

Schätzverfahren zur Leistungsbeurteilung von Knoten ohne Lichtsignalanlage

**Méthode d'évaluation de la capacité des carrefours sans installation de feu
circulation**

**Ballmer und Partner, Aarau
Erb + Partner Ingenieurbüro AG, Winterthur**

**S. Ballmer, dipl. Ing. ETH
T. Isenring, dipl. Ing. ETH
H.-U. Erb, dipl. Ing. HTL
F. Willhelm, dipl. Ing. HTL**

**Forschungsauftrag 13/95 auf Antrag der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)**

Februar 1999

INHALTSVERZEICHNIS

EDV-Erfasst

Dat: 30.6.99. 

Seite

ZUSAMMENFASSUNG / RÉSUMÉ

1. EINLEITUNG	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Auftrag	1
2. GRUNDLAGEN UND VORGEHEN	1
2.1 Grundlagen	1
2.2 Vorgehen	2
3. BERECHNUNGSVERFAHREN GEMÄSS DEM DEUTSCHEN MERKBLATT 1991 [4]	3
3.1 Anforderungen an den Knoten	3
3.2 Bezeichnung der Ströme und Rangfolge	3
3.3 Ermittlung der massgebenden Hauptstrombelastung	4
3.4 Berechnung der Verkehrsbelastungen in PWE / h der einzelnen Nebenströme	4
3.4.1 Belastung der einzelnen Fahrzeugarten unbekannt	4
3.4.2 Belastung der einzelnen Fahrzeugarten bekannt	5
3.5 Massgebende Geschwindigkeit im Hauptstrom	5
3.6 Grundleistungsfähigkeit G	6
3.7 Wahrscheinlichkeit des rückstaufreien Zustandes p_0	7
3.8 Maximale Leistungsfähigkeit	7
3.8.1 Maximale Leistungsfähigkeit von Einmündungen	7
3.8.2 Maximale Leistungsfähigkeit von Kreuzungen	7
3.9 Mischstreifen	9
3.9.1 Leistungsfähigkeit L_m von Mischstreifen auf der Hauptstrasse	9
3.9.2 Leistungsfähigkeit L_m von Mischstreifen auf der Nebenstrasse	9
3.10 Leistungsreserve R der einzelnen Ströme	10
3.11 Mittlere Wartezeit	10
3.12 Praktische Leistungsfähigkeit	12
3.13 Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufes	12
4. FORSCHUNGSAUFTTRAG 35/89	13
4.1 Untersuchungsobjekte	13
4.2 Erhebungsmethode	13
4.3 Berechnungen	14
4.4 Ergebnisse	14
4.4.1 Verkehrsmengen	14
4.4.2 Geschwindigkeitsverhalten	14
4.4.3 Beobachtung des Stauraumes	15
4.4.4 Zeitlücken	15
4.4.5 Leistungsreserve	16
4.5 Plausibilitätskontrolle	17
4.5.1 Einfluss der Zeitlücken auf die Leistungsreserve	18
4.5.2 Einfluss der Geschwindigkeit	18

4.5.3	Einfluss der Umrechnungsfaktoren Fahrzeugäquivalente	18
4.5.4	Berechnung mit dem Simulationsprogramm KNOSIMO	19
4.6	Folgerungen	19
5.	FORSCHUNGSAUFRAG 13/95	20
5.1	Untersuchungsobjekte	20
5.2	Erhebungsmethode	21
5.3	Berechnungen	22
5.4	Ergebnisse	23
5.4.1	Reserveleistungen	23
5.4.2	Wartezeiten	25
5.5	Folgerungen	26
6.	NEUERE FORSCHUNGSERGEBNISSE	27
6.1	Grenzzeitlücken	27
6.2	Massgebender Hauptstrom	28
6.3	Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufes	28
6.4	Mittlere Wartezeit	29
7.	BERÜCKSICHTIGUNG DER NEUEN ERKENNTNISSE	31
7.1	Berücksichtigung von STOP	31
7.2	Einfluss der Geschwindigkeit	32
7.3	Kombination der Vortrittsregelung mit der Geschwindigkeit	34
7.4	Andere Einflussgrössen	34
7.5	Wartezeiten	36
8.	BEURTEILUNG	37
8.1	Rechenmodell	37
8.2	Reserveleistungen	37
8.3	Zeitlücken	39
8.4	Mathematische Gesetzmässigkeiten	40
8.5	Forschungsbedarf	40
8.6	Allgemeine Bemerkungen zum Rechenverfahren	41
8.7	Simulationsprogramm Simpl	41
9.	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	43

ANHANGSVERZEICHNIS

Anhang 1	Verzeichnis der Abkürzungen
Anhang 2	Begriffe
Anhang 3	Zeitlücken nach Harders
Anhang 4	Knotenmerkmale
Anhang 5	Beurteilung der einzelnen Objekte
Anhang 6	Qualitätsstufen aufgrund von Reserveleistung und Wartezeit

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

		Seite
Abb. 1	Bezeichnung der Verkehrsströme an der Kreuzung und Einmündung	3
Abb. 2	Grundleistungsfähigkeiten der verschiedenen Fahrbeziehungen	6
Abb. 3	Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes in den Strömen 2. und 3. Ranges unter Berücksichtigung statistischer Abhängigkeiten	8
Abb. 4	Zusammenhang zwischen Belastungsreserve und mittlerer Wartezeit für Ströme mit Rang 2	11
Abb. 5	Zusammenhang zwischen Belastungsreserve und mittlerer Wartezeit für Ströme mit Rang 3 und 4	11
Abb. 6	Knoten Hard: Gesättigte und ungesättigte Phase. Verhältnis Belastung Strom 10 zu Reserveleistung (5 Min. Intervalle)	16
Abb. 7	Knoten Touring: Gesättigte Phase. Verhältnis Belastung Strom 4 zu Reserveleistung (1 Min. Intervalle)	17
Abb. 8	Reserveleistungen R in PWE/h	24
Abb. 9	Mittlere Wartezeit in Abhängigkeit von der Belastungsreserve und der Leistungsfähigkeit (Kimber, Hollis)	30
Abb. 10	Reserveleistungen bei Berücksichtigung der Vortrittsregelung	32
Abb. 11	Reserveleistungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung)	33
Abb. 12	Reserveleistungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Berücksichtigung der Vortrittsregelung	34
Abb. 13	Reserveleistungen bei genereller Geschwindigkeit 50, mit Vortrittsregelung und ohne anliegender Rechtsabbiegers	35

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1	Umrechnungsfaktoren f bei unbekannter Belastung der einzelnen Fahrzeugkategorien	4
Tab. 2	Umrechnungsfaktoren f bei bekannten Belastungen der einzelnen Fahrzeugkategorien	5
Tab. 3	Geschwindigkeitszuschläge $dV(\delta)$ für schiefwinklige Kreuzungen	5
Tab. 4	Geschwindigkeitszuschläge $dV(S)$ für die Beeinträchtigung der Sichtweite	5
Tab. 5	Grenzzeitlücken	15
Tab. 6	Folgezeitlücken	15
Tab. 7	Untersuchungsobjekte	20
Tab. 8	Knoten mit zu geringer Staubildung	21
Tab. 9	Reserveleistungen	23
Tab. 10	Mittlere Wartezeiten w	26
Tab. 11	Mittlere Wartezeiten und erforderliche Belastungsreserven für alle Qualitätsstufen	29
Tab. 12	Reserveleistungen bei Berücksichtigung von STOP	31
Tab. 13	Reserveleistungen bei verschiedenen Geschwindigkeitszuständen (ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung)	33
Tab. 14	Reserveleistungen bei genereller Geschwindigkeit 50, mit Vortrittsregelung und ohne anliegender Rechtsabbiegers	35
Tab. 15	Wartezeiten bei V_{sig}	36
Tab. 16	Wartezeiten bei $V = 50$ km/h und Berücksichtigung von STOP	36
Tab. 17	Reserveleistungen bei verschiedenen Einflussfaktoren	37
Tab. 18	Reserveleistungen unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren mit Nichtberücksichtigung des Rechtsabbiegers (fiktiver Rechtsabbiegestreifen)	39

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Leistungsschätzung von Knoten ohne Lichtsignalanlage wurde in der Schweiz bis anhin aufgrund von fehlenden Normen das Merkblatt der Deutschen Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen (FGSV) aus dem Jahre 1972 verwendet. Die Leistungsfähigkeit von Kreuzungen und Einmündungen wurde dabei des öfteren unterschätzt. In Deutschland wurde deshalb die Rechenmethode verbessert und im Jahr 1991 mit dem entsprechenden Merkblatt der FGSV mit dem Titel "Merkblatt zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen" zur Richtlinie erhoben.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die Anwendbarkeit des deutschen Merkblattes auf die schweizerischen Verhältnisse zu überprüfen und die Berechnungsmethode unter allfälligen Vorbehalten oder Anpassungen in das Schweizer Normenwerk aufzunehmen.

Mit dem Berechnungsverfahren gemäss deutschem Merkblatt können die Leistungsfähigkeit und die Qualität des Verkehrsablaufs für Kreuzungen oder Einmündungen beurteilt werden. Der Vergleich der berechneten Leistungsfähigkeit mit der tatsächlichen Belastung ermöglicht eine Beurteilung der Verkehrsqualität an einem bestehenden oder geplanten Knoten.

Die Untersuchungen wurden in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Forschungsarbeit mit der Nummer 35/89 wurden zwei Knoten überprüft. Die Resultate wichen erheblich vom Sollwert ab, so dass mit dem Nachfolgeauftrag 13/95 die Untersuchungen auf mehrere Knoten ausgeweitet wurden. Einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse haben auch die vornehmlich in Deutschland und den USA publizierten Arbeiten zum Thema Leistungsfähigkeit.

Die Untersuchungen beschränkten sich auf eine Überprüfung des aus der Nebenstrasse nach links in die Hauptstrasse einmündenden Verkehrs. Die maximale Leistungsfähigkeit des Nebenstromes wurde festgestellt, indem die in einer Stauperiode in die Kreuzung ausfahrenden Fahrzeuge ermittelt wurden. Damit konnte in den Stauphasen eine Reserveleistung von ~ 0 PWE/h erwartet werden.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass rund 70% aller berechneten Knoten effektiv eine bessere Leistungsfähigkeit aufweisen als berechnet wurde. Die Werte der Reserveleistung liegen in einem Streubereich von +60 PWE/h bis -141 PWE/h. Die möglichen Ursachen für die Abweichungen können Beeinflussungen durch Lichtsignalanlagen oder Barrieren, starke Rechtsabbiegeströme, reduzierte Geschwindigkeit, Fussgänger und Zweiradfahrer usw. sein.

Zusätzlich zu den Standardberechnungen wurden auch Auswertungen mit verschiedenen Zeitlücken und mit verschiedenen Vortrittsregelungen durchgeführt, die zum Teil eine Annäherung an den Sollwert gebracht haben. In Anbetracht der internationalen Entwicklung wird empfohlen, nur noch die Zeitlücken für 60 km/h zu verwenden, die Vortrittsregelung nicht zu berücksichtigen, einen Schweizer Korrekturfaktor von +90 PWE/h und das 6 stufige Level-of-Service-Konzept einzuführen.

RÉSUMÉ

Pour l'estimation de la capacité d'un carrefour sans feux, la notice de la *Deutsche Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen (FGSV)* datant de 1972 a été utilisée en Suisse en l'absence de normes spécifiques. La capacité des carrefours et des embranchements a ainsi été le plus souvent sous estimée. C'est pourquoi en Allemagne la méthode de calcul a été améliorée et diffusée en 1991 sous la forme d'une nouvelle notice de la FGSV intitulée "Calcul de la capacité d'un noeud sans feux", devenue maintenant une directive.

Le but de la présente recherche est d'examiner s'il est possible d'appliquer cette directive allemande en Suisse et d'intégrer cette méthode de calcul dans les normes suisses, éventuellement avec des restrictions ou des adaptations.

Cette méthode de calcul selon la notice allemande permet d'estimer la capacité et le niveau de service d'un carrefour ou d'un embranchement. La comparaison de la capacité calculée avec la charge effective permet l'évaluation du niveau de service d'un carrefour existant ou nouveau.

Les observations se sont déroulées en deux phases. Dans la première (Recherche 35/89), deux carrefours ont été examinés. Les résultats s'écartaient sensiblement des valeurs calculées. C'est la raison pour laquelle les observations ont été étendues à plusieurs carrefours dans la seconde (Recherche 13/95). Les travaux au sujet de la capacité des carrefours, publiés avant tout en Allemagne et aux Etats Unis, ont aussi eu une grande influence sur les résultats.

Les observations se sont limitées à l'examen du trafic d'une route secondaire débouchant dans une route principale par un tourne-à-gauche. La capacité maximale de la route secondaire a été déterminée en établissant la somme des voitures franchissant le carrefour pendant une période avec file d'attente. Dans ces conditions de saturation, la réserve de capacité est d'environ 0 uv/h.

Les dépouillements ont montré qu'environ 70 % de tous les carrefours examinés ont une capacité meilleure que celle calculée. Les réserves de capacité varient entre +60 uv/h et -141 uv/h. Les raisons de ces divergences peuvent s'expliquer par l'influence de feux circulations ou de barrières, de forts mouvements de tourne-à-droite, une vitesse réduite, des piétons et des deux-roues.

En plus des calculs standards, des analyses à partir de différents créneaux de temps ou règles de priorité ont aboutit à des résultats plus proches des valeurs calculées. Considérant le développement au niveau international, il est recommandé de n'utiliser plus que les créneaux de temps pour 60 km/h, de ne pas tenir compte des règles de priorité, de considérer un facteur suisse de correction de +90 uv/h et d'introduire le système des 6 niveaux de service.

1. EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSLAGE

Im heute gültigen Normenwerk der VSS wurde der Aspekt der Leistungsschätzung von Knoten ohne Lichtsignalanlage bisher noch nicht behandelt. Zur Leistungsschätzung von solchen Knoten wurde in der Schweiz das Merkblatt der Deutschen Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen (FGSV) aus dem Jahre 1972 verwendet.

In der Zwischenzeit hatte man in der Praxis und Lehre jedoch erkannt, dass dabei die Leistungsfähigkeit von Kreuzungen und Einmündungen des öfteren unterschätzt wurde. In Deutschland wurden deshalb zwei Forschungsaufträge vergeben, die eine Verbesserung der Rechenmethode zum Ziel hatten. Das Ergebnis der Untersuchungen bildete die Herausgabe eines neuen Merkblattes durch die FGSV unter dem Titel "Merkblatt zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen" (Ausgabe 1991).

Für die Zukunft soll nun für die Schweiz ebenfalls ein einfaches Schätzverfahren entweder als Norm, Vornorm oder als Merkblatt erarbeitet werden.

1.2 AUFTRAG

Die Ingenieurbüros Ballmer+Partner, Aarau und Erb+Partner, Winterthur wurden beauftragt, die notwendigen Erhebungen und Untersuchungen für die Überprüfung der Deutschen Richtlinie zur Leistungsbeurteilung von Knoten ohne Lichtsignalanlagen durchzuführen. Im wesentlichen sollen in diesem Forschungsauftrag die folgenden Aspekte behandelt werden:

- Überprüfung der Ergebnisse des Rechenverfahrens auf die Anwendbarkeit in der Schweiz.
- Erarbeitung der Grundlagen für eine VSS-Norm oder für ein Merkblatt zur Leistungsbeurteilung von Knoten.

2. GRUNDLAGEN UND VORGEHEN

2.1 GRUNDLAGEN

Die Leistungsfähigkeit von vortrittsbelasteten Streifen ist eine Funktion der Wartezeit und diese wiederum eine Funktion der Verkehrsmengen sowie der Grenz- und Folgezeitlücken. Verkehrsbeobachtungen haben auch gezeigt, dass bei grossen Wartezeiten die Leistungsfähigkeit der vortrittsbelasteten Streifen zu Lasten der Verkehrssicherheit höher ist, als bei normalen Wartezeiten.

Mit dem Berechnungsverfahren gemäss "Merkblatt zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen" kann die Leistungsfähigkeit und die Qualität des Verkehrsablaufs für Kreuzungen oder Einmündungen beurteilt werden. Für jeden nicht voll vortrittsberechtigten Verkehrsstrom kann die höchstmögliche Belastung berechnet werden. Die Gegenüberstellung mit der tatsächlichen Belastung ergibt die Reserveleistungsfähigkeit. Diese gibt Hinweise auf einen Sanierungsbedarf dieser Knoten.

2.2 VORGEHEN

Mit Hilfe von Knotenerhebungen soll der Zusammenhang zwischen Knotenbelastung und Leistungsfähigkeit mit der Deutschen Richtlinie verglichen werden. Es war dabei vorgesehen, die Untersuchungen in zwei Phasen durchzuführen.

In einer ersten Forschungsarbeit mit der Nummer 35/89 wurden zwei Knoten überprüft. Die Resultate wichen erheblich vom Sollwert gemäss deutschem Merkblatt ab (vgl. "Einfaches Schätzverfahren zur Leistungsbeurteilung von Knoten", FA 35/89, Zwischenbericht März 1994 und Kapitel 4), so dass mit einem Nachfolgeauftrag die Untersuchungen auf mehrere Knoten ausgeweitet wurden. Infolge der Finanzknappheit des Bundes konnte die weitere Forschung jedoch vorerst nicht weiter vorangetrieben werden. Am 4. Mai 1995 hat das Bundesamt für Strassenwesen der Weiterführung der Forschungsarbeiten zugestimmt und den Fortsetzungsauftrag mit der Nummer 13/95 erteilt.

Während dem Stillstand der Forschungsarbeit wurden vornehmlich in Deutschland und den USA diverse Arbeiten zum Thema Leistungsfähigkeit publiziert. Diese Ergebnisse haben einen grossen Einfluss auf die Anwendung des Merkblattes.

3. BERECHNUNGSVERFAHREN GEMÄSS DEM DEUTSCHEN MERKBLATT 1991 [4]

3.1 ANFORDERUNGEN AN DEN KNOTEN

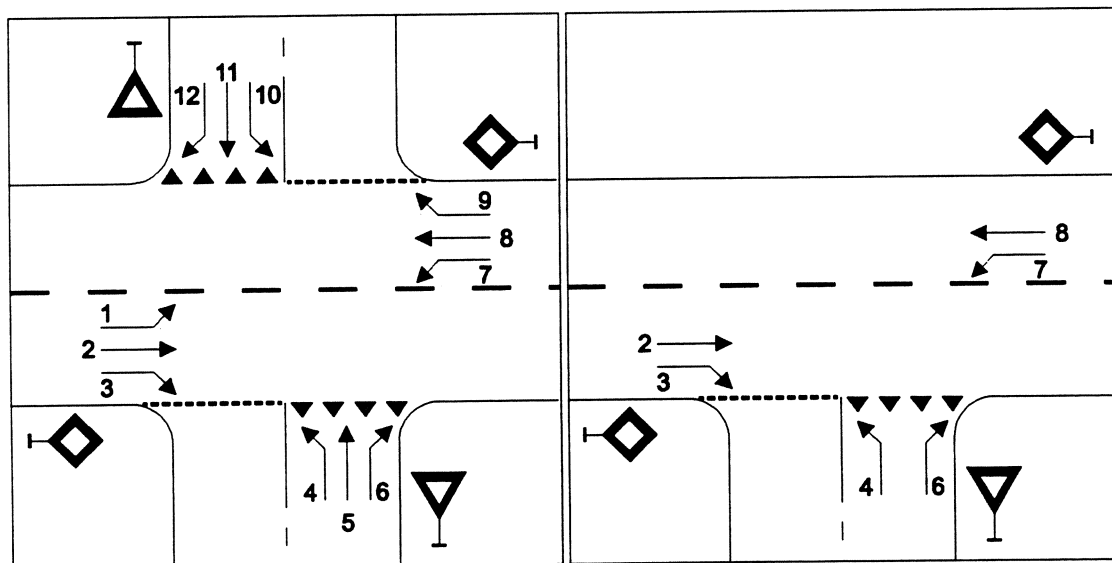
Das Verfahren kann nur für Knoten (Kreuzungen und Einmündungen) angewendet werden, bei denen einer durchgehenden Strasse (Hauptstrasse) gemäss den Zeichen 306 oder 301 der deutschen Strassenverkehrs-Ordnung (StVO) Vortritt gewährt wird (gemäss SSV, Signale 3.03 "Hauptstrasse" und 3.05 "Verzweigung mit Strasse ohne Vortritt").

