
separate Abbiegerphase		
$R''_{max} = 0.5 \cdot (Z - GQ^* - GA)$ $R''_{min} = 0$	$R''_{max} > R''_{min}$ $Z > GQ^* + GB$	
$R'_{min} = 0$ $R'_{max} = 0.5 \cdot (Z - GQ^* - GB)$	$R'_{max} > R'_{min}$ $Z > GQ^* + GA$	
separate Abbiegerphase		



Die Tabelle stellt die Ermittlung der Teilpunktreserven für den Entwurf der Koordination der Grünanfänge zusammen.

Basis sind die Phasenanteile. Weil der Zyklus der Koordination noch nicht bekannt ist, wird bei den Teilpunktreserven mit Phasenanteilen anstatt mit Phasenzeiten gerechnet:

- GA Phasenanteil des durchgehenden koordinierten Verkehrs der Richtung A
- GLA Phasenanteil der Linksabbieger der Richtung A
- GB Phasenanteil des durchgehenden koordinierten Verkehrs der Richtung B
- GLB Phasenanteil der Linksabbieger der Richtung B
- GQ Phasenanteil des Querverkehrs

Die Phasenanteile ergeben theoretisch sich zu:

$$G_i = \frac{Q_i}{S_i} + \frac{t_{zi}}{Z} \text{ mit}$$

$G_i [PWE/h]$ Phasenanteile der kritischen Fahrstreifen

$Q_i [PWE/h]$ Belastungen der kritischen Fahrstreifen

$S_i [PWE/h]$ Sättigungsraten der kritischen Fahrstreifen

$t_z [s]$ Zwischenzeiten zwischen den kritischen Fahrstreifen

$Z [s]$ Zyklus.

Bei einem unbekanntem Zyklus gilt dann für die Phasenanteile angenähert:

$$G_i \cong \frac{Q_i}{1800} + \frac{1}{15} \cdot \text{Vereinfachend wird angenommen, dass Phasenanteile und Teilpunktreserven unabhängig von der Umlaufzeit sind.}$$

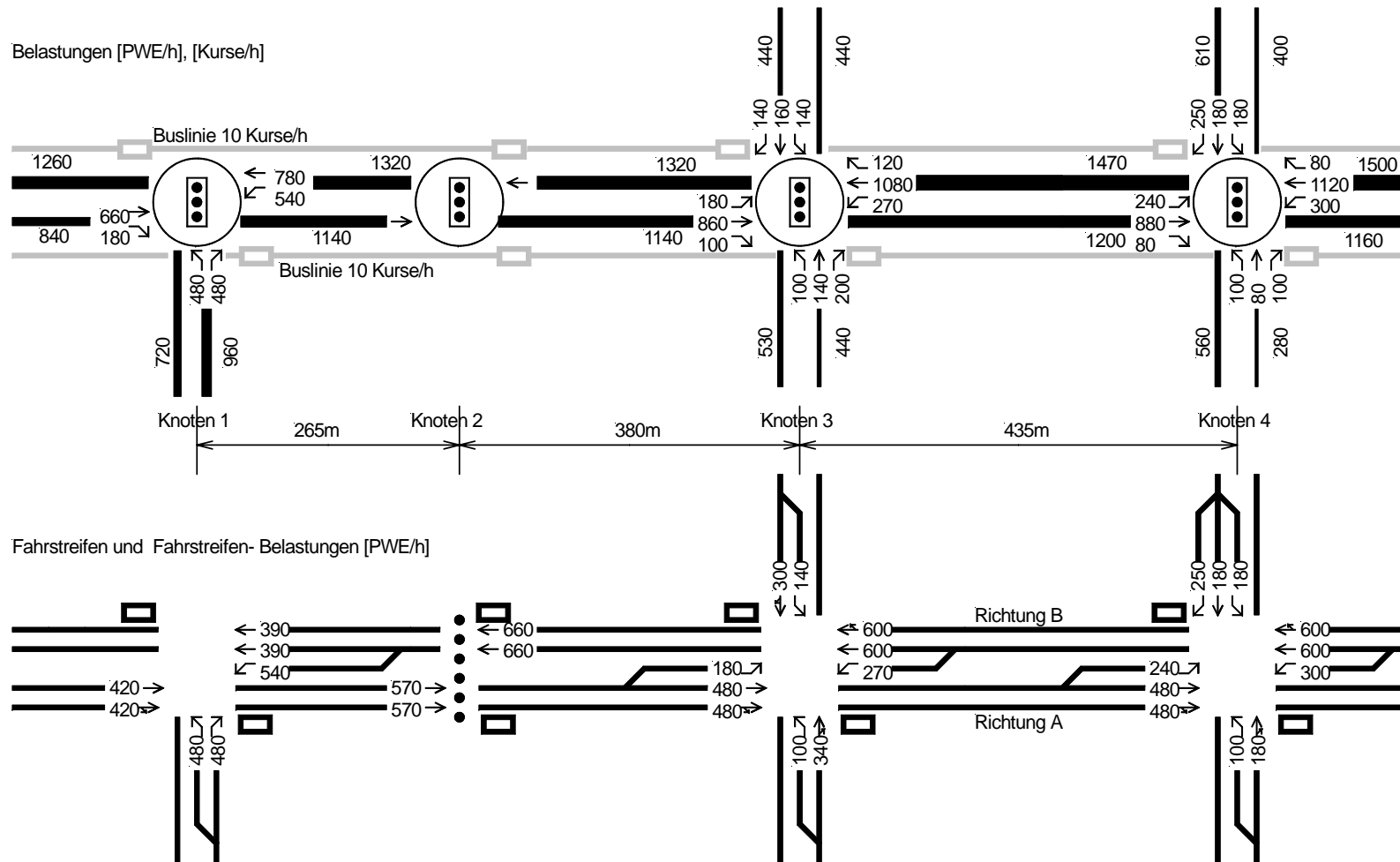
KOORDINATION GRÜNFANG

Gegeben:		Gegeben:	
➡ GA		➡ GA	
➡ GB		➡ GLA	
↔ GQ		➡ GB	
Z=1		➡ GLB	
		↔ GQ	
		Z=1	
Teilpunktreserven	Randbedingung	Teilpunktreserven	Randbedingung
Basisablauf		koordinierter Nachlauf GLA koordinierter Vorlauf GLB	
R''max=0.5*(1-GQ-GA) R''min=0	R''max>R''min 1>GQ+GB	R''max=0.5*(1-GQ-GA) R''min=0.5*(GLA-GA+GB) R''min=0.5*GLB größerer Wert massgebend	R''max>R''min
R''min=0	R''max>R''min 1>GQ+GA	R''min=0.5*GLA R''min=0.5*(GLB-GB+GA) größerer Wert massgebend	
R''max=0.5*(1-GQ-GB)		R''max=0.5*(1-GQ-GB)	R''max>R''min
Basisablauf		koordinierter Vorlauf GLA koordinierter Nachlauf GLB	
		GQ*=GQ+GLA GQ*=GQ+GLB größerer Wert massgebend	
		teilkordinierter Nachlauf GLA teilkordinierter Vorlauf GLB	
		R''max=0.5*(GLA-GA+GB) R''max=0.5*GLB größerer Wert massgebend	R''max>R''min 1>GQ+GB+GLA
		R''min=0.5*(1-GQ*-GA)>0 R''min=0.5*(GQ+GB+GLA+GLB-1) größerer Wert massgebend	
		R''min=0.5*(Z-GQ*-GB) R''min=0.5*(GQ+GA+GLA+GLB-1) größerer Wert massgebend	R''max>R''min 1>GQ+GA+GLB
		R''max=0.5*GLA R''max=0.5*(GLB-GB+GA)>0 größerer Wert massgebend	
		teilkordinierter Vorlauf GLA teilkordinierter Nachlauf GLB	
		separate Abbiegerphase	
		R''max=0.5*(1-GQ*-GA) R''min=0	R''max>R''min 1>GQ*+GB
		R''min=0 R''max=0.5*(1-GQ*-GB)	R''max>R''min 1>GQ*+GA
		separate Abbiegerphase	

5.4 Beispiel für den Entwurf der Koordination

Der Entwurf einer Koordination wird an Hand eines Beispiels aufgezeigt. Vier Knoten in ungleichmässigen Abständen im Verlauf eines vierstreifigen Strassenzugs mit separaten Abbiegestreifen werden koordiniert. Es gilt ein Tempolimit von 50 km/h.

Der obere Teil des Diagramms bringt dazu die stündlichen Belastungen des öffentlichen und des Individualverkehrs, der untere Teil die Fahrstreifen und die entsprechenden Fahrstreifen-Belastungen.



Die Tabelle ermittelt pro Knoten im oberen Teil die Phasenanteile und im unteren Teil die Teilpunktreserven R' und R'' für eine Koordination der Grünenden. Diese Koordination eignet sich wegen der hohen Auslastungen der Knoten.

Die ermittelten Teilpunktreserven für die Richtung A werden anschliessend in einem Zeit- Weg- Diagramm auf den Knotenlinien aufgetragen. Dabei liegen die Teilpunktreserven R'' über und die Teilpunktreserven R' unter jeder Halbzyklus- Linie.

KOORDINATION GRÜNENDE

Knoten: 1		Knoten: 2		Knoten: 3		Knoten: 4	
Belastg. Phasen- [PWE/h] -Anteil		Belastg. Phasen- [PWE/h] -Anteil		Belastg. Phasen- [PWE/h] -Anteil		Belastg. Phasen- [PWE/h] -Anteil	
➡ A	420 0.300	➡ A	570 0.383	➡ A	480 0.333	➡ A	480 0.333
➡ LA	0 0.000			➡ LA	180 0.167	➡ LA	240 0.200
➡ B	390 0.283	➡ B	660 0.433	➡ B	600 0.400	➡ B	600 0.400
➡ LB	540 0.367			➡ LB	270 0.217	➡ LB	300 0.233
➡ Q	480 0.333	➡ Q*	300 0.233	➡ Q**	480 0.400	➡ Q**	360 0.333
Z	1.000	Z	1.000	Z	1.000	Z	1.000
Teilpunktreserven		Teilpunktreserven		Teilpunktreserven		Teilpunktreserven	
koordinierter Nachlauf GLA		Basisablauf		koordinierter Nachlauf GLA		koordinierter Nachlauf GLA	
koordinierter Vorlauf GLB		koordinierter Vorlauf GLB		koordinierter Vorlauf GLB		koordinierter Vorlauf GLB	
R''max= 0.192	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.167	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.100	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.133	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.192		R''min= 0.000		R''min= 0.075		R''min= 0.083	
R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.083	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.100	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.192		R''min= 0.000		R''min= 0.108		R''min= 0.117	
R''min= 0.183	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.117	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.133	Teilpunkt-Reserve
R''min= -0.008		R''min= 0.192		R''min= 0.133		R''min= 0.133	
R''min= 0.183	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.192	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.133	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.167	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.183		R''min= 0.133		R''min= 0.167		R''min= 0.167	
R''max= 0.183	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.192	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.133	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.167	Teilpunkt-Reserve
R''max= 0.183		R''max= 0.133		R''max= 0.167		R''max= 0.167	
koordinierter Vorlauf GLA		Basisablauf		koordinierter Vorlauf GLA		koordinierter Vorlauf GLA	
koordinierter Nachlauf GLB		koordinierter Nachlauf GLB		koordinierter Nachlauf GLB		koordinierter Nachlauf GLB	
GQ*= 0.333	Teilpunkt-Reserve	GQ*= 0.567	Teilpunkt-Reserve	GQ*= 0.567	Teilpunkt-Reserve	GQ*= 0.533	Teilpunkt-Reserve
GQ*= 0.700		GQ*= 0.617		GQ*= 0.617		GQ*= 0.567	
GQ*= 0.700		GQ*= 0.617		GQ*= 0.617		GQ*= 0.567	
teilkoordinierter Nachlauf GLA		teilkoordinierter Nachlauf GLA		teilkoordinierter Nachlauf GLA		teilkoordinierter Nachlauf GLA	
teilkoordinierter Vorlauf GLB		teilkoordinierter Vorlauf GLB		teilkoordinierter Vorlauf GLB		teilkoordinierter Vorlauf GLB	
R''max= 0.192	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.075	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.075	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.083	Teilpunkt-Reserve
R''max= 0.000		R''max= 0.083		R''max= 0.083		R''max= 0.100	
R''max= 0.192	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.083	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.083	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.100	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.008		R''min= 0.000		R''min= 0.000		R''min= 0.017	
R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.058	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.058	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.050	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.008		R''min= 0.025		R''min= 0.025		R''min= 0.050	
R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.092	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.092	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.083	Teilpunkt-Reserve
R''min= -0.008		R''min= 0.108		R''min= 0.108		R''min= 0.083	
R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.117	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.117	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.117	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.000		R''min= 0.117		R''min= 0.117		R''min= 0.133	
R''min= 0.183	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.117	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.117	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.133	Teilpunkt-Reserve
R''min= -0.008		R''min= 0.133		R''min= 0.133		R''min= 0.133	
R''min= 0.183	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.133	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.133	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.133	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.183		R''min= 0.133		R''min= 0.133		R''min= 0.133	
R''max= 0.183	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.117	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.117	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.133	Teilpunkt-Reserve
R''max= 0.183		R''max= 0.133		R''max= 0.133		R''max= 0.133	
R''max= 0.183	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.133	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.133	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.133	Teilpunkt-Reserve
R''max= 0.183		R''max= 0.133		R''max= 0.133		R''max= 0.133	
teilkoordinierter Vorlauf GLA		teilkoordinierter Vorlauf GLA		teilkoordinierter Vorlauf GLA		teilkoordinierter Vorlauf GLA	
teilkoordinierter Nachlauf GLB		teilkoordinierter Nachlauf GLB		teilkoordinierter Nachlauf GLB		teilkoordinierter Nachlauf GLB	
separate Abbiegerphase		separate Abbiegerphase		separate Abbiegerphase		separate Abbiegerphase	
R''max= 0.008	Teilpunkt-Reserve	R''max= -0.008	keine Teilpunkt-Reserve	R''max= -0.008	keine Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.017	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.000		R''min= 0.000		R''min= 0.000		R''min= 0.000	
R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.000	keine Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.000	keine Teilpunkt-Reserve	R''min= 0.000	Teilpunkt-Reserve
R''min= 0.000		R''min= 0.000		R''min= 0.000		R''min= 0.000	
R''max= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.025	keine Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.025	keine Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.050	Teilpunkt-Reserve
R''max= 0.000		R''max= 0.025		R''max= 0.025		R''max= 0.050	
R''max= 0.000	Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.025	keine Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.025	keine Teilpunkt-Reserve	R''max= 0.050	Teilpunkt-Reserve
R''max= 0.000		R''max= 0.025		R''max= 0.025		R''max= 0.050	
separate Abbiegerphase		separate Abbiegerphase		separate Abbiegerphase		separate Abbiegerphase	

