

Verkehrstechnische Auswirkungen der Sonderphase für Linksabbieger an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage

Thomas Scholz

Jörg Ortlepp

Verkehrstechnische Auswirkungen der Sonderphase für Linksabbieger an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage

Dipl.-Ing. Thomas Scholz
Dipl.-Ing. Jörg Ortlepp

Die Unfallforschung der Versicherer veröffentlicht ihre Forschungsergebnisse in den Reihen:

FS - Fahrzeugsicherheit

VI - Verkehrsinfrastruktur

VV - Verkehrsverhalten / Verkehrspädagogik

Impressum:

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43 / 43G, 10117 Berlin

Postfach 08 02 64, 10002 Berlin

E-Mail: unfallforschung@gdv.de

Internet: www.udv.de

ISBN-Nr.: 978-3-939163-28-2

Redaktion: Dipl.-Ing. Jörg Ortlepp

Gestaltung: Michaela Gaebel

Druckerei: GDV e. V.

Berlin, Mai 2010

Im Auftrag der Unfallforschung der Versicherer (UDV)

Verkehrstechnische Auswirkungen der Sonderphase für Linksabbieger an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage

bearbeitet durch



Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften

„Friedrich List“

Professur für Straßenverkehrstechnik

Dipl.-Ing. Thomas Scholz

Bei der UDV betreut durch:

Dipl.-Ing. Werner Köppel

Inhalt

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	11
1 Einleitung und Ziel	13
2 Behandlung von Linksabbiegern an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten in den Richtlinien (RiLSA 1992, Teilfortschreibung 2003)	14
2.1 Verträgliche und nichtverträgliche Ströme	14
2.2 Linksabbieger als nichtverträgliche Ströme	15
2.3 Linksabbieger als bedingt verträgliche Ströme	17
2.4 Einsatzbedingungen der signaltechnischen Sicherung von Linksabbiegern in den Richtlinien	18
3 Stand der Erkenntnisse - Literaturlauswertung	19
3.1 Charakteristik des Unfallgeschehens	20
3.2 Anzahl und Schwere der Verkehrsunfälle	21
3.3 Unfallhäufigkeit und Auffälligkeit	25
3.4 Unfallgefahr und Sicherheitsgrad	26
3.4.1 Geometrie des Knotenpunktes	26
3.4.2 Verkehrstechnische Führung der Linksabbieger	27
3.4.3 Steuerungsverfahren	31
3.4.4 Verkehrsbelastungen	31
3.5 Aussagen zum Verkehrsablauf	32
4 Berechnungsverfahren und Auswirkungen	36
4.1 Das Bemessungsverfahren nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS 2001	36
4.1.1 Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke	36
4.1.2 Berechnung der Umlaufzeit und der Freigabezeiten	40
4.1.3 Kapazität der Fahrstreifen	40
4.1.4 Wartezeit der Kraftfahrzeugströme	42
4.2 Vergleich des Verfahrens nach HBS 2001 mit anderen Verfahren	44
4.3 Beispiel: Knotenpunktzufahrt mit unterschiedlicher Signalisierung der Linksabbieger	45
4.4 Zu überprüfende Grundlagen	48
5 Ermittlung von verkehrstechnischen Ausgangswerten	49
5.1 Auswahl von Untersuchungsfällen	49