Das Verfahren kann bei folgenden Knoten nicht angewendet werden:

- mehr als 4 Knotenäste
- Rechtsvortritt
- Abknickende Hauptstrasse (SSV, Signal 5.09 "Richtung der Hauptstrasse")
- Grosse Belastung von Mofa- und Velofahrer sowie von Fussgänger (Verringerung der Leistungsfähigkeit)
- Lichtsignalanlagen oder Barrieren in unmittelbarer Nähe

3.2 BEZEICHNUNG DER STRÖME UND RANGFOLGE

Abb. 1 Bezeichnung der Verkehrsströme an der Kreuzung und Einmündung



Rang 1	Strom 2, 3, 8, 9
Rang 2	Strom 1, 7, 6, 12
Rang 3	Strom 5, 11
Rang 4	Strom 4, 10

Rang 1	Strom 2, 3, 8
Rang 2	Strom 7, 6
Rang 3	Strom 4

3.3 ERMITTLUNG DER MASSGEBENDEN HAUPTSTROMBELASTUNG

Massgebender Hauptstrom q_{pi} [Fz/h]

$$\begin{aligned}
 [F1] \quad q_{p1} &= q_8 + q_9^{3)} \\
 [F2] \quad q_{p7} &= q_2 + q_3^{3)} \\
 [F3] \quad q_{p6} &= q_2^{2)} + 0.5 \times q_3^{1)} \\
 [F4] \quad q_{p12} &= q_8^{2)} + 0.5 \times q_9^{1)} \\
 [F5] \quad q_{p5} &= q_2 + 0.5 \times q_3^{1)} + q_8 + q_9^{3)} + q_1 + q_7 \\
 [F6] \quad q_{p11} &= q_8 + 0.5 \times q_9^{1)} + q_2 + q_3^{3)} + q_1 + q_7 \\
 [F7] \quad q_{p4} &= q_2 + 0.5 \times q_3^{1)} + q_8 + q_1 + q_7 + q_{12}^{4)} + q_{11} \\
 [F8] \quad q_{p10} &= q_8 + 0.5 \times q_9^{1)} + q_2 + q_1 + q_7 + q_6^{4)} + q_5
 \end{aligned}$$

wobei q_{pi} = massgebende Hauptstrombelastung [Fz/h]
 q_i = vorhandene Verkehrsstärke des Nebenstromes [Fz/h]

Anmerkungen:

Die Indizes und Nummern beziehen sich auf die Verkehrsströme nach Abb. 1

- 1) q_3 bzw. q_9 müssen nicht berücksichtigt werden, wenn ein separater Streifen für den Rechtsabbieger vorhanden ist.
- 2) Bei mehr als einem Streifen auf der bevorrechtigten Strasse gilt für die Ströme 2 und 8 jeweils die Belastung auf dem rechten Fahrstreifen.
- 3) q_3 und q_9 müssen nicht berücksichtigt werden, wenn für den Rechtsabbieger eine Dreiecksinsel vorhanden ist und mit "Kein Vortritt" oder "STOP" belastet ist.
- 4) q_6 und q_{12} entfallen, wenn diese Ströme durch eine Dreiecksinsel abgetrennt und mit "Kein Vortritt" oder "STOP" belastet sind.

3.4 BERECHNUNG DER VERKEHRSELASTUNGEN IN PWE / H DER EINZELNEN NEBENSTRÖME

3.4.1 Belastung der einzelnen Fahrzeugarten unbekannt

$$[F9] \quad q_i = f(Fz) \times q_i(Fz)$$

wobei $q_i(Fz)$ = vorhandene Verkehrsstärke in Fz/h [Fz/h]
 f = Umrechnungsfaktor [-]
 q_i = vorhandene Verkehrsstärke in PWE/h [PWE/h]

Tab. 1 Umrechnungsfaktoren f bei unbekannter Belastung der einzelnen Fahrzeugkategorien

Steigung*	+ 4 %	+ 2 %	± 0 %	- 2 %	- 4 %
$f(Fz)$	1.7	1.4	1.1	1.0	0.9

* Gefällsverhältnisse in Richtung Knoten

3.4.2 Belastung der einzelnen Fahrzeugarten bekannt

$$[F10] \quad q_i = f(PW) \times q_i(PW) + f(LW) \times q_i(LW) + f(LZ) \times q_i(LZ) + f(MR) \times q_i(MR)$$

wobei	q_i	= vorhandene Verkehrsstärke einer Fahrzeugkategorie in Fz/h	[Fz/h]
	f	= Umrechnungsfaktor für eine bestimmte Fahrzeugkategorie	[-]
	q_i	= vorhandene Verkehrsstärke in PWE/h	[PWE/h]

Tab. 2 Umrechnungsfaktoren f bei bekannten Belastungen der einzelnen Fahrzeugkategorien

Steigung*	+ 4 %	+ 2 %	± 0 %	- 2 %	- 4 %
f (PW)	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8
f (LW)	3.0	2.0	1.5	1.2	1.0
f (LZ)	6.0	3.0	2.0	1.5	1.2
f (MR)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3

* Gefällsverhältnisse in Richtung Knoten

3.5 MASSGEBENDE GESCHWINDIGKEIT IM HAUPTSTROM

Die Geschwindigkeit V des Hauptstromes ist aufgrund des Kreuzungswinkels δ (Winkel zwischen Achsen Hauptstrasse und Nebenstrasse) und der Sichtweite S (Sichtweite des Nebenstromes) anzupassen. Dabei ist zu beachten, dass die Anpassung der Geschwindigkeit stromweise erfolgt.¹

$$[F11] \quad v_m = v + dv(\delta) + dv(S)$$

wobei	v_m	= mittlere korrigierte Geschwindigkeit auf dem Hauptstrom	[km/h]
	v	= mittlere gem. oder sign. Geschwindigkeit auf dem Hauptstrom	[km/h]
	$dv(\delta)$	= Geschwindigkeitskorrektur aufgrund Kreuzungswinkel	[km/h]
	$dv(S)$	= Geschwindigkeitskorrektur aufgrund Sicht	[km/h]

Tab. 3 Geschwindigkeitszuschläge $dv(\delta)$ für schiefwinklige Kreuzungen

Kreuzungswinkel δ [gon]	100 - 70	70 - 60	60 - 50	50 - 40	40 - 30
+ $dv(\delta)$ [km/h]	0	2.5	5.0	7.5	10.0

Tab. 4 Geschwindigkeitszuschläge $dv(S)$ für die Beeinträchtigung der Sichtweite

Sichtweite S [m]	0 - 40	40 - 80	80 - 120	> 120
+ $dv(S)$ [km/h]	15.0	10.0	5.0	0.0

¹ z.B. können ungünstige Sichtverhältnisse nur bei einer Nebenstromrichtung auftreten.

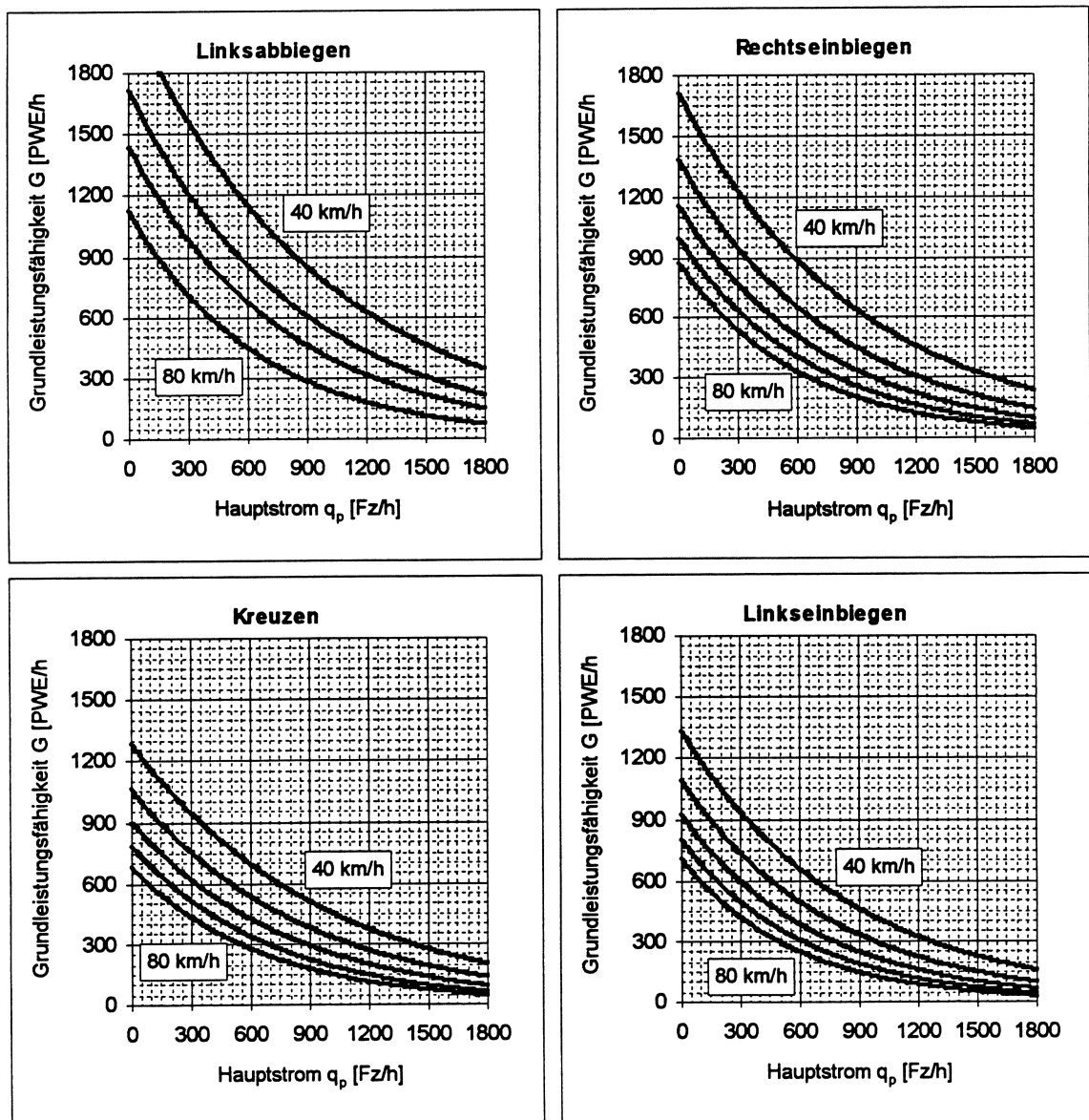
3.6 GRUNDLEISTUNGSFÄHIGKEIT G

Die Grundleistungsfähigkeit G für die einzelnen Nebenströme und die verschiedenen Fahrmanöver (Linksabbiegen, Links-, Rechtseinbiegen, Kreuzen) wird aufgrund nachstehender Formel [F12] (Siegloch, 1973) oder Diagrammen (vgl. Abb. 2) ermittelt. Massgebend ist die mittlere Geschwindigkeit des Hauptstromes. Zwischengeschwindigkeiten können interpoliert werden.

$$[F12] \quad G_i = \frac{3600}{t_r} \times e^{-\frac{q_{pi}}{3600} \times \left(t_g - \frac{t_r}{2}\right)}$$

wobei	q_{pi}	=	massgebende Hauptstrombelastung	[Fz/h]
	t_g	=	Grenzzeitlücke	[sec]
	t_f	=	Folgezeitlücke	[sec]
	i	=	1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12	[-]

Abb. 2 Grundleistungsfähigkeiten der verschiedenen Fahrbeziehungen



3.7 WAHRSCHEINLICHKEIT DES RÜCKSTAUFREIEN ZUSTANDES p_o

Für die Nebenströme zweiten Ranges (Strom 1, 7, 6 und 12) ist die Leistungsfähigkeit L_i gleich der Grundleistungsfähigkeit G_i . Bei Strömen dritten und vierten Ranges wird berücksichtigt, dass diese Ströme nur abfließen können, wenn auf den Strömen mit dem Rang 2 und 3 kein Rückstau herrscht. Allgemein gilt für die Wahrscheinlichkeit $p_{o,i}$ eines rückstaufreien Warteraumes:

$$[F13] \quad p_{o,i} = 1 - a_i \quad \text{wobei} \quad a_i = \frac{q_i}{L_i}$$

wobei	i	= 1, 7, 6, 12, 5, 11	[-]
	a_i	= Auslastungsgrad des Nebenstromes	[-]
	q_i	= vorhandene Verkehrsstärke des Nebenstromes	[PWE/h]
	L_i	= Leistungsfähigkeit des Stromes i nach den Formeln [F16], [F18], [F19]	[PWE/h]

3.8 MAXIMALE LEISTUNGSFÄHIGKEIT²

Als maximale Leistungsfähigkeit wird die grösste Stärke bezeichnet, die ein Nebenstrom unter Ausnutzung der in den übergeordneten Strömen auftretenden Zeitlücken, erreichen kann. Dabei wird der Rückstau in den übergeordneten Strömen nicht berücksichtigt.

3.8.1 Maximale Leistungsfähigkeit von Einmündungen

$$[F14] \quad L_7 = G_7$$

$$[F15] \quad L_4 = p_{0,7} \times G_4 \quad \text{wobei} \quad p_{0,7} = 1 - \frac{q_7}{L_7}$$

wobei	L_i	= Leistungsfähigkeit des Stromes i	[PWE/h]
	G_i	= Grundleistungsfähigkeit des Stromes i	[PWE/h]
	p_o	= Abminderungsfaktor	[-]

3.8.2 Maximale Leistungsfähigkeit von Kreuzungen

$$[F16] \quad L_i = G_i$$

wobei	i	= 1, 6, 7, 12	[-]
	L_i	= Leistungsfähigkeit des Stromes i	[PWE/h]
	G_i	= Grundleistungsfähigkeit des Stromes i	[PWE/h]

² In neueren Publikationen wird anstelle des Begriffes Leistungsfähigkeit der Begriff Kapazität verwendet.

für die Ströme 5, 11 gilt

$$[F17] \quad p_x = p_{0,1} \times p_{0,7} \quad \text{mit } p_{0,1} \text{ und } p_{0,7} \text{ gemäss [F13]}$$

$$[F18] \quad L_5 = p_x \times G_5$$

$$[F19] \quad L_{11} = p_x \times G_{11}$$

$$[F20] \quad p_{0,5} = 1 - \frac{q_5}{L_5} \quad \text{bzw.} \quad p_{0,11} = 1 - \frac{q_{11}}{L_{11}}$$

für die Ströme 4, 10 gilt

$$[F21] \quad p_{y,i} = p_x \times p_{0,i} \quad \text{mit } p_x \text{ gemäss [F17]}$$

wobei $i = 5, 11$

[-]

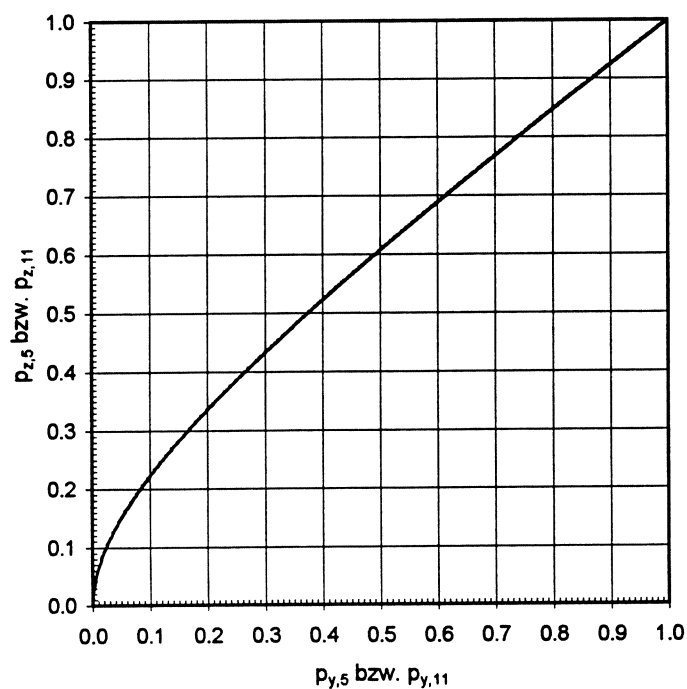
Die tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten $p_{z,5}$ und $p_{z,11}$ der staufreien Zustände in den Strömen 1, 7 und 5 bzw. 1, 7 und 11 können mit den Formeln [F22], [F23], [F24] berechnet oder mit dem Diagramm gemäss Abb. 3 bestimmt werden.

$$[F22] \quad p_{z,i} = 0.65 * p_{yi} - \frac{p_{yi}}{p_{yi} + 3} + 0.6 \times \sqrt{p_{yi}}$$

$$[F23] \quad L_4 = p_{z,11} \times p_{0,12} \times G_4$$

$$[F24] \quad L_{10} = p_{z,5} \times p_{0,6} \times G_{10}$$

Abb. 3 *Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes in den Strömen 2. und 3. Ranges unter Berücksichtigung statistischer Abhängigkeiten*



3.9 MISCHSTREIFEN

Als Mischstreifen werden Fahrstreifen im Knotenbereich bezeichnet, die von verschiedenen Strömen mit unterschiedlicher Fahrtrichtung und unterschiedlichem Rang gemeinsam genutzt werden und auf dem die Fahrzeuge auch an der Haltelinie durch eine Aufweitung der Zufahrt nicht nebeneinander stehen können. In Mischstreifen können sich die einzelnen Ströme gegenseitig behindern.

3.9.1 Leistungsfähigkeit L_m von Mischstreifen auf der Hauptstrasse

Auch auf der Hauptstrasse können fehlende Abbiegestreifen für den Linksabbieger zu Behinderungen für erstrangige Fahrzeuge führen. Eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Rückstaus kann mit folgender Formel erfolgen:

$$[F25] \quad p_{0,i}^* = 1 - \frac{1 - p_{0,i}}{1 - \frac{q_j \times 2 + q_k \times 2}{3600}}$$

wobei $i = 1$ bzw. 7
 $j = 2$ bzw. 8
 $k = 3$ bzw. 9
 Bem.: q_j und q_k müssen gemäss den Formeln [F9] oder [F10] berechnet werden

$q_{j,k} =$ vorhandene Verkehrsstärke des Geradeausfahrers bzw. des Rechtsabbiegers [PWE/h]

Um den Einfluss des Rückstaus auf den Hauptstrassenzufahrten auf die Leistungsfähigkeit der untergeordneten Nebenströme zu berücksichtigen, muss in den Formeln [F15], [F17], [F21] für die Ströme 1 und 7 jeweils $p_{0,1}$ bzw. $p_{0,7}$ durch $p_{0,1}^*$ bzw. $p_{0,7}^*$ gemäss Formel [F25] ersetzt werden.

3.9.2 Leistungsfähigkeit L_m von Mischstreifen auf der Nebenstrasse

$$[F26] \quad \frac{1}{L_m} = \sum \frac{b_i}{L_i}$$

$$[F27] \quad b_i = \frac{q_i}{q_m} \quad \text{mit} \quad q_m = \sum q_i$$

wobei $i = 4, 5, 6$ bzw. 10, 11, 12
 $m = 4+5, 4+6, 5+6, 4+5+6, 10+11, 10+12, 11+12, 10+11+12$ für Kreuzungen
 $m = 4+6, 10+12$ für Einmündungen
 $L_m =$ Leistungsfähigkeit des Mischstreifens
 $a_i =$ Auslastungsgrad des Mischstreifens
 $q_i =$ vorhandene Verkehrsstärke des Nebenstromes
 $L_i =$ Leistungsfähigkeit des Stromes i nach den Formeln [F16], [F15], [F18], [F19] oder [F23], [F24]

3.10 LEISTUNGSRESERVE R DER EINZELNEN STRÖME

Die maximale Leistungsfähigkeit beschreibt einen Verkehrszustand mit unzumutbar langen Wartezeiten und grossen Staulängen. Für die praktische Dimensionierung wird der Begriff Reserveleistung R als Differenz der Leistungsfähigkeit und der Bemessungsverkehrsstärke verwendet. Je grösser die Reserveleistung R ist, desto besser wird die Qualität des Verkehrsablaufs bezeichnet.