Es gibt Scharen von Grünenden, die durch Teilpunktreserven aller Knoten führen und die bei der gegebenen Koordinations- Geschwindigkeit verschiedene Umlaufzeiten erlauben (im nebenstehenden Zeit- Weg- Diagramm grau eingetragen).

In diesem Rahmen lässt sich die Koordination des öffentlichen Verkehrs berücksichtigen. Ohne Haltestellen zwischen den Knoten fahren zwar Busse in den Grünbändern des Individualverkehrs. Bei Haltestellen zwischen den Knoten sollte aber der Zyklus der Koordination etwa dem Haltestellen- Aufenthalt $H[s]$ plus den Zeiten für das Verzögern und Beschleunigen entsprechen, damit anschliessend an den Halt eine Busfahrt wieder in das folgende Grünband passt: $Z = 2 \cdot \frac{v}{b} + H \approx 60s$.

$$\text{Grünband passt: } Z = 2 \cdot \frac{v}{b} + H \approx 60s.$$

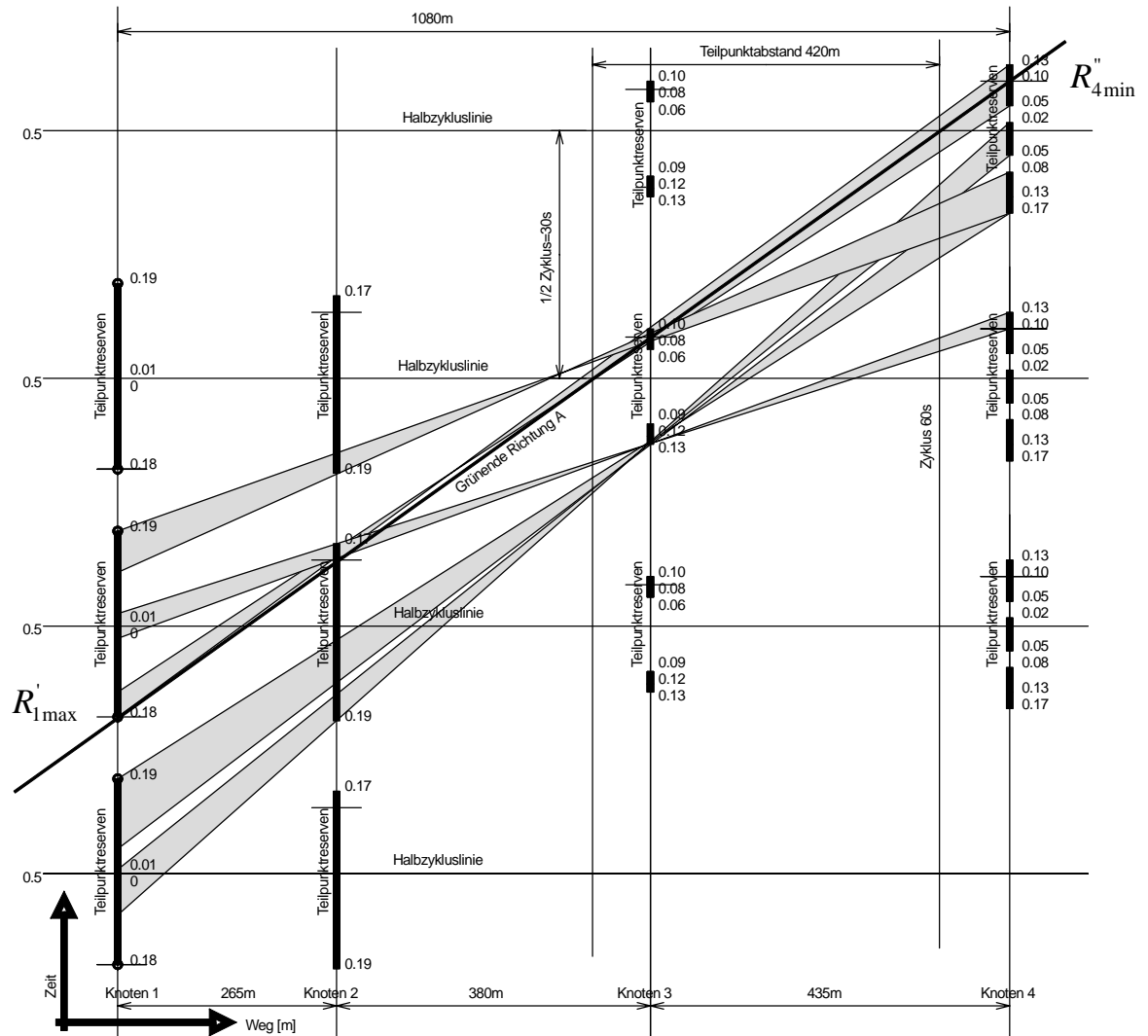
Ein niedriger Zyklus ist auch aus der Sicht der Fussgänger- Wartezeiten anzustreben.

Eine Lösung für das koordinierte Grünende der Richtung A, das mit der gegebenen Koordinations- Geschwindigkeit von 50 km/h durch Teilpunktreserven aller Knoten führt resultiert im Beispiel mit den Teilpunktreserven $R'_{1max} = 0.183$ im Knoten 1 und $R''_{4min} = 0.100$ im Knoten 4. Der Teilpunktabstand wird zu

$$L_T = \frac{\sum L_k}{2(1 + R'_{1max} + R''_{4min})} = 420m, \text{ der Zyklus zu}$$

$$Z = \frac{L_T}{\frac{1}{2} \cdot v_K} = 60s. \text{ Diese Lösung ist im Diagramm}$$

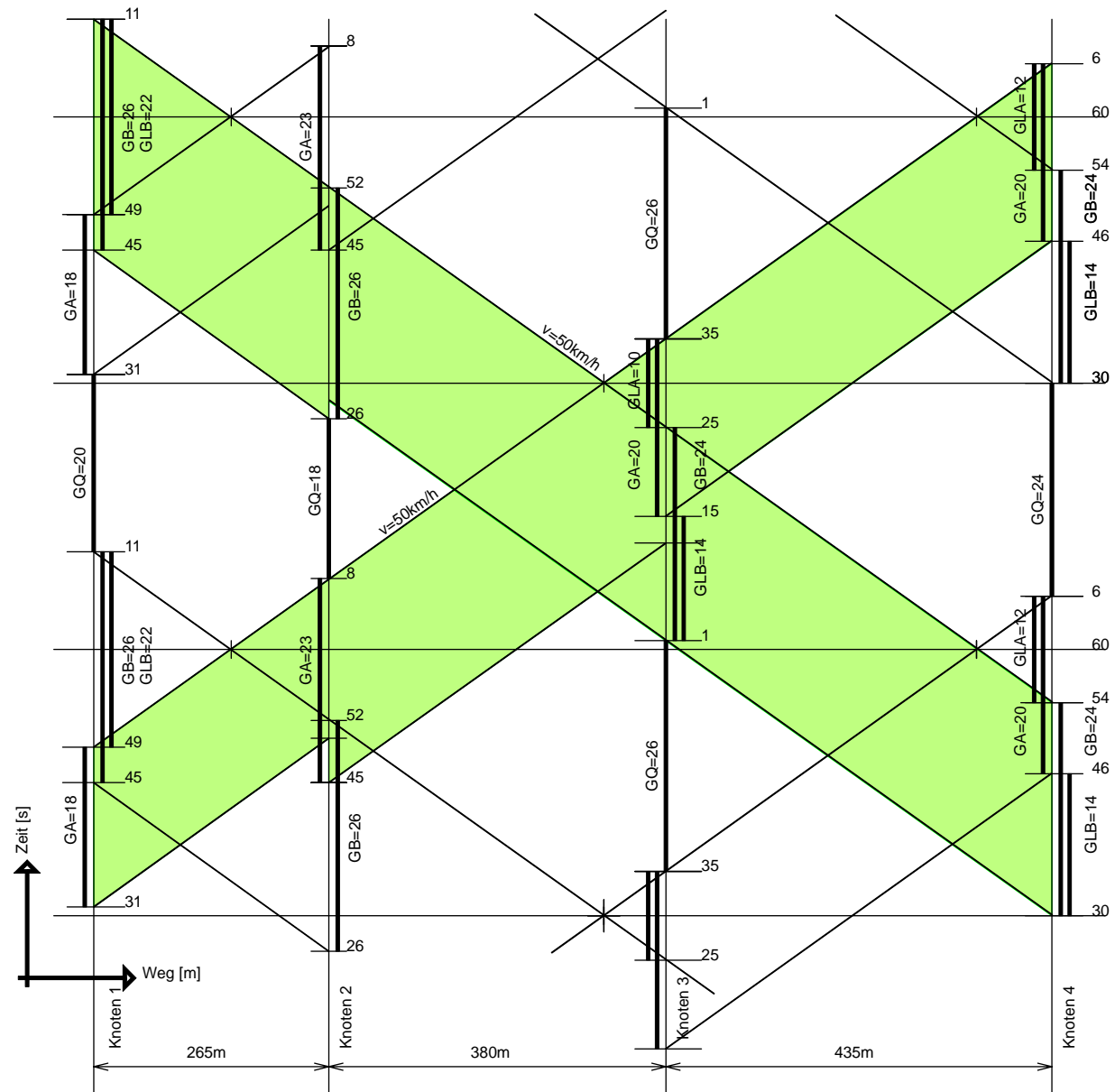
hervorgehoben.



