Peter Pitzinger
Dr. techn. dipl. Ing. SIA
Beratender Verkehrsingenieur

CH 8008 Zürich Florastrasse 27

Tel. +41 1 383 67 30
Fax +41 1 383 67 34

Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS
Forschungsauftrag Nr. 15/92

Nutzen einer Lichtsignalanlage

Zürich, Februar 1995

1. INHALT

2. Zusammenfassung, Résumé 3,4

3. Der Anlass des Forschungsberichts 5

4. Bestehende Richtwerte für den Einsatz von Lichtsignalanlagen 5

5. Das Verfahren zum Bestimmen des Nutzens einer Lichtsignalanlage 6

6. Die Verkehrsunterlagen zum bestehenden Verkehrsknoten

Verkehrsfrequenzen, Spurenplan, Spurbelastungen, Stau, Wartezeit 8
Unfallstatistik 10
Unfalldiagramm 11

7. Die kritischen Spurbelastungen

7.1 Definitionen 12
7.2 Die maximale Summe der kritischen Spurbelastungen 13
7.3 Grünzeitanteil 14
7.4 Die minimalen kritischen Spurbelastungen 17
7.5 Geradeaus-Äquivalenzwerte für vortrittsbelastete Abbieger auf Mischspuren 20

8. Stau und mittlere Wartezeit

8.1 Deterministisch 22
8.2 Stochastisch 23
8.3 Lichtsignalanlage 24
Diagramm für Stau Individualverkehr 25
Diagramm für mittlere Wartezeit Individualverkehr 26
Diagramm für mittlere Wartezeit Tram 27
Diagramm für mittlere Wartezeit Fussgänger 28
8.4 Beispiel 29

9. Privilegierung des öffentlichen Verkehrs

9.1 Prinzip 31
9.2 Korrekturfaktoren 32
Diagramme der Korrekturfaktoren 34
9.3 Mittlerer Grünzeitanteil 35
9.4 Stau und mittlere Wartezeit 36
Diagramm für Stau Individualverkehr 37
Diagramm für mittlere Wartezeit Individualverkehr 38
Diagramm für mittlere Wartezeit Tram (Teilprivilegierung) 39
Diagramm für mittlere Wartezeit Fussgänger 40
9.5 Beispiel 41

10. Koordination des Individualverkehrs

10.1 Prinzip 44
10.2 Stau und mittlere Wartezeit des Individualverkehrs 44
Diagramm für den deterministischen Teil der Stauformel 45
Diagramm für den stochastischen Teil der Stauformel 46
Diagramm für den deterministischen Teil der Wartezeitformel 47
Diagramm für den stochastischen Teil der Wartezeitformel 48
10.3 Korrekturfaktoren 49
10.4 Beispiel 51

11. Lenkung des Individualverkehrs

11.1 Beispiel 53
11.2 Keine Lenkung des Individualverkehrs 54
11.3 Wahl einer Spurleistung 55
11.4 Wahl einer mittleren Wartezeit 56
11.5 Wahl des Staus 57

12. Die Wartezeitkosten

12.1 Beispiel 58
12.2 Wartezeitkosten ohne Privilegierung des öffentlichen Verkehrs 59
12.3 Wartezeitkosten mit Privilegierung des öffentlichen Verkehrs 60

13. Abgasemissionen und Treibstoffverbrauch

13.1 Prinzip 61
13.2 Abgasemissions- und Treibstoffverbrauchsfaktoren 62
13.3 Beispiel 63

14. Vermeidbare Unfallkosten

14.1 Soziale Unfallkosten 1988 65
14.2 Soziale Unfallkostensätze 1993 66
14.3 Vermeidbare Unfälle durch Lichtsignalanlage 67
14.4 Vermeidbare Unfallkosten durch Lichtsignalanlage 68

15. Das Ergebnis des Forschungsberichts 69

16. Literatur 70

2. ZUSAMMENFASSUNG

Lichtsignalanlagen bestimmen Verkehrssicherheit und Mobilität in Verkehrsknoten. Im richtigen Knoten installiert, richtig entworfen und betrieben, bieten sie hohe Verkehrssicherheit, flüssigen Verkehrsablauf, Verkehrslenkung und niedrige Abgasemissionen der Fahrzeuge. Umgekehrt können sie zu hohen Unfallfrequenzen, stockendem Verkehr, zum Missachten der Signalanzeige und zum Ausweichen des Verkehrs führen.

Es ist deshalb ein Verfahren nötig, das den Nutzen einer Signalanlage für einen Verkehrsknoten abschätzt. Der Bericht bietet dieses Verfahren an und bildet die Grundlage für eine SNV-Norm „Nutzen einer Lichtsignalanlage". Die Tabelle stellt das Vorgehen des Verfahrens zusammen:

Die Verkehrsunterlagen zum bestehenden Verkehrszustand

Belastungen des Individualverkehrs, des öffentlicher Verkehrs, der Fussgänger Besetzung der Kursfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs Zeit-Weg-Diagramm bei koordinierten Zufahrten Spurenplan, Spurnummerierung, Spurbelastungen Stau, Wartezeiten Unfalldiagramm, Unfallstatistik

Die Kriterien und Unterlagen zum Beurteilen des Nutzens einer Lichtsignalanlage

Kriterium	Unterlagen
kritische Spurbelastungen	Spurbelastungen, Geradeaus-Äquivalent vortrittsbelasteter Abbieger (Tabelle, 1. Näherung), Geradeaus-Äquivalenzbelastung vortrittsbelasteter Abbieger Richtwerte für minimale kritische Spurbelastungen
↓	
Grünzeitanteile Spurleistung Auslastungsgrad	Formel für Grünzeitanteile, Formel für Spurleistung, Formel für Auslastungsgrad
↓	
Stau Wartezeiten	Diagramme für Stau und Wartezeiten abhängig von Spurbelastungen und Grünzeitanteilen
↓	
Änderung von Grünzeitanteilen, Stau, Wartezeiten durch Verkehrslenkung	Privilegierung des öffentlichen Verkehrs: Korrekturfaktoren für Grünzeitanteile (Diagramme), Formel für mittlere Grünzeitanteile Koordination des Individualverkehrs: Korrekturfaktoren für Stau und Wartezeiten (Diagramme), Wahl von Spurleistung, Stau, Wartezeit: (Formel für Änderung von Grünzeitanteilen)
↓	
Wartezeitkosten	Besetzung der Kursfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, Richtwert für Zeitkostenansatz, Formel für Personenwartezeiten
↓	
Abgasemissionen Treibstoffverbrauch Individualverkehr	Formel für Fahrzeugwartezeiten des Individualverkehrs, CO-Emissionen des Individualverkehrs im Stau, NOx-Emissionen des Individualverkehrs im Stau, HC-Emissionen des Individualverkehrs im Stau, Treibstoffverbrauch des Individualverkehrs im Stau
↓	
Unfallkosten	Unfalldiagramm, Unfallstatistik, polizeilich erfasste Unfälle mit Personenschäden, Kosten der Sachschäden, Abschätzen vermeidbarer Unfälle, Unfallkostensätze polizeilich erfasster Unfälle mit Personenschäden, Kosten der Personenschäden, Formel für Unfallkosten

2. RESUME

Les installations de feux de circulation influencent la sécurité routière et la mobilité dans les noeuds routiers. Lorsqu'elles sont placées dans le noeud routier qui convient, projetées et exploitées correctement, elles permettent d'élever le niveau de sécurité routière, d'accroître l'écoulement du trafic, d'assurer la gestion du trafic et de réduire les émissions de gaz d'échappement des véhicules. A l'inverse, elles peuvent provoquer une augmentation de la fréquence des accidents, des ralentissements du trafic, inciter des conducteurs à ne pas respecter les feux et à emprunter des itinéraires de déviation.

Dans ces circonstances, il est indispensable de mettre au point une méthode permettant dévaluer l'utilité d'une installation de feux de circulation pour un noeud routier donné. Le rapport propose cette méthode et sert de document de base pour établir une norme SNV „Utilité d'une installation de feux de circulation". Le tableau ci-dessous présente l'application de cette méthode:

La documentation concernant les données existantes sur l'état du trafic

Débit des transport individuels, transports publics et piétons Occupation des véhicules des transports publics Diagramme temps/distance pour les routes d'accès feux coordonnés Plan des voies, numérotation des voies, débit de voies Files, temps d'attente Diagramme des accidents, statistique des accidents

Les critères et documents permettant de juger de l'utilité d'une installation de feux de circulation

Critères	Documents
Débit de voies critiques	Débit de voies équivalent entre le courant direct et le courant non prioritaire (tableau, 1re approximation), charge équivalente des courant non prioritaire valeurs indicatives pour les débits critiques minimales de voies
↓	
Part des temps verts Capacité de voie Degré de saturation	Formule pour déterminer les parts des temps verts Formule pour déterminer la capacité de voie Formule pour déterminer le degré de saturation
↓	
Files Temps d'attente	Diagramme concernant les files et les temps d'attente en fonction des débit de voies et des parts de temps verts
↓	
Modification des parts de temps verts, des files, temps d'attente par la gestion du trafic	Privilégier les transports publics: facteurs de correction pour les parts de temps verts (diagramme), formule pour les parts moyennes de temps verts Coordination des transports individuels: facteurs de correction pour les files et les temps d'attente (diagramme), choix de la capacité de voie, des files et des temps d'attente: (formule pour modifier les parts de temps verts)
↓	
Coûts des temps d'attente	Occupation des véhicules des transports publics, valeurs indicatives pour l'évaluation des coûts en terme de temps formule pour les temps d'attente des personnes
↓	
Emissions de gaz d'échappement, Consommation de carburant Transports individuels	Formule pour les temps d'attente des véhicules de transports individuels émissions de CO dues aux transports individuels dans les files émissions de NOx dues aux transports individuels dans les files émissions de CH dues aux transports individuels dans les files consommation de carburant due aux transports individuels dans les files
↓	
Coûts des accidents	Diagramme des accidents, statistique des accidents, accidents avec dommages corporels recensés par la police, coûts des dommages matériels, évaluation des accidents évitables, estimation des frais d'accidents pour les accidents avec dommages corporels recensés par la police, coûts des dommages corporels, formule pour les coûts des accidents.

3. DER ANLASS DES FORSCHUNGSBERICHTS

Lichtsignalanlagen bestimmen Verkehrssicherheit und Mobilität in Verkehrsknoten, und damit in ganzen Stadtverkehrsnetzen. Im richtigen Knoten installiert, richtig entworfen und richtig betrieben bieten Lichtsignalanlagen hohe Verkehrssicherheit und flüssigen Verkehrsablauf, sie erlauben eine Lenkung des Verkehrs mit Priorität der öffentlichen Verkehrsmittel, mit einer Koordination des Individualverkehrs, einer Plafonierung des Individualverkehrs zum Schutz von Strassenabschnitten, und schliesslich können sie Abgasemissionen und Treibstoffverbrauch der Fahrzeuge reduzieren. Im falschen Knoten installiert, falsch entworfen oder falsch betrieben, können Lichtsignalanlagen hohe Unfallfrequenzen und einen stockenden Verkehrsablauf bringen, sie können zum Ausweichen des Individualverkehrs auf ungeeignete Routen oder zum Missachten der Signalanzeigen führen.
Es ist deshalb ein Verfahren nötig, das den Nutzen einer Lichtsignalanlage für einen Verkehrsknoten aus der Sicht von Verkehrssicherheit, Verkehrsablauf, Verkehrslenkung, Abgasemissionen und Treibstoffverbrauch abschätzt.

4. BESTEHENDE RICHTWERTE FÜR DEN EINSATZ VON LICHTSIGNALANLAGEN

Mehrere Städte und Länder wenden Richtwerte für den Einsatz von Lichtsignalanlagen an. Sehr ausführlich sind die "US-Warrants for Traffic Signal Installation" 1), sie sollen hier kurz vorgestellt werden. Die "US-Warrants" arbeiten mit 11 Richtwerten für den Einsatz von Lichtsignalanlagen. Eine Lichtsignalanlage sollte nicht eingerichtet werden, wenn einer oder mehrere dieser Richtwerte nicht erfüllt sind. Umgekehrt ist aber das Erfüllen eines oder mehrerer Richtwerte allein noch keine Rechtfertigung für eine Lichtsignalanlage. Zusätzlich sollte eine Verkehrsstudie feststellen, ob eine Lichtsignalanlage die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf in einem Knoten verbessern kann. Ist dies nicht der Fall, dann sollte weder eine neue Lichtsignalanlage eingerichtet, noch eine bestehende weiter betrieben werden.

Richtwert 1: Mindest-Individualverkehrsbelastungen. Es werden stündliche, werktägliche Individualverkehrsbelastungen pro Haupt- und Nebenstrasse angegeben, die während acht Stunden nicht unterschritten werden sollten, wenn sich eine Lichtsignalanlage eventuell rechtfertigt.

Richtwert 2: Unterbrechung des Hauptverkehrs. Für Haupt- und Querstrassen werden stündliche, werktägliche Mindestbelastungen während acht Stunden angegeben. Werden diese Mindestbelastungen überschritten und die Koordination des Hauptstrassenverkehrs nicht gestört, dann rechtfertigt sich eventuell eine Lichtsignalanlage, um Stau und Gefährdung des Querverkehrs zu reduzieren.

Richtwert 3: Mindest-Fussgängerfrequenzen. Es werden Mindest-Fussgängerfrequenzen über die Hauptstrasse, und die maximale Zahl von Zeitlücken im Hauptstrassenverkehr (ausreichend zum Überqueren) angegeben. Sind die Fussgängerfrequenzen höher und die Zeitlücken seltener, liegt die nächste Lichtsignalanlage mehr als 90 m entfernt, und behindert die neue Lichtsignalanlage nicht die Koordination des Hauptverkehrs, dann rechtfertigt sich eventuell eine neue Lichtsignalanlage.

Richtwert 4: Schulübergänge. Eine Verkehrsstudie hat zu ermitteln , ob in jeder Minute eine ausreichende Zeitlücke im Individualverkehr das Überqueren einer entsprechenden Schülergruppe erlaubt. Sind die Zeitlücken seltener, dann rechtfertigt sich eventuell eine verkehrsabhängige Lichtsignalanlage.

Richtwert 5: Koordination. Eine Lichtsignalanlage rechtfertigt sich eventuell in einem koordinierten System, um ein Bündeln des Individualverkehrs zu Kolonnen und eine Geschwindigkeitsregelung zu erreichen.

Richtwert 6: Unfallerfahrung. Eine Lichtsignalanlage ist eventuell gerechtfertigt, wenn sie mindestens fünf bisher polizeilich erfasste Unfälle pro Jahr vermeiden kann, wenn sie die Koordination nicht stört, und die Richtwerte 1, 2, 3 zu mindestens 80 % erfüllt.

Richtwert 7: Systembedingung. Für Kreuzungen von Hauptstrassen werden Frequenzen in den werktäglichen Spitzenstunden und für fünf Stunden am Wochenende angegeben. Werden diese Frequenzen überschritten, dann rechtfertigt sich eventuell eine Lichtsignalanlage.

Richtwert 8: Kombination von Richtwerten. Eine Lichtsignalanlage ist eventuell gerechtfertigt, wenn die Richtwerte 1 und 2 zu mindestens 80 % erfüllt sind.

Richtwert 9: Vierstündige Individualverkehrsbelastungen. Es werden stündliche, werktägliche Individualverkehrsbelastungen pro Haupt- und Nebenstrasse, abhängig von der Geschwindigkeit des Hauptstrassenverkehrs und der Gemeindegrösse angegeben, die während vier Stunden nicht unterschritten werden sollten, wenn sich eine Lichtsignalanlage eventuell rechtfertigt.

Richtwert 10: Wartezeit in Spitzenstunden. Werden festgesetzte Wartezeiten und Frequenzen des Querverkehrs in der Spitzenstunde überschritten, dann rechtfertigt sich eventuell eine Lichtsignalanlage.

Richtwert 11: Spitzenstundenbelastungen. Werden festgesetzte Verkehrsbelastungen der Haupt- und der Querstrasse in den Spitzenstunden überschritten, dann rechtfertigt sich eventuell eine Lichtsignalanlage.

5. DAS VERFAHREN ZUM BESTIMMEN DES NUTZENS EINER LICHTSIGNALANLAGE

Der Verfasser ist nicht in der Lage, bindende schweizerische Richtwerte für den Nutzen von Lichtsignalanlagen vorzulegen, obwohl entsprechende Beispiele existieren. Für schweizerische Verkehrsknoten erweisen sich Richtwerte als zu starr. 2) 3). Es wird vielmehr ein Verfahren angeboten, das für eine Lichtsignalanlage Stau, Wartezeiten, Abgasemissionen, Treibstoffverbrauch und vermeidbare Unfälle abschätzt. Verkehrslenkende Massnahmen wie Privilegierung des öffentlichen Verkehrs, Koordination des Individualverkehrs bezw. Vorgaben von Spurleistung, Stau oder Wartezeit werden berücksichtigt. Der Nutzen einer Lichtsignalsteuerung im Vergleich zum bestehenden Verkehrszustand lässt sich dann aus einer Bilanz der Wartezeit-, Unfall- und Treibstoffkosten, bezw. der lufthygienischen Auswirkungen ablesen.

Die Schritte des Verfahrens:

Die Verkehrsunterlagen zum bestehenden Verkehrszustand

Belastungen des Individualverkehrs, des öffentlicher Verkehrs, der Fussgänger
Besetzung der Kursfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs
Zeit-Weg-Diagramm bei koordinierten Zufahrten
Spurenplan, Spurnummerierung, Spurbelastungen
Stau, Wartezeiten
Unfalldiagramm, Unfallstatistik

Die Kriterien und Unterlagen zum Beurteilen des Nutzens einer Lichtsignalanlage

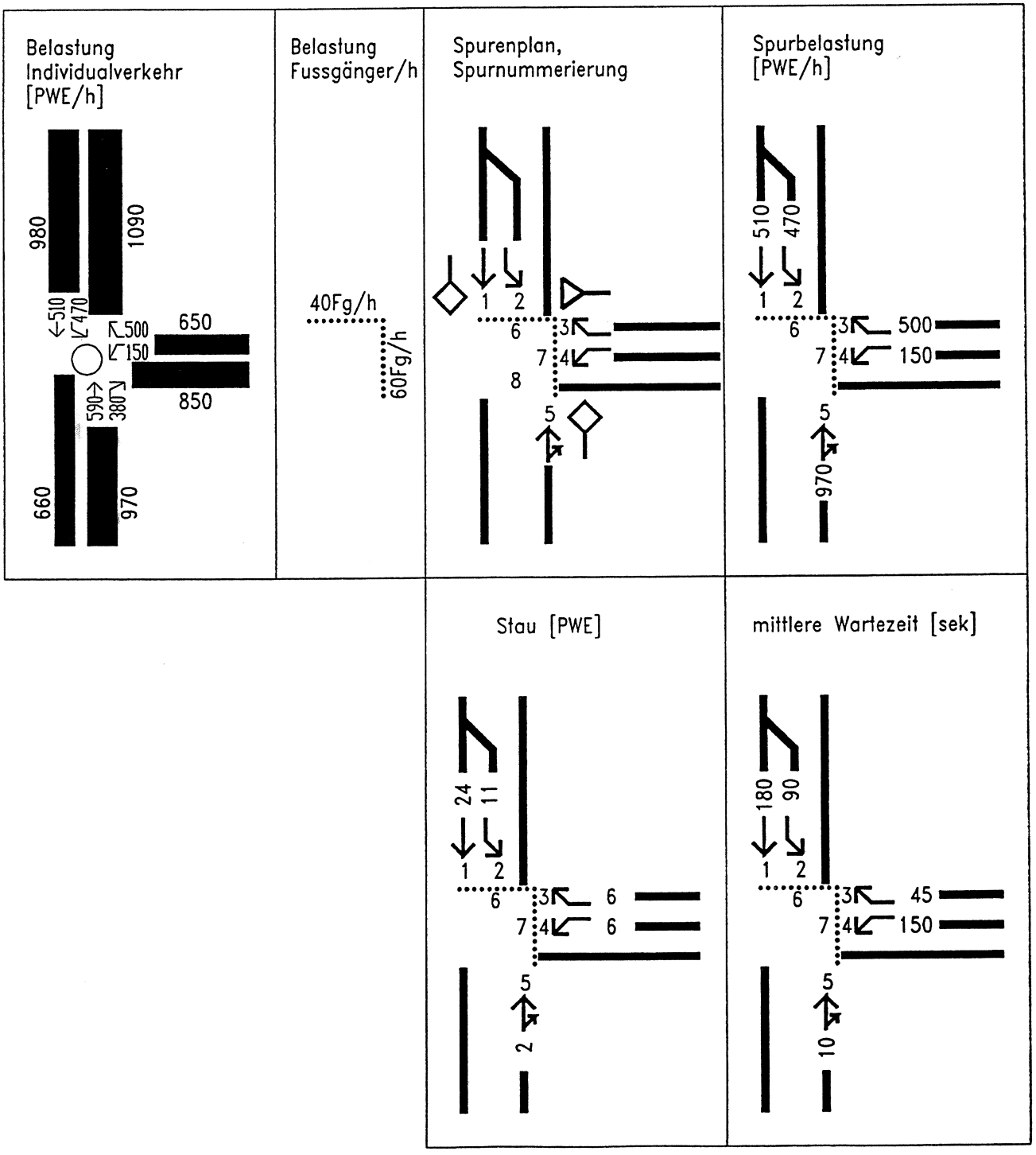
Kriterium	Unterlagen
kritische Spurbelastungen	Spurbelastungen, Geradeaus-Äquivalent vortrittsbelasteter Abbieger (Tabelle, 1. Näherung), Geradeaus-Äquivalenzbelastung vortrittsbelasteter Abbieger Richtwerte für minimale kritische Spurbelastungen
↓	
Grünzeitanteile Spurleistung Auslastungsgrad	Formel für Grünzeitanteile, Formel für Spurleistung, Formel für Auslastungsgrad
↓	
Stau Wartezeiten	Diagramme für Stau und Wartezeiten abhängig von Spurbelastungen und Grünzeitanteilen
↓	
Änderung von Grünzeitanteilen, Stau, Wartezeiten durch Verkehrslenkung	Privilegierung des öffentlichen Verkehrs: Korrekturfaktoren für Grünzeitanteile (Diagramme), Formel für mittlere Grünzeitanteile Koordination des Individualverkehrs: Korrekturfaktoren für Stau und Wartezeiten (Diagramme), Wahl von Spurleistung, Stau, Wartezeit: (Formel für Änderung von Grünzeitanteilen)
↓	
Wartezeitkosten	Besetzung der Kursfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, Richtwert für Zeitkostenansatz, Formel für Personenwartezeiten
↓	
Abgasemissionen Treibstoffverbrauch Individualverkehr	Formel für Fahrzeugwartezeiten des Individualverkehrs, CO-Emissionsfaktoren des Individualverkehrs im Stau, NOx-Emissionen des Individualverkehrs im Stau, HC-Emissionen des Individualverkehrs im Stau, Treibstoffverbrauch des Individualverkehrs im Stau
↓	
Unfallkosten	Unfalldiagramm, Unfallstatistik, polizeilich erfasste Unfälle mit Personenschäden, Kosten der Sachschäden, Abschätzen vermeidbarer Unfälle, Unfallkostensätze polizeilich erfasster Unfälle mit Personenschäden, Kosten der Personenschäden, Formel für Unfallkosten

Definitionen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Q	*[PWE,Tram, Fg /h]*	Spurbelastung Individualverkehr, Spurbelastung öffentlicher Verkehr, Belastung Fussgängerstreifen
Q_{krit}	*[PWE,Tram, Fg /h]*	kritische Spurbelastung Individualverkehr, kritische Spurbelastung öffentlicher Verkehr, kritische Belastung Fussgängerstreifen
$Q_{krit,\min}$	*180[PWE/h]*	minimale kritische Spurbelastung Individualverkehr
	60[Tram/h]	minimale kritische Spurbelastung öffentlicher Verkehr
	800[Fg/h]	minimale kritische Belastung Fussgängerstreifen
E		Geradeaus-Äquivalent vortrittsbelasteter Abbieger (Tabelle)
$E \cdot Q_v$	*[PWE/h]*	Geradeaus-Äquivalenzbelastung vortrittsbelasteter Abbieger
λ		Grünzeitanteil
$\lambda_{krit} = 0.833 \cdot \frac{Q_{krit}}{\Sigma Q_{krit}}$		Grünzeitanteil der kritische Spurbelastungen
S	*1800[PWE/h]*	Spursättigung Individualverkehr
	600[Tram/h]	Spursättigung öffentlicher Verkehr
	8000[Fg/h]	Sättigung Fussgängerstreifen
$L = \lambda \cdot S$		Spurleistung Individualverkehr, Spurleistung öffentlicher Verkehr Leistung Fussgängerstreifen
$x=Q/L$		Auslastungsgrad
k	*[PWE]*	Stau Individualverkehr (Diagramme)
w	*[s]*	Wartezeit (Diagramme)
$\lambda_{N,P}$		zum öffentlichen Verkehr feindlicher bezw. freundlicher Grünzeitanteil
$f_{N,P}$		Korrekturfaktoren bei Privilegierung des öffentlichen Verkehrs (Diagramme)
$\lambda_{mittel} = \lambda_{N,P} \cdot \frac{\Sigma \lambda_{N,P}}{\Sigma \lambda_{N,P} / f_{N,P}}$		mittlerer Grünzeitanteil bei Privilegierung des öffentlichen Verkehrs
P_k		koordinierten Anteil der Spurbelastung, der während Grünzeit eintrifft
λ_k		Grünzeitanteil der koordinierten Spurbelastung
$f_1 = \frac{1-P_k}{1-\lambda_k}$, f_2		Korrekturfaktoren für koordinierte Zufahrten (Diagramm)
k_1, k_0	*[PWE]*	deterministischer und stochastischer Stauanteil (Diagramme)
$k_k = k_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + k_0$	*[PWE*	Stau Individualverkehr bei koordinierten Zufahrten
w_1, w_0	*[s]*	deterministischer und stochastischer Wartezeitanteil (Diagramme)
$w_k = w_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + w_0$	*[s]*	Wartezeit Individualverkehr bei koordinierten Zufahrten
λ_i		Grünzeitanteil einer kritische Spurbelastungen bei Wahl von Spurleistung L_i, Wartezeit w_i oder Stau k_i (Diagramme)
$\lambda_{j,krit} = \frac{(0.833-\lambda_i) \cdot Q_{j,krit}}{\Sigma(Q_{j,krit} - Q_i)}$		Grünzeitanteil der übrigen kritischen Spurbelastungen
$W_P = \frac{w \cdot Q}{3600} \cdot (\frac{Pers}{FZ,Streifen})$	*[Pers h/h]*	Personenwartezeit
$t_K = 12$	*[Fr./Pers h]*	Zeitkostensatz der Personenwartezeit
$K_W = W_P \cdot t_K$	*[Fr./h]*	Wartezeitkosten
$W = \frac{w \cdot Q}{3600}$	*[PWE h/h]*	Fahrzeugwartezeit Individualverkehr
$E_{CO} = W \cdot 0.1405$	*[kg/h]*	CO-Emissionen des Individualverkehrs im Stau
$E_{NOx} = W \cdot 0.0064$	*[kg/h]*	NOx-Emissionen des Individualverkehrs im Stau
$E_{HC} = W \cdot 0.0220$	*[kg/h]*	HC-Emissionen des Individualverkehrs im Stau
$Tf = W \cdot 1.226$	*[kg/h]*	Treibstoffverbrauch des Individualverkehrs im Stau
$K_{Tf} = Tf \cdot 1.20$	*[Fr./h]*	Treibstoffkosten des Individualverkehrs
U_P		polizeilich erfasste Unfälle mit Personenschäden
$u_{Ks,P}$	*[Fr./U_P]*	Unfallkostensätze polizeilich erfasster Unfälle mit Personenschäden
$K_P = U_P \cdot u_{Ks,P}$	*[Fr.]*	Kosten der Personenschäden
K_S	*[Fr.]*	Kosten der Sachschäden
$K_U = K_P + K_S$	*[Fr.]*	Unfallkosten

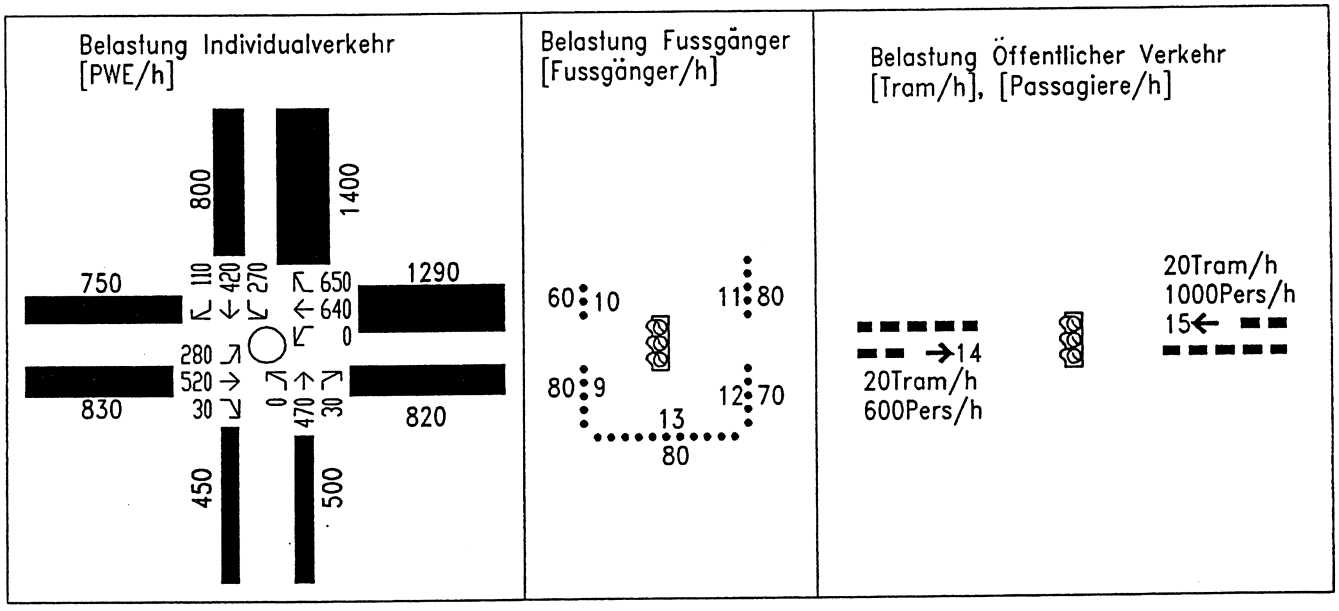
6. DIE VERKEHRSUNTERLAGEN ZUM BESTEHENDEN VERKEHRSKNOTEN

Basis zum Abschätzen des Nutzens einer Lichtsignalanlage bildet der bestehende Verkehrszustand im bestehenden Verkehrsknoten.
Der bestehende Verkehrsknoten kann eine ungesteuerte Kreuzung, ein Verkehrskreisel oder eine bestehende Lichtsignalanlage sein. Der bestehende Verkehrszustand wird definiert durch die stündlichen Verkehrsfrequenzen, durch den Spurenplan und die Spurbelastungen, und schliesslich durch den Stau und die mittleren Wartezeiten. Diese Angaben beziehen sich auf die Spitzenstunden und eventuell auch auf Flautestunden am Tag und in der Nacht, wenn der Nutzen einer neuen Lichtsignalanlage auch für verkehrsschwächere Tagesstunden abgeschätzt werden soll.
Das Bild zeigt dazu ein Beispiel:

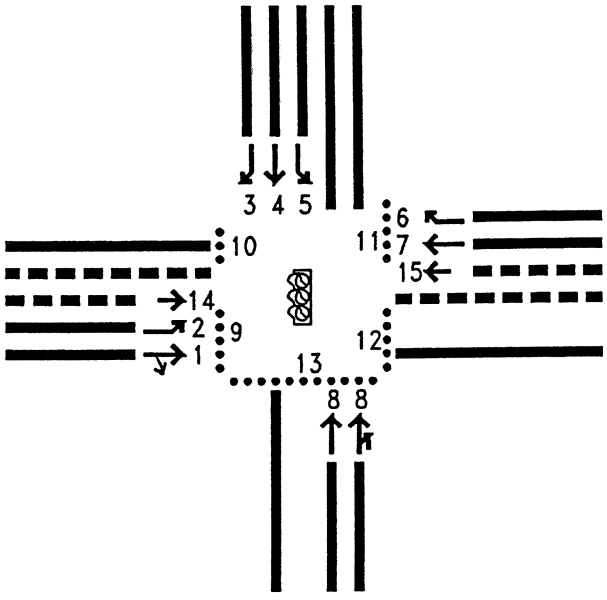


Befahren öffentliche Verkehrsmittel den Verkehrsknoten, dann sind neben den Frequenzen des Individualverkehrs und der Fussgänger auch die Zahl der Kursfahrzeuge pro Stunde und Richtung und die Passagierfrequenzen anzugeben.