Als vorhandene Belastungsreserve R_{vorh} wird die Differenz zwischen der Leistungsfähigkeit L und der vorhandenen Verkehrsstärke q eines Stromes bezeichnet. Die erforderliche Belastungsreserve R_{erf} dagegen ist die Differenz zwischen der Leistungsfähigkeit und einer vorgegebener, zulässigen Verkehrsstärke eines Stromes, welcher die Einhaltung einer angestrebten Verkehrsqualität gewährleistet.

$$[F28] \quad R_i = L_i - q_i$$

$$[F29] \quad R_m = L_m - q_m$$

wobei	i	=	1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12	
	m	=	Index für einen Mischstrom	
	R_i, R_m	=	vorhandene Belastungsreserve des Stromes i bzw. m	[PWE/h]
	q_i, q_m	=	vorhandene Verkehrsstärke i bzw. m des Nebenstromes	[PWE/h]
	L_i, L_m	=	Leistungsfähigkeit des Stromes i bzw. m	[PWE/h]

3.11 MITTLERE WARTEZEIT

Zwischen der Reserveleistung R und der mit der mittleren Wartezeit ausgedrückten Verkehrsqualität besteht ein Zusammenhang:

$$[F30] \quad w_i = f(q_{pi}, R_i)$$

wobei	i	=	1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12	
	w_i	=	mittlere Wartezeit der Fahrzeuge im Strom i	[sec]
	f	=	Abbildungsvorschrift nach Abb. 4 und Abb. 5	
	q_{pi}	=	massgebende Hauptstrombelastung nach [F1] - [F8]	[Fz/h]
	R_i	=	vorhandene Belastungsreserve des Stromes i	[PWE/h]

Die Verwendung der Abb. 4 und Abb. 5 für die Bestimmung der Wartezeit für Mischstreifen ist nicht möglich.³

³ Eine Abschätzung der mittleren Wartezeit für Mischstreifen kann mit der Abb. 9 gemäss Kapitel 6.4 annäherungsweise erfolgen

Abb. 4 Zusammenhang zwischen Belastungsreserve und mittlerer Wartezeit für Ströme mit Rang 2

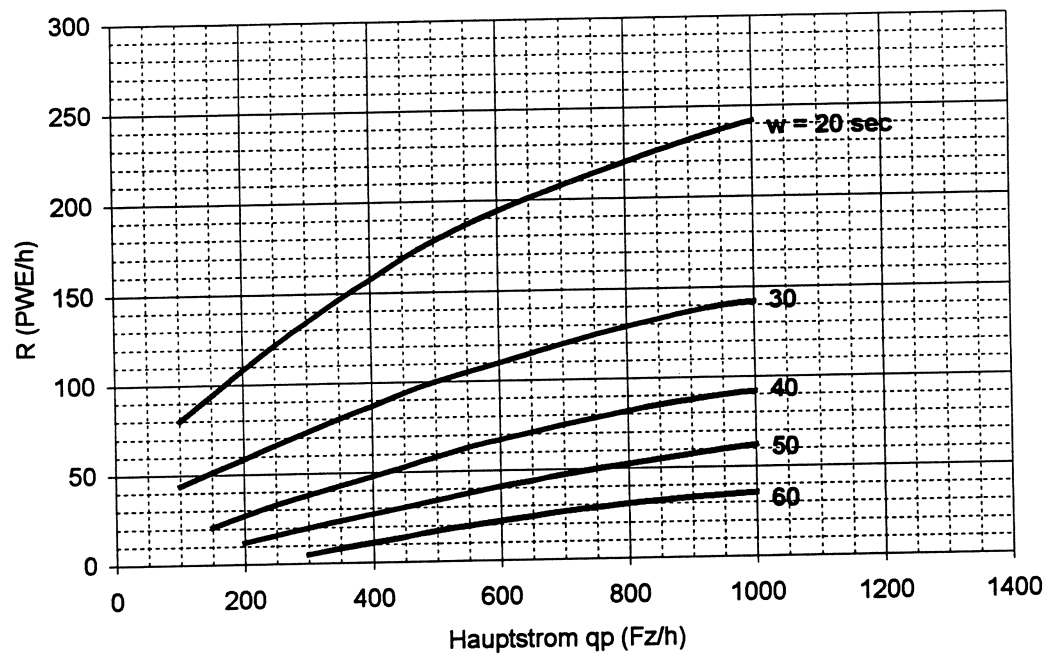
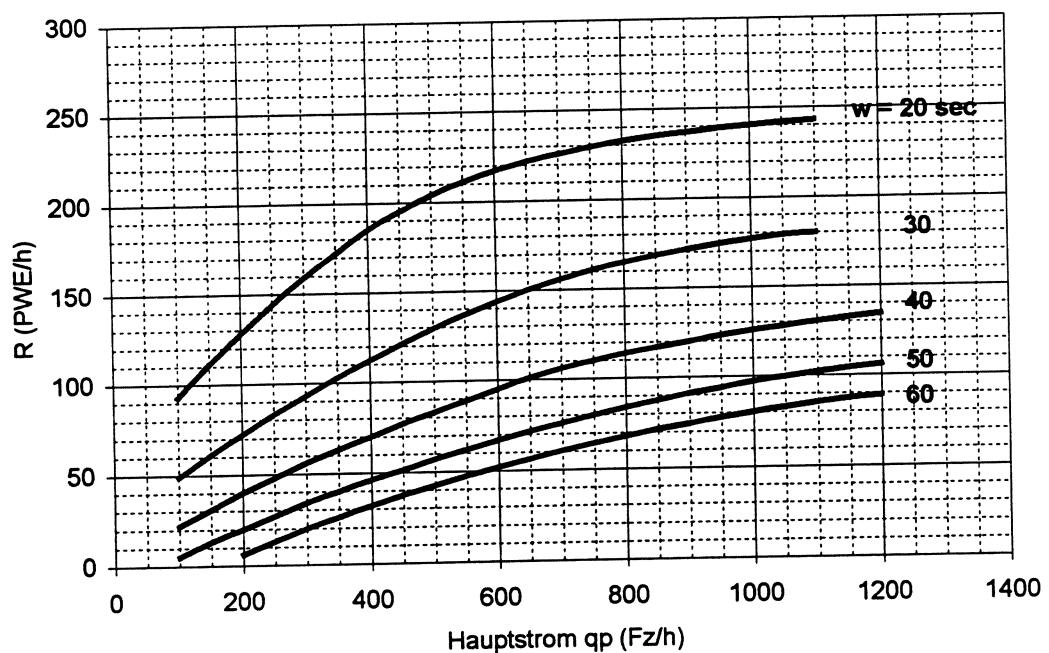


Abb. 5 Zusammenhang zwischen Belastungsreserve und mittlerer Wartezeit für Ströme mit Rang 3 und 4



3.12 PRAKTISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Die praktische Leistungsfähigkeit P_i stellt die maximale Verkehrsbelastung für den Strom i dar, damit ein durch die Wartezeit definiertes Niveau der Verkehrsqualität eingehalten wird.

$$[F31] \quad P_i = L_i - R_i$$

$$[F32] \quad P_m = L_m - R_m$$

wobei $i = 1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12$

Die Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes kann als ausreichend bezeichnet werden, wenn in allen untergeordneten Strömen i die vorhandene Verkehrsstärke q_i kleiner als P_i bleibt.

$$[F33] \quad q_i \leq P_i$$

$$[F34] \quad q_m \leq P_m$$

wobei $i = 1, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12$

3.13 BEURTEILUNG DER QUALITÄT DES VERKEHRSABLAUFES

Im Deutschen Merkblatt 1991 wird die Qualität in Abhängigkeit von der maximalen Leistungsfähigkeit L_i und der vorhandenen Verkehrsstärke q_i in den untergeordneten Strömen dargestellt. Je grösser die Differenz $R_i = L_i - q_i$ ist, desto besser wird die Qualität des Verkehrsablaufes. Die Beurteilung erfolgt nach den folgenden Ansätzen:

$R \geq 100$ in allen untergeordneten Strömen

- Ausreichende Qualität des Verkehrsablaufes.
- Wartezeit im Mittel unter 45 sec
- Höhere mittlere Wartezeiten bei Steuerung durch Lichtsignalanlage

$0 < R < 100$ in einem untergeordneten Strom

- Kritische Verkehrsqualität
- Im Normalfall längere Wartezeiten als bei Knoten mit Lichtsignalanlage
- Detailprüfung mit Simulationsprogramm sinnvoll.

$R < 0$ in einem untergeordneten Strom

- Leistungsfähigkeit des Knotens überschritten
- Unzumutbar hohe Wartezeiten und Rückstaulängen
- Die Einrichtung einer Lichtsignalanlage sollte geprüft werden

4. FORSCHUNGSAUFRAG 35/89

Die Ergebnisse des Forschungsauftrages 35/89 sind in einem Zwischenbericht enthalten. An dieser Stelle erfolgt eine Zusammenfassung der Untersuchungen und Ergebnisse.

4.1 UNTERSUCHUNGSOBJEKTE

Im Rahmen des Forschungsauftrages 35/89 wurden die Untersuchungen auf die Kreuzung Hard in Muhen (Kantonsstrasse Aarau - Schöftland) und die Einmündung Touring in Unterentfelden (Kantonsstrasse Zofingen - Lenzburg) beschränkt. Bei beiden Knoten wird die Hauptstrasse durch das Hauptstrassensignal gekennzeichnet und die Nebenstrassen sind jeweils mit einem "STOP" belastet.

Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit beim Knoten Hard beträgt im Knotenbereich 60 km/h. Der Kreuzungswinkel beträgt rund 80 gon wobei der vorderste Aufstellplatz jeweils rechtwinklig zur Hauptrichtung steht. Die Sichtweite ist grösser als 120 m. Das Gefälle der vier Knotenarme beträgt $\pm 0\%$. Der Knoten weist auf der Hauptstrasse jeweils einen Linksabbiegestreifen auf. Beim Rechtsabbieger sind Sperrflächen (gemalte Dreiecksinseln) vorhanden und zusätzlich wurden diese Streifen mit "Kein Vortritt" belastet. Für die Nebenströme stehen keine separaten Streifen zur Verfügung. Die Beobachtungen haben aber gezeigt, dass sich an der STOP - Linie drei PW nebeneinander aufreihen können.

Für den Knoten Touring beträgt die signalisierte Höchstgeschwindigkeit im Knotenbereich ebenfalls 60 km/h. Der Kreuzungswinkel beträgt 100 gon und die Sichtweiten ist grösser als 120 m. Das Gefälle sämtlicher drei Knotenarme beträgt rund 0%. Für alle ein- und abbiegenden Ströme stehen separate Streifen zur Verfügung. Beim Rechtsabbieger ist nur eine Sperrfläche vorhanden.

4.2 ERHEBUNGSMETHODE

Mittels Feldaufnahmen im Juli 1990 wurden die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten auf der Hauptstrasse, die Verkehrsbelastung aufgeteilt nach den einzelnen Knotenströmen und die Staulängen erhoben.

Die Erfassung der Geschwindigkeit und der Verkehrsbelastung auf der Hauptstrasse erfolgte mit Hilfe von auf die Fahrbahn aufgeklebten Induktionsschlaufen. Die Anordnung der Schlaufen ermöglichte nur die Erfassung der Geradeausfahrer auf der Hauptstrasse (Ströme 2 und 8).

Für die Erhebung der Zeitlücken und der Stausituationen wurden auf einer Hebebühne zwei Videokameras installiert. Mit einer Kamera wurde der unmittelbare Kreuzungsbereich erfasst. Damit konnten die Belastungen der einzelnen Streifen und dank der Zeiteinblendung auch die Zeitlücken ausgewertet werden. Die zweite Kamera diente zur gleichzeitigen Beobachtung des Stauraumes.

4.3 BERECHNUNGEN

Die Auswertung der automatischen Verkehrszählung erfolgte in 1-h Intervallen ohne Unterscheidung der Fahrzeugkategorien. Die Ermittlung der genauen Belastung der einzelnen Streifen, unterschieden nach den Kategorien Personenwagen, Lastwagen, Lastenzüge und Motorräder erfolgte mittels der Videoaufnahmen.

Für die Ermittlung der Verkehrsbelastungen der Nebenströme in PW-Einheiten wurden Umrechnungsfaktoren verwendet, die den bisherigen Erfahrungswerten für Knoten in der Schweiz entsprechen. Bei einer Längsneigung von $\pm 0\%$ in den Knotenzufahrten wurden die Faktoren 1 (1) für PW, 2 (1.5) für LW, 2 (2) für LZ und 1 (0.5) für MR verwendet (in Klammern Werte Merkblatt).

Die Untersuchung der Leistungsfähigkeit beschränkte sich auf die Überprüfung des Linkseinbieger (Kreuzung Hard Strom 10, Einmündung Touring Strom 4).

Die Grenz- und Folgezeitlücken konnten mit Hilfe der Knotenkamera dank der eingeblendeten Zeit (Angabe auf 1/10 sec) ermittelt werden. In einer ersten Auswertung wurden nur ausgenützte Grenzzeitlücken zwischen 0 und 30 sec und nicht Ausgenützte über 4 sec berücksichtigt. Bei den einfahrenden Fahrzeugen wurden die Kategorien PW, LW, LZ und landwirtschaftliche Fahrzeuge unterschieden. Für die Berechnung der mittleren Grenzzeitlücke wurden nur Personenwagen (andere Kategorien zu wenig Daten), Zeitlücken während Stauphasen und Lücken zwischen 4 und 30 sec berücksichtigt. Die Bestimmung der Folgezeitlücken wurde ebenfalls nur für Personenwagen (Datenmenge) durchgeführt.

4.4 ERGEBNISSE

4.4.1 Verkehrsmengen

Bei beiden Knoten konnte eine tageszeitlich abhängige unterschiedliche Belastung mit jeweils einer deutliche Morgen- und Abendspitze sowie einer kleinerer Mittagsspitze auf den beiden Hauptströmen festgestellt werden.

4.4.2 Geschwindigkeitsverhalten

Die Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen erfolgte in 1-h Intervallen. Die mittleren Geschwindigkeiten während der Nachtstunden (24 - 06 Uhr) sind nicht repräsentativ, da die erfasste Datenmenge zu klein ist. Es konnte die Tendenz festgestellt werden, dass während unseren Videoaufnahmen langsamer gefahren wurde, wobei aber die gefahrene Geschwindigkeit sehr gut mit der Signalisierten übereinstimmt (± 3 km/h). Beim Knoten Hard konnten (im Gegensatz zum Knoten Touring) zudem von der Richtung abhängige Geschwindigkeiten festgestellt werden.

4.4.3 Beobachtung des Stauraumes

Der Stauraum wurde jeweils mit einer separaten Kamera beobachtet. Beim Knoten Hard konnten so die Ströme 10, 11 und 12 und bei der Einmündung Touring die Ströme 4 und 6 beobachtet und ausgewertet werden. Beim Knoten Hard konnten sowohl Situationen mit ausgeprägten Staus als auch solche ohne Wartezeiten beobachtet werden. Bei der Einmündung Touring erwiesen sich die Belastungen als zu gering, so dass Stausituationen von mindestens 5 Minuten Länge praktisch ausblieben.

4.4.4 Zeitlücken

Die Berechnungen der Grenz- und Folgezeitlücken wurden analog den Berechnungen von Harders durchgeführt (vgl. "Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstrassen", Schriftenreihe Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 216, Bonn 1976).

Tab. 5 Grenzzeitlücken

Grenzzeitlücken		Linkseinbiegen		Kreuzen
		Hard	Touring	Hard
		Strom 10	Strom 4	Strom 11
vm gemessen (Hauptstrom)	[km/h]	62.4	63.3	62.4
Reduktion tf auf v = 60 km/h ⁴	[sec]	- 0.18	- 0.27	- 0.18
tg berechnet bei vm	[sec]	7.02	6.85	6.76
tg (B+E) (v=60 km/h) ⁵	[sec]	6.84	6.58	6.58
tg Harders (v=60 km/h)	[sec]	7.18	7.18	6.53
100*tg (B+E) / tg (Harders)	[%]	95	92 ⁶	101 ⁶

Tab. 6 Folgezeitlücken

Folgezeitlücken		Linkseinbiegen		Kreuzen
		Hard	Touring	Hard
		Strom 10	Strom 4	Strom 11
vm gemessen (Hauptstrom)	[km/h]	62.4	63.3	62.4
Reduktion tf auf v = 60 km/h ⁴	[sec]	- 0.13	- 0.20	- 0.16
tf berechnet bei vm	[sec]	3.70	3.80	4.50
tf (B+E) bei v = 60 km/h ⁵	[sec]	3.57	3.60	4.34
tf Harders bei v = 60 km/h	[sec]	3.90	3.90	4.01
100*tf (B+E) / tf (Harders)	[%]	92	92 ⁶	108 ⁶

Tendenziell wurden etwas kleinere Zeitlücken gemessen, als dies Harders in seinen Untersuchungen festgestellt hat. Harders untersuchte insgesamt 12 Kreuzungen und 14 Einmündungen bei denen die einzelnen Knotenmittelwerte bis zu 20 % vom Gesamtmittelwert abwichen. Für das Linkseinbiegen liegen die durch Ballmer + Erb fest-

⁴ Reduktion aufgrund Abstufung bei Zeitlücken von Harders

⁵ B+E = Ballmer + Erb

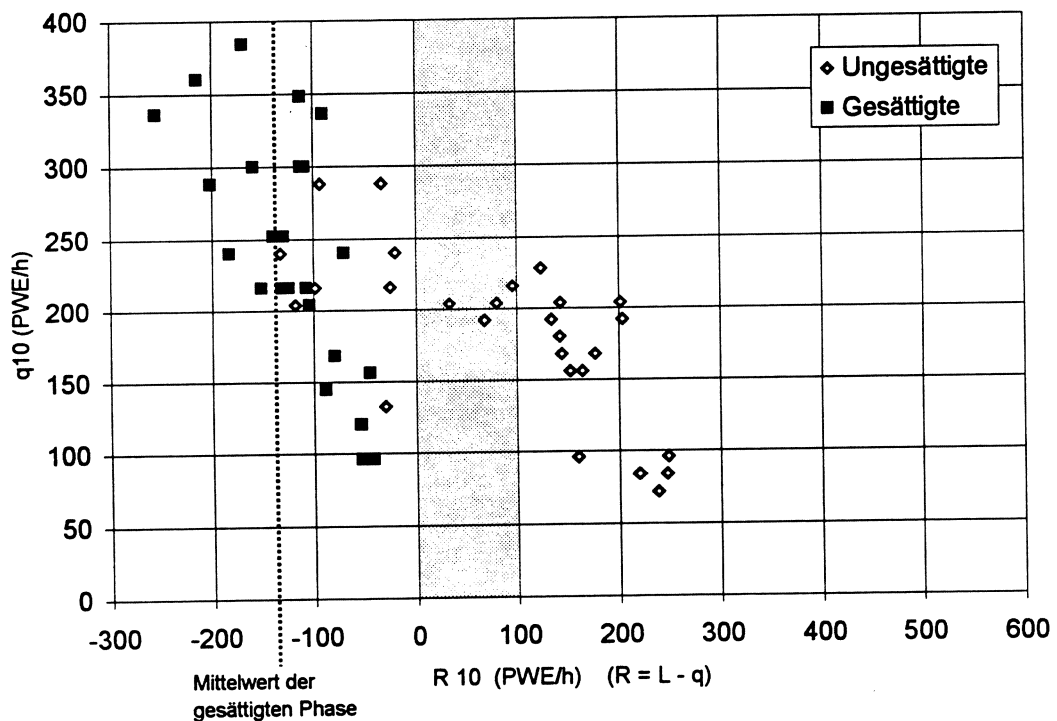
⁶ Datenmenge gering

gestellten Grenzzeitlücken rund 5 - 8 % und die Folgezeitlücke rund 8 % tiefer als diejenigen von Harders. Für das Kreuzen wurden dagegen um 1% (Grenzzeitlücken) und 8% (Folgezeitlücken) höhere Werte festgestellt.

4.4.5 Leistungsreserve

Bei den untersuchten Stichproben ergaben sich für die Linkseinbieger bei den beiden Knoten zum Teil erhebliche Differenzen. Beim Knoten Hard wurde die Leistungsfähigkeit bzw. Leistungsreserve von insgesamt 51 5'-Intervallen berechnet. Davon waren 24 mit gesättigten und 27 Intervalle mit ungesättigten Phasen⁷. Der Mittelwert der gesättigten Phase liegt um rund 170 PWE/h tiefer als der Mittelwert (50 PWE/h) des Bereiches 0 - 100 PWE/h, der zwischen eindeutig genügender und eindeutig ungenügender Leistungsreserve liegt. Diese vorliegenden Resultate stehen in einem Widerspruch zu den Erwartungen. Insbesondere werden bei der gesättigten Phase für den Strom 10 nur negative Leistungsreserven erreicht, die zum Teil deutlich unter 0 liegen.