Das ermittelte koordinierte Grünende der Richtung A wird mit der gegebenen Koordinations-Geschwindigkeit von 50 km/h und den Teilpunkten im Zeit- Weg- Diagramm übernommen. Das Grünende der Richtung B liegt spiegelbildlich zu jenem der Richtung A. Die Phasenzeiten sind jeweils das Produkt der Phasenanteile mit dem ermittelten Zyklus. Die Ausnahmen sind:

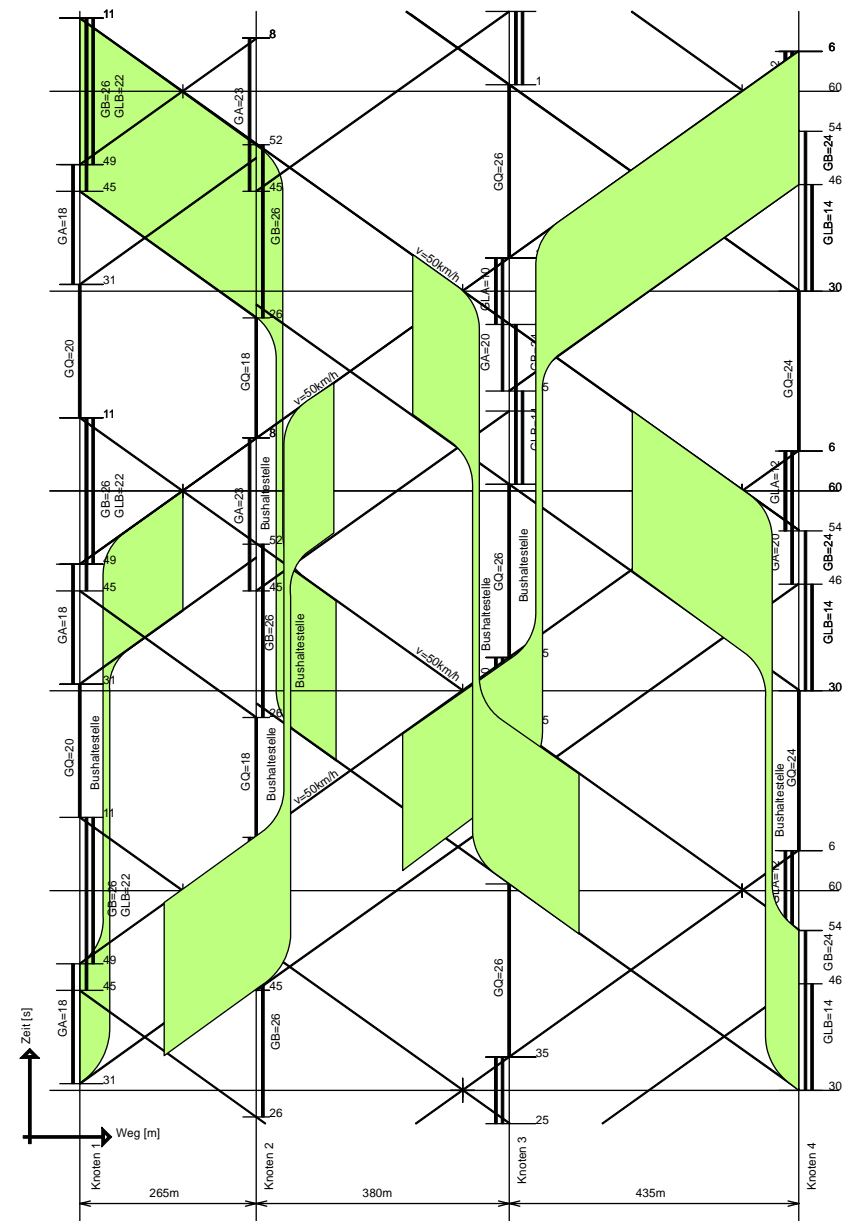
- Im Knoten 1 wird bei der ermittelten Koordination die Phasenzeit GB nur durch den Querverkehr eingeschränkt. Um ein stetige Grünband für die Richtung B zu erreichen, entspricht die Phasenzeit GB im Knoten 1 jener im Knoten 2.
- In den Knoten 2,3 und 4 nützt die ermittelte Koordination die Teilpunktreserven nicht voll aus. Der Spielraum wird dort für grössere Phasenzeiten des Querverkehrs genutzt.

Das nebenstehende Zeit- Weg- Diagramm zeigt die resultierende Koordination. Die Phasenzeiten in jedem Knoten und die beiden gegenläufigen Grünbänder sind dort eingetragen.



Im nebenstehende Zeit- Weg- Diagramm der resultierenden Koordination ist der Fahrtverlauf der Busse eingetragen:

- Liegt keine Haltestellen zwischen zwei Knoten, dann fahren Busse in den Grünbändern des Individualverkehrs.
- Liegt eine Haltestellen zwischen zwei Knoten, dann entspricht der Zyklus der Koordination etwa dem Haltestellen- Aufenthalt und den Zeiten für das Verzögern und Beschleunigen. Im Zeit- Weg- Diagramm sind die Haltestellen- Aufenthalte, und vorher das Verzögern bzw. Ausgliedern aus dem Grünband und anschließend das Beschleunigen bzw. Einfügen in das folgende Grünband eingetragen.



6. Ermitteln von Wartezeiten und Stau

6.1 Grundlagen

Deterministische Anteile, Individualverkehr

Mit den Angaben:

$q[PWE/s], Q[PWE/h]$	Zufluss
$q_g[PWE/s], Q_g[PWE/h]$	Zufluss während der Grünzeit $g[s]$
$q_r[PWE/s], Q_r[PWE/h]$	Zufluss während der Rotzeit $r[s]$
$s[PWE/s]$	Sättigung
$Z[s]$	Zyklus
$\lambda = g/Z$	Anteil der Grünzeit am Zyklus
$l = \lambda \cdot s[PWE/h]$	Leistung
$r[s]$	Rotzeit
$r^*[s]$	Teil der Rotzeit mit Zufluss $q_r[PWE/s]$
$o[s]$	Offset von $r^*[s]$ nach Beginn der Rotzeit
$x = q/l$	Sättigungsgrad

werden die stationären deterministischen Anteile an den Wartezeiten bzw. am Stau bei koordiniertem Verkehr

$$\text{zu } w_1^k[s] = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_r}{q} [g_s^k - r^* + 2(r - o)] \text{ bzw. } k_1^k[PWE] = w_1^k \cdot q,$$

$$\text{mit der gesättigten Grünzeit } g_s^k[s] = \frac{Z \cdot q_r}{s - \frac{q_g}{\lambda}}.$$

Mit $q_g = q \cdot \lambda$, $q_r = q \cdot (1 - \lambda)$, $r^* = r$ und $o = 0$ ist der Zufluss unkoordiniert und die stationären deterministischen Anteile an den Wartezeiten

$$\text{bzw. am Stau werden zu } w_1^u[s] = \frac{Z(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}, \quad g_s^u = \frac{rq}{s-q}$$

$$\text{und } k_1^u[PWE] = w_1^u \cdot q.$$

Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastung, Individualverkehr

Die Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastung an den Wartezeiten bzw. am Stau werden

$$w_2[s] = 900 \left[(x-1) - 4Cx/Q + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8 \cdot C \cdot (x+1+2Cx/Q)}{Q/x}} \right]$$

bzw. $k_2[PWE] = w_2 \cdot l$. Dabei gilt für die Konstante C etwa:

- C=1 für unkoordinierte Zufahrten zu Lichtsignalanlagen mit Priorität des öffentlichen Verkehrs
- C~0.75 für koordinierte Zufahrten zu Lichtsignalanlagen mit Priorität des öffentlichen Verkehrs
- C=0.5 für unkoordinierte Zufahrten zu Lichtsignalanlagen ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs.
- C~0.25 für koordinierte Zufahrten zu Lichtsignalanlagen ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs.

Wartezeiten und Stau, Individualverkehr

Die mittlere Wartezeit ist schliesslich $w[s] = w_1 + w_2$, die Fahrzeug-Wartezeit ergibt sich zu $W[PWE \cdot h/h] = w \cdot q$ und die Personen-Wartezeit zu $W_p[Pers \cdot h/h] = w \cdot q \cdot b$ bei einer Fahrzeugbesetzung $b[Pers/PWE]$. Der Stau wird schliesslich zu $k[PWE] = k_1 + k_2$.

Die Wartezeit-Kosten setzen sich zusammen aus den Personenkosten (Personen-Wartezeiten multipliziert mit einem Zeitkosten-Satz) und den Treibstoffkosten (Fahrzeug-Wartezeiten multipliziert mit einem Treibstoffverbrauchs-Faktor und einem Treibstoffkosten-Satz). Die Abgasemissionen sind das Produkt der Fahrzeug-Wartezeiten und von Abgas-Emissionsfaktoren im Stau:

Zeitkosten- Satz	15 Fr. / Pers. · h
Treibstoffverbrauchs- Faktor	1.195 l / h · PWE
Treibstoffkosten- Satz	1.20 Fr. / l
Abgas- Emissionsfaktor NO _x	0.0021 kg / h · PWE
Abgas- Emissionsfaktor NMHC	0.0067 kg / h · PWE
Abgas- Emissionsfaktor CO ₂	2.9624 kg / h · PWE
Partikel- Emissionsfaktor	0.0001 kg / h · PWE

Wartezeiten, öffentlicher Verkehr

Die Wartezeiten des öffentlichen Verkehrs errechnen sich gemäss SN 640 839.

6.2 Beispiel

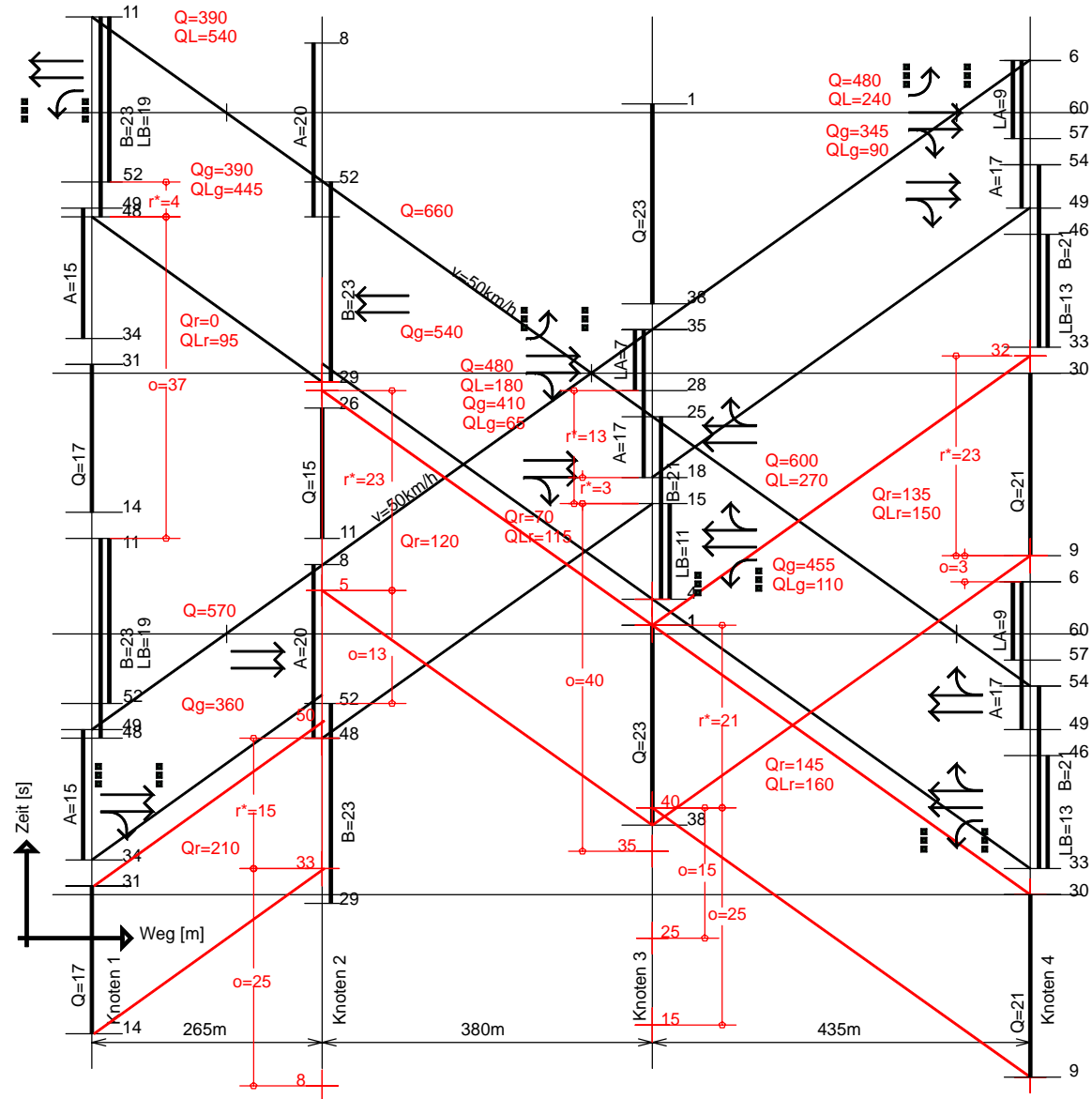
Wartezeiten und Stau des Individualverkehrs werden für das vorne besprochene Beispiel abgeschätzt. Basis sind die dort angeführten Belastungen, die Fahrstreifen- Belastungen und das ermittelt Zeit- Weg Diagramm der Koordination.