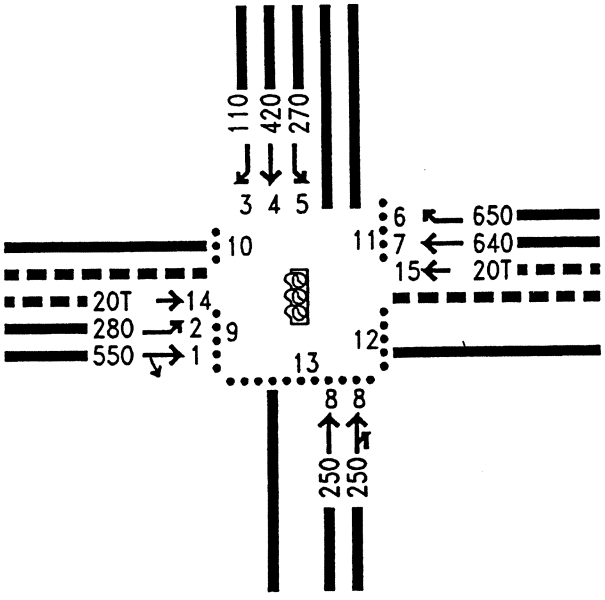
Das Bild bringt dazu ein Beispiel:



Spurenplan,
Spurnummerierung



Spurbelastung



Wesentliches Element des bestehenden Verkehrszustands im bestehenden Verkehrsknoten ist eine Unfallstatistik der vergangenen zwei Jahre. Die Unfallstatistik sollte Wochentag und Tageszeit der Unfälle angeben, die Unfallschwere, den Strassenzustand, die beteiligten Verkehrsteilnehmer und den Unfalltyp. Beim Unfalltyp sind vor allem jene Unfälle auszuweisen, die durch eine Lichtsignalanlage vermeidbar sind - Vortrittsunfälle, Unfälle von Linksabbiegern mit Gegenverkehr, Unfälle zwischen Fahrzeugen und überquerenden Fussgängern und Radfahrern 6) 7) 8) 9).

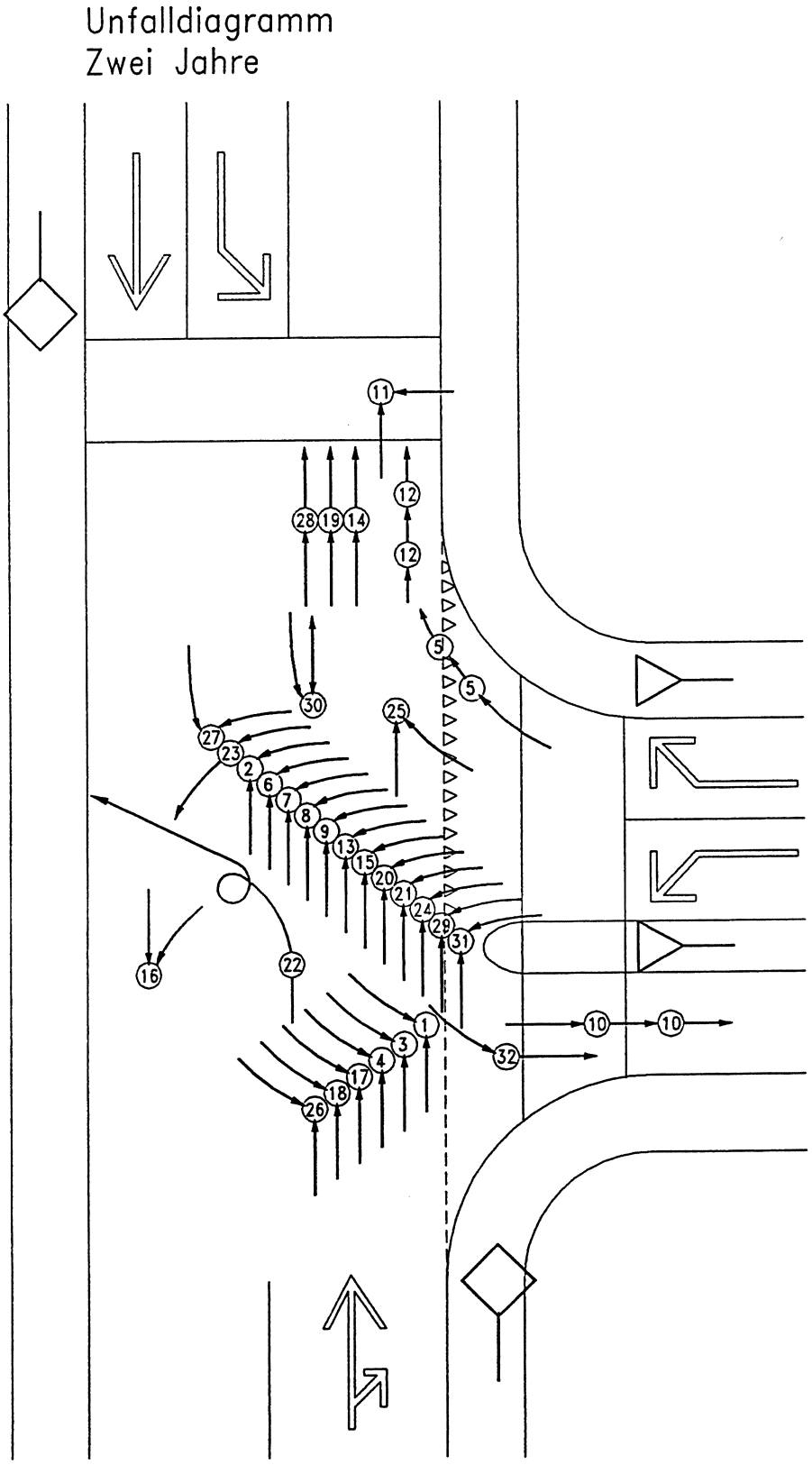
Die Tabelle zeigt ein Beispiel, sie bezieht sich auf den Verkehrsknoten auf Seite 8.

Unfallstatistik
Zwei Jahre

Nr	Tag	Tages-zeit	Verletzte		Tote	Sach-schaden [1000Fr]	Strassen-zustand	Objektart	Unfalltyp
			leicht	schwer					
1	Mo	15h	1			3.0	nass	Pw/Mofa	Linksabb./Gegenverk.
2	Mo	17h				6.0	trocken	Liefw/Mr/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
3	Fr	16h				12.0	feucht	Pw/Pw/Pw	Linksabb./Gegenverk.
4	Sa	18h		1		2.1	trocken	Pw/Mofa	Linksabb./Gegenverk.
5	Mi	9h				1.0	trocken	Pw/Liefw/Pw	Auffahren
6	Mo	13h	2			10.0	trocken	Pw/Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
7	Mo	17h		1		2.0	trocken	Pw/Mr	Linkseinb./Ger.von Links
8	Mi	18h	1			4.0	trocken	Pw/Mr	Linkseinb./Ger.von Links
9	Fr	13h				3.0	trocken	Pw/Lw	Linkseinb./Ger.von Links
10	Mi	7h				4.0	trocken	Pw/Pw/Pw	Auffahren
11	Mi	16h				3.0	trocken	Pw/Fr	Überqueren
12	Fr	17h				8.5	nass	Pw/Pw/Pw	Auffahren
13	Fr	17h		1		2.0	trocken	Pw/Mofa	Linkseinb./Ger.von Links
14	Di	17h				2.0	trocken	Pw/Mr	Auffahren
15	Do	13h				5.0	trocken	Mr/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
16	Mi	8h	1			10.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Rechts
17	Fr	8h				10.0	trocken	Pw/Pw	Linksabb./Gegenverk.
18	Do	17h	1			1.0	trocken	Pw/Fr/Pw	Linksabb./Gegenverk.
19	Di	16h				3.5	trocken	Pw/Pw	Auffahren
20	Di	17h				15.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
21	Do	18h	1			3.0	trocken	Liefw/Klmr	Linkseinb./Ger.von Links
22	Mi	6h				5.0	verschneit	Pw	Fahrunfall ohne Kollision
23	Mo	12h				0.1	trocken	Pw/Pw	Auffahren
24	Do	19h				20.0	trocken	Pw/Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
25	Di	17h				10.0	trocken	Pw/Samfz	Rechtseinb./Ger.von Links
26	Sa	14h				5.0	nass	Pw/Pw	Linksabb./Gegenverk.
27	So	19h				2.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Linksabb.
28	Di	17h				2.0	trocken	Pw/Pw	Auffahren
29	Do	17h				10.0	trocken	Pw/Lw+A	Linkseinb./Ger.von Links
30	Do	7h				0.7	trocken	Pw/Pw	Rückwärtsfahren
31	Do	18h				8.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
32	Do	17h				3.5	trocken	Pw/Pw	Auffahren
Σ			7	3	0	176.4			

Das Unfalldiagramm stellt einen Auszug von Daten aus der Unfallstatistik auf einem Situationsplan des bestehenden Verkehrsknotens dar. Es zeigt den Ort der Unfälle und gibt einen anschaulichen Überblick über die Gefahrenherde.

Das dargestellte Beispiel eines Unfalldiagramms bezieht sich auf den Verkehrsknoten auf Seite 8 und die Unfallstatistik auf Seite 10.



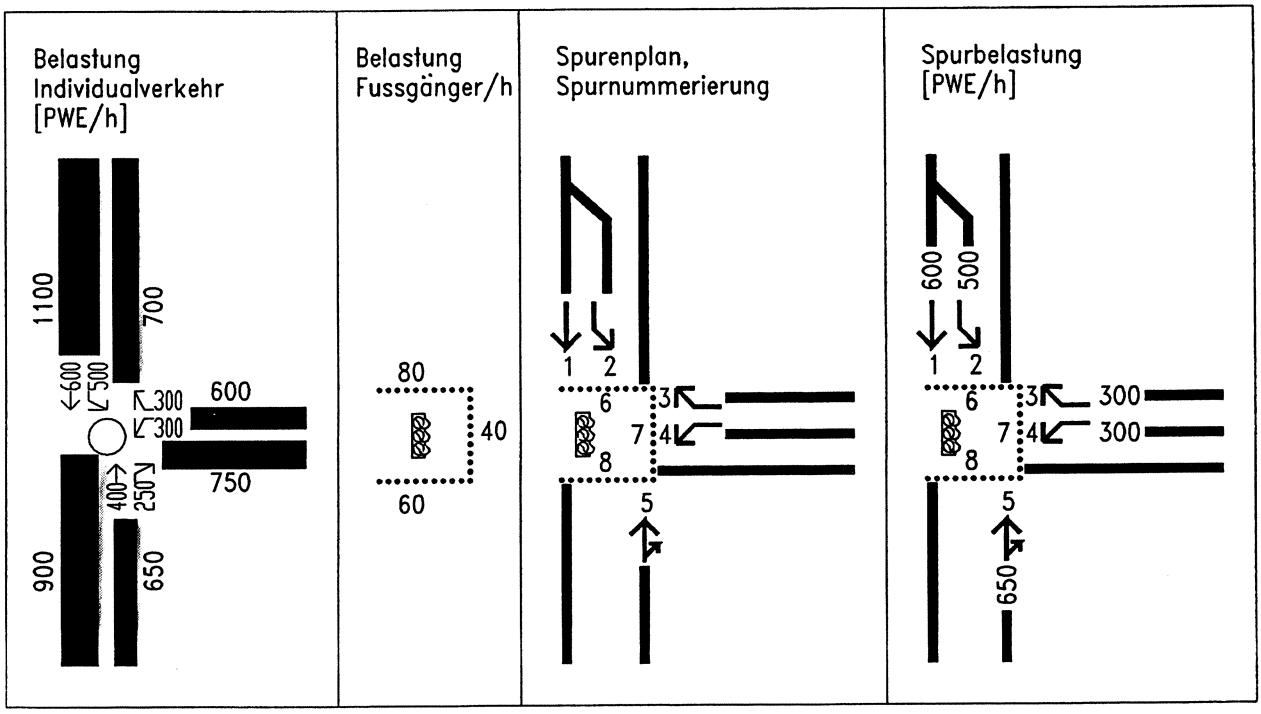
7. DIE KRITISCHEN SPURBELASTUNGEN

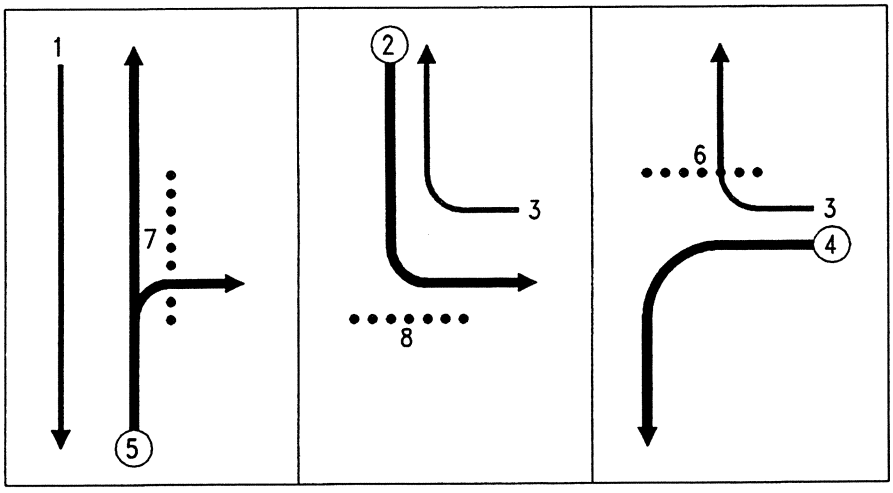
7.1 Definitionen

Die kritischen Spurbelastungen sind die grössten stündlichen Spurbelastungen, die zueinander im Konflikt stehen. Sie können nur nacheinander und nicht miteinander abfliessen, und sie bestimmen massgebend den Ablauf der Lichtsignalanlage.

Die unkritischen Spurbelastungen sind kleiner als die kritischen, und sie können mit einer oder mit mehreren kritischen Spurbelastungen zusammen abfliessen. Sie bestimmen nicht den Ablauf der Lichtsignalanlage.

Das Bild zeigt an einem Beispiel die Ermittlung der kritischen Spurbelastungen. Im unteren Bildteil sind die kritischen Spurbelastungen stark und die unkritischen schwächer eingetragen.





Kritische Spurbelastung: 650 [PWE/h] 500 [PWE/h] 300 [PWE/h]

7.2 Die maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

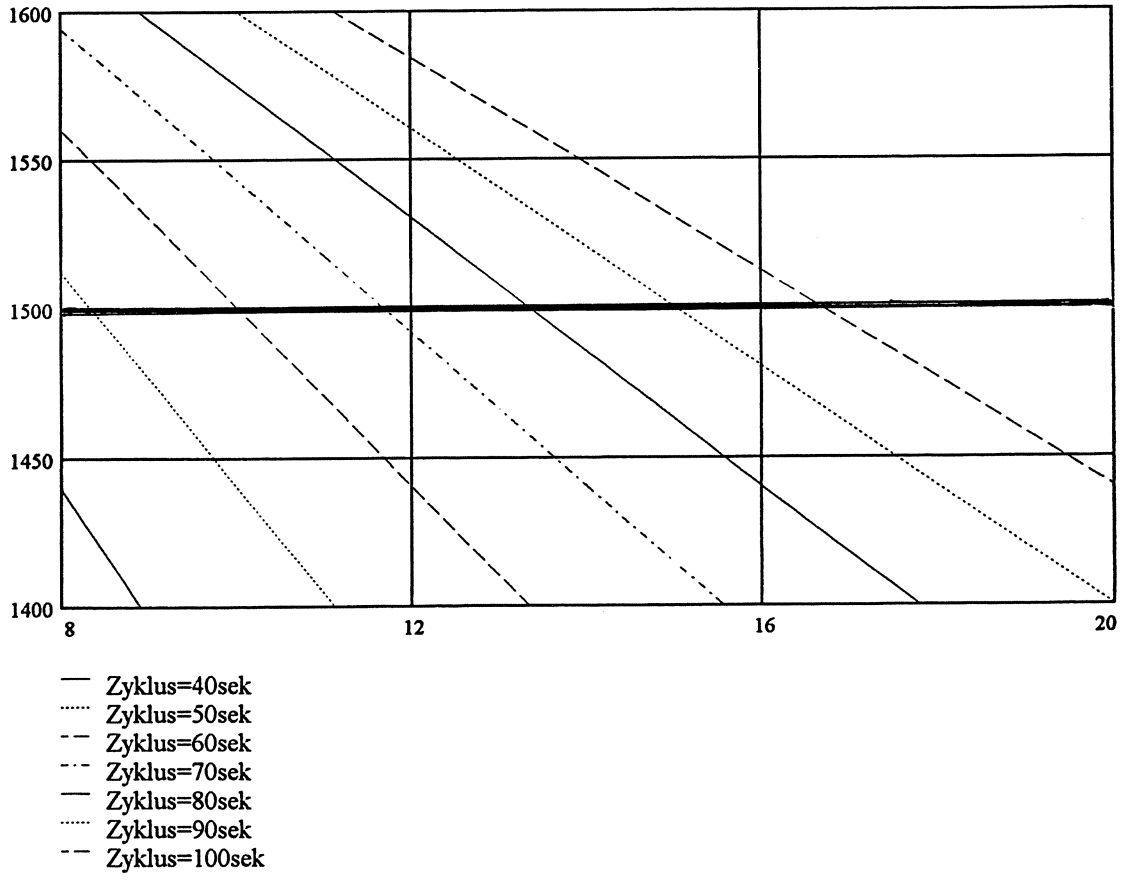
Die maximale Summe der kritischen Spurbelastungen folgt aus Erfahrungswerten für die Spursättigung S = 1800 PWE/h und für einen Auslastungsgrad x = 1 zu etwa 1500 PWE/h. Berücksichtigt ist dabei die Erfahrung, dass mit einer wachsenden Zahl von kritischen Spurbelastungen die Summe der Zwischenzeiten zwischen den kritischen Spurbelastungen ansteigt, und dass dann entsprechend höhere Umlaufzeiten gewählt werden 9) 10) 11) 12).

Das Bild zeigt dazu den Zusammenhang zwischen der Summe der Zwischenzeiten auf der Abszisse und der maximalen Summe der kritischen Spurbelastungen auf der Ordinate, abhängig von der Umlaufzeit.

Auslastungsgrad x=1, Spursättigung S=1800PWE/h

Maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

$$\sum_{max} Q = \frac{Z - \sum_i t_z}{Z} \cdot S$$



7.3 Grünzeitanteil

Der Grünzeitanteil der kritischen Spurbelastungen folgt direkt aus den entsprechenden Spurbelastungen und der maximalen Summe der kritischen Spurbelastungen.

Der Grünzeitanteil der unkritischen Spurbelastungen entspricht jenem der gleichzeitig abfliessenden kritischen Spurbelastungen.

Das Bild ermittelt dazu den Grünzeitanteil der kritischen und unkritischen Spurbelastungen für das Beispiel auf Seite 12.

$Q\left[\frac{PWE}{h}\right]$ Spurbelastung

$\sum_{max} Q = 1500 PWE / h$ Maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

$S = 1800 PWE / h$ Spursättigung Individualverkehr

$\lambda = \frac{\sum_{max} Q}{S} \cdot \frac{Q}{\sum Q}$ Grünzeitanteil der kritischen Spurbelastungen

$L = \lambda \cdot S$ Spurleistung

$x = \frac{Q}{L}$ Auslastungsgrad

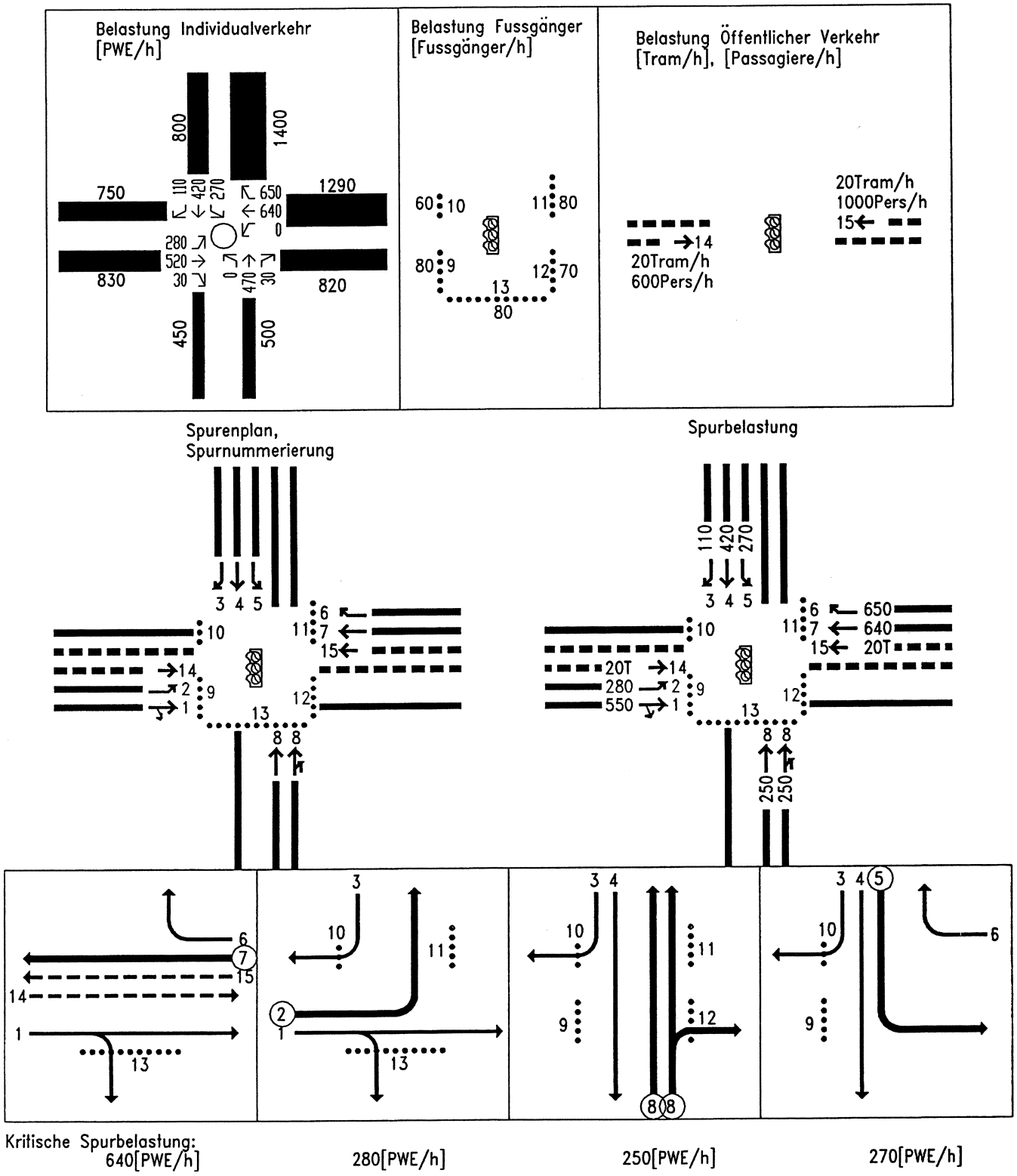
Kritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q[PWE/h]	Grünzeitanteil λ	Spurleistung [PWE/H]	Auslastungsgrad
5	650	0.374	673	0.97
2	500	0.287	517	0.97
4	300	0.172	310	0.97
Σ	1450	0.833	1500	

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q[PWE/h]	Grünzeitanteil λ	Spurleistung [PWE/H]	Auslastungsgrad
1	600	0.374	673	0.89
3	300	0.287+0.172=0.459	827	0.36
6		0.172		
7		0.374		
8		0.287		

Das Bild ermittelt für ein zweites Beispiel die kritischen Spurbelastungen einer Kreuzung, sie sind im unteren Bildteil stark hervorgehoben. Gleichzeitig mit einer oder mit mehreren kritischen Spurbelastungen laufen die schwach eingetragenen unkritischen Spurbelastungen ab.



Für die kritischen und unkritischen Spurbelastungen der Kreuzung auf Seite 15 ermittelt die Tabelle die entsprechenden Grünzeitanteile, Spurleistungen und Auslastungsgrade.

Kritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q[PWE/h]	Grünzeitanteil λ	Spurleistung L[PWE/H]	Auslastungsgrad x
7	640	0.370	667	0.96
2	280	0.162	292	0.96
8	250	0.145	260	0.96
5	270	0.156	281	0.96
Σ	1440	0.833	1500	

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeitanteil λ	Spurleistung L	Auslastungsgrad x
1	550PWE/h	0.370+0.162=0.532	958PWE/h	0.57
3	110PWE/h	0.162+0.145+0.156=0.463	833PWE/h	0.13
4	420PWE/h	0.145+0.156=0.301	541PWE/h	0.78
6	650PWE/h	0.370+0.156=0.526	947PWE/h	0.69
9	80Fg/h	0.145+0.156=0.301		
10	60Fg/h	0.162+0.145+0.156=0.463		
11	80Fg/h	0.162+0.145=0.307		
12	70Fg/h	0.145		
13	80Fg/h	0.370+0.162=0.532		
14	20Tram/h	0.370		
15	20Tram/h	0.370		

7.4 Die minimalen kritischen Spurbelastungen

Damit die Lichtsignalsteuerung eine vorgegebene Mindestgrünzeit nicht unterschreitet, muss die kritische Spurbelastung über einem Mindestwert liegen. Aus Erfahrungswerten für die Mindestgrünzeit von 6 Sekunden und für die Spursättigung von 1800 PWE/h folgt eine minimale kritische Spurbelastung von 180 PWE/h. Berücksichtigt ist dabei die Erfahrung, dass mit wachsendem Auslastungsgrad grössere Umlaufzeiten gewählt werden.

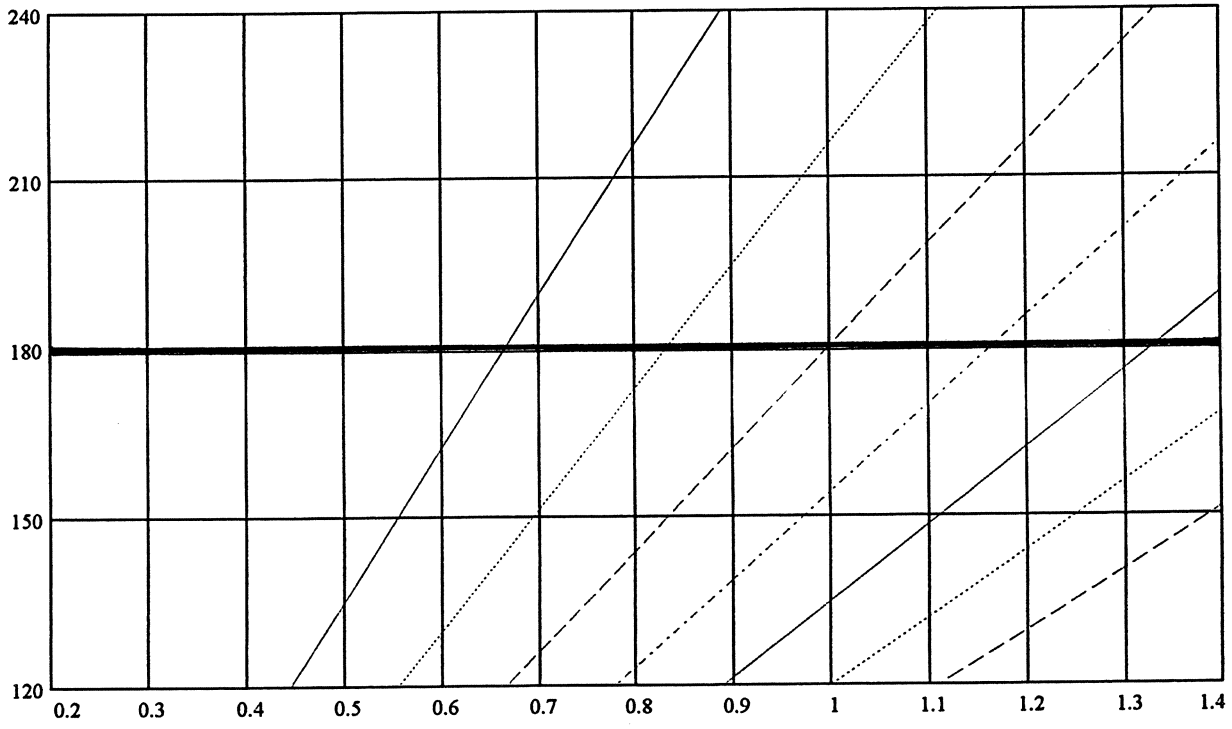
Analog dazu ergeben sich die minimalen kritischen Spurbelastungen zu 60 Tram/h und 800 Fussgänger/h.