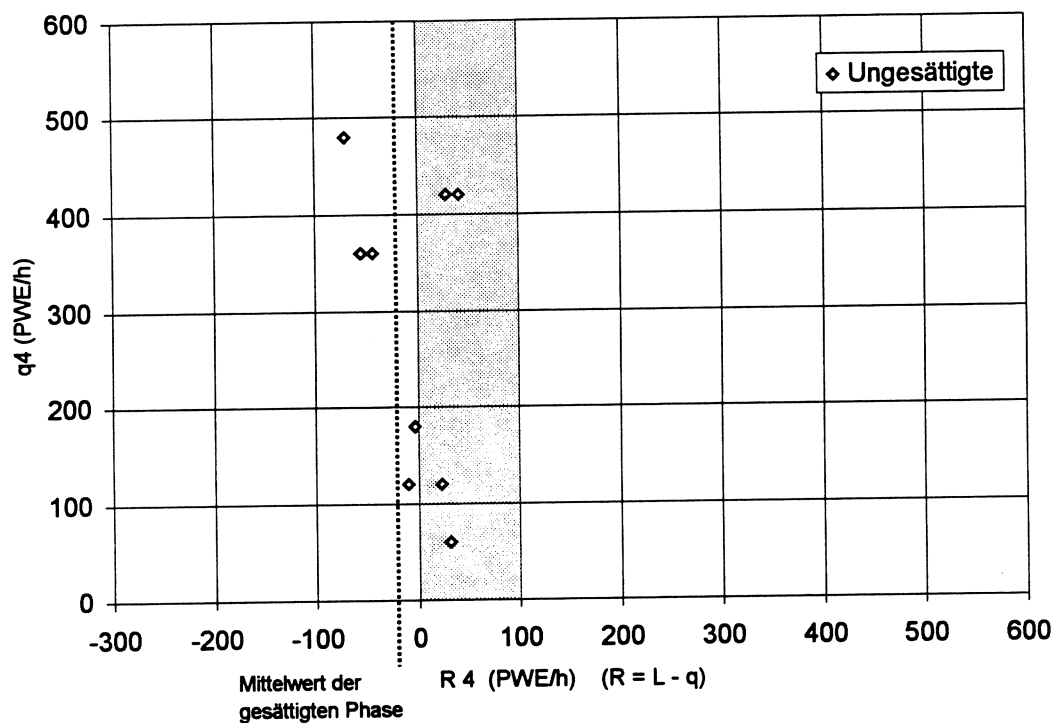
Abb. 6 Knoten Hard: Gesättigte und ungesättigte Phase. Verhältnis Belastung Strom 10 zu Reserveleistung (5 Min. Intervalle)



⁷ Als gesättigt werden diejenigen Intervalle bezeichnet, in denen immer mindestens ein Fahrzeug an der Haltelinie wartet. Als ungesättigt werden diejenigen Intervalle bezeichnet, in denen nicht immer mindestens ein Fahrzeug an der Haltelinie gewartet hat. Teilweise gesättigte Intervalle sind zusammengefasste gesättigte Teilintervalle die mit einzelnen ungesättigten Intervallen durchsetzt sind.

Beim Knoten Touring wurde die Leistungsfähigkeit bzw. Leistungsreserve von 49 5'-Intervallen mit ungesättigten Phasen berechnet. Aufgrund der fehlenden gesättigten 5'-Intervallen wurden zusätzlich noch Berechnungen mit insgesamt 9 gesättigten 1'-Intervallen durchgeführt. Der Mittelwert der gesättigten Phase liegt um rund 60 PWE/h tiefer als der Mittelwert (50 PWE/h) des Bereiches 0 - 100 PWE/h, der zwischen eindeutig genügender und eindeutig ungenügender Leistungsreserve liegt. Bei diesem Knoten kann eine etwas bessere Übereinstimmung als beim Knoten Hard festgestellt werden. Aber auch hier treten in den ungesättigten Intervallen ohne eigentliche Stausituationen negative Leistungsreserven auf.

Abb. 7 Knoten Touring: Gesättigte Phase. Verhältnis Belastung Strom 4 zu Reserverleistung (1 Min. Intervalle)



4.5 PLAUSIBILITÄTSKONTROLLE

Neben dem Vergleich der von Harders ermittelten und der durch uns beobachteten Zeitlücken (vgl. Kapitel 4.4.3) wurde der Einfluss der Faktoren Geschwindigkeit und PW-Einheiten auf die Höhe der Leistungsreserve am Beispiel der Abendspitzenstunde vom 11.7.1990 abgeschätzt. Zusätzlich wurde noch eine Berechnung mit dem Simulationsprogramm KNOSIMO⁸ durchgeführt.

⁸ Das Programm KNOSIMO liefert durch eine realistische Nachbildung des Verkehrsablaufes eine detaillierte Beurteilung der Leistungsfähigkeit von unregelmäßigen Knoten. Das Simulationsprogramm basiert auf einem mikroskopischen, ereignisorientierten Modell.

4.5.1 Einfluss der Zeitlücken auf die Leistungsreserve

Bei der Beurteilung des Einflusses der Zeitlücken wurden die Aspekte der Genauigkeit (Nachkommastellen) und die tatsächlich gemessenen Grössen der Zeitlücken geprüft. Bei der Verwendung der Zeitlücken nach Harders mit zwei Nachkommastellen (im Merkblatt nur eine Nachkommastelle) ergeben sich für die Abendspitzenstunde Knoten Hard vom 11.7 nur für die Beziehung Linksabbiegen aus der Hauptstrasse (Ströme 1 und 7) um 12 und 18 PWE/h bessere Reserveleistungen. Für alle anderen Ströme betragen die Differenzen zwischen +2 und -1 PWE/h.

Geht man von den tatsächlich festgestellten Zeitlücken nach B+E aus (vgl. Kapitel 4.4.4), so nehmen die Reserveleistungen für das Linkseinbiegen (Ströme 4 und 10) um 15 bzw. 11 PWE/h zu, wogegen für das Kreuzen (Ströme 5 und 11) eine Abnahme von 11 bzw. 8 PWE/h festgestellt werden kann.

Bei einer generellen Reduktion der Zeitlücken nach Harders (Genauigkeit: 2 Nachkommastellen) um 10 bzw. 20 % ergeben sich für den Strom 10 die folgenden Reserveleistungen:

t_g, t_f Harders	:	$R_{10} = -109$ PWE
t_g, t_f Harders - 10 %	:	$R_{10} = -71$ PWE
t_g, t_f Harders - 20 %	:	$R_{10} = -12$ PWE

4.5.2 Einfluss der Geschwindigkeit

Die Abnahme der Leistungsreserve R bei der Veränderung der Geschwindigkeit hängt vom Geschwindigkeitsbereich und von der Höhe von R ab. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Abnahme von R bei einem hohen R oder bei tiefer Geschwindigkeit grösser ist, als bei kleinem R oder bei hohen Geschwindigkeiten. So vermindert sich z.B. im Bereich 60 - 65 km/h die Leistungsreserve um 4 bis 23 PWE/h pro Geschwindigkeitszunahme um 1 km/h. Im Wertebereich $R \leq 100$ werden Veränderungen von rund 5 PWE/h erreicht. Für den Knoten Hard ergaben sich bezogen auf die Abendspitzenstunde (11.7.1990) folgende Resultate:

v_m gemessen	$v_m = 58.4$ km/h		$R_{10} = -110$ PWE
Berechnungen	$v_m - 10$	$v = 48.4$ km/h	$R_{10} = -58$ PWE
	$v_m - 5$	$v = 53.4$ km/h	$R_{10} = -87$ PWE
	$v_m + 5$	$v = 63.4$ km/h	$R_{10} = -128$ PWE
	$v_m + 10$	$v = 68.4$ km/h	$R_{10} = -143$ PWE

4.5.3 Einfluss der Umrechnungsfaktoren Fahrzeugäquivalente

Wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, wurde für die Ermittlung der PW-Einheiten andere Multiplikationsfaktoren als im Merkblatt verwendet. Die Unterschiede bestehen für die beiden Kategorien Lastwagen (Faktor 2 anstatt 1.5) und Motorräder (Faktor 1 anstatt 0.5). Die Auswirkungen auf die Reserveleistung sind äusserst gering.

4.5.4 Berechnung mit dem Simulationsprogramm KNOSIMO

Für den Knoten Hard wurde eine Berechnung mit dem Simulationsprogramm KNOSIMO durchgeführt. Dabei ergab sich für den Strom 10 ein mittlerer Rückstau von 16.7 Fz und ein maximaler Rückstau von sogar 63 Fahrzeuge. Der effektiv festgestellte Stau betrug dagegen im Stundenmittel 10.6 Fz und im Maximum 22 Fahrzeuge. Im weiteren sind in dieser Abendspitzenstunde effektiv total 187 Fahrzeuge auf dem Strom 10 ausgefahren. Gemäss KNOSIMO waren es jedoch nur 149 Fahrzeuge. Dieses Beispiel bestätigt die bisherigen Erkenntnisse, dass dieses Simulationsprogramm ebenfalls eine für schweizerische Verhältnisse zu geringe Leistungsfähigkeit ausweist.

4.6 FOLGERUNGEN

Die Leistungsreserve, nach Deutschem Merkblatt berechnet, liegt beim Linkseinbieger beim Knoten Hard um 170 PWE/h und beim Knoten Touring um 60 PWE/h zu tief. Die Plausibilitätskontrolle hat ergeben, dass diese Werte infolge Geschwindigkeit, Zeitlücken und PWE-Koeffizienten nur um maximal 20 PWE/h verbessert werden können.

Bei den untersuchten Stichproben ergeben sich bei der Kreuzung Hard für den Linkseinbieger (Strom 10, 4. Ordnung) eine Reserveleistung, die vom tatsächlichen Verkehrszustand erheblich abweicht. Bei der Einmündung Touring ist für den Linkseinbieger (Strom 4, 3. Ordnung) eine etwas bessere Übereinstimmung festzustellen. Im weiteren wurde auch festgestellt, dass Berechnungen mit dem Simulationsmodell KNOSIMO zu geringe Leistungsfähigkeiten ausweisen.

Aufgrund der Resultate der zwei Versuchsknoten konnte vermutet werden, dass das in Deutschland angewendete Verfahren in dieser Form nicht vollständig auf die Schweiz übertragen werden kann. Eine Anwendung ist nur denkbar, wenn spezielle Parameter gefunden werden können, welche die Verhältnisse in der Schweiz berücksichtigen. Dazu muss die vorliegende Datenmenge für eine solche abschliessende Aussage jedoch als zu gering bezeichnet werden. Es wird empfohlen, die Untersuchungen auf eine grössere Anzahl von Knoten mit unterschiedlichen Bedingungen (Geometrie, Sichtverhältnisse, Steigungen, Städtisches Gebiet, Überland usw.) auszudehnen.

5. FORSCHUNGSAUFTAG 13/95

5.1 UNTERSUCHUNGSOBJEKTE

Die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des deutschen Merkblattes (keine Beeinflussung durch benachbarte Lichtsignalanlagen oder Barrieren, unbehinderter Verkehrsfluss in den Hauptströmen, kein abknickender Hauptstrom, keine Störung durch hohes Fahrrad- und Fussgängeraufkommen) und die Bedingung für die Erhebung (Stau auf dem zu untersuchenden Nebenstrom) reduzierten das Angebot von möglichen Untersuchungsobjekten sehr stark.

Die Erhebungen konnten an insgesamt 18 Knoten in den Jahren 1990 und 1995 – 1997 durchgeführt werden. Davon konnten 14 Knoten für die eigentliche Ermittlung der Leistungsfähigkeit verwendet werden. Vier Knoten wiesen bei der Erhebung eine zu geringe Staubildung auf. Die wichtigsten Merkmale dieser Objekte sind in Anhang 4 zusammengestellt.

Die Berechnungen für den Knoten Hard wurden überarbeitet, da die Auswerteart im Rahmen des Forschungsauftrages 35/89 nicht derjenigen des FA 13/95 entsprach und somit ein direkter Vergleich nicht möglich war. Dies führte gegenüber den Werten aus dem Forschungsauftrag 35/89 zu abweichenden Resultaten.

Tab. 7 Untersuchungsobjekte

Nr.	Ort	Knotenbezeichnung	Äste	V sig	Erhebung
1	Muhen	Hard	4	60	1990
2	Ofringen	Wegweiser	4	60	1995
3	Buchs	Gysistrasse	4	50	1995
4	Brugg	Vogelsangerstrasse	4	60	1996
5	Döttingen	Monti	4	50	1996
6	Kölliken	Kirchgasse	4	50	1996
7	Ofringen	Lanz	4	60	1996
8	Rupperswil	Strassenverkehrsamt (SVA)	4	80	1996
9	Schinz nach Bad	Weinbaugenossenschaft (WBG)	4	50	1996
10	Sisseln	K293 / K295	3	60	1996
11	Solothurn	Langendorfstrasse	3	50	1996
12	Zofingen	Henzmannstrasse	4	50	1996
13	Rothrist	Rössli	4	50	1997
14	Schinz nach Bad	Rössli	3	50	1997

Tab. 8 Knoten mit zu geringer Staubildung⁹

Nr.	Ort	Knotenbezeichnung	Äste	V sig	Erhebung
15	Unterentfelden	Touring	3	60	1990
16	Buchs	Oberdorfstrasse	3	50	1995
17	Windisch	Mülligerstrasse	3	50	1996
18	Aarau	Gais	3	50	1996

Die 14 ausgewerteten Knoten weisen die folgenden Hauptcharakteristiken auf (vgl. Anhang 4):

Knotentyp	11 Kreuzungen 3 Einmündungen
Signalisierte Geschwindigkeit:	7 Knoten mit V sig = 50 km/h 6 Knoten mit V sig = 60 km/h 1 Knoten mit V sig = 80 km/h
Sichtweite	13 Knoten > 120 m 1 Knoten < 120 m
Steigungsverhältnisse	alle 0% ausser 1 Knoten Hauptstrom mit 3.5% 1 Knoten Nebenstrom mit 7%
Vortrittsregelung	4 Kreuzungen mit nur "Kein Vortritt" 4 Kreuzungen mit nur "STOP" 3 Kreuzungen mit "Kein Vortritt" und "STOP" 2 Einmündungen mit "Kein Vortritt" 1 Einmündung mit "STOP"

5.2 ERHEBUNGSMETHODE

Die Untersuchungen beschränkten sich auf eine Überprüfung des Linkseinbiegers (Strom 4 bzw. 10), da praktisch nur bei diesen Streifen kritische Zustände aufgetreten sind. In der Erhebung wurde die maximale Leistungsfähigkeit des Nebenstromes festgestellt, indem die in einer Stauperiode in die Kreuzung ausfahrenden Fahrzeuge ermittelt wurden. Damit konnte in den Stauphasen eine Reserveleistung von ~ 0 PWE/h erwartet werden.

Gegenüber den ausführlichen Erhebungen des ersten Forschungsauftrages FA 35/89 wurden bei den neueren Feldaufnahmen Änderungen und Vereinfachungen durchgeführt. Insbesondere wurde auf Videoaufnahmen für die Ermittlung der Zeitlücken verzichtet.

⁹ Diese Knoten werden in der Folge nicht mehr behandelt.

- Felderhebungen:**
- Erhebungen der Strombelastungen in 1 Minuten Intervallen
 - Erhebung der minimalen und maximalen Staulänge im kritischen Strom (1 Minuten Intervall)
 - Zählung des Zuflusses beim kritischen Strom (Bei den meisten Erhebungen ab 1996 wurden auf dem Nebenstrom zusätzlich zu den in den Hauptstrom einmündenden auch die auf das Stauende zufahrenden Fahrzeuge erfasst. Damit sollen Rückschlüsse auf die Wartezeiten gewonnen werden.
 - Erfassung der Knotengeometrie
- Auswertung:**
- Zusammenstellung von gesättigten, teilweise gesättigten und ungesättigten Intervallen
 - Berechnung der Reserveleistungen
 - Vergleich
 - Interpretation

5.3 BERECHNUNGEN

In den Berechnungen wurde der Aspekt der schiefwinkligen Einmündungen bzw. Kreuzungen nicht berücksichtigt, da bei allen erhobenen Knoten der vorderste Aufstellplatz rechtwinklig zum Hauptstrom lag.

Zur Beurteilung der Knoten wurden die einzelnen Stauintervalle mit einer Mindestlänge von 4 Minuten zu einem Gesamtintervall zusammengefasst. Damit ergaben sich Beurteilungslängen von 11 bis 74 Minuten.

Für den Knoten Hard wurden drei Zustände unterschieden. Sie stellen die drei verschiedenen Beobachtungszeiträume Morgen (ca. 7 - 9 Uhr), Mittag (ca. 13 - 14 Uhr) und Abend (ca. 17 - 18.30 Uhr) dar und berücksichtigen die unterschiedlichen Belastungszustände der einzelnen Ströme.

Die Berechnungen wurden mit dem Computerprogramm KNOBEL (streng nach Merkblatt) durchgeführt. Mit dem Programm KNOBEL können die Knotenbelastungen an Kreuzungen und Einmündungen graphisch dargestellt und ausgegeben werden sowie die Leistungsfähigkeit gemäss Merkblatt berechnet werden.

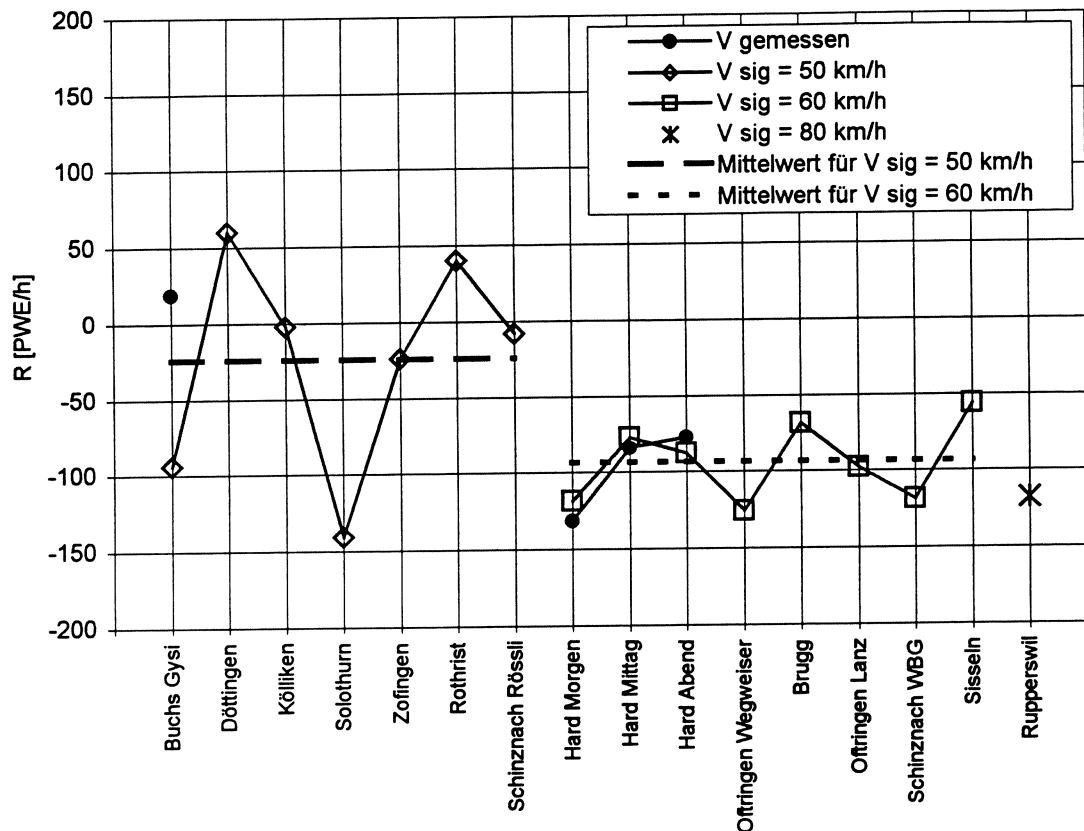
5.4 ERGEBNISSE

5.4.1 Reserveleistungen

In der nachfolgenden Tabelle wurden die Reserveleistungen aufgrund der signalisierten Geschwindigkeit sortiert. Zum Vergleich wurden für die Knoten 1 und 3 die Reserveleistungen bei Berücksichtigung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit aufgeführt.