Anstatt der Phasenzeiten sind im nebenstehenden Diagramm jetzt die Grünzeiten eingetragen. Die Grünzeiten ergeben sich aus den Phasenzeiten abzüglich den Zwischenzeiten.

Aus den vorne angegebenen Belastungen und Fahrstreifen- Belastungen bzw. aus dem Zeit- Weg Diagramm der Koordination werden dann bestimmt:

- $Q[PWE/h]$ Zufluss
- $Q_g[PWE/h]$ Zufluss während der Grünzeit $g[s]$
- $Q_r[PWE/h]$ Zufluss während der Rotzeit $r[s]$
- $r^*[s]$ Teil der Rotzeit mit dem Zufluss $q_r[PWE/s]$
- $o[s]$ Offset von $r^*[s]$ nach Beginn der Rotzeit.

Diese Daten sind im nebenstehenden Zeit- Weg Diagramm ebenfalls eingetragen. Einen Zufluss während der Rotzeit produzieren vor Allem die Einbieger aus den Querachsen, die anschliessend in den Nachbarknoten der Hauptachse auf das Eintreffen der Grünbänder warten.



Die Tabelle ermittelt schliesslich Wartezeiten und Stau des Individualverkehrs und die Personenwartezeiten von Individualverkehr und Bus. Basis sind die Verkehrsbelastungen, die Daten im vorangegangenen Zeit- Weg- Diagramm der Koordination und die unter den Grundlagen angeführten Formeln.

Der Querverkehr und der Hauptverkehr an den beiden Einfahrten in die Koordination sind nicht koordiniert, alle anderen Verkehrsströme verlaufen koordiniert.

Die Busse werden an den einzelnen Knoten nicht privilegiert, aber die Koordination ist auf die Busfahrten abgestimmt. Die Busfahrten gelten deshalb als koordiniert, ausgenommen an den beiden Einfahrten in die Koordination. Die Busse erleiden die gleichen Wartezeiten wie der Individualverkehr.

Wartezeiten und Stau: koordiniert, ohne Buspriorität																	** (C= 0.25)	* (C= 0.5)
Knoten	1				2		3					4						
Zufahrtstreifen	→A	←B	↖LB	Q	→A	←B	→A	↗LA	←B	↖LB	Q	→A	↗LA	←B	↖LB	Q		
Eingaben gemäss Belastungen und Zeit- Weg- Diagramm																		
S[PWE/h]	2000	2000	2000	1900	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1900	2000	2000	2000	2000	1900		
Q[PWE/h]	420	390	540	480	570	660	480	180	600	270	480	480	240	600	300	360		
Q _g [PWE/h]	105	390	445	136	360	540	410	65	455	110	160	345	90	210	65	108		
Q _r [PWE/h]	315	0	95	344	210	120	70	115	145	160	320	135	150	390	235	252		
g[s]	15	23	19	17	20	23	17	7	21	11	20	17	9	21	13	18		
Z[s]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60		
Wartezeiten und Stau, koordinierter / unkoordinierter Zufluss, deterministischer Teil																		
w ₁ [s]	21.4	0.0	1.2	20.6	5.3	3.4	0.8	5.7	4.8	10.0	17.8	9.5	24.8	18.1	21.7	18.1		
k ₁ [PWE]	2.5	0.0	0.2	2.7	0.8	0.6	0.1	0.3	0.8	0.8	2.4	1.3	1.7	3.0	1.8	1.8		
Wartezeiten und Stau, koordinierter * / unkoordinierter Zufluss **, stochastischer- und Überlastungsteil																		
w ₂ [s]	33.2	2.4	15.4	43.7	14.9	13.7	16.4	24.2	14.5	13.2	16.9	16.4	22.3	27.4	17.8	10.6		
k ₂ [PWE]	4.6	0.5	2.7	6.5	2.8	2.9	2.6	1.6	2.8	1.3	3.0	2.6	1.9	5.3	2.1	1.7		
Wartezeiten und Stau																		
w[s]	54.5	2.4	16.6	64.3	20.2	17.0	17.2	29.8	19.2	23.2	34.8	25.9	47.1	45.5	39.5	28.7		
k[PWE]	7.1	0.5	2.9	9.3	3.6	3.5	2.7	1.9	3.6	2.1	5.4	3.8	3.5	8.3	4.0	3.5		
Personenwartezeiten																		
Knoten	1				2		3					4						
Zufahrt	→A	←B	↖LB	Q	→A	←B	→A	↗LA	←B	↖LB	Q	→A	↗LA	←B	↖LB	Q	Σ	
IV W[Pers h/h]	17	1	3	22	8	8	6	2	8	2	12	9	4	20	4	7	134	
Bus W[Pers h/h]	9	0			3	3	3		3			4		8			34	
Total																	168	

7. Koordination und Priorität

7.1 Grundsätzliches

Die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs - also die Qualität des Verkehrsablaufs aller Verkehrsteilnehmer sowohl im Individualverkehr wie im öffentlichen Verkehr - misst sich an den Wartezeiten von Personen. Eine optimale Lösung für die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs resultiert beim Minimum der Personen- Wartezeiten aller Verkehrsteilnehmer. Neben der Koordination kann die Privilegierung des öffentlichen Verkehrs die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs heben.

Ohne Koordination ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs

Bei isolierten Lichtsignalanlagen folgen die deterministischen Anteile an Wartezeiten und Stau sowohl des öffentlichen wie des Individualverkehrs aus Grünzeit, Belastung und Sättigung.

Die Wartezeitformel für Anteile von Zufallseinflüssen und Überlastung rechnet mit der Konstanten $C=0.5$.

Ohne Koordination mit Priorität des öffentlichen Verkehrs

Die Privilegierung des öffentlichen Verkehrs reduziert die Wartezeiten von Bus und Tram mit Nachlauf, Vorlauf, Zwischenphase und mit Kombinationen dieser Elemente.

Mit einer Privilegierung des öffentlichen Verkehrs ändern sich für den Individualverkehr die deterministischen Anteile an Wartezeiten und Stau nur in dem Mass, mit dem sich (bei Zwischenphasen) die durchschnittlichen Grünzeiten ändern.

Die Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastungen an Wartezeiten und Stau des Individualverkehrs steigen an, denn in der Wartezeitformel für Anteile von Zufallseinflüssen und Überlastung wächst die Konstante C von 0.5 auf 1.0.

Der Nutzen der Privilegierung des öffentlichen Verkehrs für die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs an isolierten Lichtsignalanlagen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- befördert der öffentliche Verkehr mehr Personen als der Individualverkehr, dann steigt mit der Priorität des öffentlichen Verkehrs auch die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs an Lichtsignalanlagen

- wenn der öffentliche Verkehr weniger Personen als der Individualverkehr befördert, dann ist die intermodale Qualität des Verkehrsablaufs mit Priorität nur wenig niedriger als ohne Priorität. Dies gilt aber nur für bestimmte Grade der Privilegierung des öffentlichen Verkehrs (Nachlauf, Nachlauf + Vorlauf, Nachlauf + Zwischenphase + Vorlauf) und unter der Randbedingung, dass die Stauräume des Individualverkehrs ausreichen.

Mit Koordination ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs

Bei koordinierten Zufahrten sind sowohl die deterministischen Anteile, wie die Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastungen an Wartezeiten und Stau niedriger als bei isolierten Zufahrten. Dies gilt für den Individualverkehr; aber auch für den öffentlichen Verkehr, wenn die Koordination auf die Fahrten der Kursfahrzeuge abgestimmt ist.

So berücksichtigt in koordinierten Zufahrten die Wartezeitformel für die deterministischen Anteile an Wartezeiten und Stau neben der Grünzeit auch den Zufluss während der Grün- und Rotzeit und den Offset nach Beginn der Rotzeit.

Die Wartezeitformel für Anteile von Zufallseinflüssen und Überlastungen rechnet in koordinierten Zufahrten mit der Konstante $C\sim 0.25$.

Daraus resultiert eine hohe intermodale Qualität des Verkehrsablaufs.

Mit Koordination mit Priorität des öffentlichen Verkehrs

Mit Nachlauf, Nachlauf + Vorlauf, Nachlauf + Zwischenphase + Vorlauf senkt die Priorität die Wartezeiten des öffentlichen Verkehrs.

Mit der Privilegierung des öffentlichen Verkehrs bleiben (ausgenommen bei Zwischenphasen) die Vorteile der Koordination für den Individualverkehr bei den deterministischen Anteilen an Wartezeiten und Stau erhalten, weil sich die Wartezeitformel für die deterministischen Anteile an koordinierten Zufahrten auf durchschnittliche Grünzeiten bezieht.

Aber die Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastungen an Wartezeiten und Stau steigen bei koordinierten Zufahrten auf das hohe Niveau der isolierten Zufahrten an. So wächst bei koordinierten Zufahrten in der Wartezeitformel für Anteile von Zufallseinflüssen und Überlastung die Konstante C von ~ 0.25 auf ~ 0.75 .

So ist es wesentlich schwieriger, mit Koordination und Priorität des öffentlichen Verkehrs eine höhere intermodale Qualität des Verkehrsablaufs zu erzielen, als mit der Koordination allein.

Eine hohe intermodale Qualität des Verkehrsablaufs bei einer Koordination zusammen mit einer Priorität des öffentlichen Verkehrs wird dort erreicht:

- wo der öffentliche Verkehr mehr Personen als der Individualverkehr befördert
- wo die Ein- und Abbieger gegenüber den durchgehenden, koordinierten Verkehrsströmen dominieren
- wo die Auslastung der koordinierten Knoten stark variiert.

Anstatt einer grossräumigen Koordination mit einer gemeinsamen Umlaufzeit sind dann zweckmässig:

- kleine Koordinationsgruppen
- koordinierte Knotenpaare, die praktisch wie ein Einzelknoten arbeiten und während einem Umlauf vom Verkehr durchfahren werden
- isolierte Knoten ohne Koordinations- Bedingungen.

Für eine hohe intermodale Qualität des Verkehrsablaufs lässt sich eine grossräumige Koordination dort sinnvoll brechen:

- wo die Stauräume an den Koordinations- Brüchen ausreichen
- wo die Randbedingungen der Koordination zu Umlaufzeit und Phasenfolge jedes Knotens die Privilegierung des öffentlichen Verkehrs einschränken.