Das Bild zeigt dazu den Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad auf der Abszisse und der minimalen kritischen Spurbelastung auf der Ordinate, abhängig von der Umlaufzeit.

Mindestgrünzeit g_{min}=6 sek, Spursättigung S=1800 PWE/h

$$Q_{min} = \frac{S \cdot x \cdot g_{min}}{Z}$$

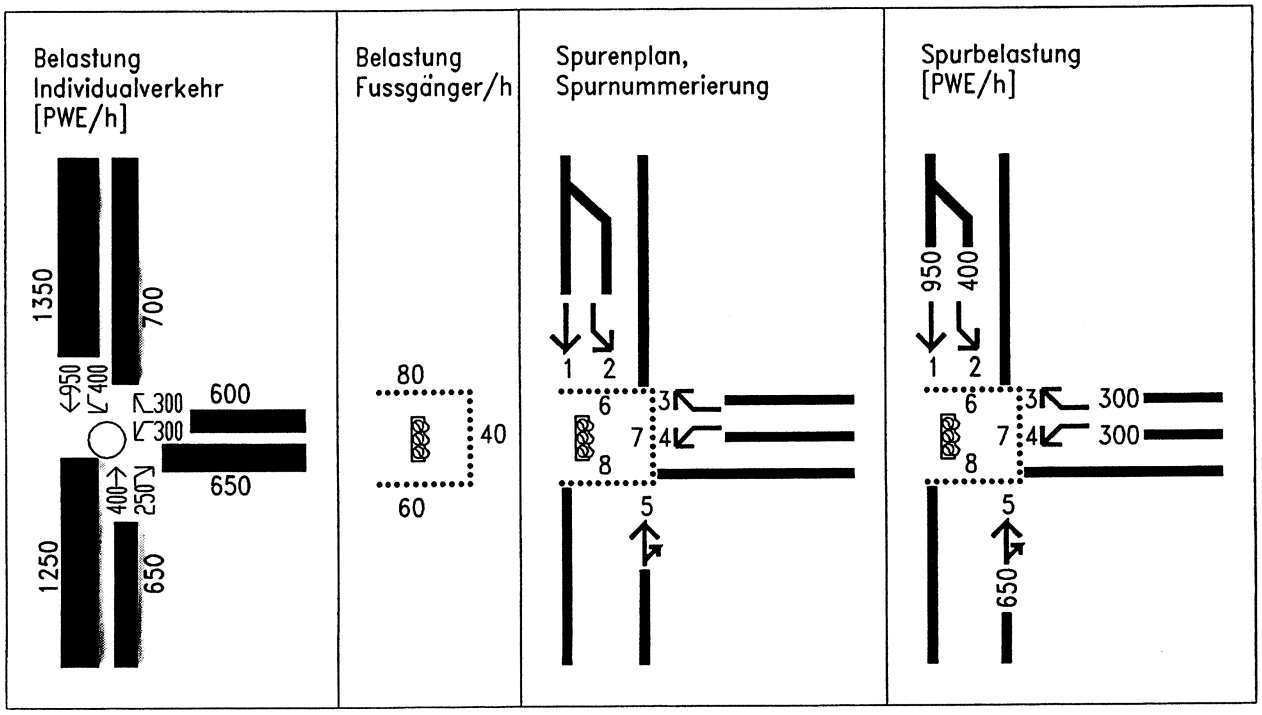
Minimale kritische Spurbelastung Q_{min}



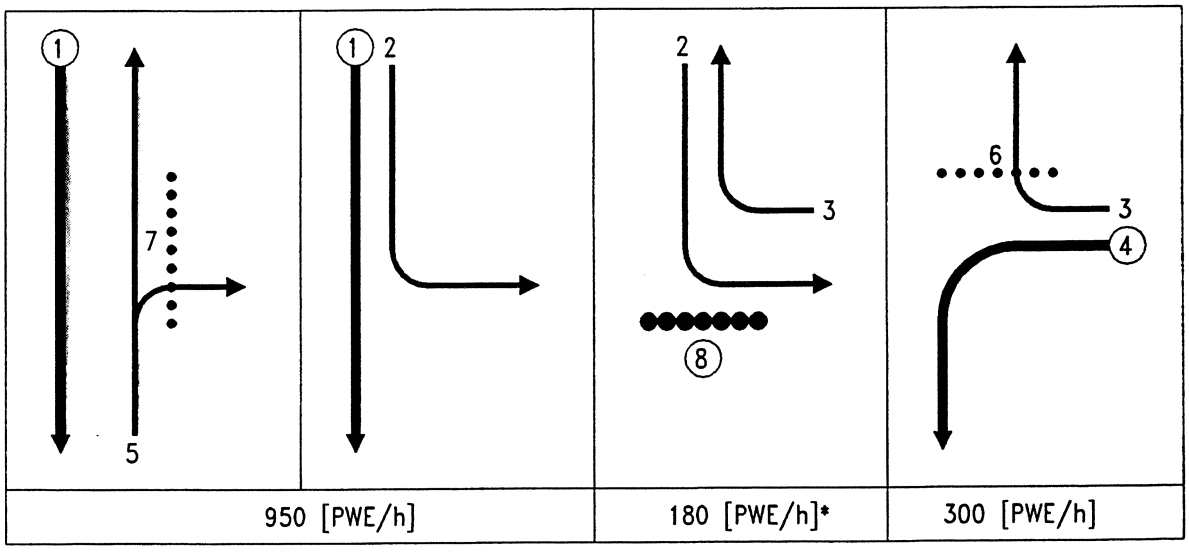
— Zyklus=40sek
····· Zyklus=50sek
– – Zyklus=60sek
–·– Zyklus=70sek
— Zyklus=80sek
····· Zyklus=90sek
– – Zyklus=100sek

Auslastungsgrad x

Das Bild zeigt ein Beispiel mit einer massgebenden minimalen kritischen Spurbelastung. Die kritischen Spurbelastungen sind im unteren Bildteil stark hervorgehoben. Die zweite kritische Spurbelastung bildet ein Fussgängerstreifen mit einer Frequenz von 60 Fussgänger/h - sie wird durch die minimale kritische Spurbelastung von 180 PWE/h ersetzt.



Kritische Spurbelastung:



* Minimale kritische Spurbelastung

Für die kritischen und des Verkehrsknotens auf Seite 18 ermittelt das Bild die entsprechenden Grünzeitanteile, Spurleistungen und Auslastungsgrade.
Den unkritischen Spurbelastungen der Spuren 2 und 5 steht die Summe der Grünzeitanteile der Spuren 1 und 8 zur Verfügung (0.554+0.105=0.659). Diese Summe wird proportional zu den Spurbelastungen der Spuren 2 und 5 aufgeteilt.

$Q\left[\frac{PWE}{h}\right]$ Spurbelastung

$\sum_{max} Q = 1500 PWE / h$ Maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

$S = 1800 PWE / h$ Spursättigung Individualverkehr
$(S = 600 Tram / h$ Spursättigung Tram)
$(S = 8000 Fg / h$ Sättigung Fussgängerstreifen)

$Q_{min} = 180 PWE / h$ Minimale kritischen Spurbelastung Individualverkehr*
$(Q_{min} = 60 Tram / h$ Minimale kritischen Spurbelastung Tram)
$(Q_{min} = 800 Fg / h$ Minimale kritischen Belastung Fussgängerstreifen)

$\lambda = \frac{\sum_{max} Q}{S} \cdot \frac{Q}{\sum Q}$ Grünzeitanteil der kritischen Spurbelastungen

$L = \lambda \cdot S$ Spurleistung

$x = \frac{Q}{L}$ Auslastungsgrad

Kritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q[PWE/h]	Grünzeitanteil λ	Spurleistung [PWE/H]	Auslastungsgrad
1	950	0.554	996	0.95
8	180*	0.105	189	0.95
4	300	0.175	315	0.95
Σ	1430	0.834	1500	

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q[PWE/h]	Grünzeitanteil λ	Spurleistung [PWE/H]	Auslastungsgrad
2	400	$\frac{(0.554+0.105)}{(650+400)} \cdot 400 = 0.251$	452	0.89
3	300	0.105 + 0.175 = 0.280	504	0.60
5	650	$\frac{(0.554+0.105)}{(650+400)} \cdot 650 = 0.408$	734	0.89
6		0.175		
7		0.408		

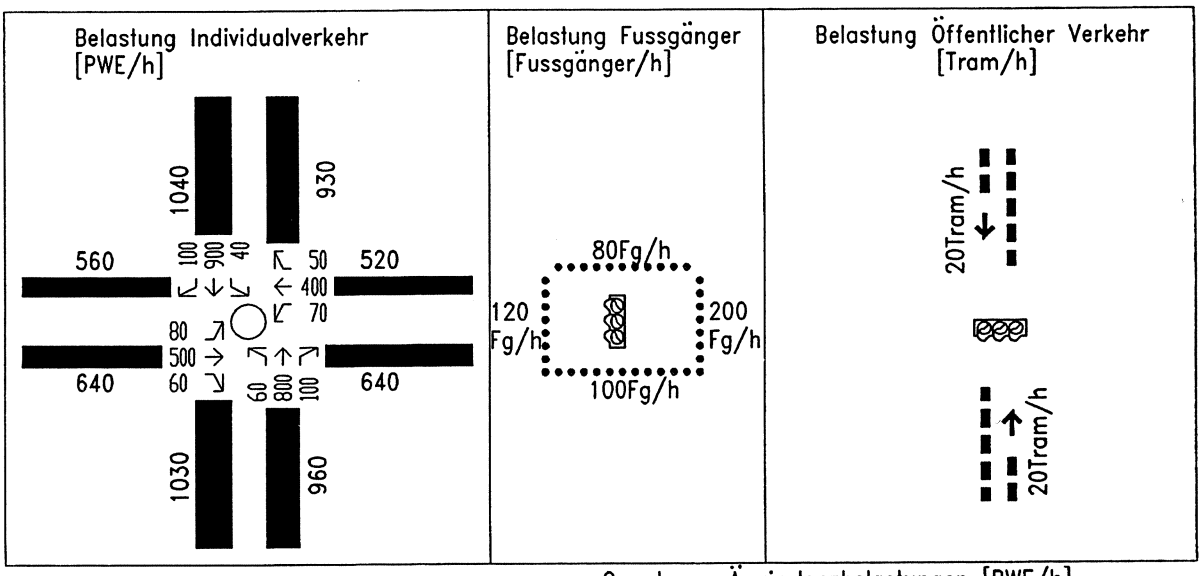
7.5 Geradeaus-Äquivalenzwerte für vortrittsbelastete Abbieger auf Mischspuren

Vortrittsbelastete Abbieger auf eigenen Abbiegespuren bilden eigene, kritische Spurbelastungen gemäss den vorangegangenen Seiten. Vortrittsbelastete Abbieger auf Mischspuren sind mit Äquivalenzwerten in Geradeausverkehr umzurechnen. Die Äquivalenzwerte hängen ab von der vortrittsberechtigten Verkehrsart, Verkehrsbelastung und Spurenzahl. Die Tabelle gibt dazu Schätzwerte an 10) 11) 12) 13) 31) 32).

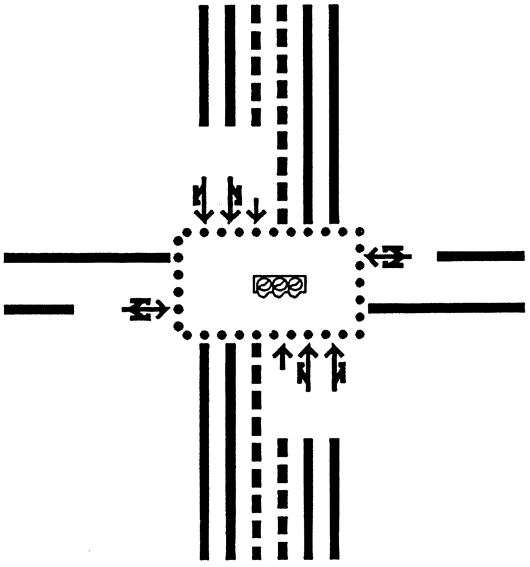
Kreuzen vortrittsberechtigte Abbieger auf Mischspuren mehrere vortrittsberechtigte Verkehrsströme, dann sind die einzelnen Äquivalenzwerte zu multiplizieren.

Vortrittsberechtigter Verkehr				Vortrittsbelastete Abbieger auf Mischspuren
Individualverkehr		Tram	Fussgänger	Geradeaus-Äquivalent
Gegenverkehr einspurig [PWE/h]	Gegenverkehr zweispurig [PWE/h]	[Tram/h]	[Fussgänger/h, Übergang]	
0 bis 50	0 bis 100	0 bis 10	0 bis 150	1
50 bis 100	100 bis 200	10 bis 30	150 bis 250	1.2
100 bis 250	200 bis 350	30 bis 60	250 bis 500	1.5
250 bis 500	350 bis 700	60 bis 120	500 bis 1000	2
500 bis 750	700 bis 1000	120 bis 180	1000 bis 1400	3
750 bis 1000	1000 bis 1200	>180	>1400	4
>1000	>1200			5

Das Bild zeigt an einem Beispiel die Äquivalenzwerte für vortrittsbelastete Abbieger auf Mischspuren, und es ermittelt die kritischen Spurbelastungen.



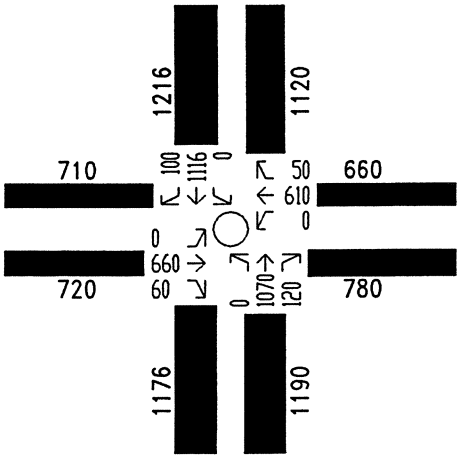
Spurenplan,



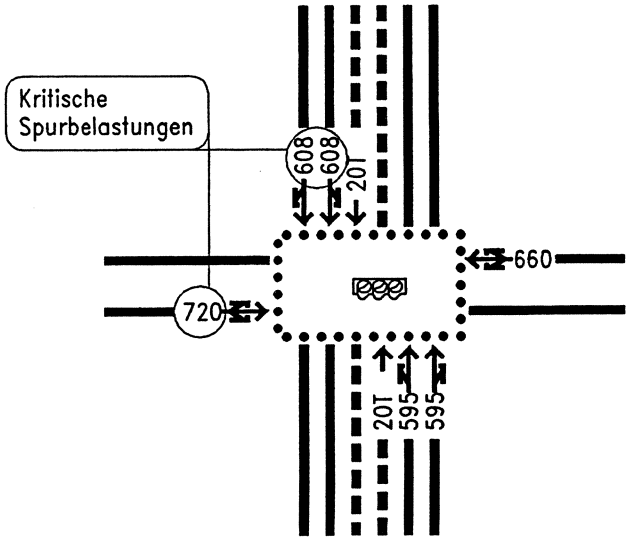
Geradeaus-Äquivalenzbelastungen [PWE/h]

Vortrittsbelastete Abbieger [PWE/h]	Individual-Gegenverkehr [PWE/h]	Geradeaus-Äquivalent	Tram [Tram/h]	Geradeaus-Äquivalent	Fussganger [Fg/h]	Geradeaus-Äquivalent	Geradeaus-Äquivalent	Geradeaus-Äquivalenzbelastung [PWE/h]
40	900	3	40	1.5	200	1.2	5.4	216
60	1000	3	40	1.5			4.5	270
100					200	1.2	1.2	120
80	450	2					2.0	160
70	560	3					3.0	210

Äquivalenzbelastung [PWE/h]



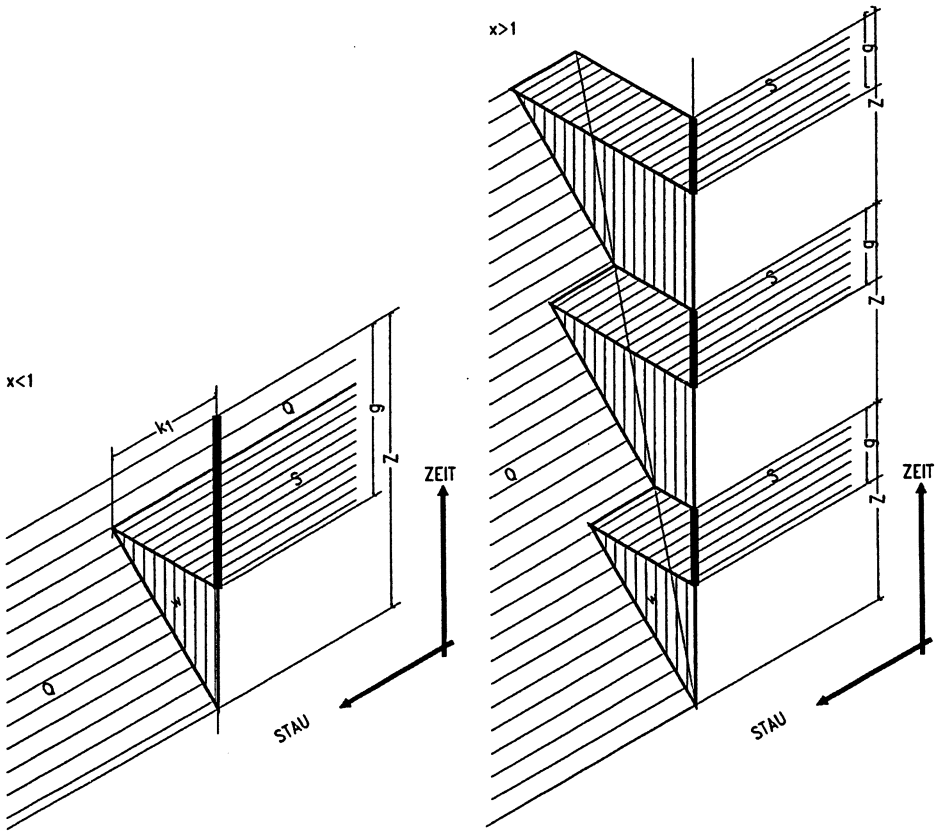
Spurbelastung [PWE/h]



8. STAU UND MITTLERE WARTEZEIT

8.1 Deterministisch

Bei regelmässigem Zufluss und Abfluss an einer Lichtsignalanlage resultieren Stau und mittlere Wartezeit deterministisch gemäss den Formeln in der unten stehenden Tabelle.



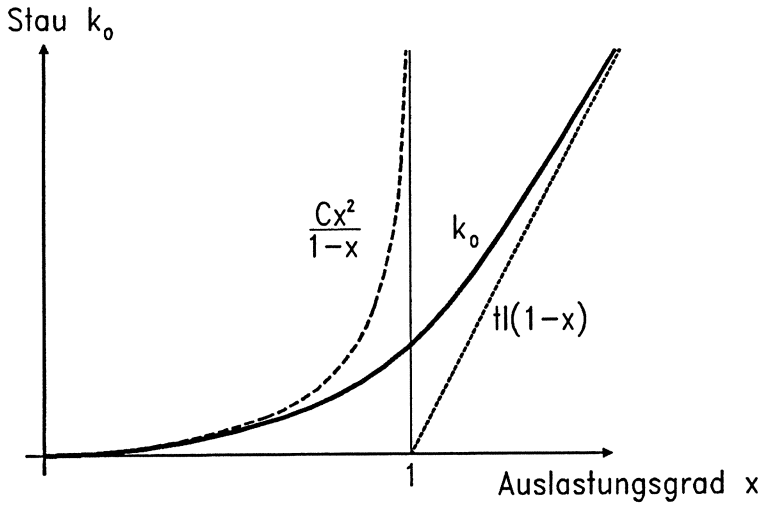
Stau und mittlere Wartezeit, Lichtsignalanlage
regelmässiger Zufluss und Abfluss, deterministisch

$g[sek]$	Grünzeit	$Q\left[\frac{PWE}{h}\right]$	Spurbelastung
$Z[sek]$	Zyklus	$L\left[\frac{PWE}{h}\right]$	Spurleistung
$\lambda = \frac{g}{Z}$	Grünzeitanteil	$S\left[\frac{PWE}{h}\right]$	Spursättigung
$x = \frac{Q}{L} = \frac{y}{\lambda}$	Auslastungsgrad	$y = \frac{Q}{S}$	
$k[PWE]$	Stau	$w[sek]$	mittlere Wartezeit

$x \leq 1$	$k_1 = \frac{Z \cdot Q \cdot (1-\lambda)}{3600 \cdot (1-y)}$	$w_1 = \frac{Z \cdot (1-\lambda)^2}{2 \cdot (1-y)}$
$x \geq 1$	$k_2 = L \cdot (x-1) + \frac{L \cdot Z \cdot (1-\lambda)}{3600}$	$w_2 = 1800 \cdot (x-1) + \frac{Z \cdot (1-\lambda)}{2}$

8.2 Stochastisch

Allgemein gesagt resultieren an einer Verkehrsanlage bei stochastischem Zufluss und Abfluss der Stau und die mittlere Wartezeit gemäss den Formeln in der unten stehenden Tabelle.



Stau und mittlere Wartezeit, Verkehrsanlage
stochastischer Zufluss und Abfluss

$$k_o = \frac{Q}{4 \cdot x} \cdot \left[(x-1) - \frac{2 \cdot C \cdot x}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4 \cdot C \cdot \left(x + 1 + \frac{C \cdot x}{Q} \right)}{\left(\frac{Q}{x} \right)}} \right]$$

$$w_0 = k_0 \cdot \frac{3600 \cdot x}{Q}$$

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

8.3 Lichtsignalanlage

Stau und mittlere Wartezeit an einer Lichtsignalanlage ergeben sich aus einer Kombination der deterministischen und stochastischen Formeln gemäss den Seiten 22 und 23. Zu den deterministischen Anteilen k_1 und w_1 für einen Auslastungsgrad $x \leq 1$ werden die stochastischen Anteile k_2 und w_2 addiert, die für alle Auslastungsgrade gelten.

Stau und mittlere Wartezeit resultieren gemäss den Formeln in der unten stehenden Tabelle. 10) 11) 12) 14) 15) 16) 17) 18) 19)

Stau und mittlere Wartezeit, Lichtsignalanlage
stochastischer Zufluss, regelmässiger Abfluss, C=0.5

$$k = k_1 + k_0$$

$$k = \frac{Z \cdot Q \cdot (1-\lambda)}{3600 \cdot (1-y)} + \frac{Q}{4 \cdot x} \cdot \left[(x-1) - \frac{x}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{2 \cdot \left(x + 1 + \frac{x}{2 \cdot Q} \right)}{\left(\frac{Q}{x} \right)}} \right]$$

$$w = w_1 + k_0 \cdot \frac{3600 \cdot x}{Q}$$

$$w = \frac{Z \cdot (1-\lambda)^2}{2 \cdot (1-y)} + 900 \cdot \left[(x-1) - \frac{x}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{2 \cdot \left(x + 1 + \frac{x}{2 \cdot Q} \right)}{\left(\frac{Q}{x} \right)}} \right]$$

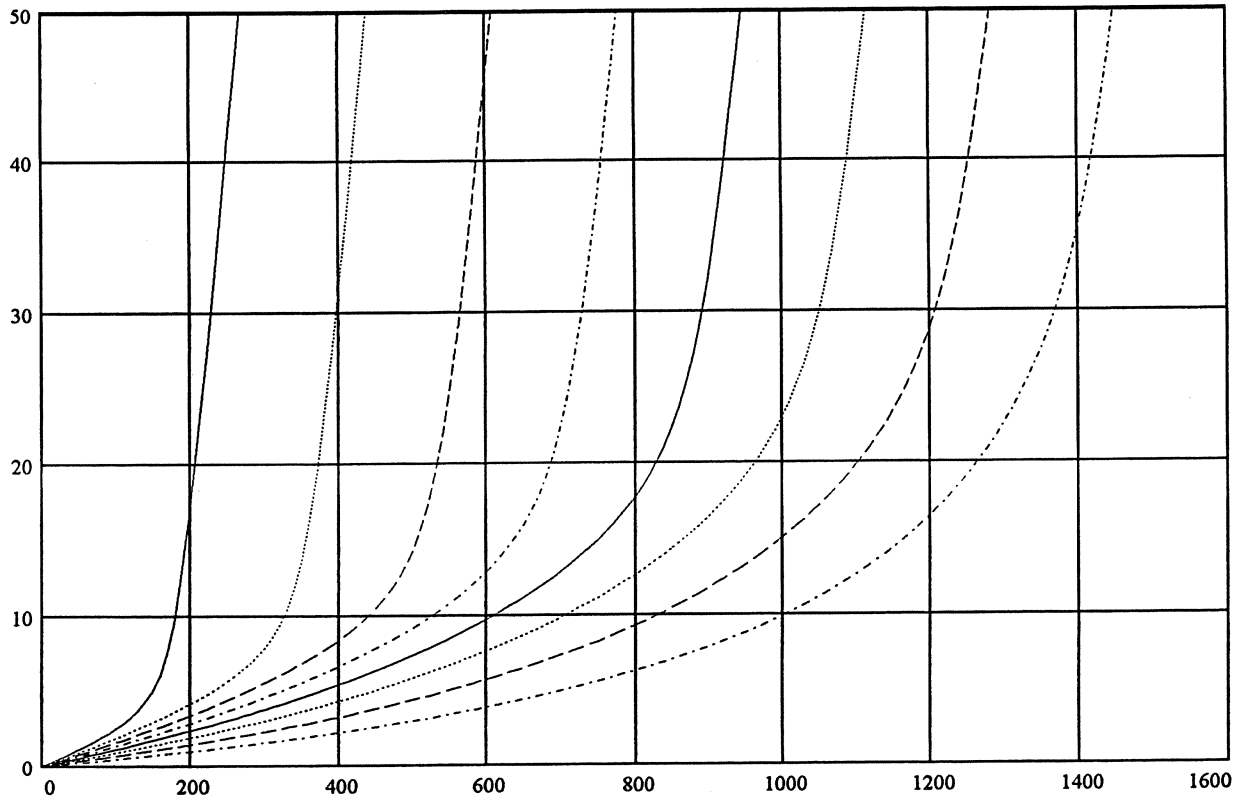
Aus dem Diagramm lässt sich der Stau des Individualverkehrs bei einer Lichtsignalanlage ablesen, abhängig vom Grünzeitanteil und der Spurbelastung.

Das Diagramm gilt exakt nur für eine mittlere Umlaufzeit von 70 Sekunden, der Stau ist aber relativ unabhängig von der Umlaufzeit.

$$i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad q := 0..160 \qquad Q_q := 10\cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

$$k_{q,i} := \frac{Q_q\cdot Z\cdot\left(1-\lambda_i\right)}{3600\cdot\left(1-y_q\right)} + \frac{Q_q}{4\cdot x_{i,q}}\cdot\left[\left(x_{i,q}-1\right) - \frac{x_{i,q}}{Q_q} + \sqrt{\left(x_{i,q}-1\right)^2 + 2\cdot\frac{\left(x_{i,q}+1+\frac{x_{i,q}}{2\cdot Q_q}\right)}{\left(\frac{Q_q}{x_{i,q}}\right)}}\right]$$

STAU k[PWE], Lichtsignalanlage,
stochastischer Zufluss,
regelmässiger Abfluss, C=0.5



— 0.1
····· 0.2
– – 0.3
–·– 0.4
— 0.5
····· 0.6
– – 0.7
–·– 0.8

λ

SPURBELASTUNG Q[PWE/h]

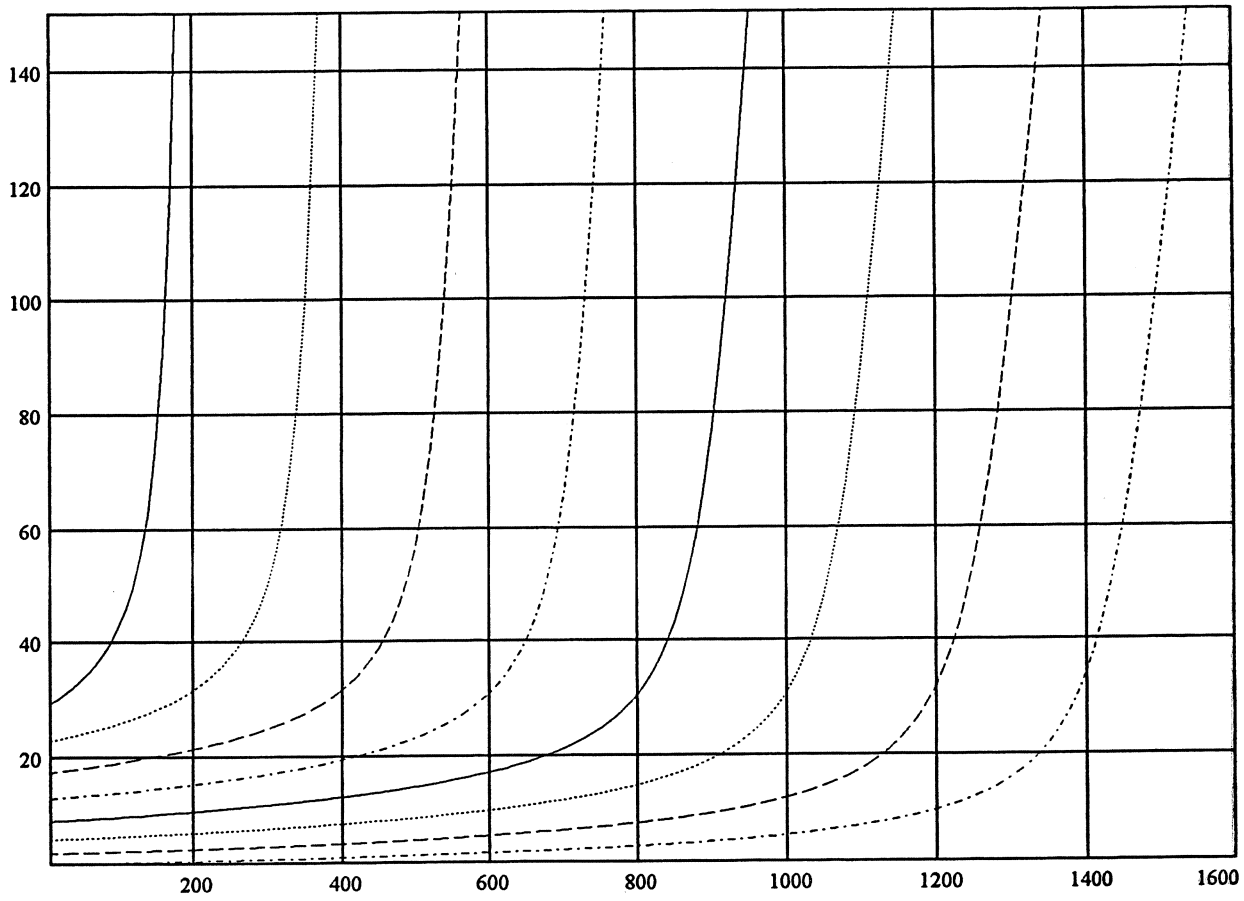
Aus dem Diagramm lässt sich die mittlere Wartezeit des Individualverkehrs ablesen, abhängig vom Grünzeitanteil und der Spurbelastung.