Tab. 9 Reserveleistungen

Objekt		Inter- vall	V gemes- sen	Reserveleistungen			
Nr.	Bezeichnung			V gem.	V sig = 50 km/h	V sig = 60 km/h	V sig = 80 km/h
				PWE/h	PWE/h	PWE/h	PWE/h
1a	Hard Morgen	51	62	-132		-119	
1b	Hard Mittag	35	61	-84		-77	
1c	Hard Abend	74	58	-77		-88	
2	Oftringen Wegweiser	50				-126	
3	Buchs Gysi	28	40	19	-94		
4	Brugg	19				-68	
5	Döttingen	24			60		
6	Kölliken	25			-2		
7	Oftringen Lanz	47				-98	
8	Rupperswil	24					-118
9	Schinznach WBG	34				-119	
10	Sisseln	60				-56	
11	Solothurn	58			-141		
12	Zofingen	11			-24		
13	Rothrist	25			40		
14	Schinznach Rössli	13			-8		
Mittelwert					-24	-94	-118
Mittl. Abweichung vom Mittelwert					53	22	0

Abb. 8 Reserveleistungen R in PWE/h 

Eine Beurteilung der Resultate erfolgt aufgrund der Kategorieneinteilung "signalisierte Geschwindigkeit". Dabei fallen folgende Punkte auf:

- Rund 70% aller berechneten Knoten weisen effektiv eine bessere Leistungsfähigkeit auf als berechnet wurde (negative Leistungsreserve). Betrachtet man nur die Knoten mit $V_{sig} \geq 60$ km/h so erhöht sich der Anteil auf 100%.
- Die Knoten mit $V_{sig} = 50$ km/h weisen eher realistische Reserveleistungen auf. Wenn für den Knoten 4 Buchs Gysi die effektiv gefahrene Geschwindigkeit eingesetzt wird und der Knoten 11 Solothurn nicht berücksichtigt wird, so ergibt sich für die Knoten mit $V_{sig} = 50$ km/h ein einheitliches Bild mit einer mittleren Reserveleistung von +14 PWE/h .
- Die Knoten mit der signalisierten Geschwindigkeit von 50 km/h weisen bei Reserveleistungen von +60 bis - 141 sehr grosse Streuungen auf. Der Mittelwert liegt bei -24 PWE/h .
- Die Knoten mit der signalisierten Geschwindigkeit von 60 km/h weisen bei Reserveleistungen von -56 bis -126 PWE/h grosse Streuungen auf. Der Mittelwert liegt bei -95 PWE/h .

- Der Knoten mit der signalisierten Geschwindigkeit von 80 km/h weist eine Reserveleistung von -118 PWE/h auf. Er liegt damit im Bereich der Knoten mit der signalisierten Geschwindigkeit 60 km/h.
- Die Beurteilung ob es sich um einen Einzelstreifen oder um Mischstreifen handelt, ist bei einigen Knoten schwierig (vgl. Definition Mischstreifen, Anhang 2 Begriffe) und die Differenzen zwischen den Reserveleistungen sind gross (bis 60 PWE/h bei Mischstreifen mit Geradeausfahrer).

Bei einer zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse ist festzustellen, dass von den 14 Knoten deren 4 innerhalb einer Reserveleistung von +/- 50 PWE/h liegen. Innerhalb einer Reserveleistung von +/- 75 PWE/h konnten 7 Knoten beobachtet werden. Als mögliche Ursachen für die Abweichungen können die folgenden Einflüsse massgebend sein:

- Reduktion der Leistungsfähigkeit durch Fussgänger und Zweiradfahrer z.B. bei den Knoten Döttingen, Buchs Gysi, Zofingen und Rothrist.
- Ein grosser Anteil des Rechtsabbiegers (Strom 3 bzw. 9) bei den von links kommenden Fahrzeugen wie z.B. beim Knoten Oftringen Wegweiser kann die Leistungsfähigkeit erhöhen. Durch die starke Belastung des Stromes 3 bzw. 9 wird die Verarbeitung der Ströme 7 bzw. 1 (Linksabbieger) und Strom 11 bzw. 5 (Geradeausfahrer Nebenstrom) stark behindert oder verunmöglicht. Der Linkseinbieger (Strom 4 bzw. 10) kann somit Lücken ausnützen, die (vortrittsrechtlich und modellmässig) gar nicht für ihn bestimmt sind.
- Ein grosser Anteil des Rechtsabbiegers (Strom 3 bzw. 9) bei den von links kommenden Fahrzeuge könnte auch eine Reduktion der Geschwindigkeit auf dem Hauptstrom bewirken.
- Die Sichtverhältnisse können durch die Witterungsverhältnisse nicht optimal sein (Regen beim Knoten Rothrist).
- Beeinflussungen durch Lichtsignalanlagen oder Barrieren (Knoten Oftringen Buchs Gysi).
- Die stark verbesserte Leistungsfähigkeit beim Knoten Solothurn könnte allenfalls auf die überbreite Mittelinsel zurückzuführen sein (Sicheres Anhalten in der Knotenmitte ist möglich).

5.4.2 Wartezeiten

Die Beobachtung des Stauresumes erfolgte bei den Erhebungen 1990 mittels einer Videokamera und bei den späteren Knotenerhebungen mit einer Zählperson. Bei 5 Knoten mit neuerem Erhebungsdatum wurden bei dem vom Stau betroffenen Streifen auch die am Stauende eintreffenden Fahrzeuge erfasst. Auch hier zeigt sich, dass die berechneten Werte von den beobachteten Werten zum Teil erheblich abweichen. Die zu erwartende Tendenz, dass bei geringen Wartezeiten eine hohe Reserveleistung ausgewiesen wird ist jedoch klar zu erkennen.

Tab. 10 Mittlere Wartezeiten w

Objekt		massgebender Hauptstrom q_p	Reserveleistung	Mittlere Wartezeiten w	
				w gemäss Abb. 5	w beobachtet
Nr.	Bezeichnung	PWE/h	PWE/h	sec	sec
8	Rupperswil	1239	-118	> 60	105
9	Schinznach WBG	1295	-119	- (*)	73
10	Sisseln	641	-56	> 60	152
11	Solothurn	1197	-141	> 60	55
14	Schinznach Rössli	1207	-8	> 60	25

(*) Keine Wartezeitberechnung gemäss Abb. 5 möglich, da es sich um Mischstreifen handelt

5.5 FOLGERUNGEN

Aufgrund der obigen Untersuchungen zeigt sich klar, dass das Deutsche Merkblatt für die Leistungsberechnung von unregelmässigen Knoten in der Form 1991 nicht auf die Schweiz übertragbar ist. Es ist deshalb notwendig, mit den vorhandenen Daten die Auswirkungen von neueren Forschungsergebnissen abzuschätzen und / oder für die Schweiz spezifische Korrekturen festzulegen.

6. NEUERE FORSCHUNGSERGEBNISSE

Die Anwendung des Merkblattes in Deutschland und weitere Untersuchungen am Lehrstuhl für Verkehrswesen an der Ruhr-Universität Bochum haben ergeben, dass das Merkblatt einige Mängel aufweist und deshalb Korrekturen bzw. Anpassungen notwendig sind. Insbesondere wurde auch festgestellt, dass die tatsächliche Leistungsfähigkeit höher ist als die berechnete.

Am 26. September 1995 fand dazu ein Kolloquium der deutschen Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV) in Bochum statt. Dazu erschienen ist der Forschungsbericht "Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Strassen" des Bundesministeriums für Verkehr (Heft 669), [=Entwurf Deutsches HCM].

Die wichtigsten Aspekte der neueren Forschungsergebnisse werden im folgenden kurz dargestellt.

6.1 GRENZZEITLÜCKEN

Heute werden für die Berechnung der Leistungsfähigkeit immer noch die Zeitlücken nach Harders aus dem Jahr 1976 verwendet. Es wird vermutet, dass sich das Verhalten der Fahrzeuglenker an Knoten ohne Lichtsignalanlage generell verändert hat und daher heute andere Werte für Grenz- und Folgezeitlücken gelten. Die Gründe für die Verhaltensänderungen können u.a. in der im Durchschnitt stark gewachsenen Motorleistung und in der sehr starken Zunahme der Verkehrsdichte auf den Strassen liegen. Verschiedene Untersuchungen in den letzten Jahren haben die folgenden Erkenntnisse gebracht:

Grossmann/Brilon (1991)

Anhand einer einzelnen Messung konnte für den Rechtseinbieger die ungefähre Größenordnung der Zeitlücken $t_g = 6.8 \text{ sec}$, $t_f = 3.5 \text{ sec}$ bei einer mittleren Geschwindigkeit auf dem Hauptstrom von $v_m = 60 \text{ km/h}$ bestätigt werden.

Schnüll, Richter (1992)

Messungen für deutsche Ausserortsstrassen ergaben eine Abnahme der Grenzzeitlücken bei steigender Geschwindigkeit. Die Messungen von Schnüll und Richter bestätigten ebenfalls nur die Zeitlücken von Harders für $v=60 \text{ km/h}$.

Kyte (1994)

Messungen in den USA haben gezeigt, dass die Abhängigkeit der Zeitlücken von der mittleren Geschwindigkeit v_m auf der Hauptstrasse nicht vorhanden ist und die Zeitlücken ungefähr den Werten von Harders für $v = 60 \text{ km/h}$ entsprechen.

Brilon, Ahn und Partner (1995, Hersteller PC-Programme KNOBEL und KNOSIMO)

Die Verwendung der Grenz- und Folgezeitlücken von Harders für $v = 50 \text{ km/h}$ wird für alle Geschwindigkeitsbereiche empfohlen.

6.2 MASSGEBENDER HAUPTSTROM

Bei der Herleitung zur Ermittlung der massgebenden Hauptströme finden im Rahmen des Deutschen HCM gegenüber derjenigen des Merkblattes (FGSV, 1991) zwei weitere Aspekte Berücksichtigung (beide Aspekte bedürfen der Überprüfung durch empirische Untersuchungen).

Kreuzung mit STOP

Bei der Ermittlung der massgebenden Hauptstrombelastung für die Linkseinbieger an einer Kreuzung (Strom 4 bzw. 10) wird angenommen, dass die jeweils entgegengerichteten Ströme 11 und 12 bzw. 5 und 6 nicht zu berücksichtigen sind, sofern die gegenüberliegende Zufahrt ein STOP aufweist. Ein an der Haltelinie bereits wartender Fahrer (z.B. in Strom 4) kann davon ausgehen, dass ein Fahrzeug, das sich von der gegenüberliegenden Zufahrt dem Knoten nähert (z.B. in Strom 11), in jedem Fall vor der Weiterfahrt anhält. Es besteht somit während dieses Zeitraumes für das wartende Fahrzeug die Möglichkeit, das beabsichtigte Fahrmanöver durchzuführen.

- Die Leistungsfähigkeit wird bei der Berücksichtigung dieses Aspektes erhöht.

Einfluss der Rechtsabbiegeströme 3 und 9

In neueren amerikanischen, sehr umfangreichen Untersuchungen (Kyte 1996) hat sich die in Deutschland getätigte Vermutung bestätigt, dass der gegenüberliegende Rechtsabbieger (Strom 3 bzw. 9) analog dem anliegenden Rechtsabbieger auf die Linkseinbieger (Strom 10 bzw. 4) einen Einfluss hat und zur Hälfte berücksichtigt werden soll.

- Die Leistungsfähigkeit wird bei der Berücksichtigung dieses Aspektes reduziert.

6.3 BEURTEILUNG DER QUALITÄT DES VERKEHRSABLAUFES

Für die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufes wurde in Deutschland ein Wechsel vom dreistufigen Beurteilungsschema (vgl. Kapitel 3.13) zu einem 6-stufigen Schema vorgenommen. Dieses Schema entspricht dem im amerikanischen HCM postulierten Level-of-Service-Konzept. Wesentlicher Unterschied ist die Unterteilung der bisherigen Stufe mit einer genügenden Leistungsfähigkeit in vier Stufen.

Im Rahmen des Merkblattes ergeben sich für die Wartezeiten und Belastungsreserven damit die folgenden Ansätze:

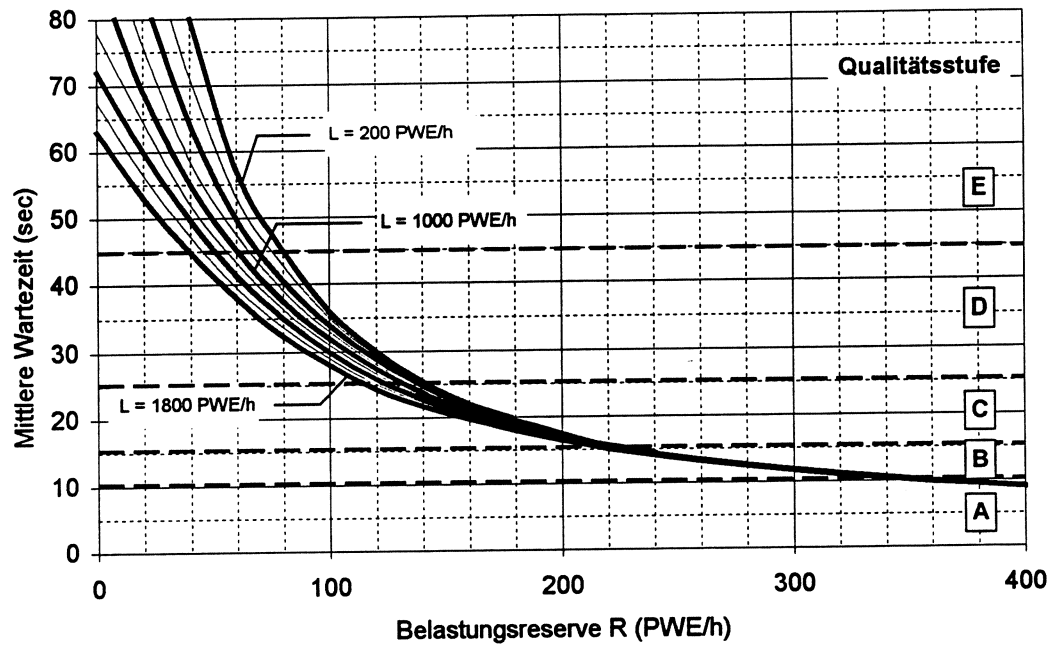
Tab. 11 *Mittlere Wartezeiten und erforderliche Belastungsreserven für alle Qualitätsstufen*

Qualitätsstufe	Mittlere Wartezeit w [sec]	Erforderliche Belastungsreserve R_{eff}	Beurteilung
A	< 10	≥ 400	Ausgezeichnete Verkehrsqualität. Höchstens geringe Zeitverluste. Die Mehrzahl der Fahrzeuge muss in der Regel nicht warten
B	10 - 15	300 - 400	Gute Verkehrsbedingungen. Geringe Beeinflussung der untergeordneten Ströme durch die vortrittsberechtigten Ströme. Die Wartezeiten sind tolerierbar.
C	15 - 25	200 - 300	Zufriedenstellende Qualität. Deutliche Beeinflussung der untergeordneten Ströme durch die vortrittsberechtigten Ströme. Spürbarer Anstieg der Wartezeit. Bildung von Stau, der aber bezüglich zeitlicher Dauer und räumlicher Ausdehnung keine nennenswerte Beeinträchtigung darstellt.
D	25 - 45	100 - 200	Ausreichende Verkehrsqualität. Auslastung nahe bei der zulässigen Belastung. Behinderungen in Form von Haltevorgängen. Stabilität der Verkehrssituation hinsichtlich Stau und Wartezeiten.
E	> 45	0 - 100	Mangelhafte Qualität des Verkehrszustandes. Übergang vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand. Geringe Zunahmen der Verkehrsbelastungen führen zu stark ansteigenden Wartezeiten und Staulängen. Kein Stauabbau. Stark streuende Wartezeiten. Der Verkehr kann noch knapp bewältigt werden. Die Sicherheit nimmt deutlich ab.
F	—	< 0	Völlig ungenügender Zustand (Überlastung). Anzahl der zufließenden Fahrzeuge grösser als die Leistungsfähigkeit. Lange, wachsende Kolonnen und hohe Wartezeiten. Weitere Reduktion der Sicherheit.

6.4 MITTLERE WARTEZEIT

Die Abschätzung der Wartezeiten in Abhängigkeit der Reserveleistung erfolgte im Merkblatt anhand zweier Grafiken (vgl. Abb. 4 und Abb. 5, Seite 11). Damit konnte aber keine Aussage über die Wartezeiten für Mischströme gemacht werden. Mit einer zusätzlichen Grafik (vgl. Abb. 9) nach der Wartezeitformel vom Kimber, Hollis (1978) kann zumindest eine überschlägige Näherung für Mischströme erreicht werden. Für Einzelströme mit Rang 3 und 4 sind diese Werte gemäss deutschem HCM um rund 10 sec zu niedrig.

Abb. 9 Mittlere Wartezeit in Abhängigkeit von der Belastungsreserve und der Leistungsfähigkeit (Kimber, Hollis)



7. BERÜCKSICHTIGUNG DER NEUEN ERKENNTNISSE

Die Erkenntnisse aus den in Kapitel 6 beschriebenen Fakten bedingen eine Überprüfung der bisherigen Berechnungen. Als Ergänzung wurden die folgenden Zustände berechnet:

- Berücksichtigung von STOP beim gegenüberliegenden Strom (vgl. Kapitel 6.2)
- Berechnung des massgebenden Hauptstromes unter Verwendung der Zeitlücken für die Geschwindigkeiten 50 km/h und 60 km/h (vgl. Kapitel 6.1)

Auf eine Berechnung des Einflusses des gegenüberliegenden Rechtsabbiegers (vgl. Kapitel 6.2) wurde verzichtet, da eine genau Berechnung zu aufwendig gewesen wäre. Eine grobe Abschätzung hat ergeben, dass bei den untersuchten Knoten die Reserveleistung maximal um 20 PWE/h abnehmen würde.

7.1 BERÜCKSICHTIGUNG VON STOP

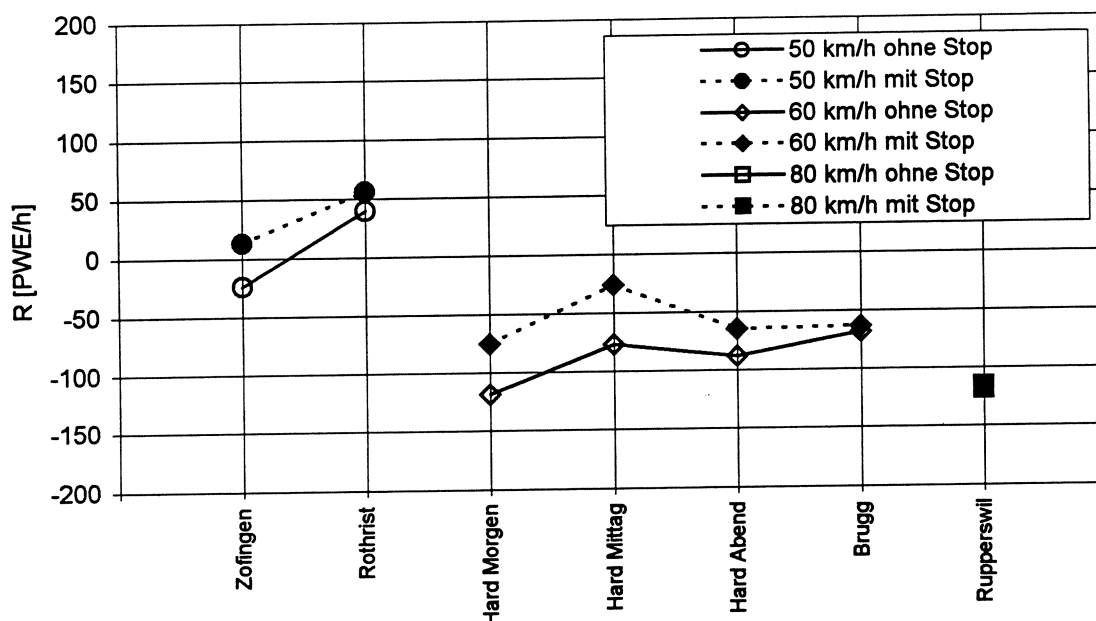
Der Einfluss einer Berücksichtigung der STOP-Signalisation kann bei den Knoten Mühlen Hard (1), Brugg (4), Rupperswil (8), Zofingen (12) und Rothrist (13) abgeschätzt werden.