5.2	Überprüfung der Abminderungsfaktoren zur Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärken für Linksabbiegefahrstreifen	51
5.2.1	Mess- und Berechnungsverfahren	53
5.2.3	Ermittlung der Größenordnung wichtiger Angleichungsfaktoren	56
5.3	Überprüfung der Gesetzmäßigkeiten zum bedingt verträglichen Linksabbiegen und Aussagen zum Verhalten bei innerer Mehrphasigkeit	59
5.3.1	Mess- und Berechnungsverfahren	59
5.3.2	Ungesichertes Linksabbiegen ohne zusätzliche Vor- oder Zugabezeit	60
5.3.3	Zeitweilig gesichertes Linksabbiegen mit Zugabezeit	64
6	Ergebnisse der verkehrstechnischen Berechnungen	67
6.1	Ausgangsbedingungen für die Berechnungen	67
6.2	Ergebnisse der Simulationsrechnungen	68
6.2.1	Große Kreuzungen mit Dreiecksinseln (Fall 6)	68
6.2.2	Große Kreuzung ohne Dreiecksinseln (Fall 4)	72
6.2.3	Geometrisch mittlere Kreuzung (Fall 3)	75
6.2.4	Kleine Kreuzung mit je einem Fahrstreifen in allen Zufahrten (Fall 1)	77
6.2.5	Kombination ungleicher Knotenpunktzufahrten an Kreuzungen	80
6.3	Zusätzliche Überlegungen zur Steuerung	83
6.3.1	Gesicherter Freigabe des Linksabbiegers als Vorgabezeit, Zugabezeit oder kombiniert jeweils mit fester und variabler Länge	83
6.3.2	Form der Signalisierung des Rechtsabbiegers	85
6.3.3	Auswirkungen unterschiedlicher Umlaufzeiten	87
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse verkehrstechnischer Berechnungen	87
6.4.1	Vorschlag für Veränderungen bei der Anwendung von Bemessungsverfahren	87
6.4.2	Mögliche Verkehrsstärken von Linksabbiegern bei hoher Belastung im Gegenverkehr	88
6.4.3	Gesamtkapazitäten von Knotenpunkten mit unterschiedlicher Steuerungsform	89
6.5	Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit der Sonderphasen	90
7	Einsatzempfehlungen	91
	Literaturverzeichnis	93
	Anhang	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Im Knoteninnenbereich wartende Linksabbieger, die im Gegenverkehr durchsetzen	13
Abbildung 2-1	Verträgliche und nichtverträgliche Ströme für Linksabbieger (Fußgänger-/Radfahrerströme werden in dieser Arbeit nicht betrachtet)	14
Abbildung 2-2	Gesicherte Signalisierung der Linksabbieger	15
Abbildung 2-3	Nicht gesicherte Signalisierung der "bedingt verträglichen" Linksabbieger	16
Abbildung 2-4	Zeitweilig gesicherte Signalisierung der Linksabbieger	17
Abbildung 3-1	Struktur der Unfallkategorie für die Unfälle an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005 unterschieden nach den Unfalltypen	23
Abbildung 3-2	Struktur der Unfallkategorie für die Unfälle an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005 für alle Unfälle (1), die Unfälle beim Abbiegen (2) und diejenigen Abbiegeunfälle mit Zusammenstoß mit dem Gegenverkehr (3)	23
Abbildung 3-3	Wochenganglinie der Abbiegeunfälle mit der Unfallart 5 an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005	24
Abbildung 3-4	Tagesganglinie der Abbiegeunfälle mit der Unfallart 5 an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005	24
Abbildung 3-5	Zusammenhang zwischen der Zahl der Unfälle/Jahr und der Konfliktverkehrsbelastung mit und ohne eigene Linksabbiegerphase von ZIBUSCHKA (1980)	25
Abbildung 3-6	Unfallkostenraten (DM/100 Kfz) in Abhängigkeit von Grundformvariante und signaltechnisch gesicherter Führung der Linksabbiegeströme (alle Unfälle) – STURM (1989)	27
Abbildung 3-7	Unfalldiagramm eines Außerortsknotenpunktes für das Jahr 1992 und ein Vergleich der Unfallkosten für verschiedene Verkehrsregelungen im Zeitraum von 1991 bis 1994 aus Meewes (2000)	28
Abbildung 3-8	Unfallkostenrate (UKR) für verschiedene Knotenpunkttypen (Preisstand 2000, Bezugsjahr 2000) – ECKSTEIN/MEEWES (2000)	29
Abbildung 3-9	Beispiel für eine Kombination aus gesicherter und ungesicherter Signalisierung für Linksabbieger aus den U.S.A. (http://projects.kittelson.com/pplt/index.html)	30
Abbildung 3-10	Zusammenhang zwischen der Unfallrate (Unfälle/1 Mio. Pkw-E) und der Konfliktverkehrsbelastung mit und ohne eigene Linksabbiegerphase von ZIBUSCHKA (1980)	32