Das Diagramm gilt exakt nur für eine mittlere Umlaufzeit von 70 Sekunden, die mittlere Wartezeit ist aber relativ unabhängig von der Umlaufzeit.

$$q := 1..160 \qquad Q_q := 10\cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

$$w_{q,i} := \frac{Z\cdot\left(1-\lambda_i\right)^2}{2\cdot\left(1-y_q\right)} + 900\cdot\left[\left(x_{i,q}-1\right) - \frac{x_{i,q}}{Q_q} + \sqrt{\left(x_{i,q}-1\right)^2 + 2\cdot\frac{\left(x_{i,q}+1+\frac{x_{i,q}}{2\cdot Q_q}\right)}{\left(\frac{Q_q}{x_{i,q}}\right)}}\right]$$

MITTLERE WARTEZEIT w[sek],
Lichtsignalanlage,
stochastischer Zufluss,
regelmässiger Abfluss



— 0.1
····· 0.2
-- 0.3
-·- 0.4
— 0.5
····· 0.6
-- 0.7
-·- 0.8

λ

SPURBELASTUNG Q[PWE/h]

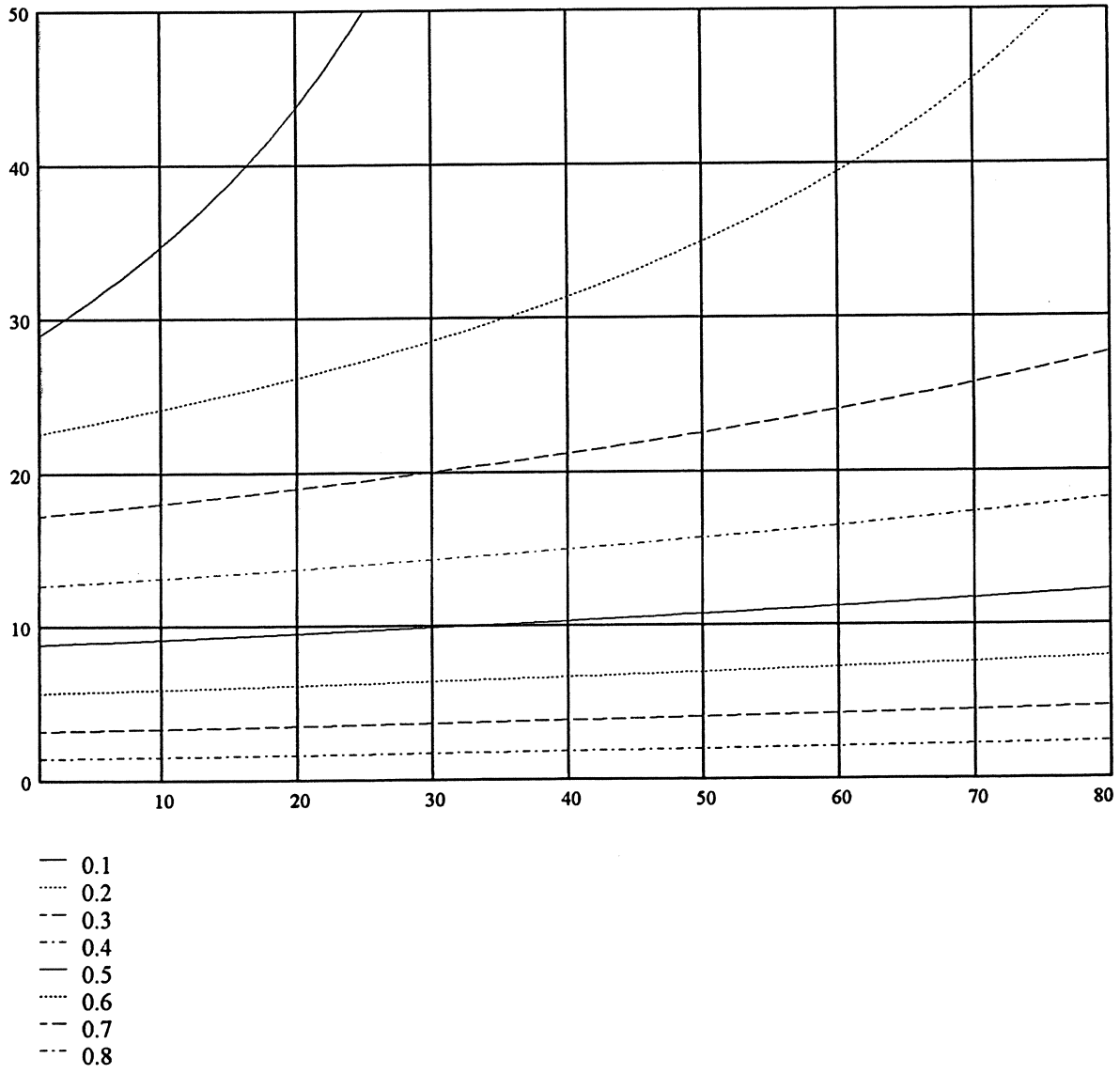
Aus dem Diagramm lässt sich die mittlere Wartezeit der Tram ablesen, abhängig vom Grünzeitanteil und der Spurbelastung.

Das Diagramm gilt exakt nur für eine mittlere Umlaufzeit von 70 Sekunden, die mittlere Wartezeit ist aber relativ unabhängig von der Umlaufzeit.

$$q := 1..80 \qquad T_q := q \qquad S := 600 \qquad y_q := \frac{T_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

$$w_{q,i} := \frac{Z\cdot\left(1-\lambda_i\right)^2}{2\cdot\left(1-y_q\right)} + 900\cdot\left[\left(x_{i,q}-1\right) - \frac{x_{i,q}}{T_q} + \sqrt{\left(x_{i,q}-1\right)^2 + 2\cdot\frac{\left(x_{i,q}+1+\frac{x_{i,q}}{2\cdot T_q}\right)}{\left(\frac{T_q}{x_{i,q}}\right)}}\right]$$

MITTLERE WARTEZEIT w[sek],
Lichtsignalanlage,
stochastischer Zufluss,
regelmässiger Abfluss



λ **Kursfahrzeuge/h, Richtung**

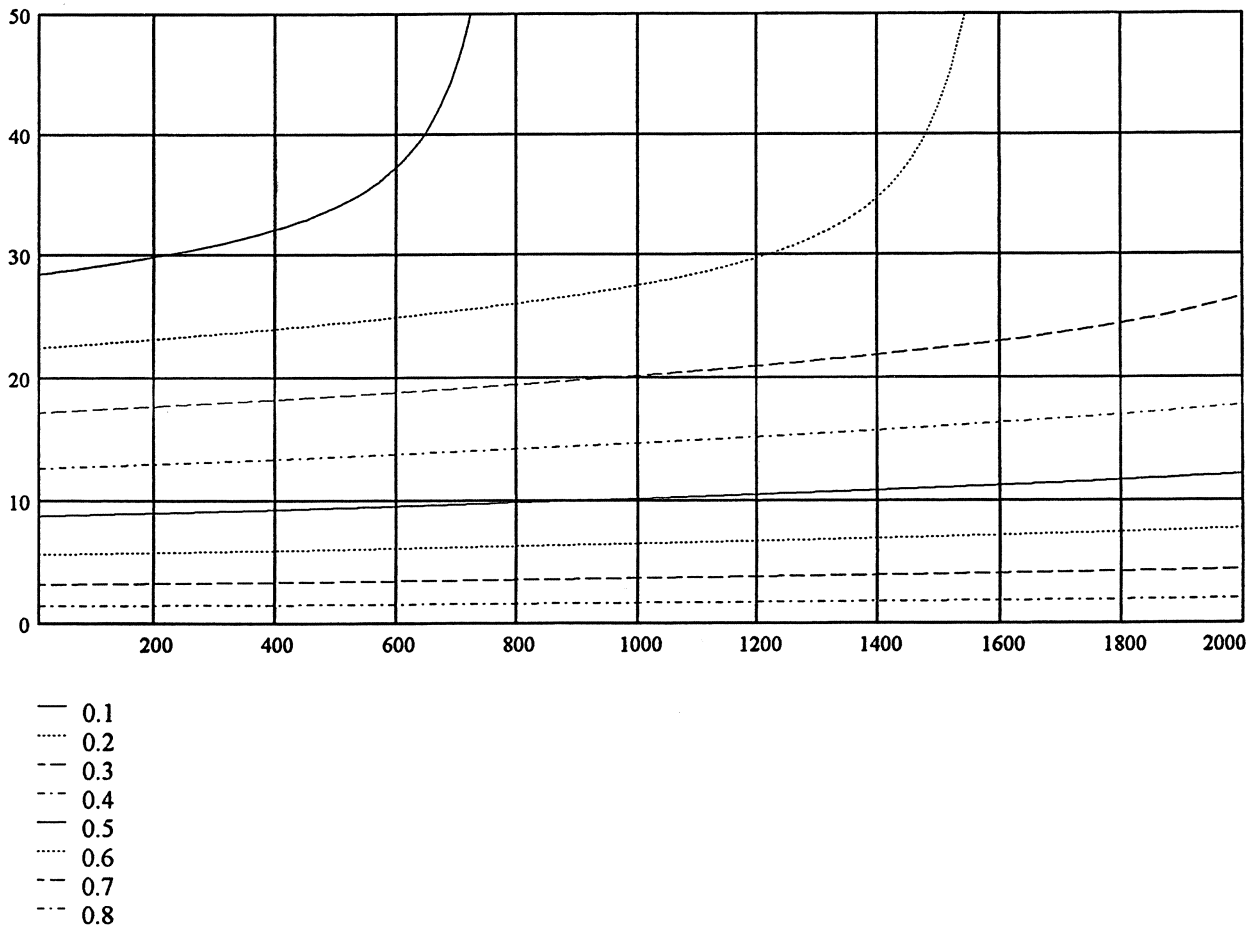
Aus dem Diagramm lässt sich die mittlere Wartezeit der Fussgänger ablesen, abhängig vom Grünzeitanteil und den Fussgängerfrequenzen.

Das Diagramm gilt nur exakt für eine mittlere Umlaufzeit von 70 Sekunden, die mittlere Wartezeit ist aber relativ unabhängig von der Umlaufzeit.

$$q := 1..200 \qquad P_q := 10\cdot q \qquad S := 8000 \qquad y_q := \frac{P_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

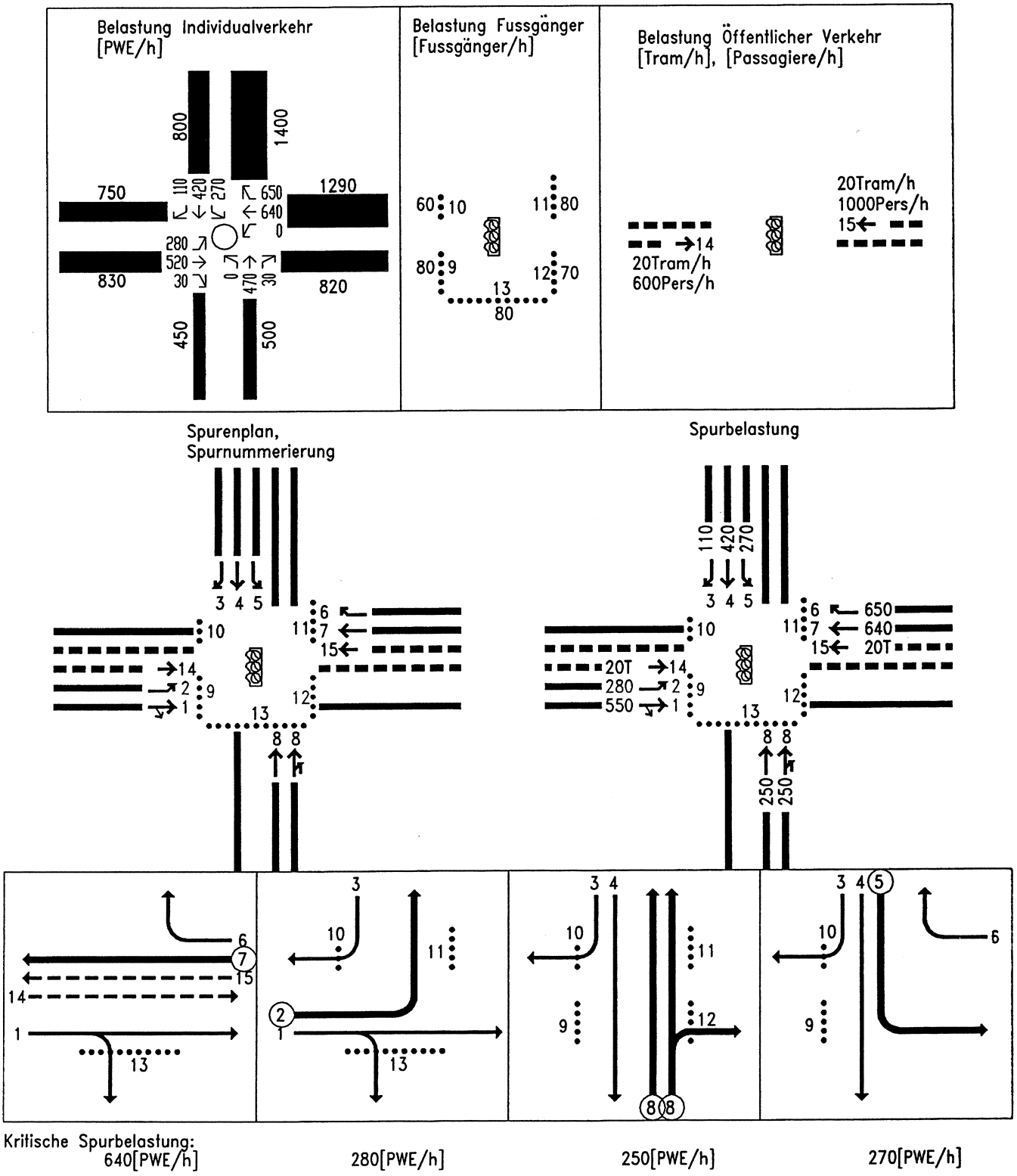
$$w_{q,i} := \frac{Z\cdot\left(1-\lambda_i\right)^2}{2\cdot\left(1-y_q\right)} + 900\cdot\left[\left(x_{i,q}-1\right) - \frac{x_{i,q}}{P_q} + \sqrt{\left(x_{i,q}-1\right)^2 + 2\cdot\frac{\left(x_{i,q}+1+\frac{x_{i,q}}{2\cdot P_q}\right)}{\left(\frac{P_q}{x_{i,q}}\right)}}\right]$$

MITTLERE WARTEZEIT w[sek],
Lichtsignalanlage,
stochastischer Zufluss,
regelmässiger Abfluss



8.4 Beispiel

Das Bild ermittelt für eine Kreuzung mit Individualverkehr, Fussgängern und öffentlichem Verkehr die kritischen und unkritischen Spurbelastungen. Für dieses Beispiel werden auf der folgenden Seite 30 Stau und mittlere Wartezeiten ermittelt.



Aufgrund der Spurbelastungen im vorangegangenen Beispiel auf Seite 29 und der Grünzeitanteile ermittelt die untenstehende Tabelle Stau und mittlere Wartezeiten aus den Diagrammen auf den Seiten 25 bis 28.

$k[PWE]$ Stau

$w[sek]$ mittlere Wartezeit

Kritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeitanteil λ	Stau k[PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]
7	640PWE/h	0.370	20	62
2	280PWE/h	0.162	11	100
8	250PWE/h	0.145	10	108
8	250PWE/h	0.145	10	108
5	270PWE/h	0.156	11	103
Σ		0.833	62	

Unkritische Spurbelastungen

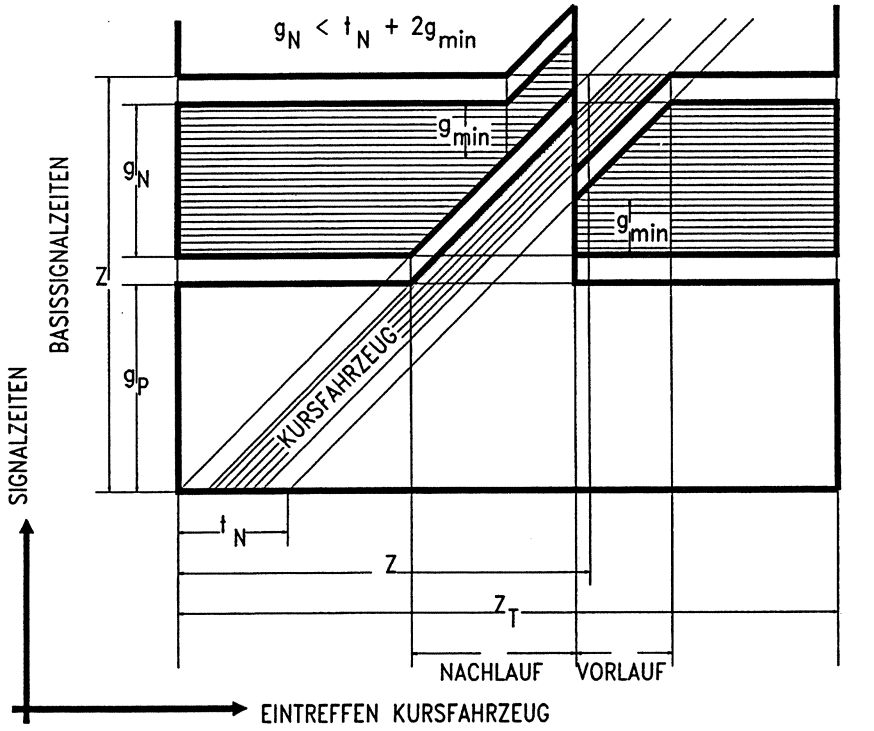
Spur	Spurbelastung Q	Grünzeitanteil λ	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]
1	550PWE/h	0.532	8	14
3	110PWE/h	0.463	1	11
4	420PWE/h	0.301	9	34
6	650PWE/h	0.526	10	16
9	80Fg/h	0.301		17
10	60Fg/h	0.463		10
11	80Fg/h	0.307		17
12	70Fg/h	0.145		26
13	80Fg/h	0.532		8
14	20Tram/h	0.370		15
15	20Tram/h	0.370		15
Σ			28	
ΣΣ			90	

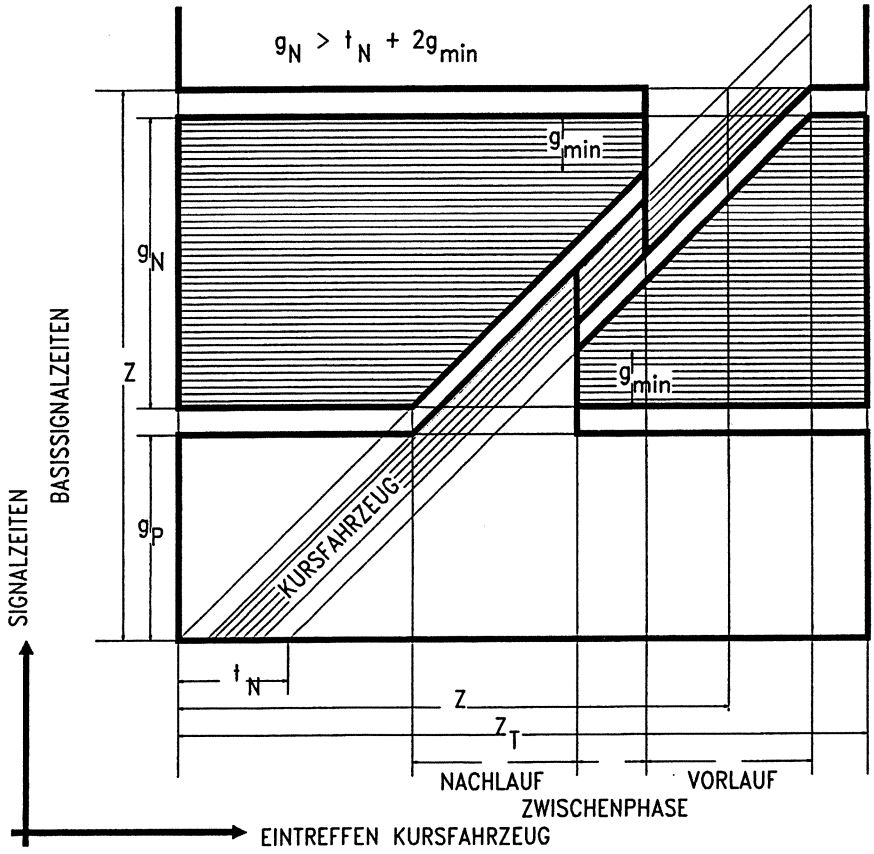
9. PRIVILEGIERUNG DES ÖFFENTLICHEN VERKEHRS

9.1 Prinzip

Die Privilegierung des öffentlichen Verkehrs geht von Basissignalzeiten aus und modifiziert sie so, dass die Signalzeiten zu einer Funktion des Eintreffens der Kursfahrzeuge werden. Das Bild zeigt dazu das Prinzip einer vollen Privilegierung des öffentlichen Verkehrs mit einem Nachlauf und einem Vorlauf der zum öffentlichen Verkehr freundlichen Grünzeit, bezw. mit einer Zwischenphase, 20) 21) 22) 23) 24). Die Wartezeiten der Kursfahrzeuge sinken gegen 0 Sekunden.

SIGNALZEITEN ALS FUNKTION DES EINTREFFENS DER KURSFAHRZEUGE





9.2 Korrekturfaktoren

Von der Privilegierung profitiert die zum öffentlichen Verkehr freundliche Basisgrünzeit, und die zum öffentlichen Verkehr feindliche Basisgrünzeit wird reduziert. Die Formeln bestimmen die entsprechenden Erhöhungs- bezw. Reduktionsfaktoren. Sie hängen neben den freundlichen und feindlichen Grünzeiten bezw. den Frequenzen der Kursfahrzeuge auch von Zwischenzeiten, Mindestgrünzeiten und von der Umlaufzeit ab.

PRIVILEGIERUNG DES ÖFFENTLICHEN VERKEHRS
KORREKTURFAKTOREN

g_N	zum öffentlichen Verkehr feindliche Grünzeit
g_P	zum öffentlichen Verkehr freundliche Grünzeit
$g_{\min}$	Mindestgrünzeit
Z_T	durchschnittlicher Zyklus der Kursfahrzeuge $\left(\frac{3600}{Kursfahrzeuge\,/\,h}\right)$
t_Z	Zwischenzeit
$t_N = g_{\min} + 2 \cdot t_Z$	
f_N	Reduktionsfaktor der zum öffentlichen Verkehr feindlichen Grünzeit
f_P	Erhöhungsfaktor der zum öffentlichen Verkehr freundlichen Grünzeit

	f_P	f_N
$g_N \le t_N + 2 \cdot g_{\min}$ Vorlauf und Nachlauf	$1 + \frac{(g_N - g_{\min}) \cdot (t_N + g_{\min})}{g_P \cdot Z_T}$	$1 - \frac{g_N \cdot t_N + (g_{\min})^2 - g_{\min} \cdot (t_N + 2 \cdot g_{\min} - g_N)}{g_N \cdot Z_T}$
$g_N \ge t_N + 2 \cdot g_{\min}$ Vorlauf, Nachlauf und Zwischenphase	$1 + \frac{g_{\min} \cdot (g_N - g_{\min}) + t_N \cdot (t_N + g_{\min})}{g_P \cdot Z_T}$	$1 - \frac{g_N \cdot t_N + (g_{\min})^2}{g_N \cdot Z_T}$

Es werden Mindestgrünzeiten von 6 Sekunden, eine Umlaufzeit von 70 Sekunden und eine durchschnittliche Zwischenzeit von 4 Sekunden angenommen. Dann vereinfachen sich die Formeln für die Korrekturfaktoren gemäss Seite 32 zu:

λ_N, λ_P	zum öffentlichen Verkehr feindlicher bez. freundlicher Grünzeitanteil
f_N, f_P	Korrekturfaktoren des zum öffentlichen Verkehr feindlichen bez. freundlichen Grünzeitanteils
$Q_t[Tram/h]$	Kursfahrzeuge pro Stunde
Annahmen	durchschnittliche Umlaufzeit $Z = 70\ s$ durchschnittliche Mindestgrünzeit $g_{min} = 6\ s$ durchschnittliche Zwischenzeit $t_z = 4\ s$

volle Priorität, Eigentrasse		volle Priorität, kein Eigentrasse	
$\lambda_P \leq 0.462$	$f_P = 1 + \frac{6 \cdot (1.414 - \lambda_P)}{\lambda_P \cdot \frac{3600}{Q_t}}$	$\lambda_P \leq 0.319$	$f_P = 1 + \frac{(17.962 - 16 \cdot \lambda_P)}{\lambda_P \cdot \frac{3600}{Q_t}}$
$\lambda_P \geq 0.462$	$f_P = 1 + \frac{20 \cdot (0.748 - \lambda_P)}{\lambda_P \cdot \frac{3600}{Q_t}}$	$\lambda_P \geq 0.319$	$f_P = 1 + \frac{(22.43 - 30 \cdot \lambda_P)}{\lambda_P \cdot \frac{3600}{Q_t}}$
$\lambda_N \leq 0.371$	$f_N = 1 - \frac{20 \cdot (\lambda_N - 0.086)}{\lambda_N \cdot \frac{3600}{Q_t}}$	$\lambda_N \leq 0.514$	$f_N = 1 - \frac{(30 \cdot \lambda_N - 2.571)}{\lambda_N \cdot \frac{3600}{Q_t}}$
$\lambda_N \geq 0.371$	$f_N = 1 - \frac{(14 \cdot \lambda_N + 0.514)}{\lambda_N \cdot \frac{3600}{Q_t}}$	$\lambda_N \geq 0.514$	$f_N = 1 - \frac{(24 \cdot \lambda_N + 0.514)}{\lambda_N \cdot \frac{3600}{Q_t}}$

$$\lambda_{Basis} = \frac{\lambda_{N,P}}{f_{N,P}} \cdot \frac{\sum \lambda_{N,P}}{\sum \lambda_{N,P} / f_{N,P}}$$

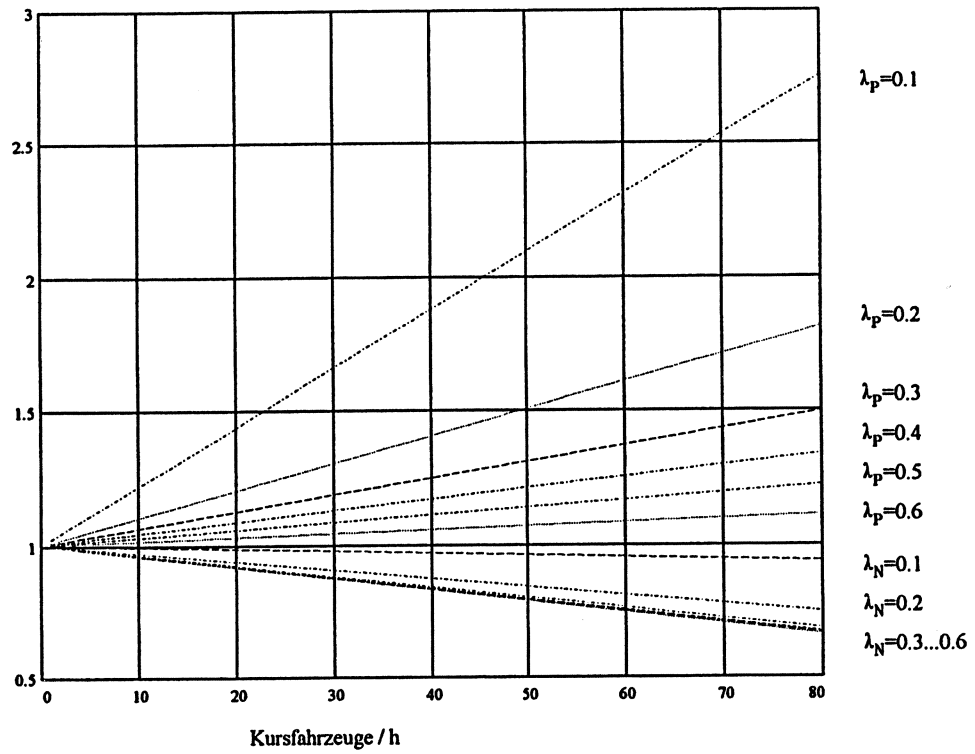
Basis - Grünzeitanteil bei Privilegierung

$$\lambda_{mittel} = \lambda_{N,P} \cdot \frac{\sum \lambda_{N,P}}{\sum \lambda_{N,P} / f_{N,P}}$$

mittlerer Grünzeitanteil bei Privilegierung

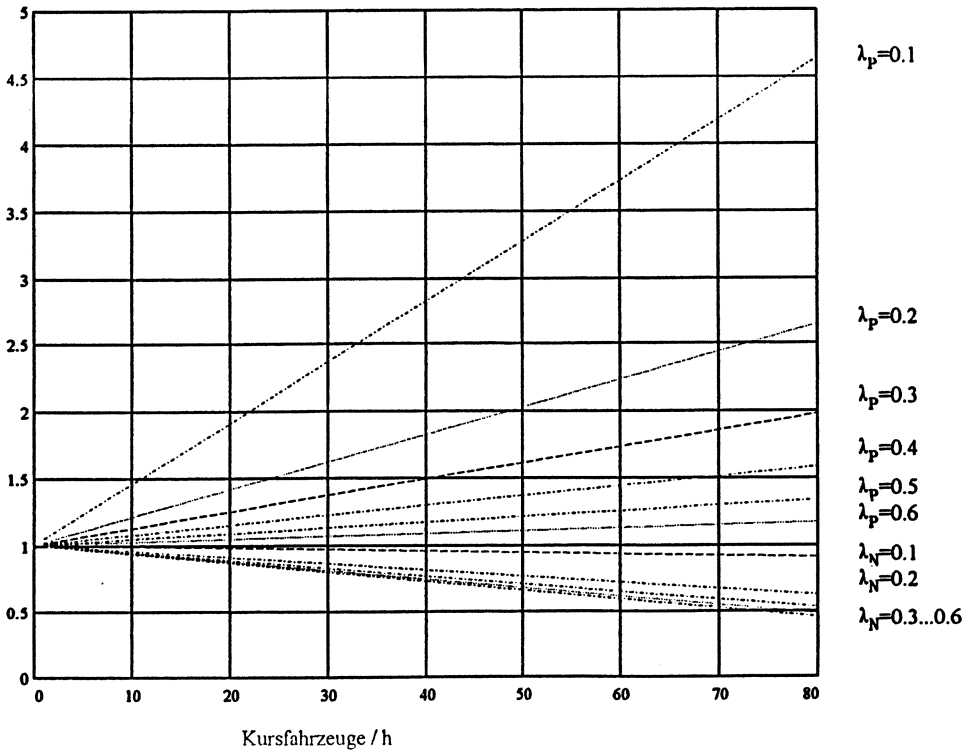
Die Korrekturfaktoren f_P und f_N lassen sich aus den beiden folgenden Diagrammen ablesen. Sie gelten für eine volle Privilegierung der Kursfahrzeuge mit bez. ohne Eigentrasse, der Grünzeitanteil des öffentlichen Verkehrs beträgt dann $\lambda = 1$. Bei einer Teilprivilegierung sind die beiden Korrekturfaktoren und der Grünzeitanteil des öffentlichen Verkehrs entsprechend zu reduzieren.