Tab. 12 Reserveleistungen bei Berücksichtigung von STOP

Objekt		Reserveleistungen			Belastung gegenüberliegender Geraudeaufahrer
Nr.	Bezeichnung	ohne Berücksichtigung Stop	mit Berücksichtigung Stop	Differenz	
		PWE/h	PWE/h	PWE/h	PWE/h
1a	Hard Morgen	-119	-75	44	53
1b	Hard Mittag	-77	-26	51	94
1c	Hard Abend	-88	-65	23	83
4	Brugg	-68	-63	5	33
8	Rupperswil	-118	-116	2	3
12	Zofingen	-24	13	37	27
13	Rothrist	40	56	16	17

Die Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung ergibt für die Versuchsknoten eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit von 2 bis 51 PWE/h.

Abb. 10 Reserveleistungen bei Berücksichtigung der Vortrittsregelung



7.2 EINFLUSS DER GESCHWINDIGKEIT

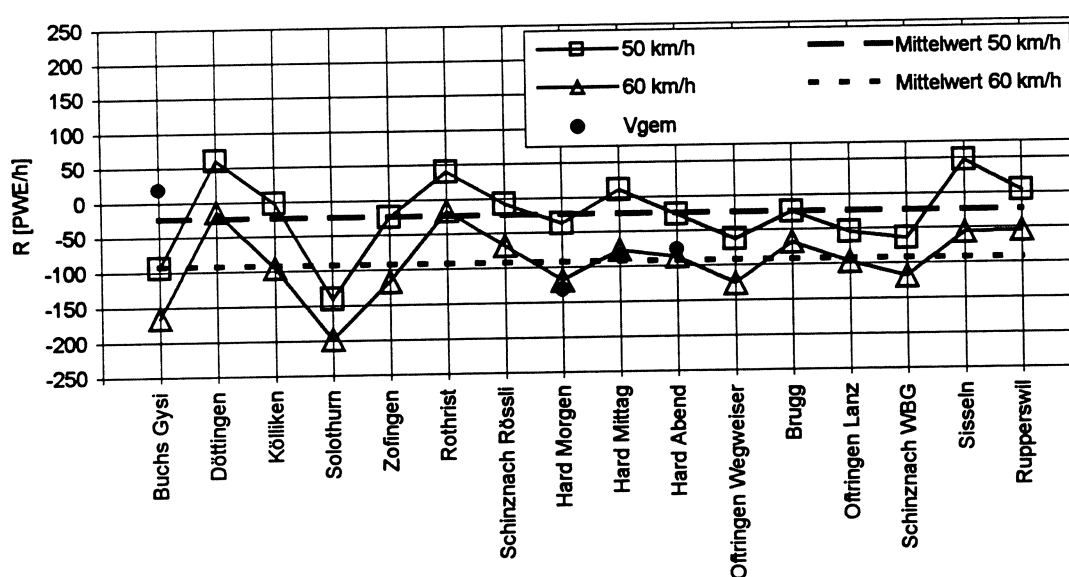
Die Veränderung der Leistungsreserve R_i bei der Veränderung der Geschwindigkeit hängt vom Geschwindigkeitsbereich und von der massgebenden Hauptstrombelastung ab. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Veränderung der Reserveleistung bei tieferen Geschwindigkeiten und bei niedrigen Hauptstrombelastungen höher ist. Im Merkblatt wird darauf hingewiesen, dass im Einzelfall entschieden werden soll, ob entweder die signalisierte oder eine geschätzte mittlere Geschwindigkeit verwendet werden soll (vgl. Merkblatt Seite 16). Aufgrund von Untersuchungen in den USA besteht auch in Deutschland die Tendenz für alle Geschwindigkeitszustände nur noch die Zeitlücken für die Geschwindigkeit 60 km/h zu verwenden.

Der Einfluss der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Hauptströme auf die Leistungsreserve ist deutlich erkennbar. Im Minimum kann zwischen den Geschwindigkeiten 50 km/h und 60 km/h ein Unterschied in der Reserveleistung von 40 PWE/h und ein Maximum von 104 PWE/h festgestellt werden. Mit der Verwendung der Geschwindigkeit 50 km/h und der entsprechenden Zeitlücken kann eine Annäherung an den Sollwert von 0 PWE/h erreicht werden (insbesondere wenn die Objekte Buchs Gysi und Solothurn nicht berücksichtigt werden).

Tab. 13 Reserveleistungen bei verschiedenen Geschwindigkeitszuständen (ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung)

Objekt		V sig	V gemessen	Reserveleistungen bei verschiedenen Geschwindigkeitszuständen			
				V sig	V gem	50 km/h	60 km/h
1a	Hard Morgen	60	62	-119	-132	-37	-119
1b	Hard Mittag	60	61	-77	-84	11	-77
1c	Hard Abend	60	58	-88	-77	-26	-88
2	Ofringen Wegweiser	60		-126		-63	-126
3	Buchs Gysi	50	40	-94	19	-94	-166
4	Brugg	60		-68		-24	-68
5	Döttingen	50		60		60	-14
6	Kölliken	50		-2		-2	-96
7	Ofringen Lanz	60		-98		-55	-98
8	Rupperswil	80		-118		3	-55
9	Schinznach WBG	60		-119		-65	-119
10	Sisseln	60		-56		47	-56
11	Solothurn	50		-141		-141	-199
12	Zofingen	50		-24		-24	-117
13	Rothrist	50		40		40	-17
14	Schinznach Rössli	50		-8		-8	-68
Mittelwert				-65		-24	-93
Abweichung vom Mittelwert				50		40	37

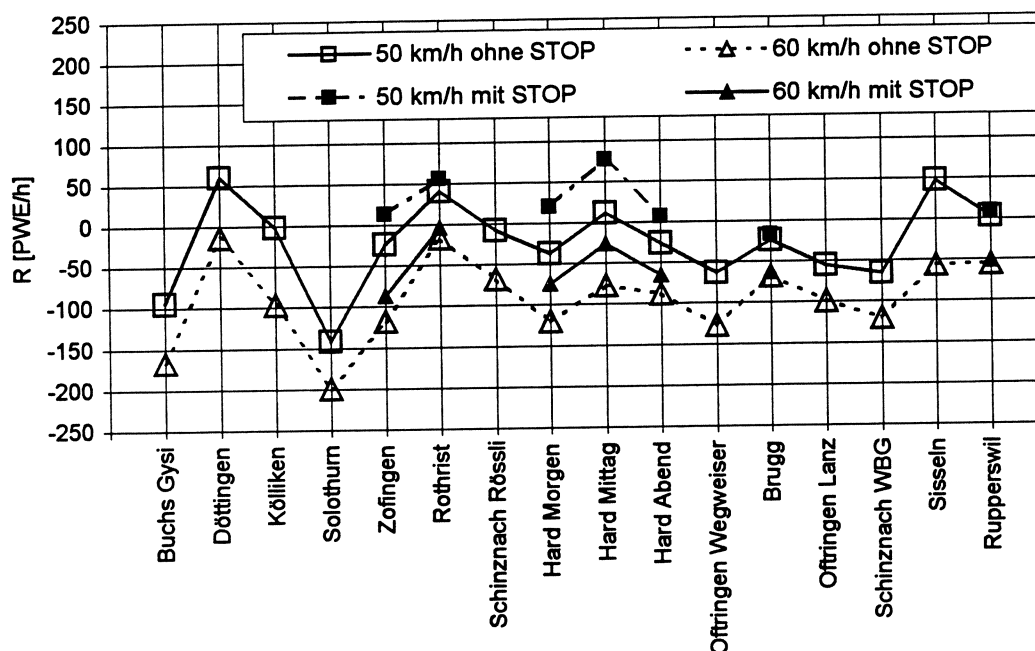
Abb. 11 Reserveleistungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung)



7.3 KOMBINATION DER VORTRIITSREGELUNG MIT DER GESCHWINDIGKEIT

Die Aspekte Vortrittsregelung und Geschwindigkeit wurden kombiniert. Dadurch ergaben sich für die einzelnen Kurven grössere Streuungen. Der Mittelwert für den Zustand $V = 50 \text{ km/h}$ liegt bei -10 PWE/h (Mittlere Abweichung vom Mittelwert 47) und für den Zustand 60 km/h bei -82 PWE/h (Mittlere Abweichung vom Mittelwert 40)

Abb. 12 Reserveleistungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Berücksichtigung der Vortrittsregelung



7.4 ANDERE EINFLUSSGRÖSSEN

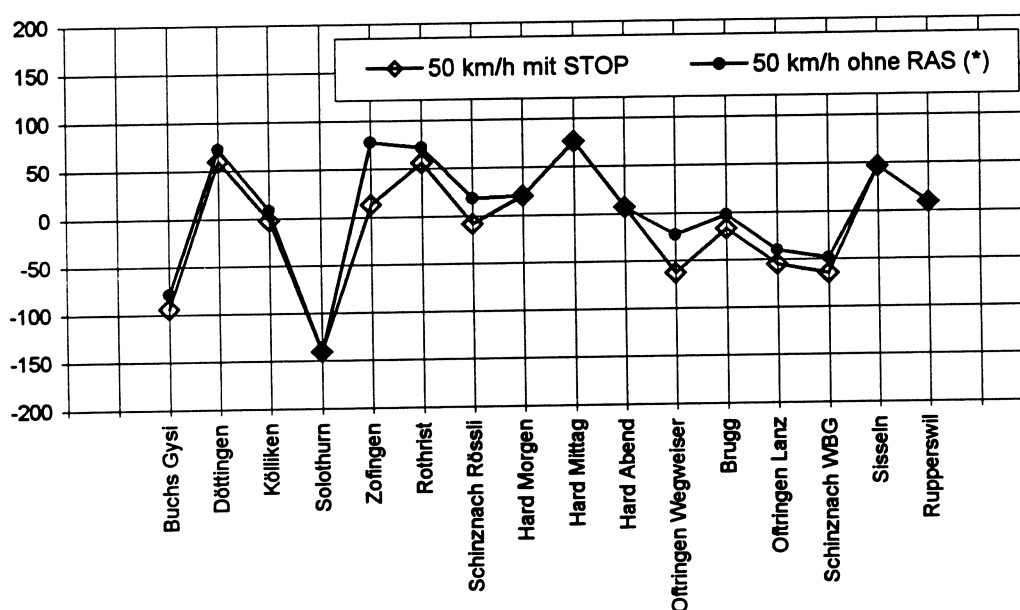
Für die Ermittlung der Verkehrsbelastungen in PW-Einheiten wurden die Umrechnungsfaktoren gemäss deutschem Merkblatt verwendet. Die Faktoren sind abhängig von der Längsneigung. In der Schweiz werden für die Kategorie Lastwagen und Motorräder normalerweise etwas grössere Werte als in Deutschland angenommen. Eine Abschätzung des Einflusses bei Berechnung mit dem Schweizer Faktor im Rahmen des Forschungsauftrages 35/89 hatte gezeigt, dass vernachlässigbar kleine Veränderungen aufgetreten sind. In diesem Sinne wird auf eine erneute Überprüfung im Rahmen dieses Forschungsauftrages verzichtet.

In Anbetracht der bekannten Problematik bei den Knoten mit einer starken anliegenden Rechtsabbiegebeziehung, wurden die Auswirkungen einer Nichtberücksichtigung des Rechtsabbiegers auf die Reserveleistung der Linkseinbiegers abgeschätzt.

Tab. 14 Reserveleistungen bei genereller Geschwindigkeit 50, mit Vortrittsregelung und ohne anliegender Rechtsabbieger

Objekt		V sig	Reserveleistung	
			Rechtsabbieger gemäss Situation	mit effektivem oder fiktivem Rechtsabbiegestreifen
1a	Hard Morgen	60	20	20
1b	Hard Mittag	60	77	77
1c	Hard Abend	60	7	7
2	Ofringen Wegweiser	60	-63	-23
3	Buchs Gysi	50	-94	-79
4	Brugg	60	-17	-2
5	Döttingen	50	60	73
6	Kölliken	50	-2	8
7	Ofringen Lanz	60	-55	-40
8	Rupperswil	80	9	9
9	Schinz nach WBG	60	-65	-55
10	Sisseln	60	47	47
11	Solothurn	50	-141	-141
12	Zofingen	50	13	78
13	Rothrist	50	56	72
14	Schinz nach Rössli	50	-8	18

Abb. 13 Reserveleistungen bei genereller Geschwindigkeit 50, mit Vortrittsregelung und ohne anliegender Rechtsabbieger



(*) RAS = Rechtsabbiegestreifen

7.5 WARTEZEITEN

Die Ermittlung der mittleren Wartezeiten erfolgte mit dem Ansatz von Kimber, Hollis (1978) in Abhängigkeit von der Belastungsreserve und der Leistungsfähigkeit (vgl. Abb. 9). Wiederum ergaben sich zwischen den beobachteten und berechneten Werten grosse Differenzen.

Tab. 15 Wartezeiten bei V_{sig}

Objekt		Leistungs- fähigkeit	Reservelei- stung	w gemäss Abb. 9	w beobachtet
Nr.	Bezeichnung	PWE/h	PWE/h	sec	sec
8	Rupperswil	60	-118	> 999	105
9	Schinznach WBG	96	-125	> 999	73
10	Sisseln	320	-56	556	152
11	Solothurn	156	-141	> 999	55
14	Schinznach Rössli	181	-8	269	25

Tab. 16 Wartezeiten bei $V = 50 \text{ km/h}$ und Berücksichtigung von STOP

Objekt		Leistungs- fähigkeit	Reservelei- stung	w gemäss Abb. 9	w beobachtet
Nr.	Bezeichnung	PWE/h	PWE/h	sec	sec
8	Rupperswil	187	9	164	105
9	Schinznach WBG	150	-71	> 999	73
10	Sisseln	423	47	63	152
11	Solothurn	156	-141	> 999	55
14	Schinznach Rössli	181	-8	269	25

8. BEURTEILUNG

8.1 RECHENMODELL

Die Resultate bei den Knoten ohne separate Rechtsabbiegestreifen und einer starken Abbiegebeziehung nach Rechts stellen die Zweckmässigkeit des dem Rechenmodell zugrunde gelegten Ansatzes in Frage, dass Ströme mit einem tieferen Rang den ranghöheren Strömen immer den Vortritt gewähren müssen. Gerade in diesem Fall werden durch die starke Belastung des Rechtsabbiegers für den Linkseinbieger Einfahrmöglichkeiten geschaffen, die rein vortrittsrechtlich gesehen dem Linksabbieger und dem gegenüberliegenden Geradeausfahrer zustehen würden. Dadurch wird für den Linkseinbieger eine bessere Leistungsfähigkeit erreicht.

8.2 RESERVELEISTUNGEN

Die obigen Abschätzungen der verschiedenen Einflüsse haben gezeigt, dass mit deren Berücksichtigung bei einigen Knoten eine Annäherung an den erwarteten Wert erreicht werden kann. Bei einigen Knoten tritt dagegen genau das Gegenteil ein.

Tab. 17 Reserveleistungen bei verschiedenen Einflussfaktoren

Variante	Reserveleistung [PWE/h]					
	ohne Berücksichtigung STOP			mit Berücksichtigung STOP		
	V sig	50 km/h	60 km/h	V sig	50 km/h	60 km/h
Mittelwert	-65	-24	-93	-54	-10	-82
Mittl. Abw. vom Mittelwert	50	40	37	52	47	40
Minimum	-141	-141	-199	-141	-141	-199
Maximum	60	60	-14	60	60	-4

Anzahl Werte im Streubereich um den Erwartungswert 0 PWE/h

0 ± 25 PWE/h	3	6	2	3	7	2
0 ± 50 PWE/h	4	10	2	4	8	3
0 ± 75 PWE/h	7	14	6	10	13	9

Anzahl der um den Mittelwert korrigierten Werte im Streubereich um den Erwartungswert 0 PWE/h

0 ± 25 PWE/h	4	6	7	4	6	7
0 ± 50 PWE/h	7	11	12	8	8	11
0 ± 75 PWE/h	13	14	13	13	13	13

Aufgrund obiger Tabelle ist ersichtlich, dass nicht generell gesagt werden kann, bei welcher Berücksichtigung von Einflussgrössen die besten Ergebnisse erreicht werden. Es haben sich aber die folgenden Sachverhalte gezeigt:

- Der Mittelwert liegt bei der Geschwindigkeit 50km/h am nächsten beim Erwartungswert von 0 PWE/h. Die beste Annäherung wird bei 50 km/h und mit Berücksichtigung der STOP-Regelung mit $R = -10$ PWE/h erreicht.
- Bei der Geschwindigkeit 60 km/h werden die kleinsten mittleren Abweichungen vom Mittelwert (37 bzw. 40 PWE/h) festgestellt. Die kleinste Abweichung wird bei der Geschwindigkeit 60 km/h und ohne Berücksichtigung der STOP-Regelung erreicht.
- Bei der Berücksichtigung der STOP-Regelung wird ein Mittelwert erreicht der näher beim Erwartungswert liegt als beim Fall ohne Berücksichtigung des STOP bei jeweils gleicher Geschwindigkeit. Genau umgekehrt verhalten sich dagegen die mittleren Abweichungen.

Bei der Betrachtung der Anzahl Werte in den einzelnen Streubereichen fallen die folgenden Aspekte auf:

- Die um den Mittelwert korrigierten Werte ergeben in den meisten Fällen eine bessere Übereinstimmung als die entsprechenden Unkorrigierten.
- Bei den unkorrigierten Werten zeigt sich unabhängig von der Vortrittsregelung die Verwendung der Geschwindigkeit 50 km/h als am zweckmässigsten. Verwendet man dagegen die korrigierten Werte, so werden mit der Geschwindigkeit 60 km/h die besten Ergebnisse erzielt.
- Die Berücksichtigung der STOP-Regelung ergibt nur geringfügige Differenzen gegenüber den entsprechenden Varianten einer Nichtberücksichtigung.

Als Vergleich zur Standardberechnung wurde ein Zustand berechnet, bei dem auf die Berücksichtigung des Rechtsabbiegers (Strom 3 oder 9) bei der Berechnung des massgebenden Hauptstromes für die Ströme 4 oder 10 verzichtet wurde. Es können die folgenden Feststellungen gemacht werden (vgl. Tab. 18, Seite 39):

- Alle Mittelwerte liegen näher beim Erwartungswert = 0 PWE/h als bei der Variante mit der Standardberechnung.
- Alle mittleren Abweichungen sind kleiner als diejenigen bei der Variante mit der Standardberechnung.
- Bei der Betrachtung der Streubereiche wird das beste Resultat mit der Variante mit Korrektur um den Mittelwert, mit Geschwindigkeit 60 km/h und der Nichtberücksichtigung der Vortrittsregelung erreicht.

Tab. 18 Reserveleistungen unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren mit Nichtberücksichtigung des Rechtsabbiegers (fiktiver Rechtsabbiegestreifen)

Variante	Reserveleistung [PWE/h]					
	ohne Berücksichtigung STOP			mit Berücksichtigung STOP		
	V sig	50 km/h	60 km/h	V sig	50 km/h	60 km/h
Mittelwert	-50	-8	-79	-38	7	-68
Mittl. Abw. vom Mittelwert	56	39	37	56	43	39
Minimum	-141	-141	-199	-141	-141	-199
Maximum	73	73	-6	78	78	7

Anzahl Werte im Streubereich um den Erwartungswert 0 PWE/h

0 ± 25 PWE/h	2	7	2	2	8	2
0 ± 50 PWE/h	4	12	4	4	10	6
0 ± 75 PWE/h	8	14	8	10	12	11

Anzahl der um den Mittelwert korrigierten Werte im Streubereich um den Erwartungswert 0 PWE/h

0 ± 25 PWE/h	3	7	8	4	7	7
0 ± 50 PWE/h	7	11	12	8	9	12
0 ± 75 PWE/h	12	14	15	11	14	14

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit eine Verbesserung der Resultate durch eine weitere Verfeinerung des Rechenganges des deutschen Merkblattes erwartet werden kann. Um diese Frage beantworten zu können, ist die Betrachtung des Rechenganges sowie die Berücksichtigung der mathematischen Gesetzmässigkeiten notwendig. Der Rechengang des deutschen Merkblattes basiert auf zum Teil einschneidenden Randbedingungen und auf einer vereinfachten Abbildung der Wirklichkeit. Im momentan gültigen Rechenverfahren werden die Geschwindigkeit, die Sicht, die Kreuzungsverhältnisse sowie das Gefälle (bis 4%) berücksichtigt. Neue Untersuchungen haben dagegen gezeigt, dass die Berücksichtigung der Geschwindigkeit bzw. der Grenzzeitlücken offensichtlich nicht zutreffend ist. Über weitere Einflüsse wie benachbarte Lichtsignalanlagen oder Barrieren, Radfahrer- und Fussgängerbelastungen, kurze Mehrfachaufstellungen, Belastungen der beiden Hauptströme und deren Rechtsabbieger können zur Zeit noch keine Aussagen gemacht werden.