7.2 Beispiel

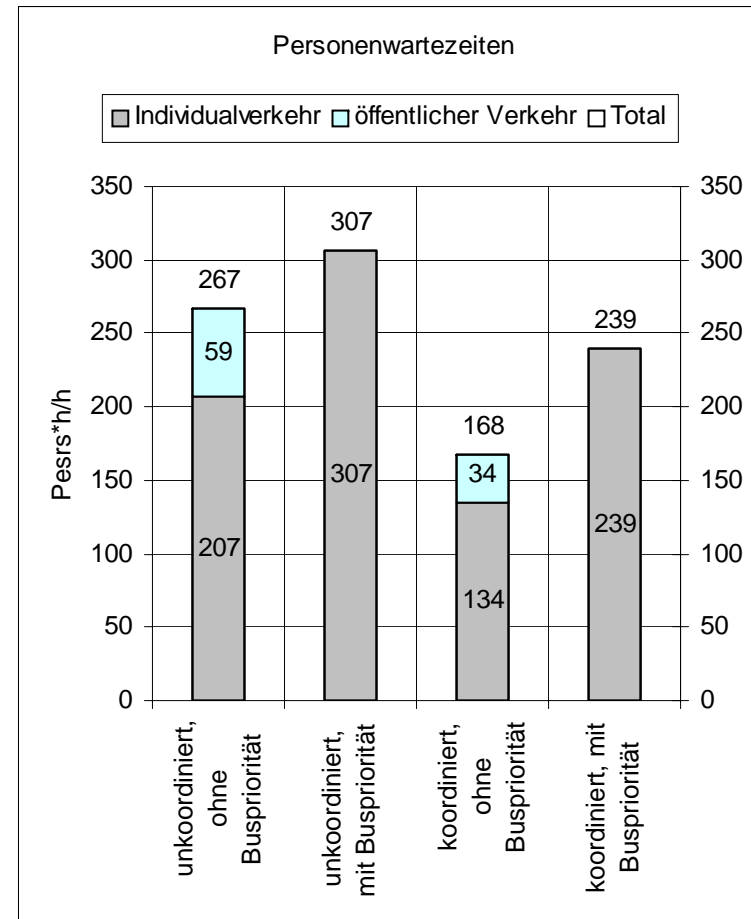
Ausgangslage ist das Beispiel mit vier Knoten, deren Koordination vorne ermittelt wurde. 20 Busse/h befördern ~1200 Pers./h, im Individualverkehr befahren und ~5070 FZ/h mit ~6600 Pers./h das System. Die Knoten sind etwa zu 85% ausgelastet.

Das Diagramm vergleicht dazu intermodale Qualität des Verkehrsablaufs von vier Varianten:

- ohne Koordination ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs
- ohne Koordination mit Priorität des öffentlichen Verkehrs
- mit Koordination ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs
- mit Koordination mit Priorität des öffentlichen Verkehrs

Priorität des öffentlichen Verkehrs erfolgt mit Vor- und Nachläufen bzw. mit zusätzlichen Grünzeiten vor Eintreffen der Busse und bedeutet Null- Wartezeiten für die Kursfahrzeuge. Die Koordination ist auf den Individualverkehr und auf die Busfahrten abgestimmt.

Unter diesen Annahmen erzielt eine Koordination ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs die höchste intermodale Qualität des Verkehrsablaufs, deutlich schlechter sind eine Koordination mit Buspriorität und unkoordinierte Knoten ohne bzw. mit Buspriorität.



8. Rechnergestützte Verfahren

Die Tabelle stellt Online- Verfahren zur Koordination von Lichtsignalanlagen zusammen:

SCOOT	Split Cycle and Offset Optimization Technique	Transport Research Laboratory TRL Ltd. Siemens Traffic Controls Ltd. Peek Traffic Ltd.
SCAT	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System	Australian Road Research Board

Eine Zusammenfassung über rechnergestützte Offline- Verfahren zum Entwurf der Koordination findet sich in:

„Hinweise für Arbeitsplätze zur interaktiven Bearbeitung von Aufgaben des Verkehrs- System- Managements“

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln 1996.

Kurzcharakteristik AMPEL-K

AMPEL (-K)	Koordinierung von Signalprogrammen
Entwickler	Brilon/Wu (1991), Bochum
DV-Parameter	MS-DOS, Turbo-Pascal starre Menüstruktur
Modelle	Versatzzeitenoptimierung bereits berechneter Festzeitprogramme für koordinierte Streckenzüge unter Berücksichtigung von Wartezeit und Anzahl von Halten
Eingabedaten	<ul style="list-style-type: none"> - Signalgruppen mit Belastungsdaten und Mindestfreigabezeiten - Signalzeitenpläne der Einzelknotenpunkte optional: - Umlaufzeit - Progressionsgeschwindigkeiten (Koordinierung) - Pulkauflösung - Wartezeitäquivalent für Anzahl von Halten
Berechnungsverfahren	Bei fester Umlaufzeit für alle Knotenpunkte eines koordiniert signalisierten Streckenzuges ist eine Versatzzeitenoptimierung möglich, bei der eine Kenngröße minimiert wird, die Wartezeit und Anzahl von Halten berücksichtigt
Ausgabedaten	signalgruppenspezifisch: <ul style="list-style-type: none"> - Schaltzeiten - Wartezeiten - Rückstaulängen - Kraftstoffverbrauchswerte - Emissionsdaten

Kurzcharakteristik IVA-Netzbaustein

IVA-Netzbaustein	Signalplan-Management
Anwendungsbereich	Straßennetze mit Festzeitsteuerung der LSA
Entwickler	Heusch Boesefeldt Systemtechnik, Heusch Boesefeldt GmbH, Aachen AK „Entscheidungs- und Optimierungsverfahren“ der FGSV
DV-Parameter	MS-PASCAL, IBM-AT mit 80387 Coprozessor, 640 KB, MS-DOS, menü-orientiert, interaktiv
Modelle	SIGMA (Signalplan Management) modifiziertes Wartezeitmodell nach Akcelik, vereinfachtes Zwei-Bereichs-Pulkmodell, Verkehrsflußmodell nach Robertson
Eingabedaten	<ul style="list-style-type: none"> - Knotenpunktdaten - Zeit-Weg-Grundgerüst - Netzdefinition - Belastungstabellen - Phasenübergangsdiagramme
Optimierungsverfahren	mehrstufiger heuristischer Prozeß, lokales Optimum
Entscheidungsvariable	Split Umlaufzeit Versatz Phasenfolge
Zielkriterien	gewichtete Kombination aus Halten, Zeitverlusten, Kraftstoffverbrauch und Emissionen, gewichtete Kombination aus Halten und Reisezeiten

Kurzcharakteristik KONTRAST

KONTRAST - Grüne Welle	Berechnung und Darstellung von Zeit-Weg-Diagrammen
Anwendungsbereich	festzeitgesteuerte Netze
Entwickler	Stadt Düsseldorf, Straßenbauamt Ing.-Büro IGS, Kaarst Ing.-Büro IBB, Langenfeld
DV-Parameter	Programm-Sprache: Fortran, C Betriebssysteme: UNIX (verschiedene Systeme) Hardware: Workstations (verschiedene Hersteller), PC
Modelle	Grünbandveränderung nach den Möglichkeiten der zugeordneten Einzel-Signalzeitenpläne, ÖV-Fahrtverlaufslinien
Eingabedaten	Knotenpunktdaten (z.B. Signalgruppen, Umlaufzeit) Zeit-Weg-Grundgerüst pro Einzelwelle Geschwindigkeiten (vorbelegt) – getrennt nach IV, ÖV, Zuordnung zu den Einzelknoten (Knoten-Nr., Version, Signalzeitenplan-Nr.)
Berechnungsverfahren	Probiervverfahren von Hand mit Benutzung von automatisierten Teilelementen
Entscheidungsvariable	Signalgruppenzeitbedarf Bandbreite Geschwindigkeiten
Zielkriterien	Grünbandbreite (getrennt nach Richtungen)

Kurzcharakteristik LISA-PLAN (Koordinierung)

LISA-PLAN	Koordinierung von Signalprogrammen bis 30 LSA
Entwickler	Stadt Frankfurt am Main, Ordnungsamt
DV-Parameter	Programm-Sprachen HP-Basic, HP-GL Betriebssysteme MS-DOS, HP-BASIC, HP-UX Hardware PC-386, HP-Workstation, Turbo-Pascal
Eingabedaten	Grundgerüst der Wegachse, Signalgruppen, Pulkbreite, Geschwindigkeit, erforderliche Zeitlücke für den Querverkehr, Umlaufzeit optional: Signalvorläufe, Linksabbiegerfreigabe
Berechnungsverfahren	systematisches Probiervverfahren
Entscheidungsvariable	Einhaltung der vorgegebenen Parameter
Zielkriterien	Grünbandbreite
Auswahlverfahren	Vergleich von Koordinierungen nach einfachem Pulkmodell mit den Kenngrößen Wartezeit und Anzahl der Halte

Kurzcharakteristik MAXBAND

MAXBAND	Maximal Bandwidth Traffic Signal Setting Optimization Program
Anwendungsbereich	koordinierte Streckenzüge bis zu 10 Knoten, geschlossene Rasternetze, nur Kraftfahrzeuge
Entwickler	Little/Baass
DV-Parameter	Basic A für IBM-PC, menü-orientiert, interaktiv
Modelle	einfaches Verkehrsmodell ohne Pulkauflösung, Abbieger und Zufluß-zusammensetzung unberücksichtigt
Eingabedaten	Streckendaten, Split oder Verkehrsdaten mit Sättigungsgrad, zulässige Bereiche für Umlaufzeit und Progressionsgeschwindigkeit
Optimierungsverfahren	mathematisch exakt (mixed integer linear programming); branch and bound Algorithmus; Lösung durch n (n - 1) Suchvorgänge, globales Optimum
Entscheidungsvariable	Versatzzeiten Umlaufzeit Phasenfolge (Linksabbieger)
Zielkriterien	Grünbandbreite (gewichtete Summen beider Richtungen bzw. aller Netzabschnitte)

Kurzcharakteristik LISA + (Koordinierung)

LISA+	Berechnung von koordiniert signalisierten Streckenzügen
Entwickler	Schlothauer & Partner, Berlin Verkehrshochschule Dresden VSC Verkehrs-System Consult GmbH, Halle INVER Ingenieurbüro für Verkehrsanlagen GmbH, Erfurt
DV-Parameter	Betriebssysteme MS-DOS/DR-DOS, Turbo-PASCAL, (Menüstruktur/interaktiv), PC (80386)
Modelle	Dominanzverfahren zur Optimierung von Koordinierungen
Eingabedaten	Ausgangsparameter für Koordinierungsberechnung (Geschwindigkeiten, Abstände, Linksabbieger), gerätespezifische Parameter
Berechnungsverfahren	Berechnung von Versätzen und Freigabedauern Wirtschaftlichkeitsvergleich der Koordinierungsvarianten
Ausgabedaten	Zeit-Weg-Band, Wirtschaftlichkeitsdiagramme

Kurzcharakteristik PASSER

PASSER	Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine
Anwendungsbereich	koordiniert signalisierte Streckenzüge bis zu 20 LSA; nur KFZ; Sonderfälle
Entwickler	Brook/Messer/Chang
DV-Parameter	IBM PC/XT/AT, PC DOS, MS DOS FORTRAN, TURBO-PASCAL (fast execution), menü-orientiert, windowunterstützt 256/512 K RAM, interaktiv mit Grafik (CGA/EGA)
Modelle	einfaches Verkehrsmodell ohne Pulkauflösung, aber mit Abbiegern und Querverkehr II-87 1.0: mit übersättigten Zuständen III-88 1.0: Wartezeit nach HCM 85 innerhalb festgelegter Grünbänder
Eingabedaten	Strecken-/Knotenpunktdaten, oberer unterer Grenzwert für die Umlaufzeit, Zeitschritte für die Suche nach der opt. Umlaufzeit, Variation der Progressionsgeschwindigkeit ($\pm 2\%$), Verkehrsstärken, Sättigungsgrad, minimale Grünzeiten
Optimierungsverfahren	Interferenzverfahren nach Brooks, Lösung innerhalb eines Durchgangs, makroskopisch, deterministisch
Entscheidungsvariable	Versatzzeit, Umlaufzeit, Phasenfolge (Haupttrichtung), Anzahl der Halte, Wartezeit (III-88 1.0)
Zielkriterien	Grünbandbreite, Split