Korrekturfaktor f_P (volle Priorität und Eigentrasse der Kursfahrzeuge)



Korrekturfaktor f_N (volle Priorität und Eigentrasse der Kursfahrzeuge)

Korrekturfaktor f_P (volle Priorität der Kursfahrzeuge, kein Eigentrasse)



Korrekturfaktor f_N (volle Priorität der Kursfahrzeuge, kein Eigentrasse)

9.3 Mittlerer Grünzeitanteil

Von der Privilegierung profitiert die zum öffentlichen Verkehr freundliche Basisgrünzeit gemäss dem Erhöhungsfaktor, und die zum öffentlichen Verkehr feindliche Basisgrünzeit leidet gemäss dem Reduktionsfaktor. Insgesamt resultiert ein Leistungsverlust. Die unten stehende Tabelle bestimmt dazu die resultierenden mittleren Grünzeitanteile, die massgebend sind zum Bestimmen von Stau und mittlerer Wartezeit.

BEMESSUNG DES GRÜNZEITANTEILS OHNE PRIVILEGIERUNG

Spur	kritische Spurbelastung Q[PWE/h]	Grünzeit-anteil λ	Leistung $L = \lambda \cdot 1800$ [PWE/H]	Auslastungs-grad $x = \frac{Q}{L}$
1	900	0.500	900	1.0
2	600	0.333	600	1.0
Σ	1500	0.833	1500	

Grünzeitanteil ohne Privilegierung $$\lambda = \frac{\sum Q_{max}}{S} \cdot \frac{Q}{\sum Q}$$

BEMESSUNG DES GRÜNZEITANTEILS MIT PRIVILEGIERUNG DER TRAM

Spur	Privile-gierung	Korrektur-faktor f	$\frac{\lambda}{f}$	Grünzeit-anteil λ_{Basis}	Grünzeit-anteil λ_{Mittel}	Leistung $L = \lambda_{Mittel} \cdot 1800$ [PWE/h]	Auslastungs-grad $x = \frac{Q}{L}$
1	60 Tram/h, P	f_P=1.16	0.431	0.410	0.476	857	1.05
2	N	f_N=0.75	0.444	0.423	0.317	570	1.05
Σ			0.875	0.833	0.793	1427	

Grünzeitanteil Basissignalplan $$\lambda_{Basis} = \frac{\lambda}{f} \cdot \frac{\sum \lambda}{\sum \left(\frac{\lambda}{f}\right)}$$

mittlerer Grünzeitanteil mit Privilegierung $\lambda_{Mittel} = \lambda_{Basis} \cdot f$

9.4 Stau und mittlere Wartezeit

Mit der Privilegierung des öffentlichen Verkehrs wechseln die Grünzeiten der Lichtsignalanlage zufällig und der Abfluss wird stochastisch. Gegenüber einer Lichtsignalanlage ohne Privilegierung des öffentlichen Verkehrs wachsen Stau und mittlere Wartezeit der übrigen Verkehrsteilnehmer an. Die untenstehende Tabelle bringt dazu die entsprechenden Formeln.

Stau und mittlere Wartezeit an einer Lichtsignalanlage ergeben sich analog zu Seite 24 aus einer Kombination der deterministischen und stochastischen Formeln gemäss den Seiten 22 und 23. Zu den deterministischen Anteilen k_1 und w_1 für einen Auslastungsgrad $x \leq 1$ werden die stochastischen Anteile k_2 und w_2 addiert, die für alle Auslastungsgrade gelten.

Bei der Privilegierung des öffentlichen Verkehrs wird allerdings der stochastische Abfluss durch die Konstante C=1 berücksichtigt, anstatt durch C=0.5 bei regelmässigem Abfluss. Als Auslastungsgrad ist bei Privilegierung des öffentlichen Verkehrs in den Formeln für Stau und mittlere Wartezeit das Verhältnis einzusetzen $x = \frac{Q}{\lambda_{mittel} \cdot 1800}$.

Stau und mittlere Wartezeit, Lichtsignalanlage mit Privilegierung des öffentlichen Verkehrs
stochastischer Zufluss, stochastischer Abfluss, C=1.0

$$k = k_1 + k_0$$

$$k = \frac{Z \cdot Q \cdot (1-\lambda)}{3600 \cdot (1-y)} + \frac{Q}{4 \cdot x} \cdot \left[(x-1) - \frac{2 \cdot x}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4 \cdot \left(x + 1 + \frac{x}{Q} \right)}{\left(\frac{Q}{x} \right)}} \right]$$

$$w = w_1 + k_0 \cdot \frac{3600 \cdot x}{Q}$$

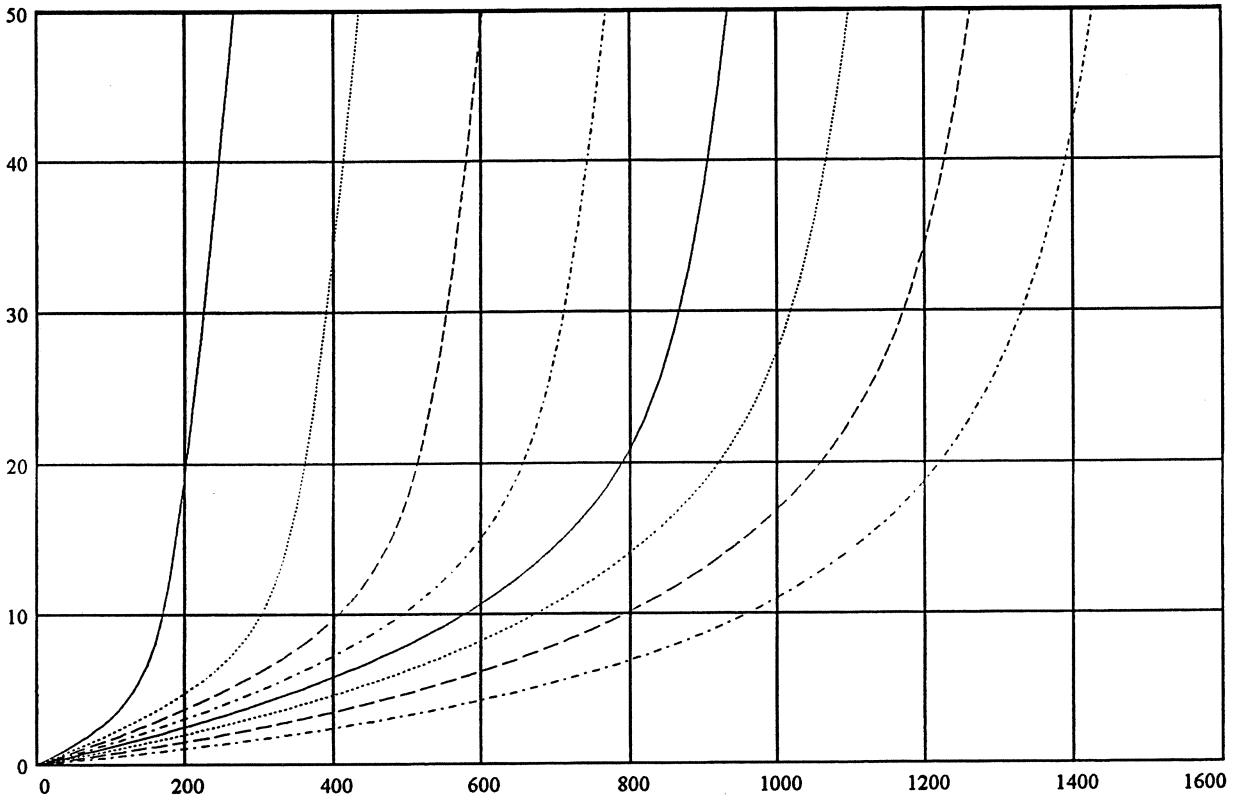
$$w = \frac{Z \cdot (1-\lambda)^2}{2 \cdot (1-y)} + 900 \cdot \left[(x-1) - \frac{2 \cdot x}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4 \cdot \left(x + 1 + \frac{x}{Q} \right)}{\left(\frac{Q}{x} \right)}} \right]$$

Aus dem Diagramm lässt sich der Stau des Individualverkehrs bei einer Privilegierung des öffentlichen Verkehrs ablesen, abhängig vom mittleren Grünzeitanteil und der Spurbelastung.

$$i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad q := 0..160 \qquad Q_q := 10\cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

$$k_{q,i} := \frac{Q_q\cdot Z\cdot\left(1-\lambda_i\right)}{3600\cdot\left(1-y_q\right)} + \frac{Q_q}{4\cdot x_{i,q}}\cdot\left[\left(x_{i,q}-1\right) - \frac{x_{i,q}}{Q_q}\cdot 2 + \sqrt{\left(x_{i,q}-1\right)^2 + 4\cdot\frac{\left(x_{i,q}+1+\frac{x_{i,q}}{Q_q}\right)}{\left(\frac{Q_q}{x_{i,q}}\right)}}\right]$$

STAU k[PWE], Lichtsignalanlage,
Privilegierung des öffentlichen Verkehrs,
stochastischer Zufluss,
stochastischer Abfluss, C=1.0



— 0.1
····· 0.2
-- 0.3
-·- 0.4
— 0.5
····· 0.6
-- 0.7
-·- 0.8

λ

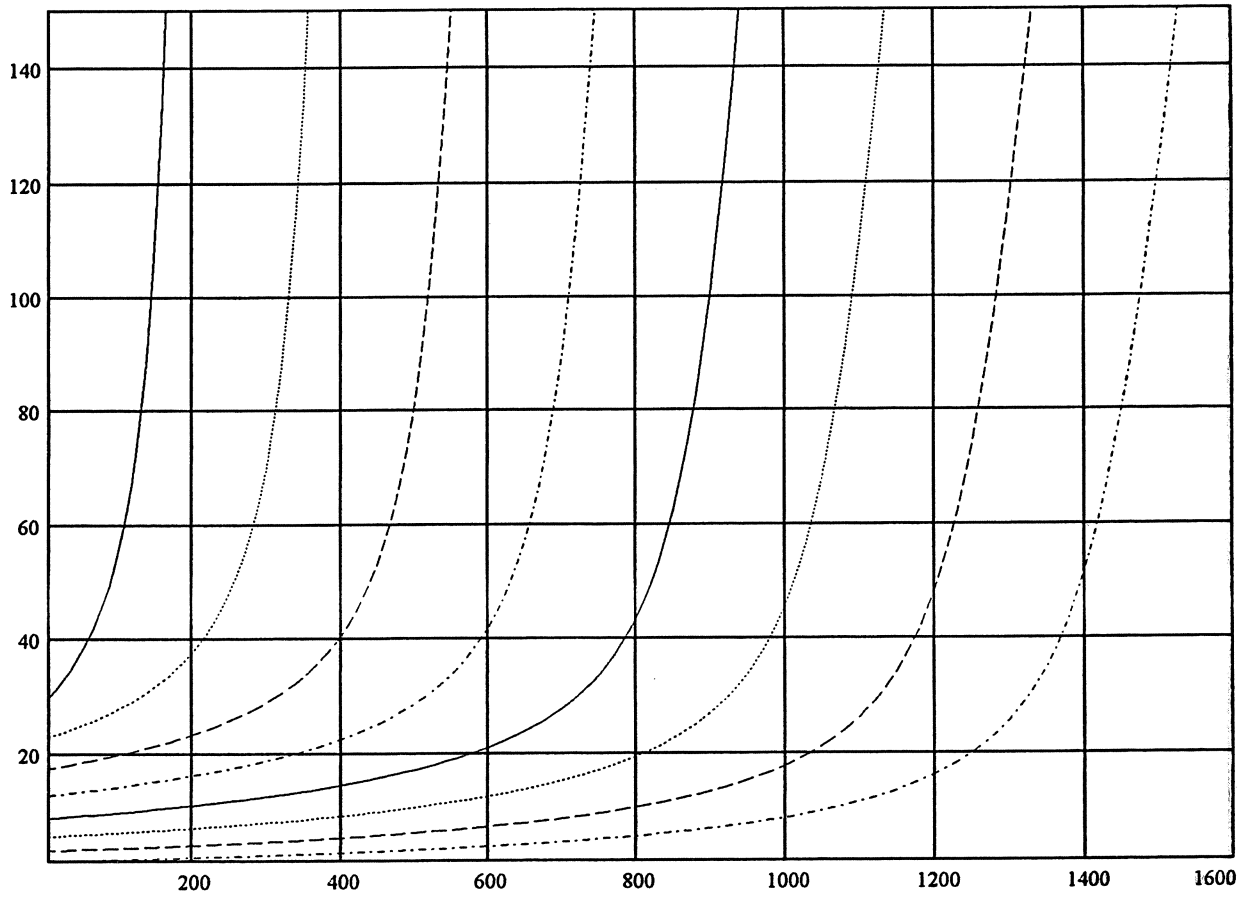
SPURBELASTUNG Q[PWE/h]

Aus dem Diagramm lässt sich die mittlere Wartezeit des Individualverkehrs bei einer Privilegierung des öffentlichen Verkehrs ablesen, abhängig vom mittleren Grünzeitanteil und der Spurbelastung.

$$q := 1..160 \qquad Q_q := 10 \cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

$$w_{q,i} := \frac{Z \cdot (1-\lambda_i)^2}{2 \cdot (1-y_q)} + 900 \cdot \left[(x_{i,q}-1) - \frac{x_{i,q}}{Q_q} \cdot 2 + \sqrt{(x_{i,q}-1)^2 + 4 \cdot \frac{\left(x_{i,q} + 1 + \frac{x_{i,q}}{Q_q}\right)}{\left(\frac{Q_q}{x_{i,q}}\right)}} \right]$$

MITTLERE WARTEZEIT w[sek],
Lichtsignalanlage,
Privilegierung des öffentlichen Verkehrs
stochastischer Zufluss,
stochastischer Abfluss, C=1



— 0.1
····· 0.2
-- 0.3
-·- 0.4
— 0.5
····· 0.6
-- 0.7
-·- 0.8

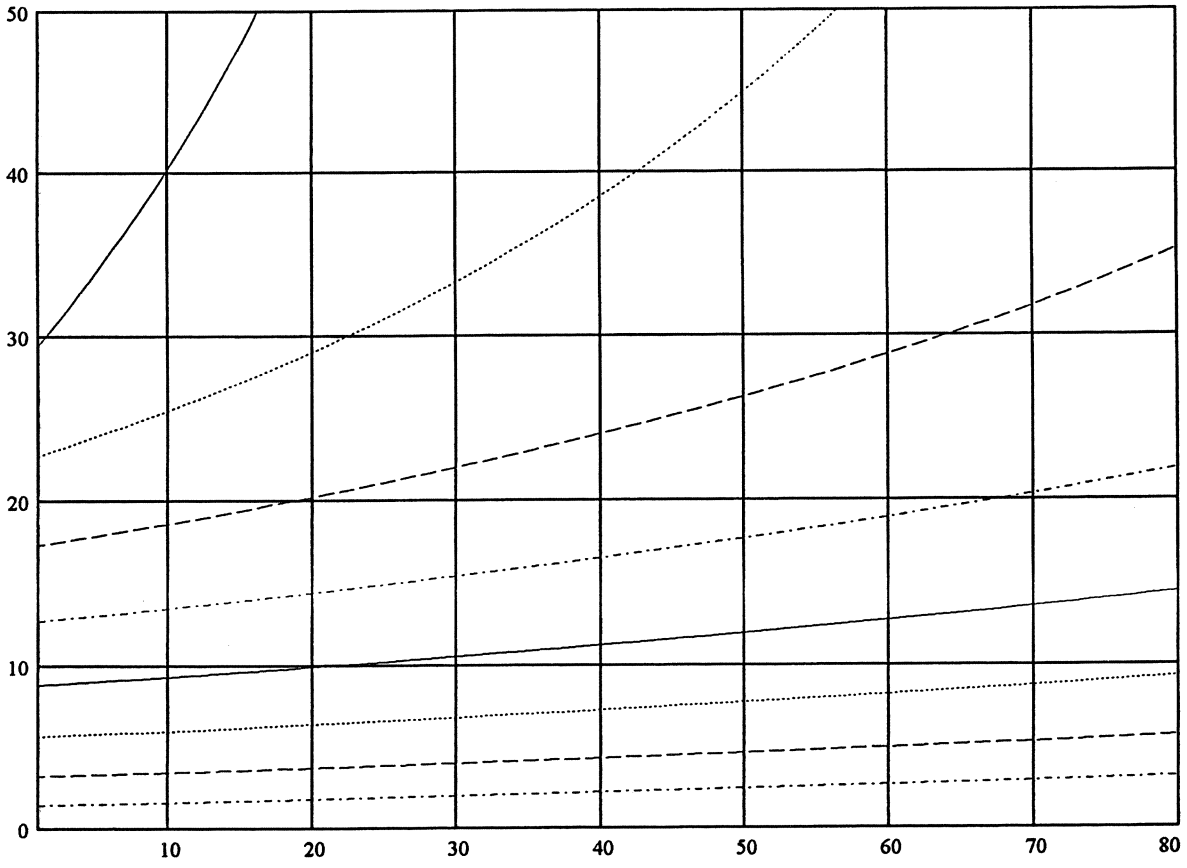
λ SPURBELASTUNG Q[PWE/h]

Aus dem Diagramm lässt sich die mittlere Wartezeit der Tram bei einer Teilprivilegierung des öffentlichen Verkehrs ablesen, abhängig vom Grünzeitanteil und der Tramfrequenz.

$$q := 1..80 \qquad T_q := q \qquad S := 600 \qquad y_q := \frac{T_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

$$w_{q,i} := \frac{Z\cdot\left(1-\lambda_i\right)^2}{2\cdot\left(1-y_q\right)} + 900\cdot\left[\left(x_{i,q}-1\right) - \frac{x_{i,q}}{T_q}\cdot 2 + \sqrt{\left(x_{i,q}-1\right)^2 + 4\cdot\frac{\left(x_{i,q}+1+\frac{x_{i,q}}{T_q}\right)}{\left(\frac{T_q}{x_{i,q}}\right)}}\right]$$

MITTLERE WARTEZEIT w[sek],
Lichtsignalanlage,
Privilegierung des öffentlichen Verkehrs
stochastischer Zufluss,
stochastischer Abfluss, C=1



— 0.1
····· 0.2
-- 0.3
-·- 0.4
— 0.5
····· 0.6
-- 0.7
-·- 0.8

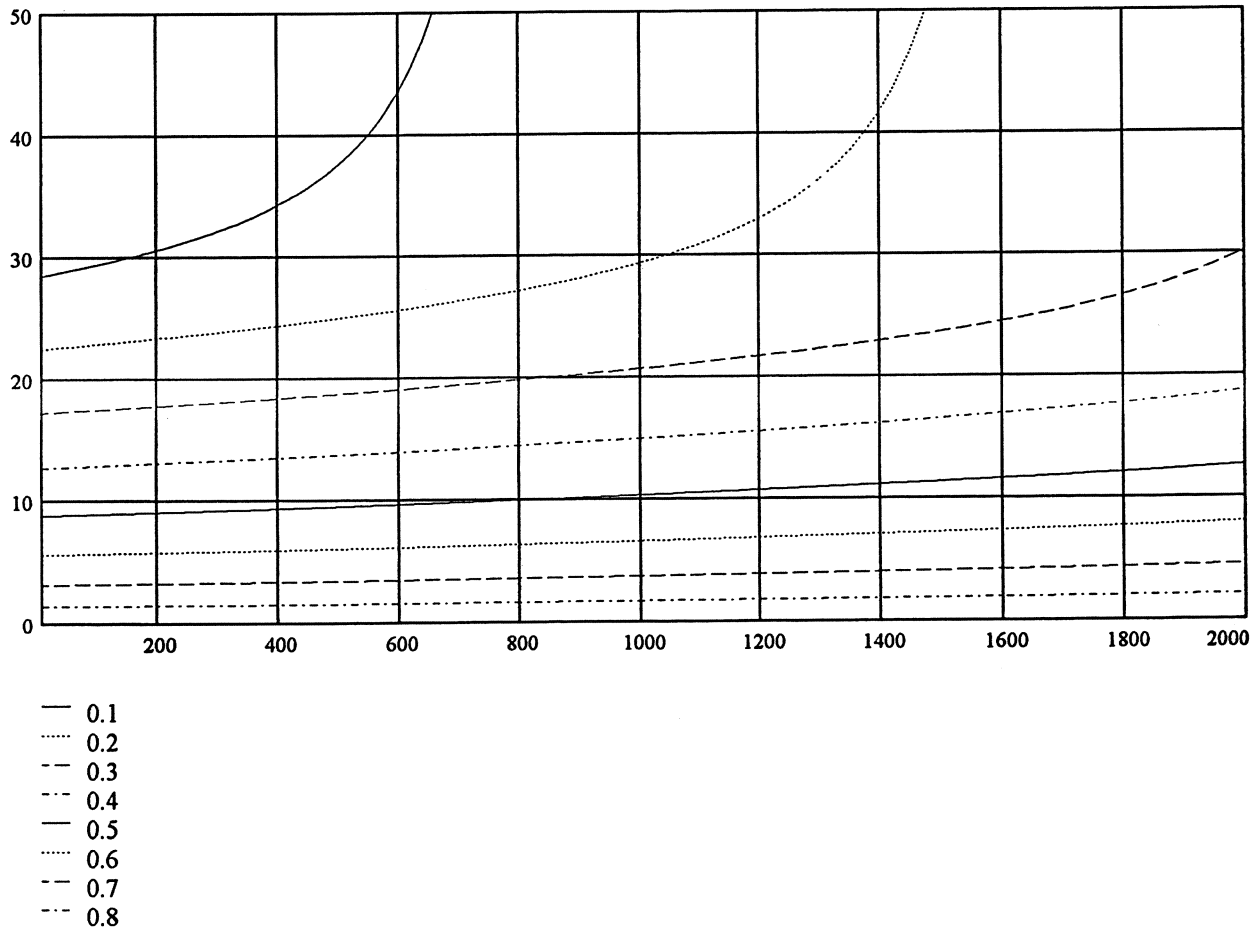
λ **Kursfahrzeuge/h, Richtung**

Aus dem Diagramm lässt sich die mittlere Wartezeit der Fussgänger bei Privilegierung des öffentlichen Verkehrs ablesen, abhängig vom mittleren Grünzeitanteil und den Fussgängerfrequenzen.

$$q := 1..200 \qquad P_q := 10 \cdot q \qquad S := 8000 \qquad y_q := \frac{P_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$$

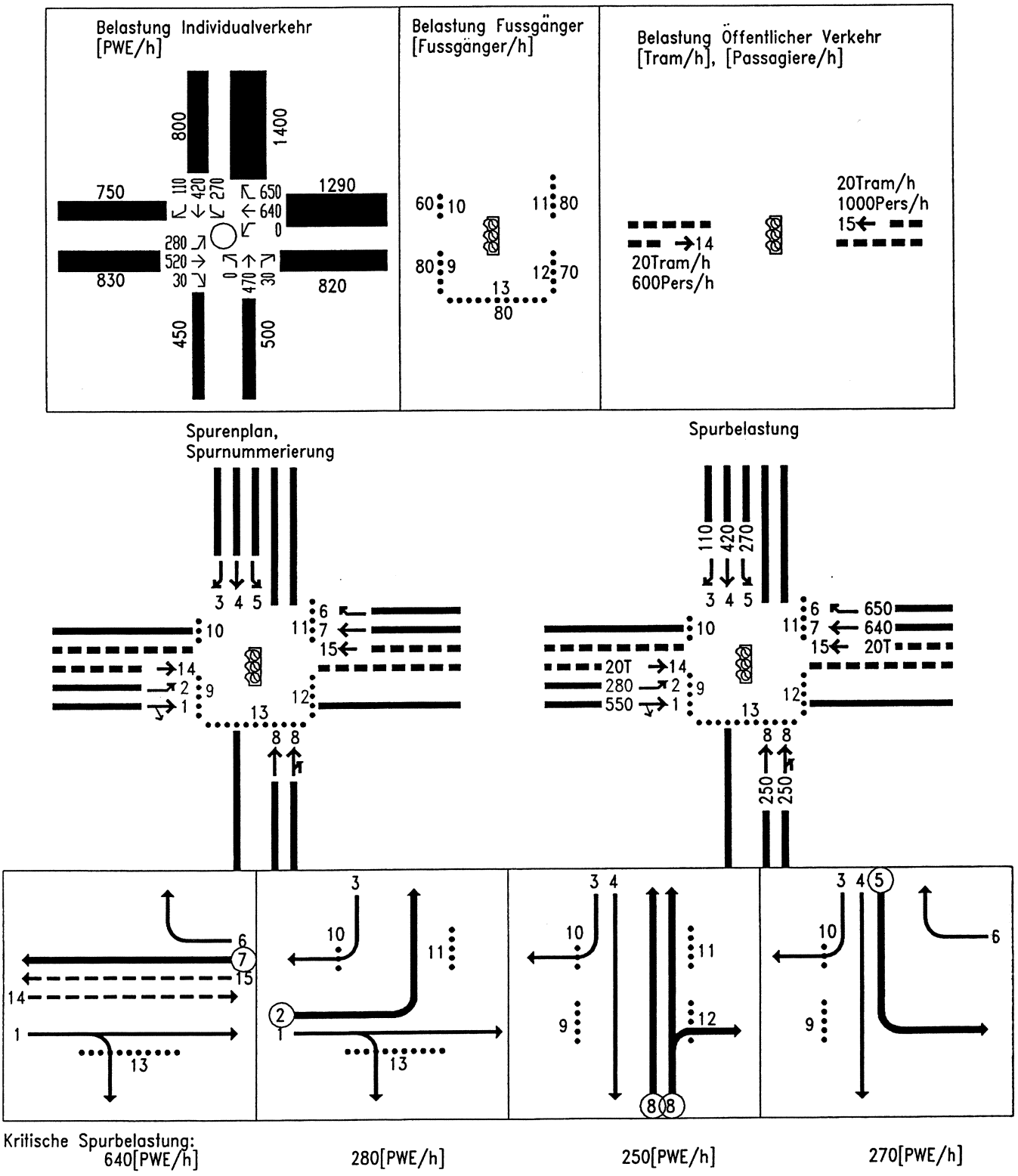
$$w_{q,i} := \frac{Z \cdot \left(1 - \lambda_i\right)^2}{2 \cdot \left(1 - y_q\right)} + 900 \cdot \left[\left(x_{i,q} - 1\right) - \frac{x_{i,q}}{P_q} \cdot 2 + \sqrt{\left(x_{i,q} - 1\right)^2 + 4 \cdot \frac{\left(x_{i,q} + 1 + \frac{x_{i,q}}{P_q}\right)}{\left(\frac{P_q}{x_{i,q}}\right)}} \right]$$

MITTLERE WARTEZEIT w[sek],
Lichtsignalanlage,
Privilegierung des öffentlichen Verkehrs
stochastischer Zufluss,
stochastischer Abfluss, C=1



9.5 Beispiel

Das Bild ermittelt für eine Kreuzung mit Individual-, öffentlichem Verkehr und Fussgängern die kritischen und unkritischen Spurbelastungen. Für dieses Beispiel errechnet die folgende Seite 42 die Basis- und die mittleren Grünzeitanteile.