Abbildung 3-11	Unfalldiagramm von einem Knotenpunkt mit LSA in Karlsruhe, an dem Linksabbieger im Gegenverkehr durchsetzen, von ZWIRNER (2004)	32
Abbildung 3-12	Anteil kritischer Abbiegevorgänge in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke von HOFFMANN/ZMECK (1982)	34
Abbildung 4-1	Bemessungsverfahren für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage	37
Abbildung 4-2	Ermittlung der Kapazität für bedingt verträgliche Linksabbieger (qualitativ)	45
Abbildung 4-3	Mittlere Wartezeit der Linksabbieger und Verkehrsstärke des Gegenverkehrs	46
Abbildung 4-4	Mittlere Wartezeit der Linksabbieger bei verschiedenen Signalsteuerungen des Linksabbiegeverkehrs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des Gegenverkehrs	43
Abbildung 5-1	Kategorisierung der Abwicklung des Linksabbiegeverkehrs an lichtsignalgeregelten Landstraßenknotenpunkten nach der Knotenpunktform und der Art der Signalisierung in der Hauptrichtung	50
Abbildung 5-2	Zwei verschiedene Formen der Signalisierung für Linksabbieger am Knotenpunkt B 170 Bannewitz/OBI bei Dresden	51
Abbildung 5-3	Vergleich der berechneten Sättigungsverkehrsstärken mit dem Zeitlückenverfahren und dem Querschnittsverfahren für kleine und mittlere Zeitlücken normiert auf eine einheitlichen Radius von $R = 55 \text{ m}$ (SEHM [2005])	54
Abbildung 5-4	Verlauf der Mediane und Mittelwerte der Folgezeitlücken aus AXHAUSEN/ FELLENDORF/HOOK (1989)	55
Abbildung 5-5	Verlauf der Mediane und Mittelwerte der Folgezeitlücken aus den Messdaten von SEHM (2005)	55
Abbildung 5-6	Vergleich der Messwerte von SEHM (2005) mit dem HBS 2001	56
Abbildung 5-7	Sättigungsverkehrsstärken in Abhängigkeit der Längsneigung aus den Messungen von SCHOLZ (2003)	57
Abbildung 5-8	Sättigungsverkehrsstärken in Abhängigkeit des SV-Anteils von SEHM (2005) für einen LA-Fahrstreifen mit $R = 18 \text{ m}$	57
Abbildung 5-9	Beispiele für Bezugsquerschnitte für Hauptstromfahrzeuge aus Weinert (2001)	60
Abbildung 5-10	Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücke für einen ungesicherten Linksabbieger mit jeweils einem separaten Fahrstreifen für Geradeausfahrer und Rechtsabbieger (mit Dreiecksinsel und aus der Signalisierung genommen) in der Gegenrichtung an einem Innerortsknotenpunkt außerhalb des Ballungsgebietes sowie das Abflussverhalten nach Ende der Freigabe im übergeordneten Strom	63
Abbildung 5-11	Messergebnisse für eine Steuerung mit nicht gesicherter Linksabbiegerführung und anschließender Zugabezeit	64

Abbildung 5-12	Abfluss der Linksabbieger nach dem Ende der Freigabezeit der übergeordneten Gegenrichtung	65
Abbildung 6-1	Fall 6: Große Kreuzung mit Dreiecksinseln	68
Abbildung 6-2	Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Geradeausfahrer für große Kreuzungen mit Dreiecksinseln (Fall 6) für eine Umlaufzeit von 90 s	69
Abbildung 6-3	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für große Kreuzungen mit Dreiecksinseln (Fall 6) für eine Umlaufzeit von 90 s	71
Abbildung 6-4	Fall 4: Große Kreuzung ohne Dreiecksinseln	72
Abbildung 6-5	Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 90 s	72
Abbildung 6-6	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 90 s	73
Abbildung 6-7	Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 60 s	74
Abbildung 6-8	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 60 s	75
Abbildung 6-9	Fall 3: Mittlere Kreuzung	76
Abbildung 6-10	Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s	76
Abbildung 6-11	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s	77
Abbildung 6-12	Fall 1: Kleine Kreuzung	78
Abbildung 6-13	Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für kleine Kreuzungen (Fall 1) für eine Umlaufzeit von 60 s und Linksabbiegeranteilen zwischen 10 und 33 %	78