Kurzcharakteristik TRANSYT

TRANSYT	Traffic Network Study Tool
Anwendungsbereich	festzeitgesteuerte Straßennetze
Entwickler	Transport and Road Research Laboratory
DV-Parameter	Version 8 Mainframe, Minicomputer PDP 11 Microcomputer mit > 256 KB Version 9 Microcomputer mit > 380 KB, menü-orientiert, interaktiv FORTRAN, PC DOS, MS DOS
Modelle	Verkehrsmodell mit Pulkauflösung und Berücksichtigung von Ein-/Abbiegern („cyclic flow profiles“), makroskopisch, deterministisch, am Knotenpunkt spurbezogene Zuflußzusammensetzung, „effektive Grünzeiten“, vereinfachtes Umlegungsmodell (Version 6), IV und ÖV
Eingabedaten	Umlaufzeiten („double cycling“), Sättigungsverkehrsstärken, Signalprogrammdateien, Netzdaten, Gewichtungsfaktoren, Geschwindigkeiten
Optimierungsverfahren	„hill-climbing-Verfahren“, lokales Optimum, systematisches Probierverfahren
Entscheidungsvariable	Freigabezeit („double greening“ Version 9), Versatzzeit, Phasenfolge (Version 9)
Zielkriterien	Anzahl der Halte, Wartezeit, Kraftstoffverbrauch, Abgas-/Lärmemissionen, Kosten, (Performance Index)

Kurzcharakteristik SIVIP-VERO

SIVIP – VERO	Versatzoptimierung
Anwendungsbereich	koordiniert signalisierte Straßennetze
Entwickler	Siemens AG
DV-Parameter	Hardware: HP-/Siemens-Workstations Betriebssystem: UNIX SYSV, grafik-/windoworientiert Programmiersprache: C
Modelle	Berücksichtigung aller Zuflüsse durch entsprechende Pulkverteilung, deterministisches Verfahren, signalgruppenorientierter Abfluß an den Zielknotenpunkten, alle Verkehrsarten sind durch Übernahme der Planstruktur berücksichtigt
Eingabedaten	Signalzeitenpläne (Doppelumläufe und Doppelanwürfe möglich) Verkehrsbelastungen und Zeitbedarfswerte Weggrundgerüst und Optimierungsbeziehungen Abschnittweise Gewichtungsfaktoren und Geschwindigkeiten Optimierungsprioritäten
Optimierungsverfahren	abschnittweise Berechnung der Zielfunktion für jeden Versatzwert der Signalzeitenpläne mit anschließender Bestwertbestimmung
Entscheidungsvariable	Versätze der Freigabezeiten
Zielkriterien	gewichtete Kombination aus Wartezeiten und Halte, Treibstoffverbrauch

Kurzcharakteristik VISSIG-Koordinierung

VISSIG-Koordinierung	Verkehr in Städten – Signalisierung
Anwendungsbereich	Berechnung von koordiniert signalisierten Streckenzügen und Darstellung von Zeit-Weg-Diagrammen
Entwickler	PTV System GmbH, Karlsruhe
DV-Parameter	MS-DOS, Turbo-Pascal Fenster- und Grafik-Technik (SAA-Standardoberfläche), interaktiv, masken- und grafikorientiert
Modelle	Versatzzeitenoptimierung bereits berechneter Festzeitprogramme von Einzelknoten für koordinierte Streckenzüge mit der Grünbandbreite als Zielfunktion, die mit den Verkehrsbelastungen gewichtet wird
Eingabedaten	– Signalgruppen mit Belastungsdaten und Mindestfreigabedauern – Belastungsdaten / Sättigungsverkehrsstärken – Festzeitprogramme gleicher Umlaufzeit an den Einzelknoten – Definition der Koordinierungsstrecke – Festlegung koordiniert geführter Einbiegerströme – Variation der Progressionsgeschwindigkeiten – Fahrtverläufe einzelner Fahrzeuge
Optimierungsverfahren	Versatzzeitenoptimierung
Entscheidungsvariable	– Versätze der Freigabezeiten – Phasenfolge und Signalplan am Einzelknoten – Reisezeiten für einzelne Fahrzeuge (ÖV-Priorisierung)
Zielkriterien	Grünbandbreite gewichtet mit Belastungsdaten und benutzerspezifischen Gewichtungsfaktoren

Kurzcharakteristik VTassist – VASCO/WAVE

VTassist	Programmodule VASCO/WAVE
Anwendungsbereich	Festzeit- und verkehrsabhängige Steuerungen mit und ohne ÖPNV-Beschleunigung
Entwickler	GEVAS-Ingenieurgesellschaft für Verkehrsplanung, Verkehrstechnik und Anwender-Software mbH, München, Essen
DV-Parameter	Personal Computer oder VAX-Rechnersysteme (DEC) Betriebssysteme : MS-/DR-DOS oder VMS Programmiersprache: FORTRAN, C
Modelle	Modell zur Berechnung koordinierter LSA-Steuerungen (Dr. R. Schultz, Universität Hamburg 1981), spurbezogene Bewertung der Zufahrten mit und ohne signalgeregeltem Zufluß; Pulkauflösungsmodell wie TRANSYT, Zusammensetzung des Zustroms einer Zufahrt unterteilt nach Ursprüngen erster u. zweiter Ordnung, Netzgröße: bis 50 Knotenpunkte
Eingabedaten	Definition des Netzes und der Ursprünge 1. und 2. Ordnung, Signalgruppeneinstellungen (Schnittstelle zu VT ASSIST – CROSS), Signalprogramme, Belastungswerte in den Zufahrten
Berechnung	Auslastungsgrad, Wartezeiten und Anzahl der Halte je Umlauf und Spur, Bewertungsindex (Performance Index; Zeitstrafe je Halt)
Ausgabedaten	festzeitgesteuerte oder verkehrsabhängige Zeit-Weg-Diagramme

9. Anhang: Ableitung von Wartezeiten und Stau

9.1 Deterministische Anteile bei stationärem Verkehr

Unkoordinierter Zufluss

Bei einem gleichmässigen Zufluss q [PWE/s] während dem Umlauf Z [s] und einer gleichmässigen Sättigung s [PWE/s] während der Grünzeit g [s] resultiert gemäss der Grafik die mittlere Wartezeit

$$w_1^u[s] = \frac{Z(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}, \quad \text{mit } \lambda = \frac{g}{Z}, \quad \text{der gesättigten Grünzeit } g_s^u = \frac{r \cdot q}{s - q}$$

und dem Sättigungsgrad $x = \frac{q}{\lambda \cdot s} = \frac{q}{l} \leq 1$. Der mittlere Stau ist

$$k_1^u [PWE] = w_1^u \cdot q.$$

Koordinierter Zufluss, gleichförmiger Zufluss während der Rotzeit

Bei koordinierten Lichtsignalen erfolgt der Zufluss q ungleichförmig mit q_g während der Grünzeit g und q_r während der Rotzeit r . Bei einer guten Koordination sind $q_g > q_r$, die gesättigte Grünzeit $g_s^k < g_s^u$ und die mittlere Wartezeit gemäss der Grafik $w_1^k < w_1^u$.

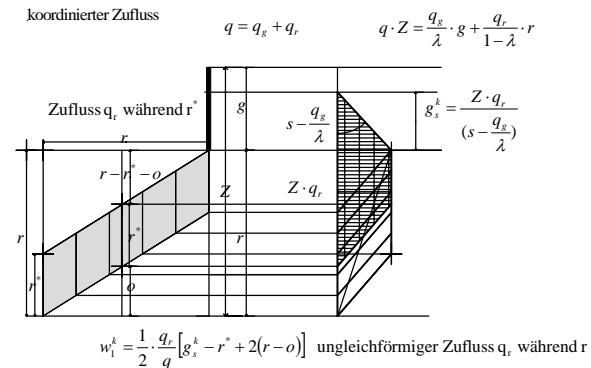
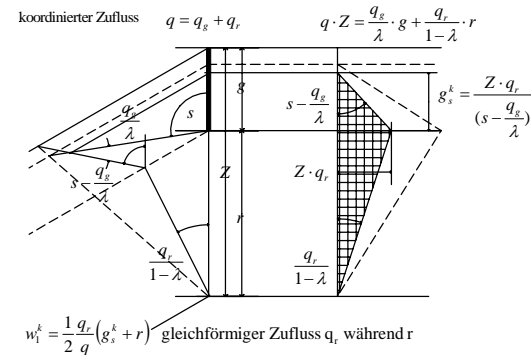
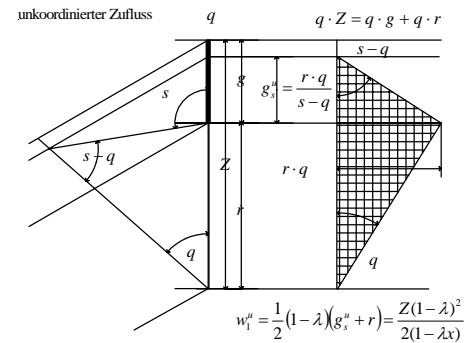
Koordinierter Zufluss, ungleichförmiger Zufluss während der Rotzeit

Schliesslich kann bei koordinierten Lichtsignalen der Zufluss q_r nur während einem Teil r^* der Rotzeit r mit dem Offset o nach Beginn der Rotzeit erfolgen. Die mittlere Wartezeit wird gemäss der Grafik dann

$$\text{zu } w_1^k[s] = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_r}{q} [g_s^k - r^* + 2(r - o)], \quad \text{abhängig von } o, r^* \text{ und } r. \text{ Dies ist}$$

der deterministische Anteil der mittleren Wartezeit bei koordinierten Lichtsignalen, ohne Zufallseinflüsse und ohne Überlastung für $x \leq 1$.

Der mittlere zu Stau wird $k_1^k [PWE] = w_1^k \cdot q$,



9.2 Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastung

Wartezeiten stochastisch bei stationärem Verkehr

Das Warteschlangen- Modell M/D/1 bzw. M/M/1 nach Edie setzt voraus:

- ein stationäres System mit einem Fahrstreifen und mit $x \leq 1$
- einen poisson- verteilten Zufluss und einen konstanten bzw. zufällig verteilten Abfluss
- „first in first out“ als Reihenfolge des Abflusses
- und das in Kauf nehmen von unendlichen Wartezeiten.

Dann werden die mittleren Wartezeiten zu $w_s = \frac{C \cdot x}{l \cdot (1-x)}$ für $C=0.5$ bei zufällig verteiltem und $C=1$ bei konstantem Abfluss.