Für eine volle Privilegierung des öffentlichen Verkehrs im Beispiel auf Seite 41 ermitteln die Tabellen die Korrekturfaktoren (gem.Seite 34), die Grünzeitanteile des Basissignalplan und die resultierenden mittleren Grünzeitanteile (gem.Seite 35).

f_N Reduktionsfaktor des zum öffentlichen Verkehr feindlichen Grünzeitanteils

f_P Erhöhungsfaktor des zum öffentlichen Verkehr freundlichen Grünzeitanteils

$$\lambda_{Basis} = \left(\frac{\lambda}{f}\right) \cdot \frac{\sum \lambda}{\sum \left(\frac{\lambda}{f}\right)}$$ Grünzeitanteil Basissignalplan

$\lambda_{Mittel} = f \cdot \lambda_{Basis}$ mittlerer Grünzeitanteil mit Privilegierung

$L = \lambda_{Mittel} \cdot S[PWE / h]$ Leistung

Kritische Spurbelastungen

Spur	Q [PWE/h]	λ	Privilegierung	f	λ/f	λ_{Basis}	λ_{Mittel}	L [PWE/H]	x
7	640	0.370	40Tram/h P	1.20	0.309	0.297	0.356	640	1.00
2	280	0.162	N	0.83	0.195	0.187	0.155	280	1.00
8	250	0.145	N	0.83	0.175	0.168	0.139	250	1.00
5	270	0.156	N	0.83	0.188	0.181	0.150	270	1.00
Σ	1440	0.833			0.867	0.833	0.800	1440	

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Q	λ_{Mittel}	L [PWE/H]	x
1	550PWE/h	0.356+0.155=0.511	920	0.60
3	110PWE/h	0.155+0.139+0.150=0.444	800	0.14
4	420PWE/h	0.139+0.150=0.289	520	0.81
6	650PWE/h	0.356+0.150=0.506	911	0.71
9	80Fg/h	0.139+0.150=0.289		
10	60Fg/h	0.155+0.139+0.150=0.444		
11	80Fg/h	0.155+0.139=0.294		
12	70Fg/h	0.139		
13	80Fg/h	0.356+0.155=0.511		
14	20Tram/h	volle Privilegierung=1.00		
15	20Tram/h	volle Privilegierung=1.00		

Aufgrund der Spurbelastungen und der mittleren Grünzeitanteile ermitteln die unten stehenden Tabellen Stau und mittlere Wartezeiten aus den Diagrammen auf den Seiten 37 bis 40 bei einer vollen Privilegierung des öffentlichen Verkehrs im Beispiel auf Seite 41.

Stau und Wartezeiten mit Privilegierung des öffentlichen Verkehrs

$k[PWE]$ Stau

$w[sek]$ mittlere Wartezeit

Kritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeitanteil λ_{Mittel}	Stau k[PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]
7	640PWE/h	0.356	30	120
2	280PWE/h	0.155	17	175
8	250PWE/h	0.139	16	184
8	250PWE/h	0.139	16	184
5	270PWE/h	01.50	16	178
Σ		0.800	95	

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeitanteil λ_{Mittel}	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]
1	550PWE/h	0.511	9	18
3	110PWE/h	0.444	1	12
4	420PWE/h	0.289	11	50
6	650PWE/h	0.506	12	23
9	80Fg/h	0.289		18
10	60Fg/h	0.444		11
11	80Fg/h	0.294		18
12	70Fg/h	0.139		26
13	80Fg/h	0.511		9
14	20Tram/h	1.000		0
15	20Tram/h	1.000		0
Σ			33	
ΣΣ			128	

10. KOORDINATION DES INDIVIDUALVERKEHRS

10.1 Prinzip

Der Zufluss zu unkoordinierten Lichtsignalanlagen ist stochastisch. Die Koordination bündelt den Individualverkehr, und sie kann so Stau und mittlere Wartezeiten in Zufahrten zu Lichtsignalanlagen reduzieren.

10.2 Stau und mittlere Wartezeit des Individualverkehrs

Die Formeln für Stau und mittlere Wartezeit für koordinierte Zufahrten bestehen je aus einem deterministischen und einem stochastischen Teil, analog zu unkoordinierten Zufahrten. Bei koordinierten Zufahrten sind aber die deterministischen Teile der Formeln mit zwei Faktoren zu korrigieren. Die untenstehende Tabelle bringt die entsprechenden Formeln für koordinierte Zufahrten 12) 25).

Diese Formeln sind nicht anzuwenden, wenn an koordinierten Lichtsignalanlagen der öffentliche Verkehr privilegiert wird.

Stau und mittlere Wartezeit, koordinierte Lichtsignalanlage
C= 0.5

$$k = k_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + k_0$$

$$k = \frac{Z \cdot Q \cdot (1-\lambda)}{3600 \cdot (1-y)} \cdot f_1 \cdot f_2 + \frac{Q}{4 \cdot x} \cdot \left[(x-1) - \frac{x}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{2 \cdot \left(x + 1 + \frac{x}{2 \cdot Q} \right)}{\left(\frac{Q}{x} \right)}} \right]$$

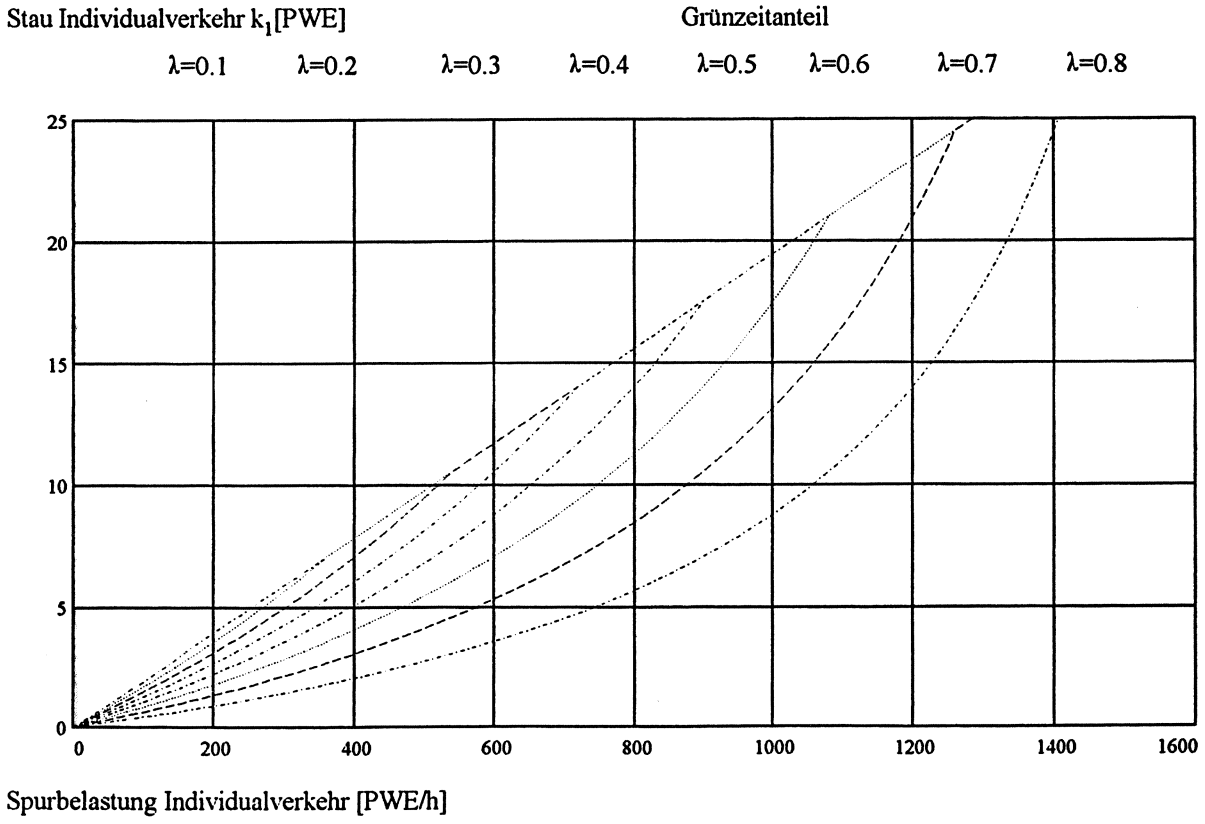
$$w = w_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + w_0$$

$$w = \frac{Z \cdot (1-\lambda)^2}{2 \cdot (1-y)} \cdot f_1 \cdot f_2 + 900 \cdot \left[(x-1) - \frac{x}{Q} + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{2 \cdot \left(x + 1 + \frac{x}{2 \cdot Q} \right)}{\left(\frac{Q}{x} \right)}} \right]$$

Aus dem Diagramm lässt sich der deterministische Teil der Stauformel ablesen, abhängig von Spurbelastung und Grünzeitanteil. Dieser deterministische Teil ist bei koordinierten Zufahrten mit zwei Faktoren zu korrigieren.

$i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad q := 0..160 \qquad Q_q := 10 \cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$

$$kl_{q,i} := \frac{Q_q \cdot Z \cdot (1 - \lambda_i)}{3600 \cdot (1 - y_q)}$$



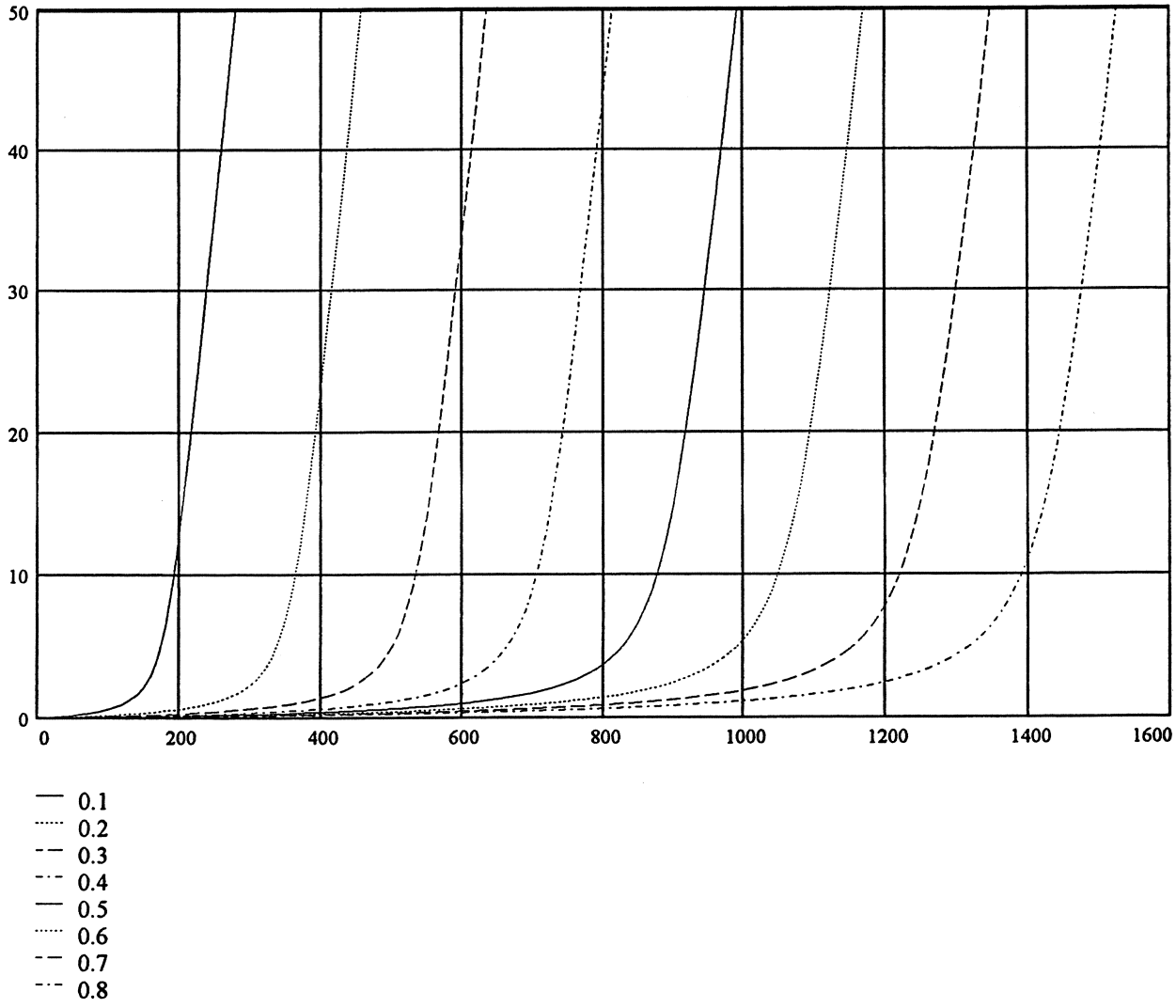
Aus dem Diagramm lässt sich der <u>stochastische Teil der Stauformel</u> ablesen, abhängig von Spurbelastung und Grünzeitanteil.

$i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad q := 0..160 \qquad Q_q := 10 \cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad Z := 70 \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i}$

$$k0_{q,i} := \frac{Q_q}{4 \cdot x_{i,q}} \cdot \left[\left(x_{i,q} - 1\right) - \frac{x_{i,q}}{Q_q} + \sqrt{\left(x_{i,q} - 1\right)^2 + 2 \cdot \frac{\left(x_{i,q} + 1 + \frac{x_{i,q}}{2 \cdot Q_q}\right)}{\left(\frac{Q_q}{x_{i,q}}\right)}} \right]$$

Stau k_0[PWE/h]

Lichtsignalanlage, C = 0.5



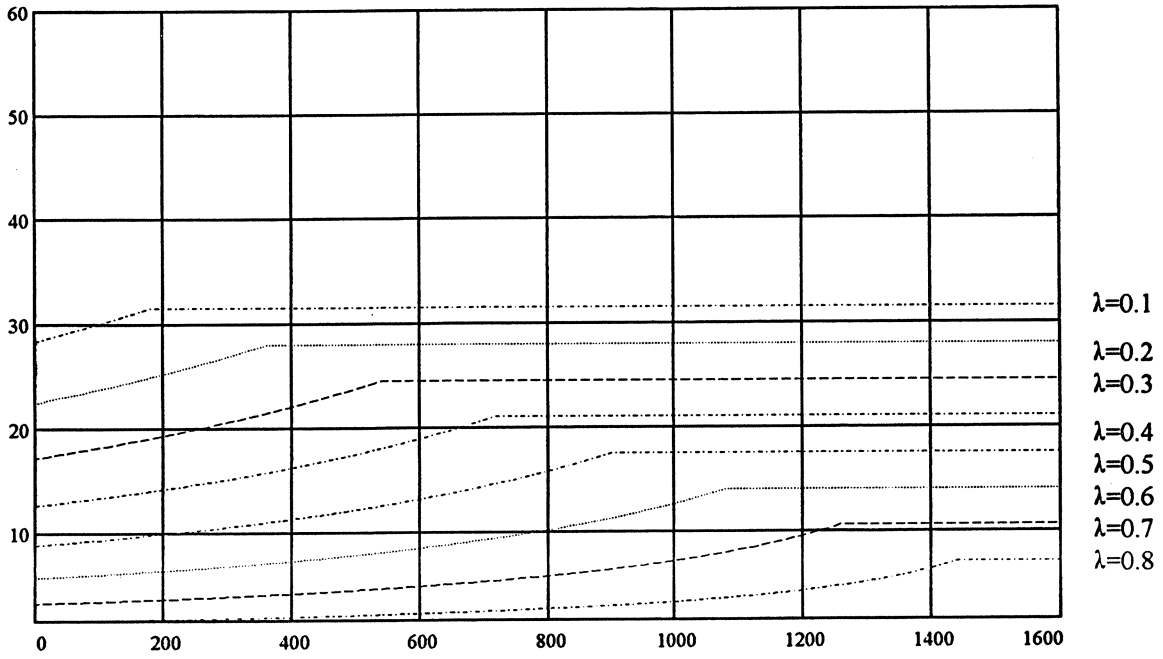
Aus dem Diagramm lässt sich der <u>deterministische Teil der Wartezeitformel</u> ablesen, abhängig von Spurbelastung und Grünzeitanteil. Dieser deterministische Teil ist bei koordinierten Zufahrten mit zwei Faktoren zu korrigieren.

$$q := 1..160 \qquad Q_q := 10 \cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i} \qquad Z := 70$$

$$w1_{q,i} := \frac{Z \cdot \left(1 - \lambda_i\right)^2}{2 \cdot \left(1 - y_q\right)}$$

Wartezeit Individualverkehr w_1[s]

Grünzeitanteil



Spurbelastung Individualverkehr [PWE/h]

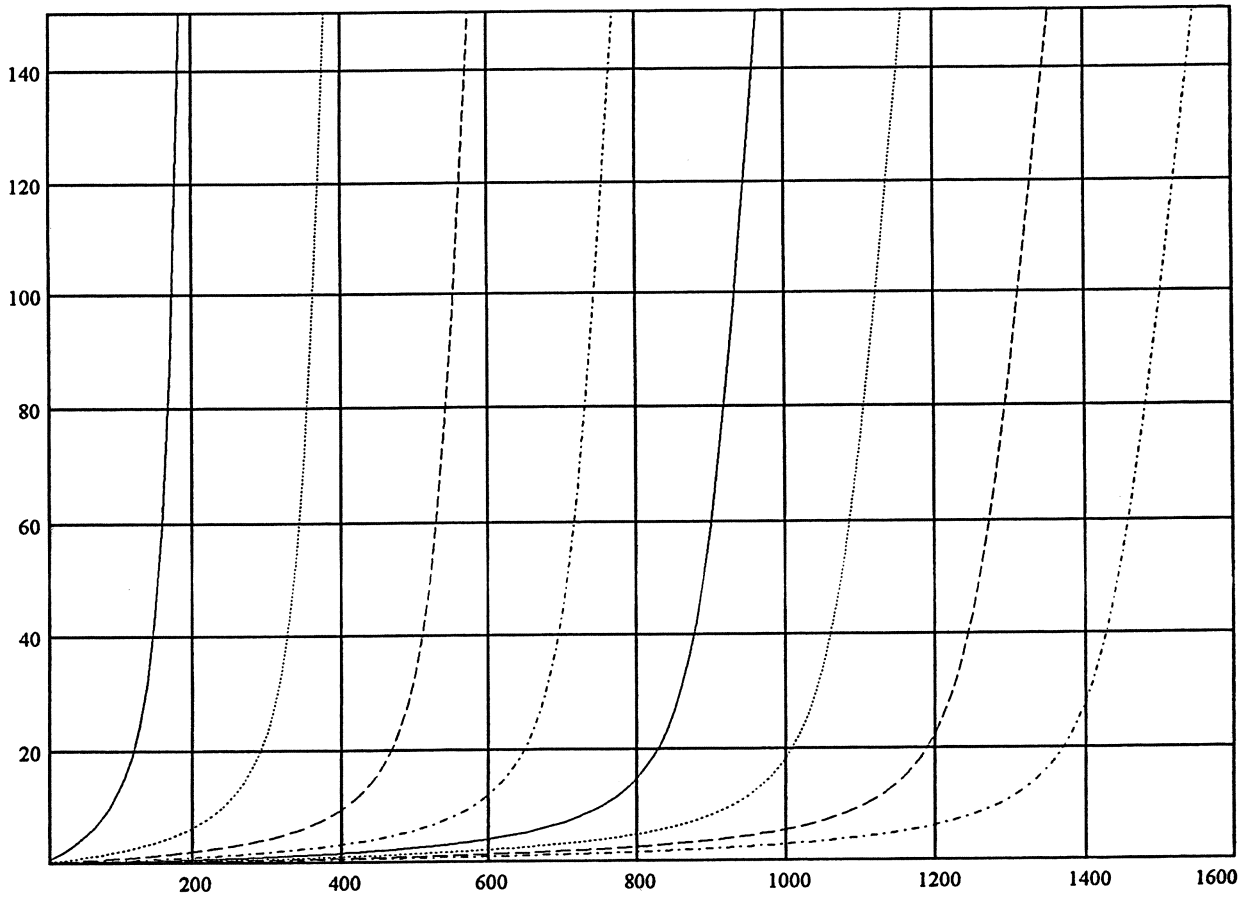
Aus dem Diagramm lässt sich der <u>stochastische Teil der Wartezeitformel</u> ablesen, abhängig von Spurbelastung und Grünzeitanteil.

$$q := 1..160 \qquad Q_q := 10 \cdot q \qquad S := 1800 \qquad y_q := \frac{Q_q}{S} \qquad i := 1,2..8 \qquad \lambda_i := \frac{i}{10} \qquad x_{i,q} := \frac{y_q}{\lambda_i} \qquad Z := 70$$

$$w0_{q,i} := 900 \cdot \left[\left(x_{i,q} - 1\right) - \frac{x_{i,q}}{Q_q} + \sqrt{\left(x_{i,q} - 1\right)^2 + 2 \cdot \frac{\left(x_{i,q} + 1 + \frac{x_{i,q}}{2 \cdot Q_q}\right)}{\left(\frac{Q_q}{x_{i,q}}\right)}} \right]$$

Mittlere Wartezeit w_0[sek]

Lichtsignalanlage, C = 0.5



— 0.1
····· 0.2
– – 0.3
-·- 0.4
— 0.5
····· 0.6
– – 0.7
-·- 0.8

λ

Spurbelastung Q[PWE/h]

10.3 Korrekturfaktoren

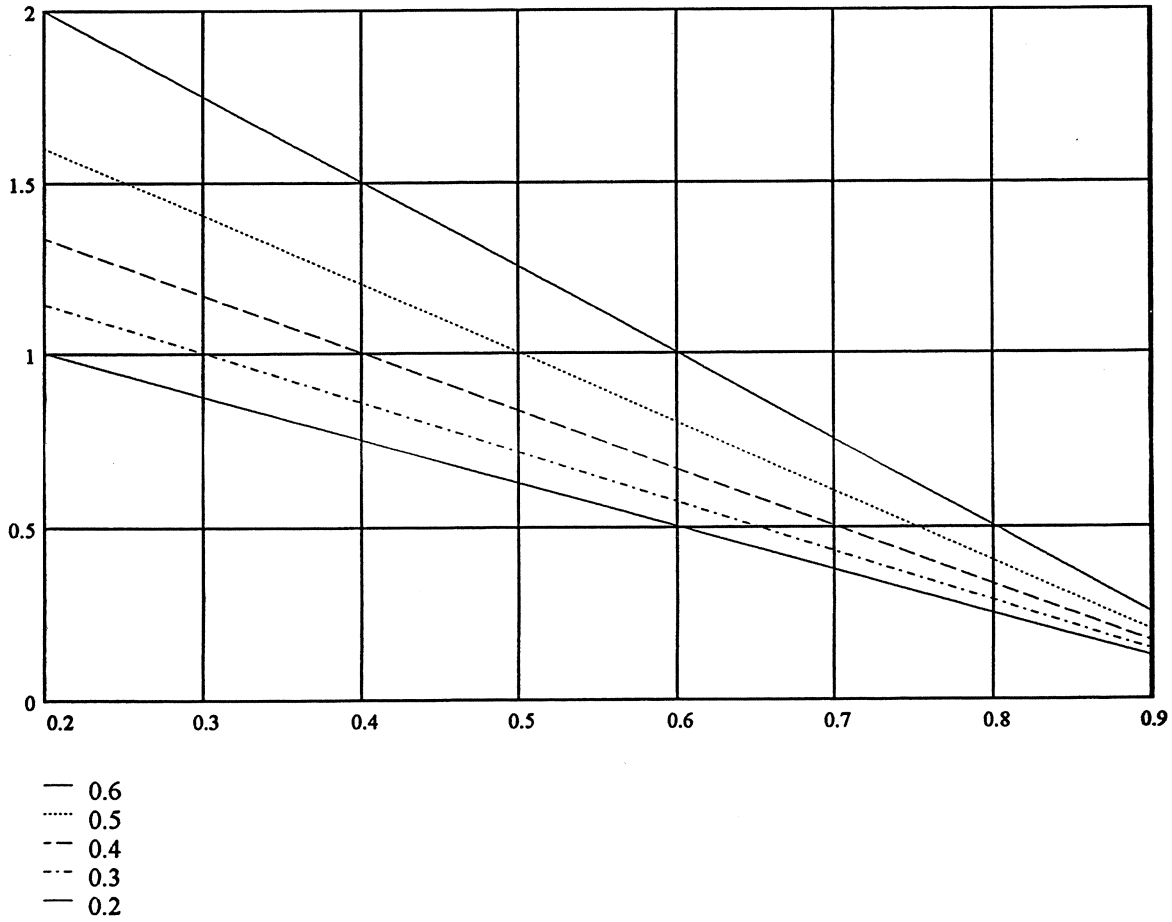
Der erste Korrekturfaktor für koordinierte Zufahrten hängt von zwei Parametern ab:

- vom Grünzeitanteil der koordinierten Zufahrtspur
- vom Anteil der Spurbelastung, der während der Grünzeit eintrifft

Aus dem Diagramm lässt sich der erste Korrekturfaktor ablesen, abhängig von diesen zwei Parametern.

$i := 2,3..9 \qquad P_i := \frac{i}{10} \qquad j := 2,3..6 \qquad \lambda_j := \frac{j}{10} \qquad f_{i,j} := \frac{1 - P_i}{1 - \lambda_j}$

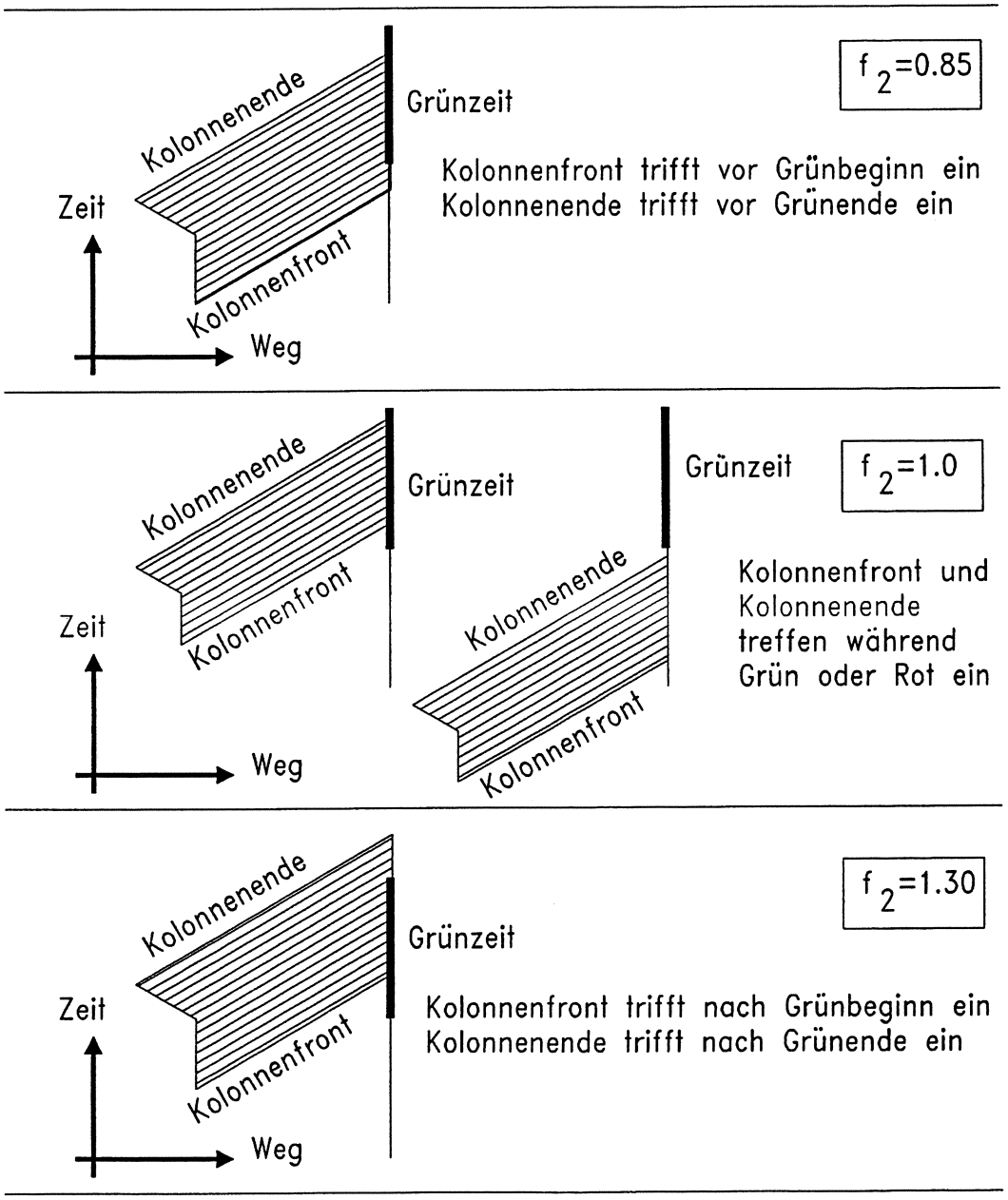
Faktor f_1



Grünzeitanteil λ

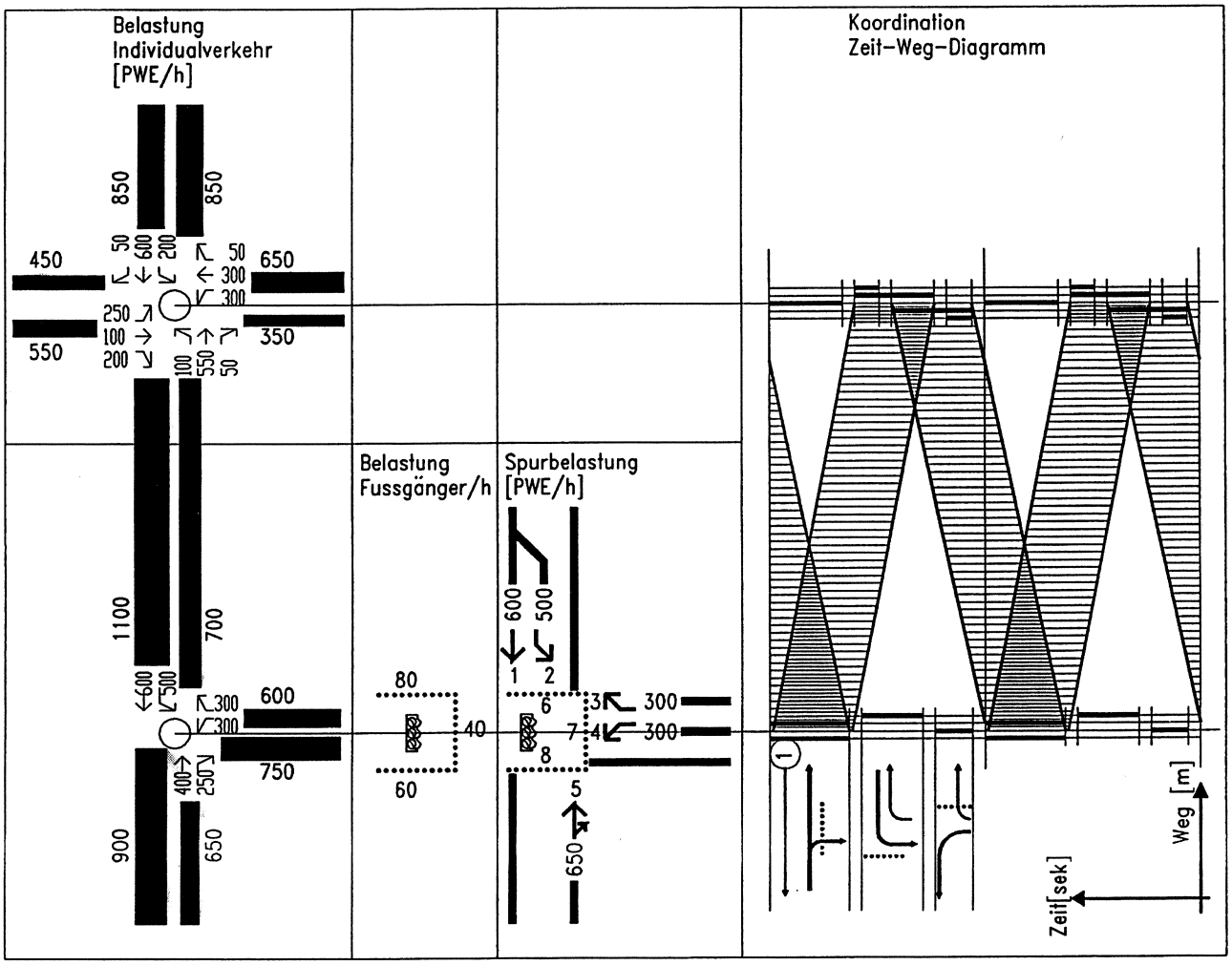
P = Anteil der Spurbelastung Q,
der während der Grünzeit eintrifft

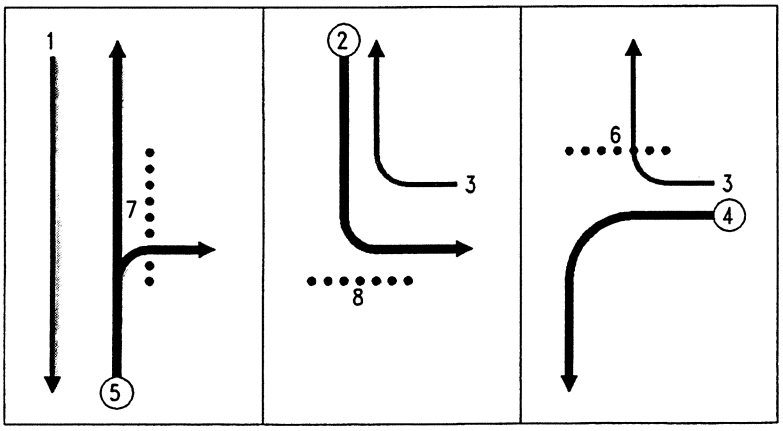
Der zweite Korrekturfaktor für koordinierte Zufahrten berücksichtigt das Eintreffen der koordinierten Kolonne, bezogen auf die Grünzeit in der koordinierten Zufahrt. Der zweite Korrekturfaktor lässt sich anhand eines Zeit-Weg-Diagramms der Koordination und aus dem untenstehenden Bild ablesen.