Abbildung 6-14	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für kleine Kreuzungen (Fall 1) für eine Umlaufzeit von 60 s und Linksabbiegeranteilen zwischen 10 und 33 %	79
Abbildung 6-15	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 3 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 1 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s	81
Abbildung 6-16	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 4 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 3 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s	81
Abbildung 6-17	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 6 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 3 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s	82
Abbildung 6-18	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 6 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 4 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s	82
Abbildung 6-19	Gesicherte Signalisierungsvarianten für Linksabbieger bei 2 Phasensteuerung mit zeitweilig gesichertem Linksabbiegen	83
Abbildung 6-20	Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei 2 Phasensteuerung mit zeitweilig gesicherter Freigabezeit auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s	84
Abbildung 6-21	Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen 2 Phasensteuerungen mit zeitweiliger Sicherung der Linksabbieger für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s	85
Abbildung 6-22	Mögliche Signalisierungsformen für Rechtsabbieger bei zeitweilig gesicherter Linksabbiegerführung	86
Abbildung 6-23	Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei 2 Phasensteuerung mit Zugabezeit auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für große Kreuzungen (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 90 s	86
Abbildung 6-24	Knotenverkehrsstärke bei 2 Phasensteuerungen mit Zugabezeit der Linksabbieger für große Kreuzungen (Fall 4) und für eine Umlaufzeit von 90 s	87
Abbildung 6-25	Kapazitäten der Linksabbieger bei einer Gegenverkehrsstärke von $600 \text{ Fz}/(h \cdot \text{Fahrstreifen})$ für unterschiedliche Steuerungsvarianten der Linksabbieger und Knotenpunktformen – ein Ergebnis der Simulationsläufe	89
Abbildung 7-1	Einsatzgrenzen der 4 Phasensteuerung (gesichert)	92
Abbildung 7 2	Einsatzgrenzen der 2 Phasensteuerung mit variabler oder festen Zugabezeit (zeitweilig gesichert)	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Übersicht der Eingangsdaten aus den einzelnen Untersuchungen	19
Tabelle 3-2	Anteile einzelner Unfalltypen an der Gesamtunfallzahl für Knotenpunkte mit LSA [%], aktualisiert aus STURM (1989) und erweitert mit Unfällen aus Sachsen	20
Tabelle 3-3	Übersicht der Unfallzahlen im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004 und 2005	22
Tabelle 3-4	Abhängigkeiten der mittleren relativen Unfallziffer von BAIER/SCHLABBACH (1976)	26
Tabelle 3-5	Mittlere Unfallrate pro Jahr für verschiedene Steuerungsverfahren aus BRENNER et al. (1997)	31
Tabelle 4-1	Ermittlung der Angleichungsfaktoren nach HBS 2001	38
Tabelle 4-2	Berechnungsgleichungen zur Bestimmung des mittleren Reststaus für einen Untersuchungszeitraum T	43
Tabelle 4-3	Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Kraftfahrzeuge in nicht koordinierten Zufahrten (HBS 2001)	43
Tabelle 4-4	Kapazität C_{LA} und Wartezeit w für einen Linksabbiegefahrstreifen ($q_{LA} = 100$ Fz/h) bei unterschiedlicher Form der Signalisierung und einer Verkehrsstärke des übergeordneten Gegenverkehrs von $q_{GV} = 250$ Fz/h	46
Tabelle 4-5	Kapazität CL_A und Wartezeit w für einen Linksabbiegefahrstreifen ($q_{LA} = 100$ Fz/h) bei unterschiedlicher Form der Signalisierung und einer Verkehrsstärke des übergeordneten Gegenverkehrs von $q_{GV} = 450$ Fz/h	47
Tabelle 5-1	Grundsättigungsverkehrsstärken für einstreifiges Linksabbiegen in Abhängigkeit des Radius	56
Tabelle 5-2	Sättigungsverkehrsstärken für einstreifiges Linksabbiegen in Abhängigkeit von der Längsneigung (Radius $R > 20$ m)	57
Tabelle 5-3	Sättigungsverkehrsstärken für einstreifiges Linksabbiegen in Abhängigkeit des SV-Anteils (Radius $R > 20$ m)	57
Tabelle 5-4	Aktualisierte Angleichungsfaktoren für den Fahrzeugabfluss aus lichtsignalgeregelten Zufahrten	58
Tabelle 5-5	Vergleich der Grenz- und Folgezeitlücken für Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage	61
Tabelle 5-6	Zusammenstellung der Einflüsse auf die Zeitlücken	62
Tabelle 5-7	Vergleich von Sättigungsverkehrsstärken bei unterschiedlicher Linksabbiegersignalisierung für die ersten 3 und 4 Linksabbieger (LA)	66
Tabelle 6-1	Übersicht der simulierten Signalisierungsvarianten mit Festzeitsteuerung	67
Tabelle 6-2	Kategorisierung der Knotenpunktformen	80