Nach Miller gilt für Lichtsignalanlagen

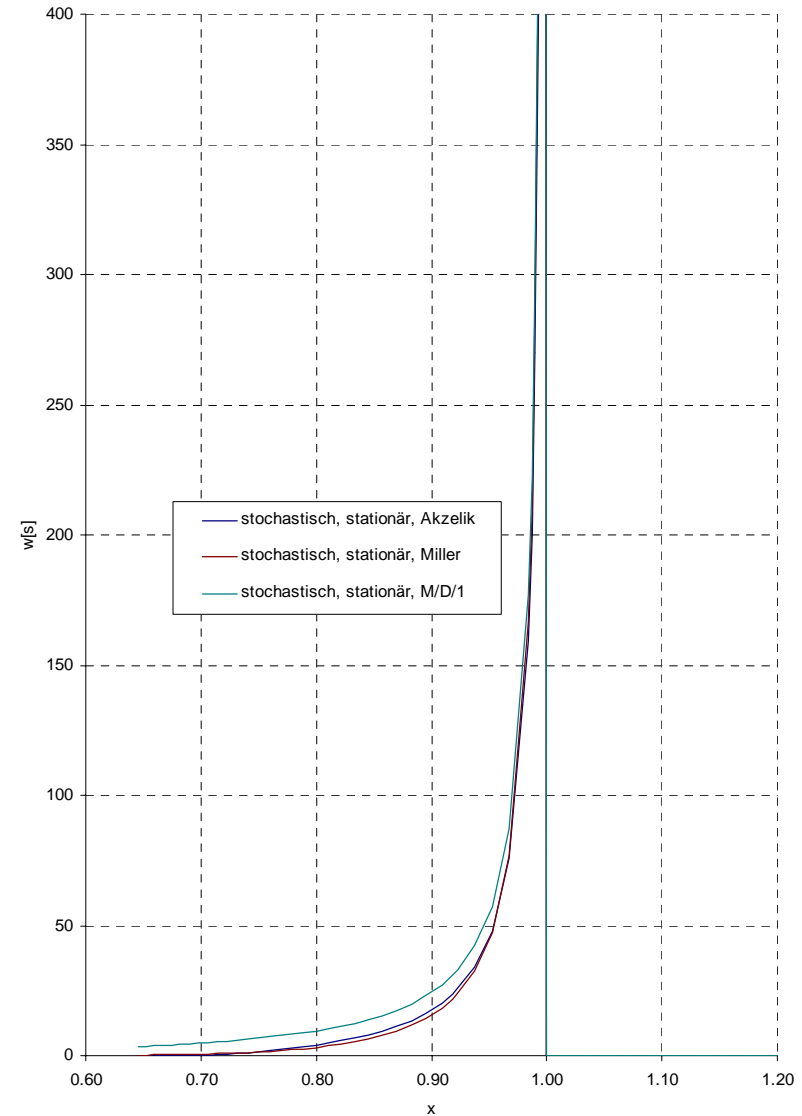
$$w_s = \frac{1-\lambda}{1-\lambda \cdot x} \cdot \frac{1}{q} \cdot \frac{e^{-1.33 \cdot \sqrt{s \cdot \lambda \cdot Z} \cdot \frac{1-x}{x}}}{2 \cdot (1-x)} \quad \text{für } x \leq 1.$$

Nach der Näherung von Akzelik gilt: $w_s = \frac{1-\lambda}{1-\lambda \cdot x} \cdot \frac{1}{q} \cdot 1.5 \cdot \frac{x-x_0}{1-x}$

für $x \geq x_0 = 0.67 + \frac{s \cdot \lambda \cdot Z}{600}$.

Die Grafik stellt die mittleren Wartezeiten gemäss den drei Gleichungen für einen Zyklus von 90 Sekunden, einen Zufluss von 600 PWE/h und für eine Sättigung von 2000 PWE/h bei stochastischem und stationärem Verkehr dar, abhängig vom Sättigungsgrad x . Die Näherung von Akzelik entspricht praktisch der Gleichung von Miller, das Warteschlangen- Modell M/D/1 nach Edie liefert etwas grössere Wartezeiten.

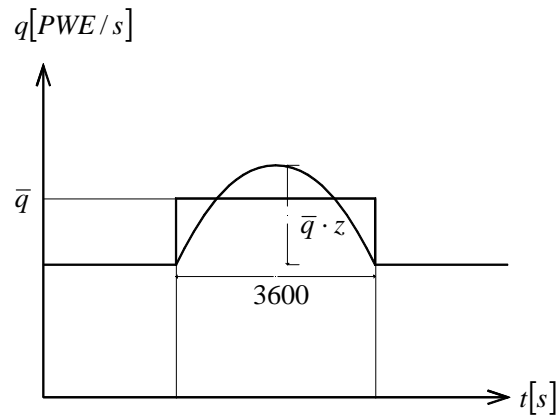
Alle drei Kuren verlaufen asymptotisch zu $x=1$ und können deshalb allein noch keine realistischen Wartezeiten liefern.



Wartezeiten deterministisch bei instationärem Verkehr

Bei einer deterministischen Betrachtung entstehen Wartezeiten - zusätzlich zu jenen durch den Wechsel von Grün und Rot - im Allgemeinen erst bei $x \geq 1$. Die Wartezeiten ergeben sich aus der Differenz zwischen der über die Zeit aufgetragenen Zufluss- und der Abfluss-Summenlinien. Für eine gleichmässige Zufluss- Ganglinie während einer Stunde mit $x = const$ gilt $w_d = 1800 \cdot (x - 1)$.

Wu geht von einer parabolischen Zufluss- Ganglinie mit einer Spannweite von $z=0.4$ und damit von $x \neq const$ aus. Die Grafik stellt den Verlauf dieser Ganglinie in der betrachteten Stunde dar.

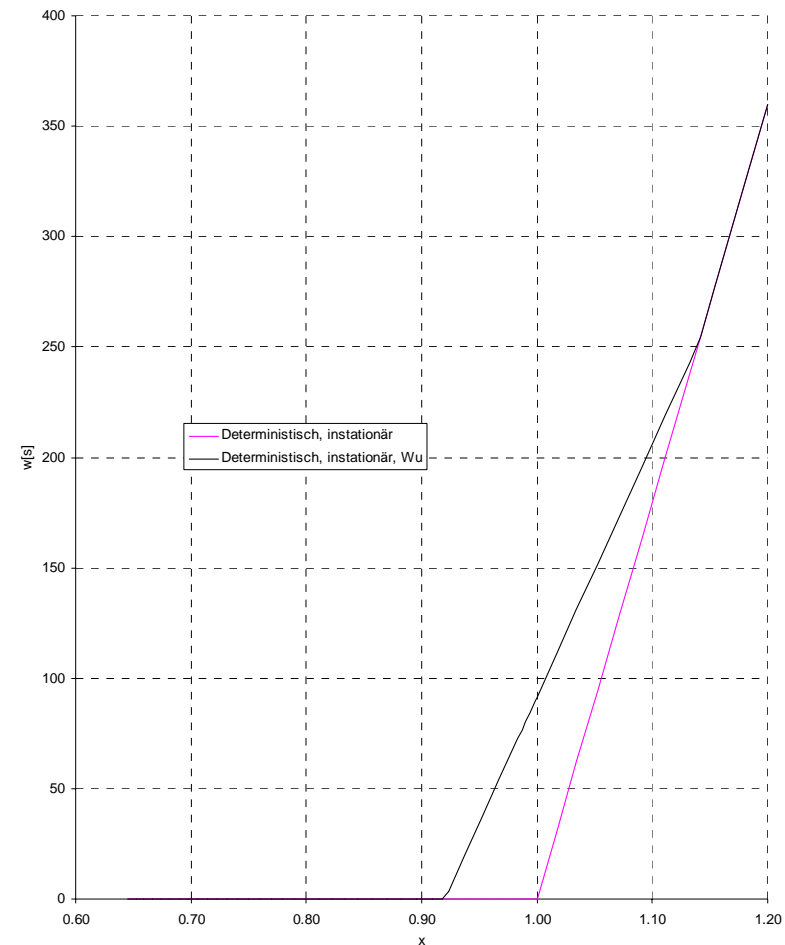


Wird die Wartezeit- Funktion durch zwei Geradenstücke angenähert, dann folgt für die mittleren deterministischen Wartezeiten bei instationärem Verkehr zu:

$$w_d = 1145.5 \cdot (x - 0.92) \text{ für } 0.92 \leq x \leq 1.14$$

$$w_d = 1800 \cdot (x - 1) \text{ für } x \geq 1.14.$$

Die Grafik stellt die mittleren deterministischen Wartezeiten bei instationärem Verkehr für $x = const$ bzw. für $x \neq const$ und $z=0.4$ dar. Nur nach den Gleichungen von Wu entstehen deterministische Wartezeiten bei $x \leq 1$. Hier sind aber noch keine Zufallseinflüsse berücksichtigt.



Transformation

Realistische Näherungen sollten sowohl die Zufallseinflüsse des Zu- und Abflusses etwa bei $x \leq 1$, wie die Zeitabhängigkeit von Wartezeiten etwa bei $x \geq 1$ berücksichtigen. Realistische Wartezeiten resultieren nach einer Lösung von Kimber und Hollis deshalb aus einer asymptotischen Transformation der stochastischen Wartezeiten bei stationärem Verkehr an die deterministischen Wartezeiten bei instationärem Verkehr.

Akzelik transformiert seine Näherung für stochastische Wartezeiten bei stationärem Verkehr $w_s = \frac{1-\lambda}{1-\lambda \cdot x} \cdot \frac{1}{q} \cdot 1.5 \cdot \frac{x-x_0}{1-x}$ asymptotisch an die

deterministischen Wartezeiten $w_d = 1800 \cdot (x-1)$ bei instationärem Verkehr für $x = const$. Es resultieren dann die mittleren Wartezeiten zu:

$$w_2 = 900 \left[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{2(x-x_0)}{300 \cdot l}} \right] \text{ für } x \geq x_0 = 0.67 + \frac{s \cdot \lambda \cdot Z}{600}.$$

Wu transformiert die stochastischen Wartezeiten bei stationärem Verkehr nach Miller $w_s = \frac{1-\lambda}{1-\lambda \cdot x} \cdot \frac{1}{q} \cdot \frac{e^{-1.33 \cdot \sqrt{s \cdot \lambda \cdot Z} \cdot \frac{1-x}{x}}}{2 \cdot (1-x)}$ asymptotisch an die

deterministischen Wartezeiten bei instationärem Verkehr und bei einer parabolischen Zufluss- Ganglinie mit $w_d = 1145.5 \cdot (x-0.92)$ für

$0.92 \leq x \leq 1.14$. bzw. $w_d = 1800 \cdot (x-1)$ für $x \geq 1.14$. Es resultieren dann die mittleren Wartezeiten zu:

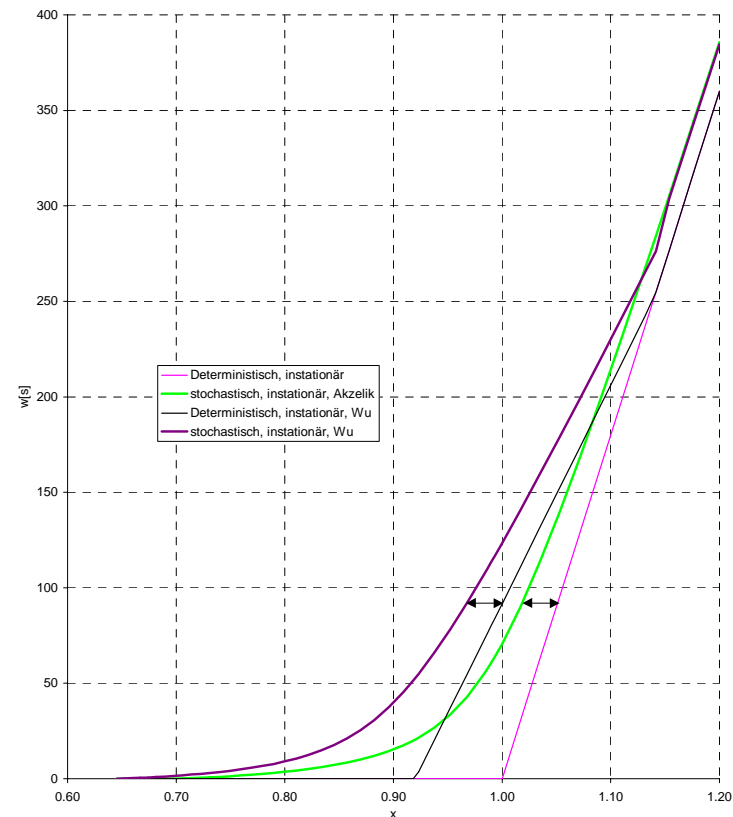
$$w_2 = 523.8 \left[1.09x-1 + \sqrt{(1.09x-1)^2 + \frac{(1.09x-x_0)}{174.6 \cdot l}} \right] \text{ für } 0.92 \leq x \leq 1.14,$$

$$\text{bzw. } w_2 = 900 \left[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{(x-0.92x_0-0.08)}{300 \cdot l}} \right] \text{ für } x \geq 1.14$$

$$\text{mit } x \geq x_0 = 0.67 + \frac{s \cdot \lambda \cdot Z}{600}.$$

Die Grafik vergleicht die mittleren Wartezeiten gemäss den Näherungen von Wu und Akzelik für einen Zyklus von 90 Sekunden, einen Zufluss von 600 PWE/h und einer Sättigung von 2000 PWE/h abhängig vom Sättigungsgrad x . Eingezeichnet sind auch die deterministischen Wartezeiten bei instationärem Verkehr als Asymptoten der Näherungen bei hohen Sättigungsgraden.