10.4 Beispiel

Das Bild zeigt eine Einmündung, die mit einer benachbarten Kreuzung koordiniert ist. Die Koordination ist in einem Zeit-Weg-Diagramm dokumentiert. Der untere Bildteil ermittelt die kritischen Spurbelastungen in der Einmündung, und für die koordinierte Zufahrt die Korrekturfaktoren zum deterministischen Teil der Stau- und Wartezeitformel.





Kritische Spurbelastung:

650 [PWE/h] 500 [PWE/h] 300 [PWE/h]

Koordinierte Spur 1:

P=0.55 Anteil der Spurbelastung, der während der Grünzeit eintrifft

$f_1 = 0.73$

$f_2 = 0.85$ Kolonnenfront trifft vor Grünbeginn ein, Kolonnenende trifft vor Grünende ein

Die beiden oberen Tabellen ermitteln für das Beispiel auf Seite 51 Stau und mittlere Wartezeiten für die unkoordinierten Spuren. Die unterste Tabelle errechnet Stau und mittlere Wartezeit für die koordinierte Zufahrt gemäss den Diagrammen auf den Seiten 45 bis 50.

Koordinierte Lichtsignalanlage

P	Anteil der Spurbelastung Q, der während der Grünzeit eintrifft	
$f_1 = \frac{1-P}{1-\lambda}$	Faktor f_1	
$f_2 = 0.85$	Faktor f_2,	Kolonnenfront trifft vor Grünbeginn ein, Kolonnenende trifft vor Grünende ein
$f_2 = 1.00$	Faktor f_2,	Kolonnenfront und Kolonnenende treffen während Grün oder Rot ein
$f_2 = 1.30$	Faktor f_2,	Kolonnenfront trifft nach Grünbeginn ein, Kolonnenende trifft nach Grünende ein
$k = k_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + k_0$	Stau[PWE]	
$w = w_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + w_0$	mittlere Wartezeit[sek]	

Kritische Spurbelastungen, unkoordiniert

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeitanteil λ	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]
5	650[PWE/h]	0.374	20	65
2	500[PWE/h]	0.287	17	78
4	300[PWE/h]	0.172	12	103
Σ	1450[PWE/h]	0.833		

Unkritische Spurbelastungen, unkoordiniert

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeitanteil λ	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]
1	600[PWE/h]	0.374	15	40
3	300[PWE/h]	0.459	4	14
6		0.172		
7		0.374		
8		0.287		

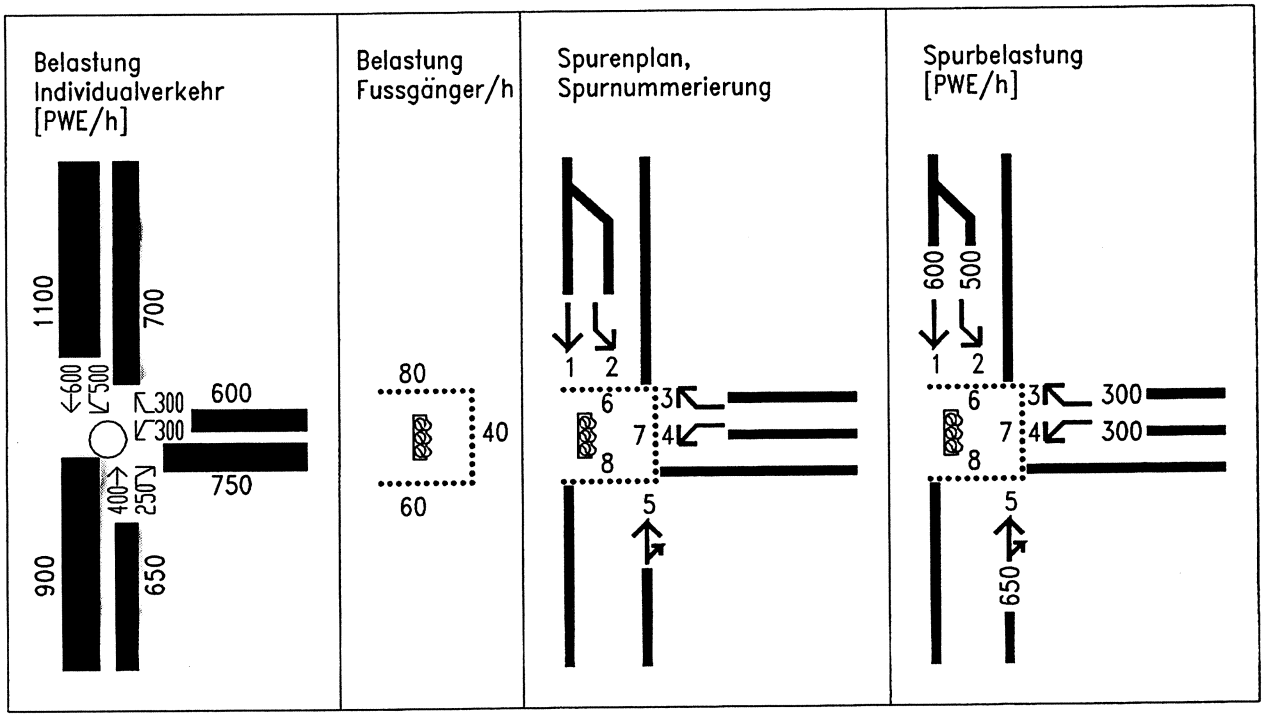
Unkritische Spurbelastungen, koordiniert

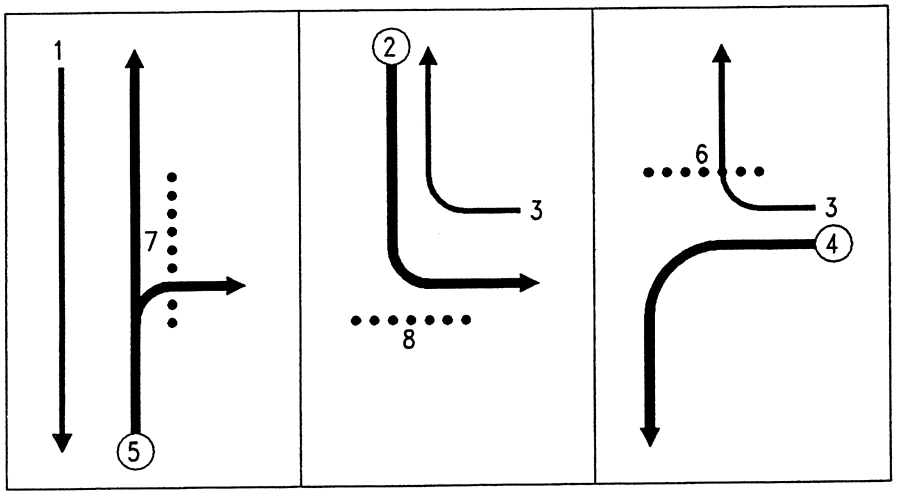
Spur	Q	λ	P	f_1	f_2	Stau k [PWE] $k = k_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + k_0$	mittlere Wartezeit w[sek] $w = w_1 \cdot f_1 \cdot f_2 + w_0$
1	600	0.374	0.55	0.73	0.85	11·0.73·0.85+4 =11	20·0.73·0.85+20=32

11. LENKUNG DES INDIVIDUALVERKEHRS

11.1 Beispiel

Der obere Teil des Bildes zeigt für eine lichtsignalgesteuerte Einmündung die Verkehrsfrequenzen, den Spurenplan mit Spurnummerierung und die Spurbelastungen. Der untere Teil des Bildes ermittelt die kritischen (stark eingetragen) und die unkritischen Spurbelastungen. An dem Beispiel soll die Lenkung des Individualverkehrs aufgezeigt werden.





Kritische Spurbelastung: 650 [PWE/h] 500 [PWE/h] 300 [PWE/h]

11.2 Keine Lenkung des Individualverkehrs

Ohne Lenkung des Individualverkehrs wird der Grünzeitanteil proportional zu den kritischen Spurbelastungen ermittelt.

Die Tabellen errechnen dazu Grünzeitanteil, Spurleistung, Auslastungsgrad, Stau und mittlere Wartezeit der kritischen und unkritischen Spurbelastungen für das Beispiel auf Seite 53.

Keine Lenkung des Individualverkehrs
Grünzeitanteil proportional zu den kritischen Spurbelastungen

$Q\left[\frac{PWE}{h}\right]$ kritische Spurbelastung

$\sum_{max} Q = 1500 PWE / h$ Maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

$S = 1800 PWE / h$ Spursättigung Individualverkehr

$S = 8000 Fg / h$ Spursättigung Fussgänger

$\lambda = \frac{\sum_{max} Q}{S} \cdot \frac{Q}{\sum Q}$ Grünzeitanteil der kritischen Spurbelastungen

$L = \lambda \cdot S$ Spurleistung $x = \frac{Q}{L}$ Auslastungsgrad

$k[PWE]$ Stau $w[sek]$ mittlere Wartezeit

Kritische Spurbelastungen

Spur	Q[PWE/h]	λ	$L = \lambda \cdot S$ [PWE/H]	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
5	650	0.374	673	0.97	20	65
2	500	0.287	517	0.97	17	78
4	300	0.172	310	0.97	12	103
Σ	1450	0.833	1500			

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Q	λ	$L = \lambda \cdot S$	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
1	600PWE/h	0.374	673PWE/h	0.89	15	40
3	300PWE/h	0.459	827PWE/h	0.36	4	14
6	80Fg/h	0.172	1376Fg/h	0.06		24
7	40Fg/h	0.374	2992Fg/h	0.01		14
8	60Fg/h	0.287	2296Fg/h	0.03		18

11.3 Wahl einer Spurleistung

Um z.B. anschliessende Strassenabschnitte vor Überlastung zu schützen, wird die Spurleistung in der Spur 5 reduziert. Daraus folgen aus den angegebenen Formeln der Grünzeitanteil der Spur 5, und jener der übrigen kritischen Spurbelastungen.
Die Tabellen errechnen dazu Grünzeitanteil, Spurleistung, Auslastungsgrad, Stau und mittlere Wartezeit der kritischen und unkritischen Spurbelastungen für das Beispiel auf Seite 53.

Lenkung des Individualverkehrs

Wahl der Spurleistung in Spur 5: $L_5 = 600[PWE\ /\ h]$,

Grünzeitanteil Spur 5: $\lambda_5 = \frac{L_5}{S} = 0.333$

$Q\left[\frac{PWE}{h}\right]$ kritische Spurbelastung

$\sum_{max} Q = 1500 PWE / h$ Maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

$S = 1800 PWE / h$ Spursättigung Individualverkehr

$S = 8000 Fg\ /\ h$ Spursättigung Fussgänger

$$\lambda = \left(\frac{\sum_{max} Q}{S} - \lambda_5\right) \cdot \left[\frac{Q}{\left(\sum Q\right) - Q_5}\right]$$ Grünzeitanteil der übrigen kritischen Spurbelastungen

$L = \lambda \cdot S$ Spurleistung $x = \frac{Q}{L}$ Auslastungsgrad

$k[PWE]$ Stau $w[sek]$ mittlere Wartezeit

Kritische Spurbelastungen

Spur	Q[PWE/h]	λ	$L = \lambda \cdot S$ [PWE/H]	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
5	650	0.333	600	1.08	43	204
2	500	0.313	563	0.89	13	45
4	300	0.187	337	0.89	9	64
Σ	1450	0.833	1500			

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Q	λ	$L = \lambda \cdot S$	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
1	600PWE/h	0.333	600PWE/h	1.00	24	95
3	300PWE/h	0.500	900PWE/h	0.33	4	11
6	80Fg/h	0.187	1496Fg/h	0.05		23
7	40Fg/h	0.333	2667Fg/h	0.01		16
8	60Fg/h	0.313	2504Fg/h	0.02		17

11.4 Wahl einer mittleren Wartezeit

Um z.B. anschliessende Strassenabschnitte vor Überlastung zu schützen, wird die mittlere Wartezeit in der Spur 5 festgelegt. Daraus folgen gemäss dem Diagramm auf Seite 26 der Grünzeitanteil der Spur 5, und aus den untenstehenden Formeln die Grünzeitanteile der übrigen kritischen Spurbelastungen.
Die Tabellen errechnen dazu Grünzeitanteil, Spurleistung, Auslastungsgrad, Stau und mittlere Wartezeit für die kritischen und unkritischen Spurbelastungen im Beispiel auf Seite 53.

Lenkung des Individualverkehrs

Wahl der mittleren Wartezeit in Spur 5: $w_5 = 300[sek]$,

Grünzeitanteil Spur 5: $\lambda_5 = 0.3165$

$Q\left[\frac{PWE}{h}\right]$ kritische Spurbelastung

$\sum_{max} Q = 1500 PWE / h$ Maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

$S = 1800 PWE / h$ Spursättigung Individualverkehr

$S = 8000 Fg / h$ Spursättigung Fussgänger

$$\lambda = \left(\frac{\sum_{max} Q}{S} - \lambda_5\right) \cdot \left[\frac{Q}{(\sum Q) - Q_5}\right]$$ Grünzeitanteil der übrigen kritischen Spurbelastungen

$L = \lambda \cdot S$ Spurleistung $x = \frac{Q}{L}$ Auslastungsgrad

$k[PWE]$ Stau $w[sek]$ mittlere Wartezeit

Kritische Spurbelastungen

Spur	Q[PWE/h]	λ	$L = \lambda \cdot S$ [PWE/H]	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
5	650	0.316	570	1.14	57	300
2	500	0.323	581	0.86	12	40
4	300	0.194	349	0.86	9	55
Σ	1450	0.833	1500			

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Q	λ	$L = \lambda \cdot S$	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
1	600PWE/h	0.316	570PWE/h	1.05	33	160
3	300PWE/h	0.517	931PWE/h	0.32	4	11
6	80Fg/h	0.194	1552Fg/h	0.05		23
7	40Fg/h	0.316	2532Fg/h	0.02		16
8	60Fg/h	0.323	2584Fg/h	0.02		16

11.4 Wahl des Staus

Um z.B. den Stauraum des Querverkehrs nicht zu überlasten, wird der Stau in der Spur 4 festgelegt. Daraus folgt gemäss dem Diagramm auf Seite 25 der Grünzeitanteil der Spur 4, und aus der untenstehenden Formel der Grünzeitanteil der übrigen kritischen Spurbelastungen.
Die Tabellen errechnen dazu Grünzeitanteil, Spurleistung, Auslastungsgrad, Stau und mittlere Wartezeit für die kritischen und unkritischen Spurbelastungen im Beispiel auf Seite 53.

Lenkung des Individualverkehrs

Wahl des Staus in Spur 4: $k_4 = 8[PWE]$,

Grünzeitanteil Spur 4: $\lambda_4 = 0.197$

$Q\left[\frac{PWE}{h}\right]$ kritische Spurbelastung

$\sum_{max} Q = 1500 PWE / h$ Maximale Summe der kritischen Spurbelastungen

$S = 1800 PWE / h$ Spursättigung Individualverkehr

$S = 8000 Fg / h$ Spursättigung Fussgänger

$$\lambda = \left(\frac{\sum_{max} Q}{S} - \lambda_4\right) \cdot \left[\frac{Q}{\left(\sum Q\right) - Q_4}\right]$$ Grünzeitanteil der übrigen kritischen Spurbelastungen

$L = \lambda \cdot S$ Spurleistung $x = \frac{Q}{L}$ Auslastungsgrad

$k[PWE]$ Stau $w[sek]$ mittlere Wartezeit

Kritische Spurbelastungen

Spur	Q[PWE/h]	λ	$L = \lambda \cdot S$ [PWE/H]	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
5	650	0.360	648	1.00	26	95
2	500	0.277	499	1.00	21	106
4	300	0.197	355	0.84	8	52
Σ	1450	0.834	1502			

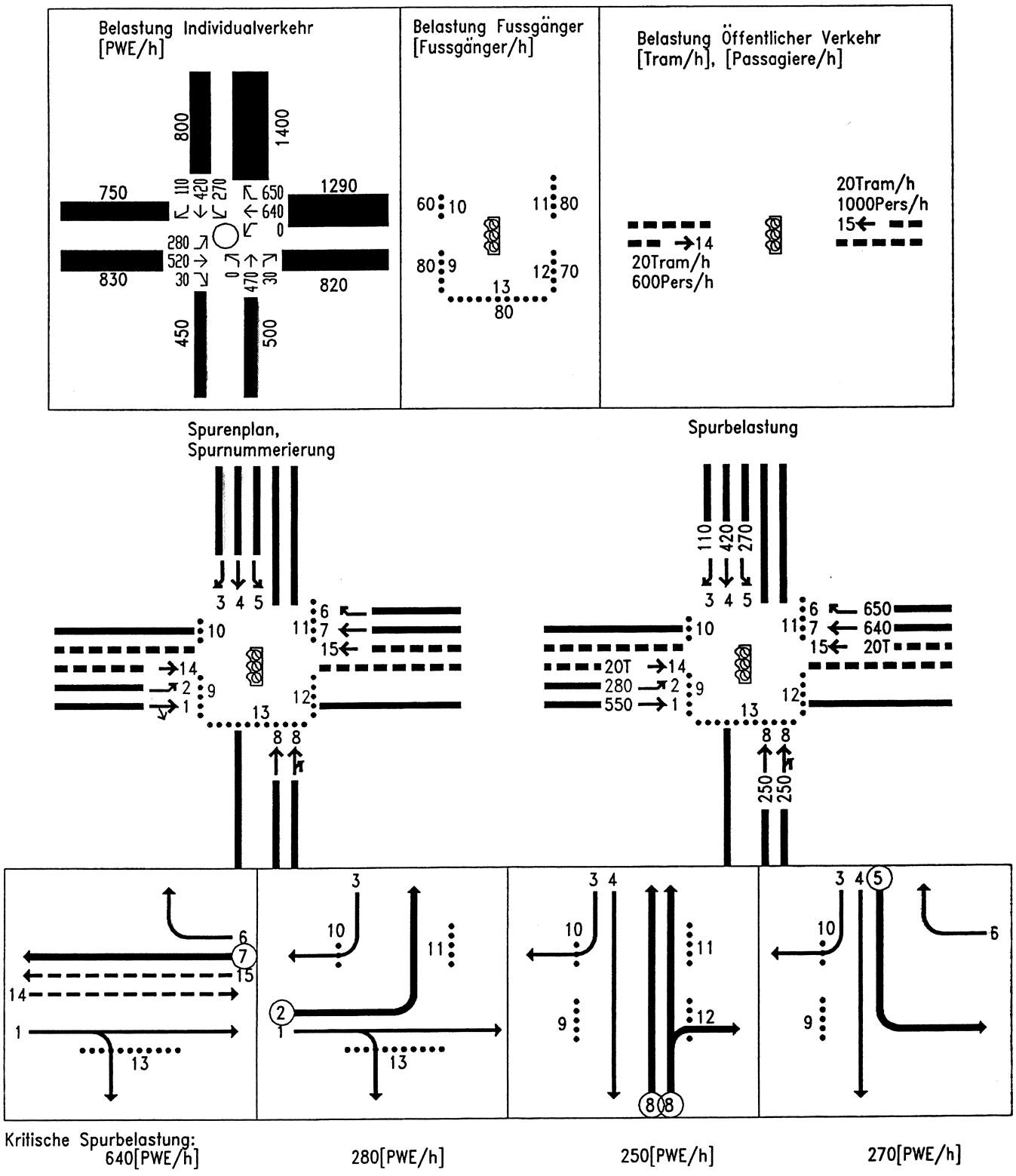
Unkritische Spurbelastungen

Spur	Q	λ	$L = \lambda \cdot S$	$x = \frac{Q}{L}$	$k[PWE]$	$w[sek]$
1	600PWE/h	0.360	648PWE/h	0.93	16	50
3	300PWE/h	0.474	853PWE/h	0.36	4	13
6	80Fg/h	0.197	1576Fg/h	0.05		23
7	40Fg/h	0.360	2880Fg/h	0.01		14
8	60Fg/h	0.277	2216Fg/h	0.03		18

12. WARTEZEITKOSTEN

12.1 Beispiel

Das Bild zeigt für eine lichtsignalgesteuerte Einmündung mit Individual-, öffentlichem Verkehr und Fussgängern die Verkehrsfrequenzen, den Spurenplan, die Spurbelastungen und die kritischen Spurbelastungen.
An dem Beispiel soll die Ermittlung der Wartezeitkosten ohne und mit Privilegierung des öffentlichen Verkehrs aufgezeigt werden.



12.2 Wartezeitkosten ohne Privilegierung des öffentlichen Verkehrs

Die Personenwartezeit folgt aus der mittleren Wartezeit, der Spurbelastung und der Fahrzeugbesetzung. Das Produkt aus Personenwartezeit und Zeitkostensatz 26) 27) sind die Wartezeitkosten. Die beiden Tabellen ermitteln die Wartezeitkosten für das Beispiel auf Seite 58 ohne Privilegierung des öffentlichen Verkehrs.

Wartezeitkosten ohne Privilegierung des öffentlichen Verkehrs

$w[sek]$ mittlere Wartezeit

Q Spurbelastung

$$W_P = w \cdot \frac{Q \cdot Pers/FZ}{3600}\left[\frac{Pers \cdot h}{h}\right]$$ Personenwartezeit

$$t_k = 12\left[\frac{Fr}{Pers \cdot h}\right]$$ Zeitkostensatz

$$K_w = W_P \cdot t_K\left[\frac{Fr}{h}\right]$$ Wartezeitkosten

Kritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeit-anteil λ	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]	Pers/ Fahrzeug	Personen-Wartezeit W_P[Pers·h/h]	Wartezeit-Kosten K_w[Fr/h]
7	640PWE/h	0.370	20	62	1.3	14.3	171.6
2	280PWE/h	0.162	11	100	1.3	10.1	121.2
8	250PWE/h	0.145	10	108	1.3	9.7	116.4
8	250PWE/h	0.145	10	108	1.3	9.7	116.4
5	270PWE/h	0.156	11	103	1.3	10.0	120.0
Σ		0.833	62			53.8	645.6

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeit-anteil λ	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]	Pers/ Fahrzeug	Personen-Wartezeit W_P[Pers·h/h]	Wartezeit-Kosten K_w[Fr/h]
1	550PWE/h	0.532	8	14	1.3	2.8	33.6
3	110PWE/h	0.463	1	11	1.3	0.4	4.8
4	420PWE/h	0.301	9	34	1.3	5.2	62.4
6	650PWE/h	0.526	10	16	1.3	3.8	45.6
9	80Fg/h	0.301		17		0.4	4.8
10	60Fg/h	0.463		10		0.2	2.4
11	80Fg/h	0.307		17		0.4	4.8
12	70Fg/h	0.145		26		0.5	6.0
13	80Fg/h	0.532		8		0.2	2.4
14	20Tram/h	0.370		15	50	4.2	50.4
15	20Tram/h	0.370		15	30	2.5	30.0
Σ			28			20.6	247.2
ΣΣ			90			74.4	892.8

12.3 Wartezeitkosten mit Privilegierung des öffentlichen Verkehrs

Die Personenwartezeit folgt aus der mittleren Wartezeit, der Spurbelastung und der Fahrzeugbesetzung. Das Produkt aus Personenwartezeit und Zeitkostensatz sind die Wartezeitkosten. Die beiden Tabellen ermitteln die Wartezeitkosten für das Beispiel auf Seite 58 mit Privilegierung des öffentlichen Verkehrs.

Wartezeitkosten mit Privilegierung des öffentlichen Verkehrs

$w[sek]$ mittlere Wartezeit

Q Spurbelastung

$$W_P = w \cdot \frac{Q \cdot Pers/FZ}{3600}\left[\frac{Pers \cdot h}{h}\right]$$ Personenwartezeit

$$t_k = 12\left[\frac{Fr}{Pers \cdot h}\right]$$ Zeitkostensatz

$$K_w = W_P \cdot t_K\left[\frac{Fr}{h}\right]$$ Wartezeitkosten

Kritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeit-anteil λ_{Mittel}	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]	Pers/ Fahrzeug	Personen-Wartezeit W_P[Pers·h/h]	Wartezeit-Kosten K_w[Fr/h]
7	640PWE/h	0.356	30	120	1.3	27.7	332.8
2	280PWE/h	0.155	17	175	1.3	17.7	212.3
8	250PWE/h	0.139	16	184	1.3	16.6	199.3
8	250PWE/h	0.139	16	184	1.3	16.6	199.3
5	270PWE/h	01.50	16	178	1.3	17.4	208.3
Σ		0.800	95			96.0	1152.0

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Spurbelastung Q	Grünzeit-anteil λ_{Mittel}	Stau k [PWE]	mittlere Wartezeit w[sek]	Pers/ Fahrzeug	Personen-Wartezeit W_P[Pers·h/h]	Wartezeit-Kosten K_w[Fr/h]
1	550PWE/h	0.511	9	18	1.3	3.6	42.9
3	110PWE/h	0.444	1	12	1.3	0.5	5.7
4	420PWE/h	0.289	11	50	1.3	7.6	91.0
6	650PWE/h	0.506	12	23	1.3	5.4	64.8
9	80Fg/h	0.289		18		0.4	4.8
10	60Fg/h	0.444		11		0.2	2.2
11	80Fg/h	0.294		18		0.4	4.8
12	70Fg/h	0.139		26		0.5	6.1
13	80Fg/h	0.511		9		0.2	2.4
14	20Tram/h	1.000		0	50	0	0
15	20Tram/h	1.000		0	30	0	0
Σ			33			18.7	224.7
ΣΣ			128			114.7	1376.7

13. ABGASEMISSIONEN UND TREIBSTOFFVERBRAUCH

13.1 Prinzip

Gegenüber einer freien Fahrt führt "Stop and Go" im Stau vor Lichtsignalanlagen zu zusätzlichen Abgasemissionen und Treibstoffverbrauch. Zusätzliche Abgasemissionen bzw. zusätzlicher Treibstoffverbrauch ergeben sich aus dem Produkt von Fahrzeugwartezeit und Abgasemissions- bzw. Treibstoffverbrauchsfaktoren 28). Die Fahrzeugwartezeit folgt aus dem Produkt von mittlerer Wartezeit und Spurbelastung. Die untenstehende Tabelle gibt die Abgasemissions- bzw. Treibstoffverbrauchsfaktoren im Stau an.