1 Einleitung und Ziel

Knotenpunkte im Straßennetz können unterschiedliche bauliche und betriebliche Formen haben. Die Kombination von baulicher Form und Verkehrsregelung wird als Knotenpunkttyp bezeichnet (ECKSTEIN/MEEWES 2002).

Bei höherer Verkehrsbelastung werden in aller Regel vorfahrtgeregeltere Knotenpunkte von lichtsignalgesteuerten Knotenpunkttypen abgelöst. Durch eine Lichtsignalanlage (LSA) wird der Verkehrsraum innerhalb eines Knotenpunktes in zyklischer Folge (Phasenfolge) abwechselnd den konfligierenden Verkehrsströmen zur Verfügung gestellt. Der Knotenpunkt wird dann von den Verkehrsströmen nacheinander passiert. Soweit nicht eine planfreie Lösung oder ein Kreisverkehrsplatz infrage kommt, gelten lichtsignalgeregelte Kreuzungen und Einmündungen als Knotenpunkttypen mit hoher Leistungsfähigkeit und guter Verkehrssicherheit. Allerdings haben aktuelle Untersuchungen (ECKSTEIN/MEEWES 2002; VOß 1994; STURM 1989) deutliche Differenzierungen dieser Auffassung nachgewiesen: Eine Lichtsignalsteuerung macht eine Kreuzung nicht in jedem Fall sicherer als eine Vorfahrtregelung, da je nach Art der Steuerung und nach Anzahl der Phasen zunächst nur eine Veränderung in der Struktur der Sicherheitsdefizite auftreten kann, aber keine Verbesserung der Verkehrssicherheit.

Nach den Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA 1992) kommt aus Gründen der Verkehrssicherheit die Einrichtung einer LSA dann in Frage, wenn sich wiederholt Unfälle ereignet haben, die durch eine LSA hätten vermieden werden können, und wenn sich andere Maßnahmen (u. a. Geschwindigkeitsbeschränkungen) als wirkungslos erwiesen haben oder keinen Erfolg versprechen (s. RiLSA (1992), Kap. 1.3.2). Dabei sind Lichtsignalanlagen an Kreuzungen und Einmündungen für den Fahrverkehr nach § 37 Nr. 8 der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO) u. a. dann erforderlich, wo immer wieder die Vorfahrt verletzt wird, ohne dass dies mit schlechter Erkennbarkeit der Kreuzung oder mangelnder Verständlichkeit der Vorfahrtregelung zusammenhängt, was jeweils durch Unfalluntersuchungen zu klären ist. Besonders häufig sind auch außerorts Un-

fälle zwischen Linksabbiegern und dem entgegenkommenden Verkehr zu verzeichnen, was u. a. auf zu hohe Geschwindigkeiten im übergeordneten Verkehrsstrom zurückgeführt werden kann, die dann zusätzlich vom wartepflichtigen Verkehrsstrom auch noch unterschätzt werden.