8.3 ZEITLÜCKEN

Die dem deutschen Merkblatt zugrunde gelegten Zeitlücken gehen auf die von Forschungsarbeiten von Harders 1976 zurück. Diese Werte hatten eine deutlichen Abhängigkeit zur gefahrenen Geschwindigkeit. Diese Zeitlücken sowie deren Geschwindigkeitsabhängigkeit sind nicht mehr aktuell.

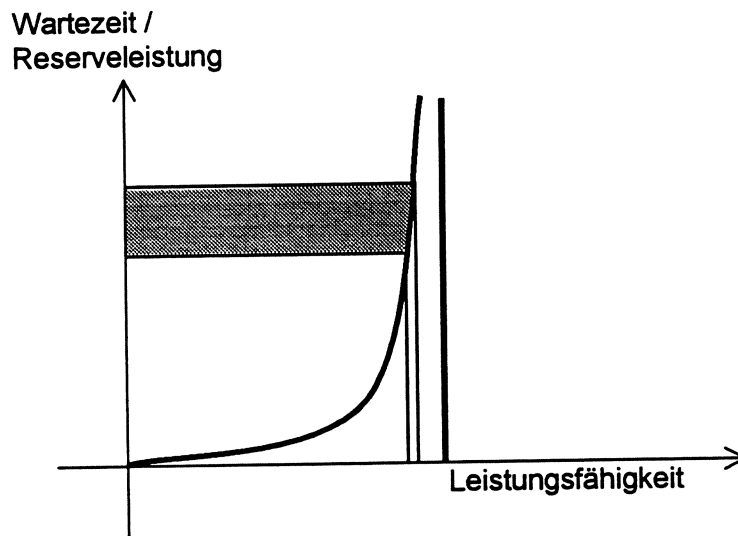
Vereinfachte Modellabbildungen sind u.a. in der Festlegung von geschwindigkeitsunabhängigen Zeitlücken sowie in der Berücksichtigung nur einer Zeitlückenart pro Streifen zu sehen. So wird beispielsweise jedem Linkseinbieger die Zeitlücke für Linkseinbieger zugeordnet, obwohl in vielleicht nur 25 % der Fälle effektiv eine solche

Zeitlücke abgewartet werden muss und in den übrigen Fällen eine Zeitlücke des Kreuzens genügt.

Die Zusammenstellung der Resultate deutet auf eine indirekte Bestätigung der Vermutung hin, dass die Zeitlücken nicht geschwindigkeitsabhängig sind.

8.4 MATHEMATISCHE GESETZMÄSSIGKEITEN

Bei den mathematischen Gesetzmässigkeiten ist einerseits festzuhalten, dass die Zahl der untersuchten Knoten nicht genügt, um eine statistisch gesicherte Aussage machen zu können. Andererseits ist festzustellen, dass es sich hier um eine Untersuchung der Leistungsgrenze handelt. Infolge des Kurvenverlaufes der Leistungsfähigkeit sind bei nur geringen Belastungsänderungen auf dem Zufahrtsstrom grosse Differenzen der Reserveleistung bzw. der Wartezeiten zu beobachten.



8.5 FORSCHUNGSBEDARF

In der Praxis können mit diesem Berechnungsverfahren nicht sämtliche auftretenden Fälle gelöst werden. In diesem Sinne besteht ein Forschungsbedarf bezüglich der Anwendung bei speziellen Knotenformen, Knotenlage und anderer Einflüsse. So interessieren die Klärung folgender Punkte

- Ermittlung aktueller Grenz- und Folgezeitlücken und deren Geschwindigkeitsabhängigkeit.
- Untersuchungen, ob neben den bekannten Abhängigkeiten der Grenz- und Folgezeitlücken (Fahrmanöver, Fahrzeugart und Geschwindigkeit) weitere Zusam-

menhänge bestehen (z.B. Verkehrsstärke, Wartezeit, örtliche oder zeitliche Einflüsse, Unterscheidung zwischen inner- und ausserorts).

- Einfluss starker Rechtsabbiegeströme von der Hauptstrasse auf den wartenden einbiegenden Verkehr.
- Abschätzung des Einflusses von Radfahrern und Fussgängern.
- Einfluss benachbarter Knoten mit Lichtsignalanlage oder anderer konstanter Verkehrsbeeinflussungen wie z.B. Bahnübergänge.
- Unterscheidung der Vortrittsregelung STOP und Kein Vortritt
- Erweiterung der Anwendbarkeit auf Knoten mit abknickendem Hauptstrom

8.6 ALLGEMEINE BEMERKUNGEN ZUM RECHENVERFAHREN

In Anbetracht der im Rahmen der Erhebungen festgestellten Schwierigkeiten beim Auffinden von Knoten, welche die Voraussetzungen erfüllen, stellt sich die Frage ob sich die Einführung einer Berechnungsmethode mit soviel Einschränkungen zum jetzigen Zeitpunkt rechtfertigt.

Die praktische Anwendung des Deutschen Merkblattes hat gezeigt, dass die vorliegende Ausgabe nicht benutzerfreundlich gestaltet wurde. Die Einarbeitungszeit bei nicht täglichem Gebrauch ist relativ gross. Im Berechnungsvorgang ist eine grosse Fehleranfälligkeit auszumachen. Als Alternative dazu bietet sich die Verwendung eines Computerprogrammes an (KNOBEL u.a.). Damit können auch auf einfache Art und Weise Varianten gerechnet werden, die Aufschluss über den Einfluss von Geschwindigkeit, Belastungen usw. ergaben.

8.7 SIMULATIONSPROGRAMM SIMPL

Als Alternative zur Verwendung von festen Zeitlücken hat sich die Verwendung des Simulationsprogrammes SimPL (Simulation mit perfekter Logik) angeboten. Das Programm SimPL wurde von der Technischen Universität München, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung entwickelt und dient zur mikroskopischen Simulation von Verkehrsabläufen im innerörtlichen Bereich. Insbesondere sollen damit Steuerungsvorgänge für Lichtsignalanlagen ausgetestet werden.

Das Verfahren hat eine sehr aufwendige Vorbereitungszeit (Definition der Strecken als Polygonzüge, der Vortrittsregelung, der Abbiegebeziehungen, Verkehrsbelastungen usw.). Für die Berechnung eines einzelnen Knotens übersteigt der Aufwand den Ertrag für unsere Anwendung bei weitem. Als Resultat wird nur die Gesamtwartezeit für den ganzen Knoten geliefert (keine Aussage über einzelne Streifen).

Die Simulation wurde für den Knoten Hard für die Morgen-, Mittag- und Abendspitzenstunde durchgeführt. Die ersten Berechnungen mit den Zeitlücken für 60 km/h (gemäss Harders) haben für die Morgen- und Abendspitzenstunde eine relative gute Annäherung an die Realität gebracht. Für die Abendspitzenstunde wurde dagegen eine ungenügende Leistungsfähigkeit berechnet (nur visuelle Beurteilung). Einigermassen realistische Zustände wurden erst bei der Reduktion der Zeitlücken für den Linksabbieger auf rund 5.4 sec erreicht.

Mit einer weiteren Untersuchung sollte der Einfluss einer (fiktiven) benachbarten lichtsignalgesteuerten Kreuzung abgeschätzt werden. Entgegen den Erwartungen konnte jedoch beim Knoten Hard keine Reduktion der Wartezeit festgestellt werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Programm in der vorliegenden Version nicht zweckmässig für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von unregelmässigen Knoten eingesetzt werden kann.

9. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Die Auswertung von 14 Knoten hat gezeigt, dass die Ermittlung der Reserveleistung gemäss deutschem Merkblatt (FGSV 1991) eine um im Mittel um 65 PWE/h zu geringe Leistungsfähigkeit ergibt. Die Berechnungen mit Berücksichtigung von verschiedenen Einflussfaktoren wie Geschwindigkeit und Stop-Regelung haben grundsätzlich eine Annäherung an den Sollwert erbracht.

Die Berechnungsvarianten mit einer Nichtberücksichtigung des Rechtsabbiegers für die Ermittlung des massgebenden Hauptstromes haben eigentlich die beste Übereinstimmung gebracht. In Anbetracht der relativ geringen Datenmenge und der fehlenden gleichen Erkenntnisse aus dem Ausland ist dennoch auf die Verwendung dieses Ansatzes zu verzichten.

Aufgrund des kleinen Einflusses der Berücksichtigung der STOP-Regelung werden in den folgenden möglichen Berechnungsvarianten nur noch die Ansätze ohne Berücksichtigung der STOP-Regelung betrachtet:

Variante	Geschwindigkeit	Mittlere Reserveleistung [PWE/h]	Mittlere Abweichung vom Mittelwert [PWE/h]
1	signalisiert	-65	50
2	50 km/h	-24	40
3	60 km/h	-93	37

Die neueren Forschungsergebnisse in Deutschland bezüglich der Leistungsfähigkeit von unregelmässigen Knoten deuten dort auf die Verwendung einer festen Geschwindigkeit von 60 km/h hin. Ob die STOP-Regelung berücksichtigt werden soll ist noch ungewiss. Für die Schweiz erscheint momentan die Einführung der festen Geschwindigkeit 60 km/h, eines Korrekturfaktors von +90 PWE/h und die Nichtberücksichtigung der STOP-Regelung am zweckmässigsten zu sein.

Es wird deshalb empfohlen, das deutsche Merkblatt (FGSV 1991) als Norm in der Schweiz mit den folgenden Ergänzungen einzuführen:

- Verwendung der Zeitlücken der Geschwindigkeit von 60 km/h für alle Geschwindigkeitsbereiche. Ausgenommen sind Anpassungen aufgrund spezieller Sicht- oder Kreuzungsverhältnisse.
- Die Vortrittsregelung STOP / Kein Vortritt ist für die Ermittlung der Hauptstrombelastung nicht zu berücksichtigen.
- Bei den Berechnungen ist ein Korrekturfaktor CH von +90 PWE/h zu berücksichtigen.
- Das 6 stufige Level-of-Service-Konzept ist einzuführen.

Für die praktische Anwendung wird empfohlen, das Computerprogramm Knobel o. ä. zu verwenden.

Sofern bei zukünftigen Untersuchungen nicht nur in der Grössenordnung andere Werte für die Grenz- und Folgezeitlücken festgestellt, sondern auch neue Zusammenhänge als signifikant erkannt werden, besteht die Möglichkeit, dass auch das "zeitlückentheoretische" Modell zur Kapazitätsberechnung einer Anpassung oder Erneuerung bedarf. In dem Fall müsste das dargestellte Verfahren insgesamt überarbeitet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Brilon W. : Anmerkungen zur Leistungsermittlung von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen. Strassenverkehrstechnik, Heft 1, 1981 und Heft 2, 1982
- [2] Brilon W. : Intersections without Traffic Signals II. Proceedings of an International Workshop 18-19 July 1991 in Bochum, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1991
- [3] Bundesministerium für Verkehr: Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Strassen. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 669, 1994
- [4] FGSV : Merkblatt zur Berechnung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, Köln, 1991
- [5] FGV : Dokumentation zu Simpl, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München
- [6] Grossmann M. : KNOSIMO, Simulationsmodell für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen - Benutzeranleitung. Lehrstuhl für Verkehrswesen Ruhr - Universität Bochum, 1991
- [7] Harders J. : Die Leistungsfähigkeit nicht signal geregelter städtischer Verkehrsknoten. Schriftenreihe Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 76, Bonn 1968
- [8] Harders J. : Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstrassen. Schriftenreihe Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 216, Bonn 1976
- [9] Hewitt R.H. : Analyse von Grenzzeitlücken durch Probit - Analyse, Übersetzung von W. Brilon und R. Moenikes-Peis
- [10] Kimber R.M., Hollis E.M. : Traffic Queues and Delays at Road Junctions, Transport and Road Research Laboratory (TRRL), Report Nr. LR 909, Crowthorne 1979
- [11] Jessen G.D. : Ein Richtlinien vorschlag für die Behandlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten ohne Lichtsignalregelung. Strassenverkehrstechnik, Heft 7/8, 1974
- [12] Ning Wu : Leistungsfähigkeiten der Mischspuren mit kurzem Stauraum an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen, Lehrstuhl für Verkehrswesen Ruhr - Universität Bochum, Arbeitsblatt 11, 1996
- [13] Ning Wu : Wartezeiten an festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen unter zeitlich veränderlichen (instationären) Verkehrsbedingungen, Strassenverkehrstechnik, Heft 3, 1992

-
- [14] Ning Wu : Verteilung der Rückstaulängen an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen, Strassenverkehrstechnik, Heft 8, 1997
 - [15] Pitzinger P. : Rückstau und Wartezeiten - Messung und Berechnung. Strassenverkehrstechnik, Heft 6, 1982
 - [16] Ponzlet M. : Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten, Strassenverkehrstechnik, Heft 7, 1996
 - [17] Richter T. : Entwurfstandards für Knotenpunkte an Ortsumgehungen, Strasse + Autobahn, Heft 10, 1993
 - [18] Sachse T. : Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Strassenabschnitten, Strassenverkehrstechnik, Heft 4, 1992
 - [19] Siegloch W. : Anmerkungen zur Leistungsermittlung von Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung. Strassenverkehrstechnik, Heft 6, 1981
 - [20] Siegloch W. : Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung. Schriftenreihe Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 154, Bonn 1973
 - [21] Siegloch W. : Ein Richtlinienvorschlag zur Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung. Strassenverkehrstechnik, Heft 1, 1974

Anhang 1 Verzeichnis der Abkürzungen

i, j, k	Index für Fahrzeugstrom	
m	Index für Fahrzeugstrom eines Mischstreifens	
f	Umrechnungsfaktor für PWE	
q_i	Belastung der einzelnen Streifen i	[Fz/h], [PWE/h]
a_i	Auslastungsgrad des Nebenstromes i	[Fz/h], [PWE/h]
q_{pi}	Massgebende Hauptstrombelastung	[PWE/h]
G_i	Grundleistungsfähigkeit Streifen i	[PWE/h]
p_o, p_x, p_y, p_z	Wahrscheinlichkeiten für rückstaufreie Warteräume	[-]
L_i	Leistungsfähigkeit Streifen i	[PWE/h]
L_m	Leistungsfähigkeit Mischstreifen m	[PWE/h]
P_i	Praktische Leistungsfähigkeit Streifen i	[PWE/h]
P_m	Praktische Leistungsfähigkeit Mischstreifen	[PWE/h]
R_i	Leistungsreserve Streifen i	[PWE/h]
R_m	Leistungsreserve Mischstreifen m	[PWE/h]
S	Sichtweite	[m]
δ	Kreuzwinkel zwischen der Haupt- und Nebenstrasse	[gon]
v	Mittlere Geschwindigkeit auf der Hauptstrasse	[km/h]
v_m	Mittlere korrigierte Geschwindigkeit auf der Hauptstrasse	[km/h]
$dV(\delta)$	Geschwindigkeitszuschlag aufgrund des Kreuzungswinkels	[km/h]
$dV(S)$	Geschwindigkeitszuschlag aufgrund der Sichtweite	[km/h]
t_g	Grenzzeitlücke	[sec]
t_f	Folgezeitlücke	[sec]
w_i	Mittlere Wartezeit	[sec]

Anhang 2 Begriffe

Auslastungsgrad	Quotient aus vorhandener Verkehrsstärke und Leistungsfähigkeit
Belastungsreserve vorhandene ~	Differenz zwischen Kapazität und vorhandener Verkehrsstärke eines Stromes
erforderliche ~	Differenz zwischen Kapazität und vorgegebener, zulässiger Verkehrsstärke eines Stromes, bei der die Einhaltung einer angestrebten Verkehrsqualität gewährleistet ist
Einmündung	Knoten mit drei Knotenarmen
Fahrbeziehung	Fahrtrichtung (links, geradeaus, rechts)
Folgezeitlücke	Zeitlücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen im Nebenstrom, die in dieselbe Zeitlücke im Hauptstrom einfahren
Grenzzeitlücke	kleinste Zeitlücke in einem übergeordneten Strom, die von einem wartepflichtigen Fahrzeug zur Ausführung eines Fahrmanövers angenommen wird
Grundleistungsfähigkeit	grösste Stärke, die ein Nebenstrom unter Ausnutzung der Zeitlücken, die in den übergeordneten Strömen auftreten, jedoch ohne Berücksichtigung des Staus in übergeordneten Strömen, erreichen kann
Hauptstrom	bevorrechtigter, übergeordneter Strom
Knoten	bauliche Anlage, die der Verknüpfung von Strassen oder Wegen dient
Knotenarm	an einen Knoten anschliessender Strassenabschnitt
Kreuzung	Knoten mit mindestens vier Knotenarmen
Leistungsfähigkeit	grösste Stärke, die ein Nebenstrom unter Ausnutzung der Zeitlücken, die in den übergeordneten Strömen auftreten, sowie unter Berücksichtigung des Staus in den übergeordneten Strömen erreichen kann zur Berücksichtigung des Staus in den übergeordneten Strömen abgeminderte Grundleistungsfähigkeit
Mischstreifen	Fahrstreifen, der von verschiedenen Strömen mit unterschiedlicher Fahrtrichtung und unterschiedlichem Rang gemeinsam genutzt wird und auf dem die Fahrzeuge auch an der Haltelinie durch eine Aufweitung der Zufahrt nicht nebeneinander stehen können

Mischstrom	aus verschiedenen Teilströmen mit unterschiedlichen Fahrtrichtungen zusammengesetzter Strom, der einen Mischfahrstreifen nutzt
Nebenstrom	wartepflichtiger, untergeordneter Strom
Personenwagen	Fahrzeuge für den Personenverkehr mit bis zu neun Sitzplätzen
Lieferwagen	Für den Güterverkehr vorgesehenes Fahrzeug mit bis 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht (mit und ohne Anhänger)
Rang eines Stromes	Einordnung eines Stromes in die vorfahrtrechtliche Hierarchie
Strom	Menge der Fahrzeuge, die in derselben Fahrbeziehung den Knoten passieren
Verlustzeit	Differenz zwischen der Fahrzeit, die zum Durchqueren der Strecke zwischen einem Querschnitt vor und einem Querschnitt hinter dem Knoten, an denen keine Beeinflussung durch den Knoten festzustellen ist, tatsächlich benötigt wird und einer fiktiven Fahrzeit, die für dieselbe Strecke unter Beibehaltung der Anfangsgeschwindigkeit (theoretisch) anzusetzen wäre
Wartezeit	Verlustzeit abzüglich der Zeitverluste aufgrund von Brems- und Beschleunigungsvorgängen
Zeitlücke	zeitlicher Abstand, der zwischen gleichartigen Bezugspunkten aufeinanderfolgender Fahrzeuge an einem Querschnitt gemessen wird
Zufahrt	Teil eines Kreuzungs- oder Einmündungsarmes, auf dem sich die Fahrzeuge dem Knoten nähern
Zufahrtaufweitung	durch Ausrundungen mit grösseren Radien sich ergebende Fläche im unmittelbaren Knotenbereich an der Haltelinie, die es ermöglicht, dass wartepflichtige Fahrzeuge sich nebeneinander aufstellen können, auch wenn für sie in der Zufahrt nur ein Fahr- bzw. Aufstellstreifen zur Verfügung steht
zulässige Verkehrsstärke	grösste Stärke, die ein Nebenstrom unter Einhaltung einer bestimmten Verkehrsqualität erreichen darf