Abgasemissionen und Treibstoffverbrauch im Stau

Gegeben:

$w[sek]$ mittlere Wartezeit

$Q[PWE/h]$ Spurbelastung

Umrechnung:

$W[PWE \cdot h/h] = \frac{w \cdot Q}{3600}$ Fahrzeugwartezeit

Abgasemissions- und Treibstoffverbrauchsfaktoren:

i	$\varphi_i[kg/PWE \cdot h]$
CO	0.1405
NOx	0.0064
HC	0.0220
Treibstoff	1.226

Emissionen und Treibstoffverbrauch:

$Em[kg/h] = W.\varphi_i$

$E_{CO}[kg/h] = W \cdot 0.1405$	CO-Emissionen
$E_{NOx}[kg/h] = W \cdot 0.0064$	NOx-Emissionen
$E_{HC}[kg/h] = W \cdot 0.0220$	HC-Emissionen
$Tf[kg/h] = W \cdot 1.226$	Treibstoffverbrauch

13.2 Abgasemissions- und Treibstoffverbrauchsfaktoren

"Stop and Go" - Emissions-Grundwerte für Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge auf Stadtstrassen, v_{mittel} = 5.3 km/h, v_{max} = 44 km/h, Anteil v < 2 km/h = 52%

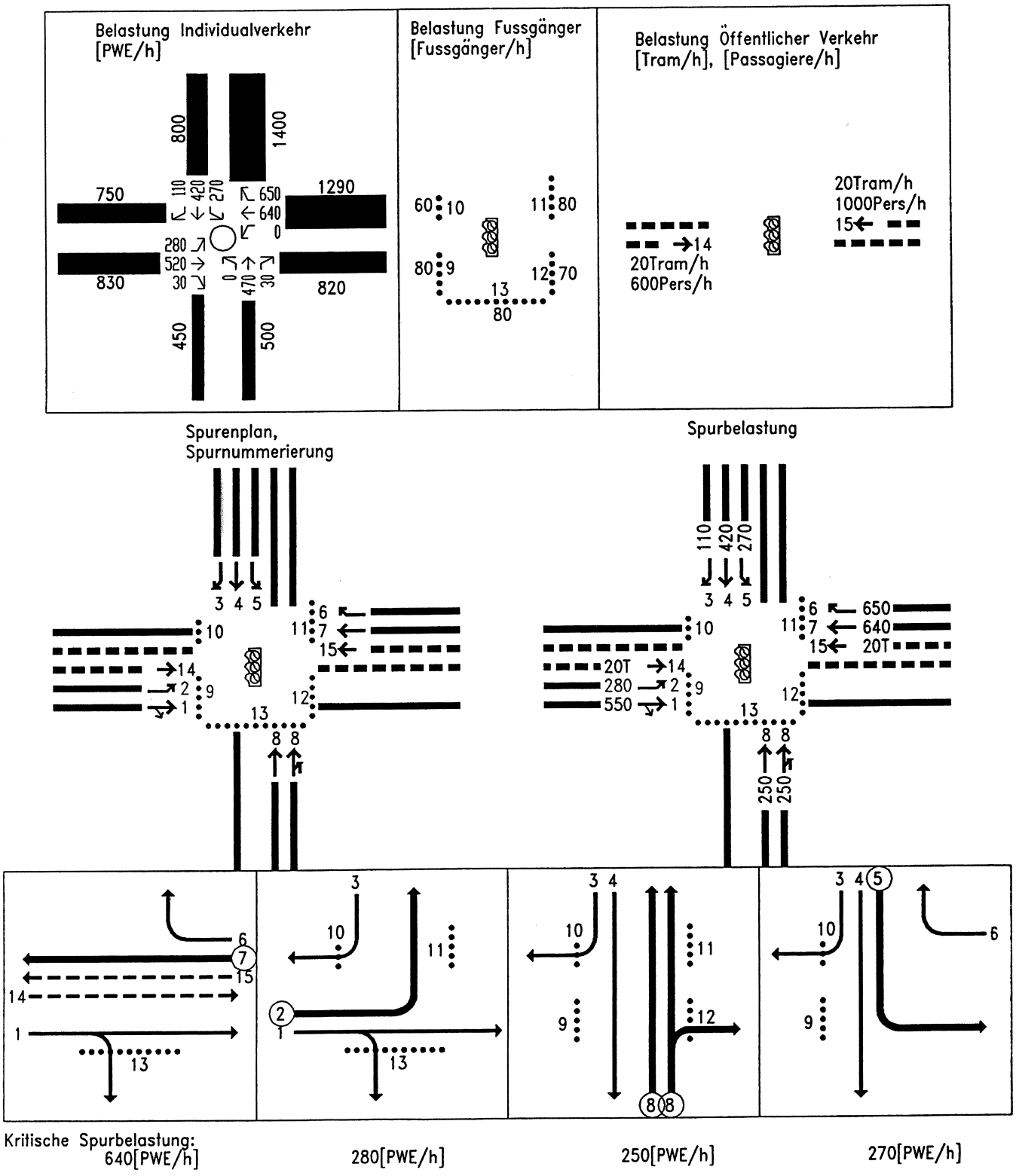
30.9.1990:
2.986.509 Personenwagen,
213.986 leichte Nutzfahrzeuge

Fahrzeugschicht	Bestandesanteil 30. 9. 1990	HC [g/h]	CO [g/h]	NOx [g/h]	Treibstoff [g/h]
CH1: PW<1.4 l FAV 1	6.05%	2.6	27	1.5	909
CH2: PW 1.4-2.0 l FAV 1	18.54%	3.1	23	1.8	1073
CH3: PW>2.0 l FAV 1	7.02%	3.0	19	1.5	1294
CH4: PW G-Kat vor FAV 1	6.59%	6.3	63	2.7	1240
CH15: Otto-PW, AGV82	23.02%	33.0	179	8.7	1276
CH18: Diesel-PW, <2.0 l, 1986-1988	0.62%	1.6	8	10.1	736
CH19: Diesel-PW, >2.0 l, 1986-1988	0.47%	2.6	11	13.0	991
CH20: Diesel-PW, FAV 1	0.55%	1.4	10	9.7	691
CH23: LNFZ G-Kat	0.75%	2.2	18	2.6	1449
CH25: Otto-LNFZ konv. ab 1981	2.99%	53.1	250	9.0	1260
CH27: Diesel-LNFZ FAV 1 ab 1986	0.66%	3.2	15	20.4	1378
CH12: Otto-PW ECE R15/03	15.68%	35.4	225	9.3	1241
CH13: Otto-PW ECE R15/01,02	10.94%	33.8	403	7.9	1408
CH14: Otto-PW ECE R15/00	3.01%	43.8	514	8.8	1422
CH16: Diesel-PW <2.0 l, konv. vor 1986	0.44%	6.2	21	11.6	983
CH17: Diesel-PW >2.0 l, konv. vor 1986	0.41%	5.2	19	9.0	1063
CH24: Otto-LNFZ konv. vor 1981	1.46%	52.8	529	16.6	1638
CH26: Diesel-LNFZ konv. vor 1986	0.83%	19.7	33	16.9	1427
Mittel	100%	22.0	140.5	6.4	1226

Quelle:
"Ermittlung von Abgas-Emissionsfaktoren von Strassenfahrzeugen in der Schweiz", Teil 1, Leichte Motorwagen, Abschlussbericht, Technischer Überwachungsverein Rheinland e.V., Institut für Umweltschutz und Energietechnik, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, April 1993

13.3 Beispiel

Das Bild zeigt für eine lichtsignalgesteuerte Kreuzung die Verkehrsfrequenzen, den Spurenplan, die Spurbelastungen und die kritischen Spurbelastungen.
An dem Beispiel soll die Ermittlung der Abgasemissionen und des Treibstoffverbrauchs aufgezeigt werden.



Die Fahrzeugwartezeiten sind das Produkt von mittlerer Wartezeit und Spurbelastung. Diese Fahrzeugwartezeiten - multipliziert mit den Abgasemissions- und Treibstoffverbrauchsfaktoren gemäss Seite 61 - führen zu Abgasemissionen und Treibstoffverbrauch in der untenstehenden Tabelle.

$w[sek]$	mittlere Wartezeit
Q	Spurbelastung
$W = w \cdot \frac{Q}{3600}\left[\frac{PWE \cdot h}{h}\right]$	Fahrzeugwartezeit
$E_{CO}[kg/h] = W \cdot 0.1405$	CO-Emissionen
$E_{NOx}[kg/h] = W \cdot 0.0064$	NOx-Emissionen
$E_{HC}[kg/h] = W \cdot 0.0220$	HC-Emissionen
$Tf[kg/h] = W \cdot 1.226$	Treibstoffverbrauch

Kritische Spurbelastungen

Spur	Spur-belastung Q[PWE/h]	Grünzeit-anteil λ	mittlere Wartezeit w[sek]	Fahrzeug-Wartezeit W[PWE·h/h]	E_{CO} [kg/h]	E_{NOx} [kg/h]	E_{HC} [kg/h]	T_f [kg/h]
7	640	0.370	62	11.0	1.55	0.07	0.24	13.49
2	280	0.162	100	7.8	1.10	0.05	0.17	9.56
8	250	0.145	108	7.5	1.05	0.05	0.17	9.20
8	250	0.145	108	7.5	1.05	0.05	0.17	9.20
5	270	0.156	103	7.7	1.08	0.05	0.17	9.44
Σ	1690			41.5	5.83	0.27	0.92	50.89

Unkritische Spurbelastungen

Spur	Spur-belastung Q[PWE/h]	Grünzeit-anteil λ	mittlere Wartezeit w[sek]	Fahrzeug-Wartezeit W[PWE·h/h]	E_{CO} [kg/h]	E_{NOx} [kg/h]	E_{HC} [kg/h]	T_f [kg/h]
1	550	0.532	14	2.1	0.30	0.01	0.05	2.57
3	110	0.463	11	0.3	0.04	0.00	0.01	0.37
4	420	0.301	34	4.0	0.56	0.03	0.09	4.90
6	650	0.526	16	2.9	0.41	0.02	0.06	3.56
Σ	1730			9.3	1.31	0.06	0.21	11.40
ΣΣ	3420			50.8	7.14	0.33	1.13	62.29

14. VERMEIDBARE UNFALLKOSTEN

14.1 Soziale Unfallkosten 1988

Die Tabellen stellen die sozialen Unfallkosten und Unfallkostensätze 1988 zusammen, gegliedert nach Unfällen und Personenschäden. Die Personenschäden sind weiter unterteilt, um verschiedenen Arten von Unfallstatistiken Rechnung zu tragen. 29) 30)

Soziale Unfallkosten:

Volkswirtschaftliche Kosten für die
- Heilung von Menschen
- Wiederherstellung von Sachgütern
- Aufwendungen für Polizei, Justiz, Versicherungen
- Verluste menschlicher Produktionsmöglichkeiten
- immatereriellen Kosten (Schock, Schmerz, Leid, Angst).

1988 Unfälle, Opfer	polizeilich erfasste Unfälle, Opfer	polizeilich nicht erfasste Unfälle, Opfer	alle Unfälle, Opfer	Soziale Unfallkosten [Mill. Fr]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro alle Unfälle, Opfer]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro polizeilich erfasste Unfälle, Opfer]
Unfälle	77168	416010	493178	5741.75	11.642	74.406
Opfer	31027	89145	120172	3333.17	27.736	107.428
Sachschäden				2237.23	4.536	28.992
Polizei, Justiz				171.35	0.347	2.220

Personen-schäden 1988	polizeilich erfasste Opfer	polizeilich nicht erfasste Opfer	alle Opfer	Soziale Unfallkosten [Mill. Fr]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro alle Opfer]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro polizeilich erfasstes Opfer]
Todesfälle	945	18	963	1403.52	1457.441	1485.20
Invalidität	1290	439	1729	1098.53	635.356	851.57
Fälle mit Taggeld	24549	35092	59641	801.04	13.431	32.63
Fälle ohne Taggeld	4243	53596	57839	30.13	0.521	7.10
Σ	31027	89145	120172	3333.17	27.736	107.43

Personen-schäden 1988	polizeilich erfasste Opfer	polizeilich nicht erfasste Opfer	alle Opfer	Soziale Unfallkosten [Mill. Fr]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro alle Opfer]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro polizeilich erfasstes Opfer]
Todesfälle	945	18	963	1403.52	1457.441	1485.20
Schwerverletzte	1290	439	1729	1098.53	635.356	851.57
Leichtverletzte	28792	88688	117480	831.17	7.075	28.87
Σ	31027	89145	120172	3333.17	27.736	107.43

Personen-schäden 1988	polizeilich erfasste Opfer	polizeilich nicht erfasste Opfer	alle Opfer	Soziale Unfallkosten [Mill. Fr]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro alle Opfer]	Sozialer Unfallkostensatz [1000 Fr pro polizeilich erfasstes Opfer]
Todesfälle	945	18	963	1403.52	1457.441	1485.20
Verletzte	30082	89127	119209	1929.70	16.188	64.15
Σ	31027	89145	120172	3333.17	27.736	107.43

14.2 Soziale Unfallkostensätze 1993

Aus den sozialen Unfallkostensätzen 1988 schätzen die Tabellen die sozialen Unfallkostensätze 1993 ab. Der Aufwertungsfaktor 1993/1988 beträgt etwa 1,26, entsprechend der Teuerung.

Die Tabellen sind gegliedert nach Unfällen und Personenschäden; die Personenschäden sind weiter unterteilt, um verschiedenen Arten von Unfallstatistiken Rechnung zu tragen.

U_P	polizeilich erfasste Unfälle mit Personenschäden
$u_{Ks,P}[Fr\ /\ U_P]$	soziale Unfallkostensätze 1993 pro polizeilich erfassten Unfall mit Personenschäden
$K_S[Fr]$	Kosten der Sachschäden
$U_P \cdot u_{Ks,P}[Fr]$	Kosten der Personenschäden
$K_U[Fr] = U_P \cdot u_{Ks,P} + K_S$	Unfallkosten

Unfälle	Sozialer Unfallkostensatz 1988 [pro polizeilich erfassten Unfall]	Sozialer Unfallkostensatz 1993 [pro polizeilich erfassten Unfall]
Unfälle	Fr. 74410	Fr. 95000

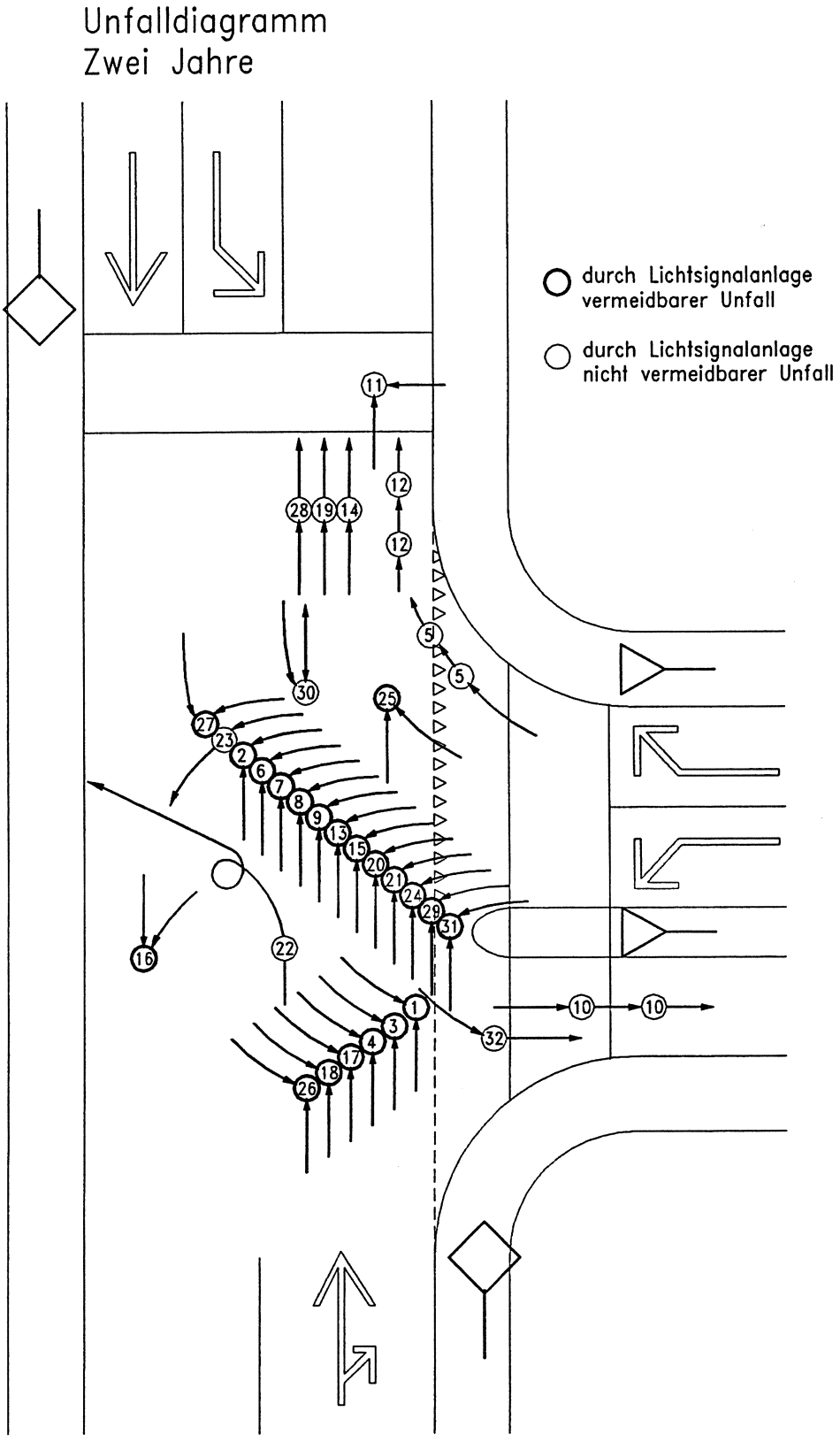
Personenschäden	Sozialer Unfallkostensatz 1988 [pro polizeilich erfasstes Opfer]	Sozialer Unfallkostensatz 1993 [pro polizeilich erfasstes Opfer]
Todesfälle	Fr. 1485200	Fr. 1900000
Invalidität	Fr. 851570	Fr. 1100000
Fälle mit Taggeld	Fr. 32630	Fr. 40000
Fälle ohne Taggeld	Fr. 7100	Fr. 10000
Σ	Fr. 107430	Fr. 135000

Personenschäden	Sozialer Unfallkostensatz 1988 [pro polizeilich erfasstes Opfer]	Sozialer Unfallkostensatz 1993 [pro polizeilich erfasstes Opfer]
Todesfälle	Fr. 1485200	Fr. 1900000
Schwerverletzte	Fr. 851570	Fr. 1100000
Leichtverletzte	Fr. 28870	Fr. 35000
Σ	Fr. 107430	Fr. 135000

Personenschäden 1988	Sozialer Unfallkostensatz 1988 [pro polizeilich erfasstes Opfer]	Sozialer Unfallkostensatz 1993 [pro polizeilich erfasstes Opfer]
Todesfälle	Fr. 1485200	Fr. 1900000
Verletzte	Fr. 64150	Fr. 80000
Σ	Fr. 107430	Fr. 135000

14.3 Vermeidbare Unfälle durch Lichtsignalanlage

Das Bild zeigt das Unfalldiagramm für eine bestehende, ungesteuerte Einmündung. Eine Lichtsignalanlage kann Vortrittsunfälle und Unfälle von Linksabbiegern mit Gegenverkehr vermeiden. Diese vermeidbaren Unfälle sind stark eingetragen, die nicht vermeidbaren schwach.



14.4 Vermeidbare Unfallkosten durch Lichtsignalanlage

Die Tabellen ermitteln aus der Unfallstatistik der bestehenden Einmündung die vermeidbaren Unfallkosten durch eine Lichtsignalanlage.

Unfallstatistik, zwei Jahre

Nr	Tag	Tages-zeit	Verletzte		Tote	Sach-schaden [1000Fr]	Strassen-zustand	Objektart	Unfalltyp
			leicht	schwer					
1	Mo	15h	1			3.0	nass	Pw/Mofa	Linksabb./Gegenverk.
2	Mo	17h				6.0	trocken	Liefw/Mr/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
3	Fr	16h				12.0	feucht	Pw/Pw/Pw	Linksabb./Gegenverk.
4	Sa	18h		1		2.1	trocken	Pw/Mofa	Linksabb./Gegenverk.
5	Mi	9h				1.0	trocken	Pw/Liefw/Pw	Auffahren
6	Mo	13h	2			10.0	trocken	Pw/Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
7	Mo	17h		1		2.0	trocken	Pw/Mr	Linkseinb./Ger.von Links
8	Mi	18h	1			4.0	trocken	Pw/Mr	Linkseinb./Ger.von Links
9	Fr	13h				3.0	trocken	Pw/Lw	Linkseinb./Ger.von Links
10	Mi	7h				4.0	trocken	Pw/Pw/Pw	Auffahren
11	Mi	16h				3.0	trocken	Pw/Fr	Überqueren
12	Fr	17h				8.5	nass	Pw/Pw/Pw	Auffahren
13	Fr	17h		1		2.0	trocken	Pw/Mofa	Linkseinb./Ger.von Links
14	Di	17h				2.0	trocken	Pw/Mr	Auffahren
15	Do	13h				5.0	trocken	Mr/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
16	Mi	8h	1			10.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Rechts
17	Fr	8h				10.0	trocken	Pw/Pw	Linksabb./Gegenverk.
18	Do	17h	1			1.0	trocken	Pw/Fr/Pw	Linksabb./Gegenverk.
19	Di	16h				3.5	trocken	Pw/Pw	Auffahren
20	Di	17h				15.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
21	Do	18h	1			3.0	trocken	Liefw/Klmr	Linkseinb./Ger.von Links
22	Mi	6h				5.0	verschneit	Pw	Fahrunfall ohne Kollision
23	Mo	12h				0.1	trocken	Pw/Pw	Auffahren
24	Do	19h				20.0	trocken	Pw/Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
25	Di	17h				10.0	trocken	Pw/Samfz	Rechtseinb./Ger.von Links
26	Sa	14h				5.0	nass	Pw/Pw	Linksabb./Gegenverk.
27	So	19h				2.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Linksabb.
28	Di	17h				2.0	trocken	Pw/Pw	Auffahren
29	Do	17h				10.0	trocken	Pw/Lw+A	Linkseinb./Ger.von Links
30	Do	7h				0.7	trocken	Pw/Pw	Rückwärtsfahren
31	Do	18h				8.0	trocken	Pw/Pw	Linkseinb./Ger.von Links
32	Do	17h				3.5	trocken	Pw/Pw	Auffahren
Σ			7	3	0	176.4			

Bilanz	Anzahl Unfälle	Verletzte leicht	Verletzte schwer	Sachschäden [1000 Fr.]	Total [1000 Fr.]
Unfälle	32	7	3		
Unfallkosten [1000 Fr.]		7 · 35.0= =245.0	3· 1100.0= =3300.0	176.4	3721.4
mit Lichtsignalanlage nicht vermeidbare Unfälle	11	0	0		
mit Lichtsignalanlage nicht vermeidbare Unfallkosten [1000 Fr.]		0	0	33.3	33.3
mit Lichtsignalanlage vermeidbare Unfälle	21	7	3		
mit Lichtsignalanlage vermeidbare Unfallkosten [1000 Fr.]		7 · 35.0= =245.0	3· 1100.0= =3300.0	143.1	3688.1

15. DAS ERGEBNIS DES FORSCHUNGSBERICHTS

Es wird ein Verfahren angeboten, das für eine Lichtsignalanlage Stau, Wartezeiten, Abgasemissionen, Treibstoffverbrauch und vermeidbare Unfälle abschätzt. Verkehrslenkende Massnahmen wie Privilegierung des öffentlichen Verkehrs, Koordination des Individualverkehrs bezw. Vorgaben von Spurleistung, Stau oder Wartezeit werden berücksichtigt. Der Nutzen einer Lichtsignalsteuerung im Vergleich zum bestehenden Verkehrszustand lässt sich dann aus einer Bilanz der Wartezeit-, Unfall- und Treibstoffkosten, bezw. der lufthygienischen Auswirkungen ablesen. Das Verfahren bildet die Grundlage für eine SNV-Norm „Nutzen einer Lichtsignalanlage".

Die Schritte des Verfahrens:

Die Verkehrsunterlagen zum bestehenden Verkehrszustand

Belastungen des Individualverkehrs, des öffentlicher Verkehrs, der Fussgänger
Besetzung der Kursfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs
Zeit-Weg-Diagramm bei koordinierten Zufahrten
Spurenplan, Spurnummerierung, Spurbelastungen
Stau, Wartezeiten
Unfalldiagramm, Unfallstatistik

Die Kriterien und Unterlagen zum Beurteilen des Nutzens einer Lichtsignalanlage

Kriterium	Unterlagen
kritische Spurbelastungen	Spurbelastungen, Geradeaus-Äquivalent vortrittsbelasteter Abbieger (Tabelle, 1. Näherung), Geradeaus-Äquivalenzbelastung vortrittsbelasteter Abbieger Richtwerte für minimale kritische Spurbelastungen
↓	
Grünzeitanteile Spurleistung Auslastungsgrad	Formel für Grünzeitanteile, Formel für Spurleistung, Formel für Auslastungsgrad
↓	
Stau Wartezeiten	Diagramme für Stau und Wartezeiten abhängig von Spurbelastungen und Grünzeitanteilen
↓	
Änderung von Grünzeitanteilen, Stau, Wartezeiten durch Verkehrslenkung	Privilegierung des öffentlichen Verkehrs: Korrekturfaktoren für Grünzeitanteile (Diagramme), Formel für mittlere Grünzeitanteile Koordination des Individualverkehrs: Korrekturfaktoren für Stau und Wartezeiten (Diagramme), Wahl von Spurleistung, Stau, Wartezeit: (Formel für Änderung von Grünzeitanteilen)
↓	
Wartezeitkosten	Besetzung der Kursfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, Richtwert für Zeitkostenansatz, Formel für Personenwartezeiten
↓	
Abgasemissionen Treibstoffverbrauch Individualverkehr	Formel für Fahrzeugwartezeiten des Individualverkehrs, CO-Emissionsfaktoren des Individualverkehrs im Stau, NOx-Emissionen des Individualverkehrs im Stau, HC-Emissionen des Individualverkehrs im Stau, Treibstoffverbrauch des Individualverkehrs im Stau
↓	
Unfallkosten	Unfalldiagramm, Unfallstatistik, polizeilich erfasste Unfälle mit Personenschäden, Kosten der Sachschäden, Abschätzen vermeidbarer Unfälle, Unfallkostensätze polizeilich erfasster Unfälle mit Personenschäden, Kosten der Personenschäden, Formel für Unfallkosten

16. LITERATUR

1 "Manual on Uniform Traffic Control Devices", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C. 1988

2 "Richtlinien für Lichtsignalanlagen, RILSA", Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 1992

3 "Richtlinien für Lichtsignalanlagen - ein Kommentar zur Ausgabe 1992", Lothar Dunker, Strassenverkehrstechnik 1/1993

4 "Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen, RLS-90", Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn 1990

5 "Rechenbeispiele zu den Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen, RB Lärm 92", Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn 1992

6 "Sicherheit von Verkehrsanlagen", IVT-ETH, Prof.K.Dietrich, M.Simon, Zürich, Juni 1982

7 "Highway Safety Engineering Studies, Procedural Guide", US.Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC 1981

8 "Highway Safety Evaluation, Procedural Guide", US.Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC 1981

9 "Traffic Engineering Handbook", Institute of Transportation Engineers, Fourth Edition, Prentice Hall, 1992

10 "Traffic Signals: Capacity and Signal Timing Analysis", R.Akcelik, Australian Road Research Board, Research Report ARR No.123, Australia 1981

11 "Calibrating SIDRA", R.Akcelik, Australian Road Research Board, Research Report ARR No.180, Australia 1990

12 "Highway Capacity Manual", Special Report 209, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC 1985

13 "Phasentrennung bei Lichtsignalanlagen", P.Pitzinger, Eidg.Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Forschungsauftrag Nr.17/92, 7339.01, Zürich 1993

14 "A time-dependent approach to junction delay", J.Catling, Traffic Engineering and Control, 11/1977

15 "Traffic queues and delays at road junctions", R.M. Kimber, E.M. Hollis, TRRL 909, Crowthorne, 1979

16 "Developement of a junction delay formula", J.Catling, LTR1 Working Paper 2, Department of Transport, 1977

17 "Rückstau und Wartezeit - Messung und Berechnung", P.Pitzinger, Strassenverkehrstechnik 6/1982, Bonn

18 "A Note on Traffic Delay Formulas", J. Burrow, Institute of Transportation Engineers Journal, 10/89

19 "Delays at fixed-time traffic signals under time dependent traffic conditions", W.Brilon, Ning Wu, Traffic Engineering + Control 12/90

20 "Lichtsignalanlagen mit Priorität für Tram und Bus - Eine Zwischenbilanz", P.Pitzinger, Schweizer Ingenieur und Architekt 37/1982, Zürich

21 "Priorität für den öffentlichen Verkehr an Lichtsignalanlagen - Prinzip und Beispiele", P.Pitzinger, Strassenverkehrstechnik 25/1981, Bonn

22 "Moderne Lichtsignalregelung: Möglichkeiten und Grenzen", P.Pitzinger, Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, 2/1983, Wien

23 "Hinweise für die Bewertung von Massnahmen zur Beeinflussung der ÖPNV-Abwicklung", Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln 1991

24 "Merkblatt für Massnahmen zur Beschleunigung des ÖPNV mit Strassenbahnen und Bussen", Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln 1982

25 "Effects of the Quality of Traffic Signal Progression on Delay", National Cooperative Highway Research Programm Report 339, Washington D.C., 1991

26 "Internalisieren der externen Kosten des Verkehrs", M.Maibach, R.Iten, S.Mauch, Nationales Forschungsprogramm Stadt und Verkehr, Bericht 33, Zürich 1992

27 "Richtlinie für die Anlage von Strassen RAS, Teil Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen RAS-W", Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln 1986

28 "Ermittlung von Abgas-Emissionsfaktoren von Strassenfahrzeugen in der Schweiz", Teil 1, Leichte Motorwagen, Abschlussbericht
Technischer Überwachungsverband Rheinland e.V.,
Institut für Umweltschutz und Energietechnik, Bern 1993

29 "Soziale Kosten von Verkehrsunfällen in der Schweiz", ECOPLAN,
Studie im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen des
Eidg.Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartements und des
Bundesamts für Bildung und Wissenschaft des Eidg.Departements des Innern,
Bern, 1991

30 "The Costs of Highway Crashes"
US.Department of Transportation, Federal Highway Administration,
Publication No. FHWA - RD - 91 - 055, Washington D.C. 1991

31 "The prediction of saturation flow for road junctions controlled by traffic signals",
R.M. Kimber et al
Transportation and Road Research Laboratory RR67, Crowthorne, 1986

32 "Traffic Flow, Capacity, Roadway Lighting and Urban Traffic Systems 1990"
Transportation Research Record No. 1287, Transportation Research Board,
Washington D.C. 1990