In der vorliegenden Untersuchung soll deshalb geklärt werden, welche verkehrstechnischen Auswirkungen unterschiedliche Lichtsignalregelungen zum Schutz von Linksabbiegern haben (Abbildung 1-1). Insgesamt soll vergleichend dargestellt werden, inwieweit behauptete Nachteile im Verkehrsablauf minimiert und durch die Verbesserung in der Verkehrssicherheit kompensiert werden können.



Abbildung 1-1: Im Knoteninnenbereich wartende Linksabbieger, die im Gegenverkehr Durchsetzen

2 Behandlung von Linksabbiegern an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten in den Richtlinien (RiLSA 1992, Teilfortschreibung 2003)

2.1 Verträgliche und nichtverträgliche Ströme

Die Signalisierung einzelner Verkehrsströme ist so aufeinander abzustimmen, dass bei allen vorkommenden Belastungen und Betriebsbedingungen die Voraussetzung für einen sicheren Verkehrsablauf gegeben sind (s. RiLSA (1992), Kap. 1.1).

Linksabieger an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten können unterschiedlich abgewickelt werden (vgl. Abbildung 2-1). Dabei sind Ströme, die keine gemeinsame Konfliktfläche besitzen als **verträgliche** Ströme anzusehen und

können somit gemeinsam in einer Phase freigegeben werden. Eine Phase stellt einen bestimmten Grundzustand dar, während dessen die Signalbilder nicht verändert werden.

Ergeben sich für einzelne Verkehrsströme eine gemeinsame Konfliktfläche, so werden diese als **nicht verträgliche** Verkehrsströme bezeichnet. Ihre Freigabe erfolgt voneinander getrennt. Näheres dazu folgt in Kapitel 2.2.

Eine Ausnahme stellen dabei die nicht gesondert signalisierten Abbieger dar, die in den RiLSA als **bedingt verträgliche** Ströme bezeichnet werden. Die Betrachtung dieser Lösung erfolgt in Kapitel 2.3.