Die Näherung von Wu stimmt gut mit der exakten Berechnung mittels Markow- Ketten und mit empirischen Werten überein. Sie liefert grössere Werte für die mittleren Wartezeiten als die Näherung von Akzelik bei Sättigungsgraden von etwa $0.8 \leq x \leq 1.1$.



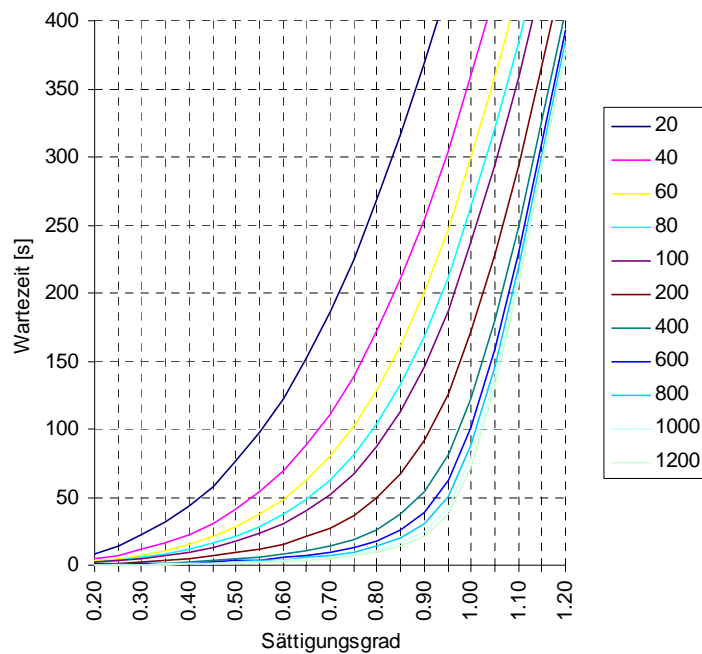
Nach einer „high definition“- Näherung des TRRL werden die Anteile für Zufallseinflüsse und Überlastung an den Wartezeiten bzw. am Stau zu:

$$w_2[s] = 900 \left[(x-1) - \frac{4Cx}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8 \cdot C \cdot (x+1+2Cx/Q)}{Q/x}} \right]$$

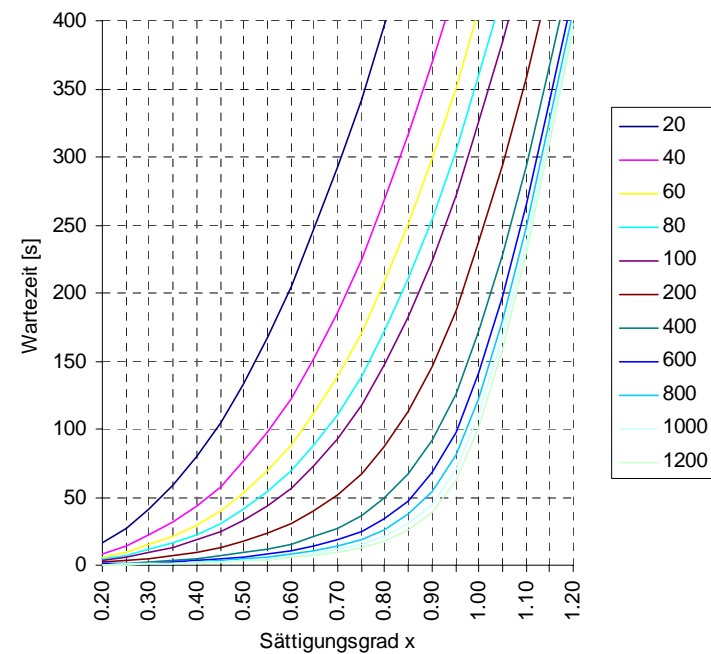
bzw. $k_2[PWE] = w_2 \cdot l$.

Dabei gilt $C=0.5$ z.B. für unkoordinierte Zufahrten von Lichtsignalanlagen ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs (zufällig verteilter Zufluss und stationärer Abfluss). $C=1$ gilt z.B. für Lichtsignalanlagen mit Priorität des öffentlichen Verkehrs (zufällig verteilter Zufluss und zufällig verteilter Abfluss). Das Diagramm links zeigt dazu die Wartezeiten abhängig vom Sättigungsgrad x und von der Belastung Q [PWE/h]. Das Diagramm rechts zeigt dazu die Wartezeiten abhängig vom Sättigungsgrad x und von der Belastung Q [PWE/h].

Anteil für Zufallseinflüsse und Überlastung, $C=0.5$



Anteil für Zufallseinflüsse und Überlastung, $C=1$



Vergleich der Näherungen nach TRRL und Wu

Das Diagramm vergleicht die „high definition“- Näherung des TRRL für $C=0.5$ mit der Näherung von Wu für den Anteil von Zufallseinflüssen und Überlastungen an den Wartezeiten.

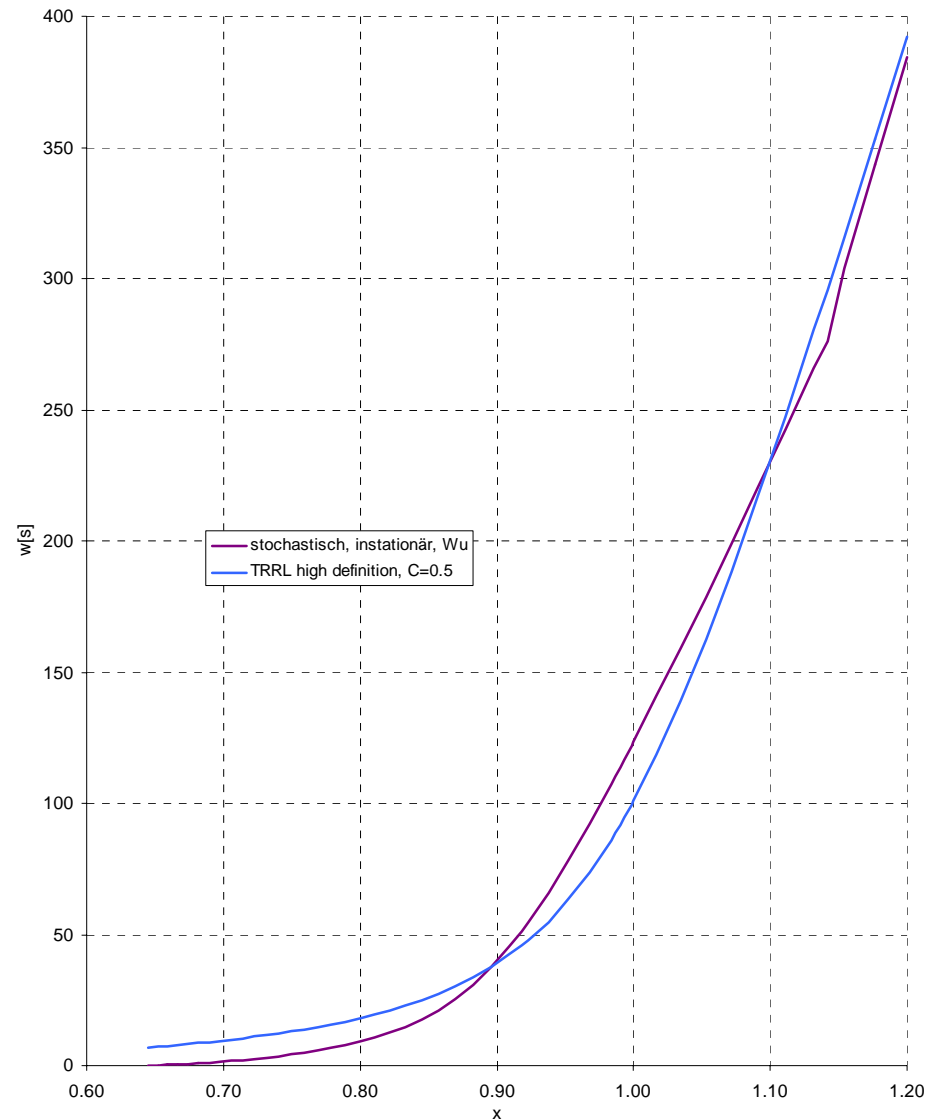
Das Diagramm geht von einer Belastung $Q = 600$ PWE/h und einer Sättigung von 2000 PWE/h aus und zeigt die Wartezeiten abhängig vom Sättigungsgrad x .

Die Näherung von Wu, die gut mit der exakten Berechnung mittels Markow- Ketten und mit empirischen Werten übereinstimmt, unterscheidet sich wenig von der Näherung des TRRL.

Die „high definition“- Näherung des TRRL hat den Vorteil, dass sie mit der Konstanten C über Wartezeiten an Lichtsignalanlagen sowohl bei stationärem wie bei zufällig verteiltem Zufluss und Abfluss aussagen kann.

Sie lässt sich deshalb z.B. sowohl bei unkoordinierten Zufahrten ohne wie mit Priorität des öffentlichen Verkehrs angenähert anwenden. Dabei gilt etwa $C=0.5$ für Lichtsignalanlagen ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs (zufällig verteilter Zufluss und stationärer Abfluss). $C=1$ gilt etwa für Lichtsignalanlagen mit Priorität des öffentlichen Verkehrs (zufällig verteilter Zufluss und zufällig verteilter Abfluss).

Bei koordinierten Zufahrten gilt etwa $C \sim 0.25$ ohne Priorität des öffentlichen Verkehrs und $C \sim 0.75$ mit Priorität des öffentlichen Verkehrs.



10. Literatur

Priorität des öffentlichen Verkehrs an Lichtsignalanlagen
P. Pitzinger, Forschungsbericht 2000, Forschungsauftrag 11/98 auf
Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS

Traffic Engineering Handbook, Fifth Edition 1999
James L. Pline, Institute of Transportation Engineers,
Washington D. C.

Fundamentals of Traffic Engineering, 14th Edition 1996
Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley

Hinweise für Arbeitsplätze zur interaktiven Bearbeitung von Aufgaben
des Verkehrs- System- Managements
Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln 1996.

Rückstaulängen an Lichtsignalanlagen unter verschiedenen Verkehrs-
bedingungen
Ning Wu, Strassenverkehrstechnik 5/96

Wartezeiten an festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen unter zeitlich
veränderlichen (instationären) Verkehrsbedingungen
Ning Wu, Strassenverkehrstechnik 3/96

Calibrating SIDRA
Australian Road Research Board
Research Report ARR 180, R. Akcelik, 2nd Edition 1993

Traffic Engineering Handbook, Fourth Edition 1992
James L. Pline, Institute of Transportation Engineers,
Washington D. C.

Delays at fixed time traffic signals under time dependent traffic condi-
tions
Brilon W., Wu N., Traffic Engineering and Control 6/92

Signal Timing Improvement Practices
National Cooperative Highway Research Program,
Synthesis of Highway Practice 172, 1992
Transportation Research Board, Washington D. C.

Effects of the Quality of Traffic Signal Progression on Delay
National Cooperative Highway Research Program Report 339,
Transportation Research Board, Washington D. C., 1991

A Note on Traffic Delay Formulas
Ian Borrow, ITE Journal 1989

The Highway Capacity Delay Formula for Signalized Intersections
R. Akcelik, ITE Journal 1988

Rückstau und Wartezeiten – Messung und Berechnung
P. Pitzinger, Strassenverkehrstechnik 6/82

Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis
Australian Road Research Board
Research Report ARR 123, R. Akcelik, Edition 1981

Traffic queues and delay at road junctions
Kimber RM., Hollis EM, TRRL Laboratory Report LR 909 1979

Signalized intersections – capacity guide
Miller A. J., Australian Road Research Board Bulletin 4/1968
Research Report ARR 79 1978

A time dependent approach to junction delays
Ian Catling, Department of Transport
Traffic Engineering and Control 1977

Die Berechnung grüner Wellen
P. Pitzinger, Strasse und Verkehr 10/69

Lichtsignalanlagen für den Strassenverkehr
P. Pitzinger, E. Sulzer, Bauverlag Wiesbaden und Berlin, 1968