Anhang 3 Zeitlücken nach Harders

Fahrbewegung des Nebenstromes		Mittlere Geschwindigkeit des Hauptstromes [km/h]					
		40	50	60	70	80	90
Linksabbieger von der Hauptstrasse	t_g	4.5	5.2	5.8	6.5	7.1	7.8
	t_f	1.7	2.1	2.5	2.8	3.2	3.6
Rechtseinbieger aus der Nebenstrasse	t_g	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7
	t_f	2.1	2.6	3.1	3.6	4.1	4.5
Kreuzen aus der Hauptstrasse	t_g	5.1	5.8	6.5	7.3	8.0	8.7
	t_f	2.8	3.4	4.0	4.6	5.3	5.9
Linkseinbieger aus der Nebenstrasse	t_g	5.6	6.4	7.2	8.0	8.8	9.6
	t_f	2.7	3.3	3.9	4.5	5.1	5.7

t_g = Grenzzeitlücke in sec

t_f = Folgezeitlücke in sec

Anhang 4 Knotenmerkmale

Objekt		Strö- me	Erh. jahr	Lage	V sig	Sicht	Hauptstrom						Nebenstrom					
							Hauptstrom Links			Hauptstrom Rechts			Stautstrom			Gegenüberliegender Ast		
							RA	LA	Drei- ecks- inseln	Ge- fälle %	RA	LA	Drei- ecks- inseln	Ge- fälle %	Kein Vortritt	STOP	Drei- ecks- inseln	Ge- fälle %
Nr.	Ort	Knoten			km/h	m												
1	Muhen	Hard	4	1990	a.o.	>120	X	X	X			X	X			X		
2	Oftringen	Wegweiser	4	1995	a.o.	>120	X					X	X		X			
3	Buchs	Gysistrasse	4	1995	i.o.	120									X			
4	Brugg	Vogelsangerstrasse	4	1996	a.o.	>120						X				X		
5	Döttingen	Monti	4	1996	i.o.	>120									X			
6	Kölliken	Kirchgasse	4	1996	i.o.	<80									X			
7	Oftringen	Lanz	4	1996	i.o.	>120									X			
8	Rupperswil	Strassenverkehrsamt	4	1996	a.o.	>120	X	X	X							X		
9	Schinzach	WBG	4	1996	i.o.	>120	X	X				X			X			
10	Sisseln	K 293 / K 295	3	1996	a.o.	>120	X	-	X	-3.5	-	X	-	3.5	X	-	-	-
11	Solothurn	Langendorfstrasse	3	1996	i.o.	>120	X	-	X		-	X	-		X	-	-	-
12	Zofingen	Henzmannstrasse	4	1996	i.o.	>120						X			X	X		
13	Rothrist	Rössli	4	1997	i.o.	>120		X ⁽¹⁾								X		
14	Schinzach	Rössli	3	1997	i.o.	>120	-	-	-		-	X	-		X	-	-	-
15	Untertentfelden	Touring	3	1990	a.o.	>120	X	-	X		-	X	-		X	X		-
16	Buchs	Oberdorfstrasse	3 ⁽²⁾	1995	i.o.	>120		-			-				X			-
17	Windisch	Mülligerstrasse	3	1996	i.o.	>120		-			-					X		-
18	Aarau	Gais	3	1996	i.o.	>120		-		7.5	-	X	-	7.5	X			-

- (1) Nur Aufstellspuren
(2) Nur Rechtsabbiegen von Hauptstrom rechts möglich

Anhang 5 Beurteilung der einzelnen Objekte

Objekt Nr. 1	Hard Muhen
--------------	------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

1a Morgen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-119	-139	-172
V gemessen	62	-132	-152	-187
	50	-37	-55	-79

1b Mittag

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-77	-118	-164
V gemessen	61	-84	-125	-173
	50	11	-26	-59

1c Abend

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-88	-120	-167
V gemessen	58	-77	-108	-153
	50	-26	-54	-89

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

1a Morgen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-75	-96	-125
V gemessen	62	-90	-111	-142
	50	20	0	-20

1b Mittag

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-26	-69	-111
V gemessen	61	-34	-77	-120
	50	77	36	7

1c Abend

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-65	-97	-141
V gemessen	58	-53	-85	-126
	50	7	-23	-54

Beurteilung

Beim Knoten Hard bewegen sich Reserveleistungen in einem Bereich von -77 bis -119 PWE/h für die Berechnungen ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung. Bei der Berücksichtigung der STOP-Signalisation bewegen sich die Werte zwischen -26 und -75 PWE/h. Woher die Unstimmigkeit herkommen ist nicht klar ersichtlich. Bezüglich der Verteilung der Verkehrsbelastungen auf die einzelnen Ströme können keine Rückschlüsse gemacht werden.

Objekt Nr. 2	Oftringen Wegweiser
--------------	---------------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-126	-176	-195
	50	-63	-107	-122

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

Der gegenüberliegende Nebenstrom weist die Vortrittsregelung "Kein Vortritt" auf. Es besteht somit kein Einfluss auf den betrachteten Strom.

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-98	-144	-161
	50	-23	-63	-75

Beurteilung

Beim Knoten Wegweiser könnte der Grund für die bessere vorhandene Leistungsfähigkeit ($R_{\text{ber}} = -126$) auf die stärkere Belastung des Rechtsabbiegers als des Geradeausfahrers zurückzuführen sein. Durch die starke Belastung des Stromes 3 wird die Verarbeitung des Linksabbiegers (Hauptstrom rechts) und des Geradeausfahrers (Nebenstrom) stark behindert oder verunmöglicht. Der Linkseinbieger (Strom 4) kann somit Lücken ausnützen, die (vortrittsrechtlich und modellmässig) gar nicht für ihn bestimmt sind¹⁰. In diesem Sinne wurde eine Varianten mit einem fiktiven Rechtsabbiegestreifen gerechnet (vgl. Tabellen 3). Als beste Annäherung an die Realität hat sich die Variante mit einem Verzicht auf die Berücksichtigung des Rechtsabbiegers bei einer Verwendung der Geschwindigkeit 50 km/h erwiesen. Ob dieser Ansatz tauglich ist, müsste bei weiteren Untersuchungen an anderen Knoten überprüft werden.

¹⁰ Im Bericht "Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Strassen", Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 669, 1994 wird dieser Aspekt als noch weiter zu erforschen bezeichnet.

Objekt Nr. 3	Gysistrasse Buchs
---------------------	--------------------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	-94	-111	-199
V gemessen	40	19	2	-61
	60	-166	-184	-288

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

Der gegenüberliegende Nebenstrom weist die Vortrittsregelung "Kein Vortritt" auf. Es besteht somit kein Einfluss auf den betrachteten Strom.

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	-79	-96	-180
V gemessen	40	39	22	-36

Beurteilung

Bei diesem vierarmigen Innerortsknoten wurde zu Beginn der Zählung eine Durchschnittsgeschwindigkeit von rund 40 km/h gemessen. Die deutlich niedrigere Geschwindigkeit ist auf die Linienführung zurückzuführen. Die Berechnungen mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h ergibt ein R_{ber} von -94 PWE/h, das deutlich im negativen Bereich liegt. Eine Verwendung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit würde im vorliegenden Fall zu durchaus plausiblen Ergebnissen ($R_{ber} = 19$ PWE/h) führen.

Weitere Einflussgrößen die bei diesem Knoten auftreten, sind die leicht versetzte Lage der Nebenströme sowie die Beeinflussung durch Zweiradfahrer, Fussgänger und Bahnübergang (Entfernung ca. 400m).

Objekt Nr. 4	Vogelsangerstrasse Brugg
---------------------	---------------------------------

Resultatzusammenstellung**Tab. 1** Ohne Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-68	-132	-322
	50	-24	-84	-240

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-63	-128	-315
	50	-17	-79	-232

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-59	-122	-303
	50	-10	-69	-213

Tab. 4 Mit Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung und mit fiktiver Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-54	-118	-296
	50	-2	-63	-204

Beurteilung

Die berechnete Reserveleistung R_{ber} von -68 PWE/h liegen deutlich unter den gemessenen Werten. Bei Berücksichtigung der Vortrittsregelung und bei der Annahme einer Geschwindigkeit von 50 km/h auf im Hauptstrom verringert sich die Differenz zwischen beobachtetem und berechneten Wert ($R_{\text{ber}} = -17 \text{ PWE/h}$). Eine noch bessere Übereinstimmung wird bei der zusätzlichen Nichtberücksichtigung des Rechtsabbiegers erreicht ($R_{\text{ber}} = -2 \text{ PWE/h}$).

Objekt Nr. 5	Monti Döttingen
--------------	-----------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	60	32	-78
	60	-14	-42	-248

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung

Der gegenüberliegende Nebenstrom weist die Vorrtrittsregelung "Kein Vortritt" auf. Es besteht somit kein Einfluss auf den betrachteten Strom.

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	73	45	-43
	60	-6	-34	-231

Beurteilung

Die gegenüber der Berechnung zu geringe tatsächliche Leistungsfähigkeit ($R_{\text{ber}} = 60$ PWE/h) könnte auf dem Einfluss des Fahrrad- und Mofaverkehrs auf dem Hauptstrom und dem Fußgängerverkehr quer zum einmündenden Nebenstrom beruhen. Bei einer Berücksichtigung eines fiktiven Rechtsabbiegers würde die Differenz noch weiter vergrößern.

Objekt Nr. 6	Kirchgasse Kölliken
---------------------	----------------------------

Resultatzusammenstellung**Tab. 1** Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	102	97	107
	60	38	32	-25

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

Der gegenüberliegende Nebenstrom weist die Vortrittsregelung "Kein Vortritt" auf. Es besteht somit kein Einfluss auf den betrachteten Strom.

Tab. 3 Mit Berücksichtigung der Sichtweite 80-120 m

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	75	70	48
	60	22	16	-63

Tab. 4 Mit Berücksichtigung der Sichtweite 40-80 m

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	52	47	-2
	60	8	2	-96

Tab. 5 Mit Berücksichtigung der Sichtweite 40-80 m und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	56	51	8
	60	11	5	-88

Beurteilung

Die Sicht wird durch die Bebauung und während der Erhebungen zusätzlich durch einen parkierten Lieferwagen vermindert. Die Sichtweite dürfte bei ca. 80 m gelegen haben. Es hat sich gezeigt, dass die Berücksichtigung der Sichtweite massgebend ist. Für Sichtweiten zwischen 80 und 120 m beträgt der Geschwindigkeitszuschlag gemäss Merkblatt 5 km/h und für Sichtweiten zwischen 40 und 80 m beträgt der Zuschlag 10 km/h. Eine zusätzlich Beeinflussung der Leistung könnte bei diesem Knoten durch Fussgänger und Zweiradfahrer erfolgen.

Bei diesem Berechnungsbeispiel ist verwunderlich, dass für die normale Berechnung (vgl. Tab.1) die Reserveleistung für Mischstreifen mit allen drei Streifen eine bessere Leistungsfähigkeit ergibt, als wenn ohne oder nur mit einem Geradeaus- / Linkseinbiegemischstreifen gerechnet würde.

Die Berechnung mit einem fiktiven Rechtsabbiegestreifen ergibt nur eine geringfügige Veränderung des Resultates ($R_{\text{ber}} = 8 \text{ PWE/h}$)

Objekt Nr. 7	Lanz Oftringen
--------------	----------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-47	-98	-98
	50	-7	-55	-55

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

Der gegenüberliegende Nebenstrom weist die Vortrittsregelung "Kein Vortritt" auf. Es besteht somit kein Einfluss auf den betrachteten Strom.
--

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-37	-87	-87
	50	7	-40	-40

Beurteilung

Die Ergebnisse liegen mit $R_{\text{ber}} = -98$ PWE/h deutlich im negativen Bereich. Die erhöhte Leistungsfähigkeit kann durch die fehlenden Abbiegestreifen (Anteil Rechtsabbieger) oder auf die den Hauptstrom querenden Fussgänger begründet werden. Denkbar ist auch eine Beeinflussung durch Lichtsignalanlagen und einen Bahnübergang.

Bei einer Betrachtung des Linkseinbiegers als Einzelstrom ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Die Berechnung mit einem fiktiven Rechtsabbiegestreifen ergibt um 10 - 15 PWE/h höhere Leistungsfähigkeiten.

Objekt Nr. 8	Strassenverkehrsamt Rapperswil
--------------	--------------------------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	80	-118	-130	-173
	50	3	-8	-27
	60	-55	-66	-96

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	80	-116	-128	-171
	50	9	-2	-21
	60	-51	-62	-92

Beurteilung

Die berechnete Leistungsreserve ($R_{ber} = -118 \text{ PWE/h}$) weist bei diesem Knoten im Ausserortsbereich ($V_{sig} = 80 \text{ km/h}$) nicht mit der gemessenen Situation überein. Hingegen wird mit der Geschwindigkeit 50 km/h eine sehr gute Übereinstimmung gefunden. Die Berücksichtigung der Vortrittsregelung hat infolge der geringen Verkehrsbelastung des gegenüberliegenden Nebenstromes nur geringfügige Veränderungen der Resultate zur Folge.

Objekt Nr. 9	WBG Schinznach
--------------	----------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-119	-125	-222
	50	-65	-71	-147

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

Der gegenüberliegende Nebenstrom weist die Vortrittsregelung "Kein Vortritt" auf. Es besteht somit kein Einfluss auf den betrachteten Strom.

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-107	-113	-204
	50	-49	-55	-124

Beurteilung

Die Erhebungen am Knoten Weinbaugenossenschaft haben gegenüber dem Modell eine Differenz bei der Reserveleistung $R_{ber} = -119$ ergeben. Die Verwendung der Geschwindigkeit 50 km/h ergibt deutlich realistischere Werte. Ein weiterer Aspekt für die bessere Leistungsfähigkeit könnte bei diesem Knoten der Anteil des Rechtsabbiegers und des fehlenden Rechtsabbiegestreifens sein.

Objekt Nr. 10	K293/K295 Sisseln
----------------------	--------------------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 *Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung*

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-42	-	-
	50	62	-	-

Tab. 2 *Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung*

Einmündung, kein gegenüberliegender Nebenstrom
--

Tab. 3 *Mit Berücksichtigung der Steigungsverhältnisse auf dem Hauptstrom*

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	60	-56	-	-
	50	47	-	-

Hinweis

Der Knoten hat aufgrund einer Streckensperrung während einiger Monate eine deutliche Mehrbelastung erfahren, welche zu regelmässigen Stausituationen führte. Es wurde deshalb eine Verkehrsregelung eingeführt, die während den Erhebungen aber nicht eingesetzt wurde.

Beurteilung

Die Berechnungen haben eine kleinere Leistungsfähigkeit ergeben, als tatsächlich festgestellt wurde ($R_{\text{ber}} = -56 \text{ PWE/h}$). Der Grund dafür könnte in der ungewohnten Verkehrssituation für den Automobilisten oder in der vermutlich höheren Geschwindigkeit im Hauptstrom liegen. Für den Hauptstrom wurde mit einer Steigung bzw. Gefälle von 3.3% gerechnet.

Objekt Nr. 11	Langendorfstrasse Solothurn
----------------------	------------------------------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 *Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung*

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	-141	-	-206
	60	-199	-	-279

Tab. 2 *Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung*

Einmündung, kein gegenüberliegender Nebenstrom
--

Beurteilung

Die Erhebungen am Knoten Langendorfstrasse haben die grössten Differenzen zu den Modellrechnungen ergeben. Die Reserveleistung wurde mit $R_{ber} = -141$ ermittelt. Woher diese grosse Unstimmigkeit stammt ist unklar. Eine mögliche Begründung könnte beim Einfluss des Rechtsabbiegers auf den Linksabbieger sein. Eine weitere Ursache für die klar deutlich bessere Leistungsfähigkeit könnte in der überbreiten Mittelinsel des linken Hauptstromes liegen. Sie ermöglicht dem Linkseinbieger bei Lücken im Strom 2 die Fahrt bis in den Schatten dieser Insel und die Weiterfahrt bei Lücken im Strom 8 (kürzere Zeitlücken sind notwendig).

Objekt Nr. 12	Henzmannstrasse Zofingen
----------------------	---------------------------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Mit Berücksichtigung von 4% Steigung auf dem Nebenstrom, ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	12	-24	-161
	60	-80	-117	-271

Tab. 2 Mit Berücksichtigung von 4% Steigung auf dem Nebenstrom, mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	52	13	-126
	60	-47	-87	-242

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung, ohne Berücksichtigung der Steigung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	104	82	16
	60	12	-11	-94

Tab. 4 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung, ohne Berücksichtigung der Steigung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	144	119	50
	60	45	19	-64

Tab. 5 Mit Berücksichtigung von 4% Steigung auf dem Nebenstrom, mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	116	78	-49
	60	5	-34	-178

Beurteilung

Bei einer ersten Betrachtung des Innerortsknoten ergibt sich eine Reserveleistung R_{ber} von -24 PWE/h. Dabei wird von einer Steigung von 4% im Nebenstrom ausgegangen (effektiv 7%, Modell sieht nur Fälle bis 4% vor). Bei diesem Knoten effektiv festgestellte geringere Leistungsfähigkeit dürfte auf die starken Fussgänger- und Fahrradbelastungen zurückzuführen sein. Die Berechnung mit dem fiktiven Rechtsabbiegestreifen erhöht die Differenz zwischen der berechneten und beobachteten Leistungsfähigkeit.

Objekt Nr. 13	Rössli Rothrist
----------------------	------------------------

Resultatzusammenstellung

Tab. 1 Ohne Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	48	40	40
	60	-8	-17	-21

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	65	56	56
	60	5	-4	-8

Tab. 3 Mit Berücksichtigung der Vortrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	81	72	74
	60	16	7	4

Beurteilung

Die Berechnung ergab eine gegenüber der Messung eine zu grosse Leistungsfähigkeit. Die Reserveleistung R_{ber} ergab einen Wert von 40 PWE/h. Mögliche Gründe für den zu hohen Wert können die Leistungsverminderung durch Velofahrer im Hauptstrom und Fussgänger quer zum Nebenstrom oder die eingeschränkte Sicht (Regen) sein.

Objekt Nr. 14	Rössli Schinznach
----------------------	--------------------------

Resultatzusammenstellung**Tab. 1** Ohne Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	-8	-	-68
	60	-68	-	-148

Tab. 2 Mit Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung

Einmündung, kein gegenüberliegender Nebenstrom
--

Tab. 3 Ohne Berücksichtigung der Vorrtrittsregelung und mit fiktivem Rechtsabbiegestreifen

	V [km/h]	Reserveleistung für Strom 4 bzw. 10		
		Einzelstreifen	Mischstreifen mit Geradeausfahrer	Mischstreifen mit allen Streifen
V signalisiert	50	18	-	-32
	60	-49	-	-121

Beurteilung

Die Ergebnisse sind mit $R_{\text{ber}} = -8 \text{ PWE/h}$ als sehr gut zu bezeichnen.

Anhang 6 Qualitätsstufen aufgrund von Reserveleistung und Wartezeit

Knoten		Inter- vall	R	Mittlere Wartezeit	Qualitäts- stufe	
Nr.	Ort	min.	PWE/h	sec	aufgrund Reserve	aufgrund Wartezeit
1a	Hard Morgen		-75		F	
1b	Hard Mittag		-26		F	
1c	Hard Abend		-65		F	
2	Oftringen Wegweiser		-126		F	
3	Buchs Gysi		-94		F	
4	Brugg		-63		F	
5	Döttingen		60		E	
6	Kölliken		-2		F	
7	Oftringen Lanz		-98		F	
8	Rupperswil	24	-116	105	F	E / F
9	Schinznach WBG	34	-119	73	F	E / F
9	Sisseln	60	-56	152	F	E / F
10	Solothurn	58	-141	55	F	E / F
11	Zofingen		13		E	
13	Rothrist		56		E	
14	Schinznach Rössli	13	-8	25	F	C

Qualitäts- stufe	Belastungs- reserve	Mittlere Wartezeit	Beurteilung
	PWE/h	sec	
A	≥ 400	≤ 10	ausgezeichnete Verkehrsqualität
B	≥ 300	≤ 15	gute Verkehrsbedingungen
C	≥ 200	≤ 25	zufriedenstellende Qualität
D	≥ 100	≤ 45	Behinderungen in Form von Haltevorgängen für alle Ströme (Mindestqualität)
E	≥ 0	> 45	Übergang stabil zu instabil, kein Stauabbau
F	< 0	-	völlig ungenügende Qualität, Überlastung, Zufluss grösser als Abbau

Tabelle gemäss deutschem HCM