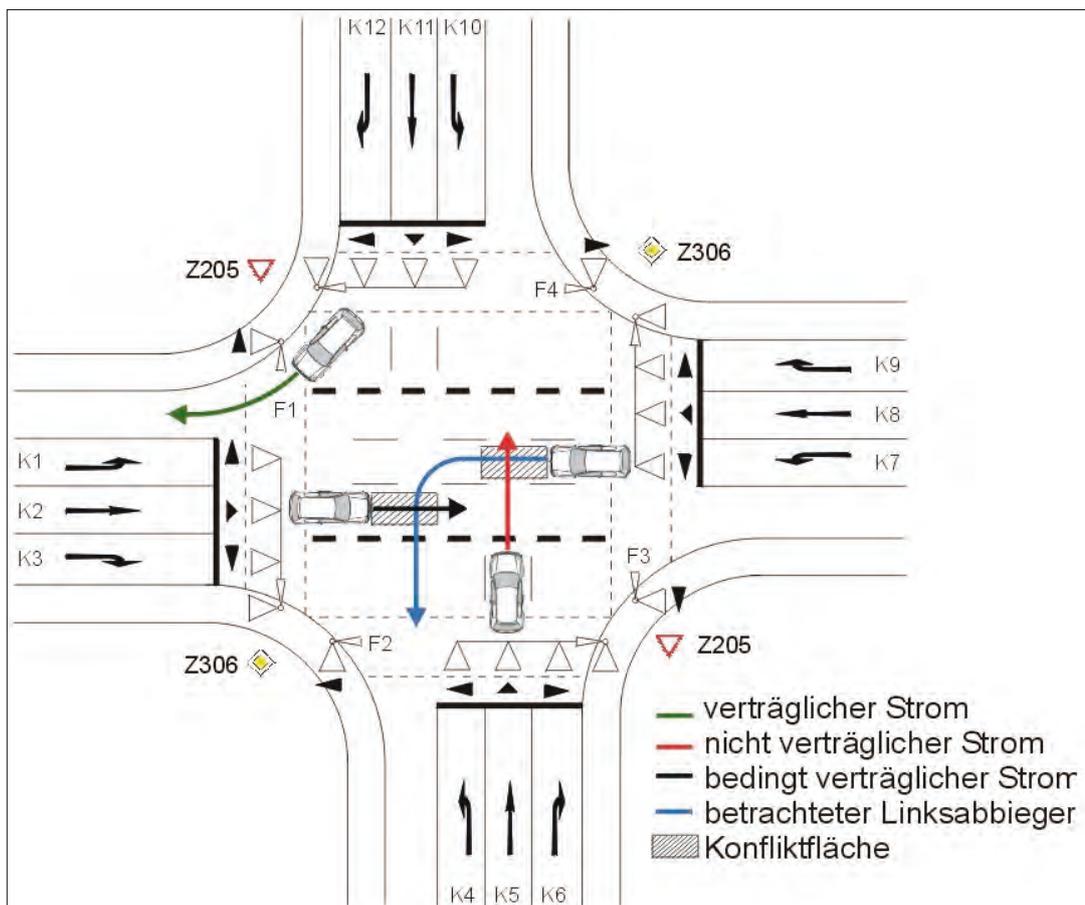


Abbildung 2-1: Verträgliche und nichtverträgliche Ströme für Linksabbieger
(Fußgänger-/Radfahrerströme werden in dieser Arbeit nicht betrachtet)

2.2 Linksabbieger als nichtverträgliche Ströme

Da Linksabbieger sowohl mit dem Gegenverkehr als auch mit Fußgängern und Radfahrern in gleicher Richtung gemeinsame Konfliktflächen haben, gelten sie vom Grundsatz als nichtverträgliche Ströme und müssen in unterschiedlichen Phasen freigegeben werden. Sie gelten dann als signaltechnisch gesichert geführt, wenn während ihrer Freigabe alle mit ihnen konfligierenden Ströme gesperrt sind.

Wird so verfahren, entstehen mehrphasige Steuerungen, bei denen nacheinander die einzelnen Geradeausverkehre und Abbiegeverkehre freigegeben werden. Gebräuchlich sind 4 Phasensteuerungen, die in vier Varianten denkbar sind (vgl. Abbildung 2-2):

- Es werden die Geradeausströme der Haupt- und der Nebenrichtung jeweils gesondert freigegeben, in getrennten Phasen werden jeweils die verträglichen Abbiegeströme freigegeben.
- Es werden die einzelnen Zufahrten nacheinander freigegeben.
- Diese beiden Systeme sind sowohl mit konfliktfreier Freigabe der Fußgänger- und Radverkehrsfurten als auch mit bedingt verträglicher Freigabe denkbar. Dadurch ergeben sich 4 Kombinationen.

Der Radverkehr wird entweder gleichzeitig mit den Fußgängern oder im Mischverkehr mit dem Kraftfahrzeugverkehr freigegeben. Der Unterschied zwischen den Varianten besteht darin, dass bei der Signalisierungsform „eigene Phase“ in den Zufahrten ein eigener Linksabbiegestreifen vorhanden sein muss. Die gegenläufigen Linksabbieger sind tan-

Form der LA-Signalisierung	Fg/Rf-Signalisierung	4 Phasensteuerung			
		I	II	III	IV
eigene Phase	konfliktfrei				
	bedingt verträglich				
Zufahrtfreigabe	konfliktfrei				
	bedingt verträglich				

Abbildung 2-2: Gesicherte Signalisierung der Linksabbieger

gential aneinander vorbeizuführen, wobei sich die Bewegungsräume der abbiegenden Bemessungsfahrzeuge nicht überschneiden dürfen (s. FGSV (1988), RAS-K, Kap. 3.3.2).

Bei der Zufahrtfreigabe bedingt die konfliktfreie Signalisierung der Fußgänger einen gesonderten Radfahrstreifen. Die bedingt verträgliche Signalisierung für Fußgänger ist mit einem (Misch-) Fahrstreifen, aber auch mit 2 Fahrstreifen getrennt für Geradeaus- und Linksabbiegerstrom möglich.

2.3 Linksabbieger als bedingt verträgliche Ströme

Während verträgliche Ströme in einer Phase zusammengefasst werden dürfen, müssen nichtverträgliche Verkehrsströme generell getrennt signalisiert werden. Eine Ausnahme gilt für abbiegende Verkehrsströme: Diese dürfen signaltechnisch nicht gesichert gleichzeitig mit Geradeausströmen geführt werden. Für sie gelten die Vorrangregeln nach § 9 Abs. 3 und 4 StVO. Solche nicht gesondert signalisierten Abbiegeströme werden in den Richtlinien als bedingt verträgliche Ströme bezeichnet. Diese Abbiegeströme müssen den Vorrang des parallelen (Fußgänger-)Stromes beachten und den entgegenkommenden Verkehrsstrom „durchsetzen“, d. h., es ist die Entscheidung der einzelnen Verkehrsteilnehmer, welche Zeitlücken sie im übergeordneten Strom annehmen oder ablehnen. Daraus entstehen 2-Phasensysteme, wie in Abbildung 2-3 dargestellt.

Zuteilung der Fahrstreifen	2 Phasensteuerung	
	I	II
Mischfahrstreifen		
separater Fahrstreifen		

Abbildung 2-3: Nicht gesicherte Signalisierung der „bedingt verträglichen“ Linksabbieger

Wird die Freigabe für Linksabbiegeströme in einen „gesicherten“ und einen „ungesicherten“ Teil untergliedert, wird dies als zeitweilig gesicherte Freigabe bezeichnet. Dabei wird nach Vorgabezeiten und Zugabezeiten unterschieden, die per Definition eine Zeitdauer darstellen, um die für einen oder mehrerer Verkehrsströme die Freigabezeit eher beginnt/später endet als für andere in gleicher Phase freigegebene Verkehrsströme (FGSV [2000]). Diese Zeiten können grundsätzlich mit und ohne Anzeige durch ein Hilfssignal gesendet werden. Die Anzeige erfolgt durch einen Grünpfeil für die gesicherte Freigabezeit und ggf. ein gelb blinkendes Signal für die Freigabezeit mit Durchsetzen.

Vorgabezeiten ohne Anzeige gelten als nicht vertretbar aus Sicherheitsgründen, Zugabezeiten ohne Anzeige sind nicht empfehlenswert, da die Zeiten schlecht ausgenutzt werden. Je nach Anzahl der Zufahrten mit Vor- bzw. Zugabezeiten entstehen Mehrphasensysteme (Abbildung 2-4).

Auch dabei sind grundsätzlich konfliktfreie und bedingt verträgliche Lösungen für die Fußgängersignalisierung denkbar. Es können auch für jede einzelne Zufahrt unterschiedliche Lösungen gewählt werden, z.B. in der Hauptrichtung stadteinwärts eine Vorgabezeit und stadtauswärts eine Zugabezeit, in der Nebenrichtung in beiden Richtungen eine Vorgabezeit oder auch die nicht gesicherte Signalisierung für Linksabbieger. Abbildung 2-4 zeigt deshalb lediglich die ersten beiden (geteilten) Phasen der grundsätzlichen Lösungsmöglichkeiten. Es können bis zu 4 geteilte Phasen entstehen, die zu sehr langen Umlaufzeiten und deshalb beispielsweise für Fußgänger und Radfahrer zu einer sehr schlechten Verkehrsqualität führen (lange Wartezeiten).

Nach den RiLSA (1992) gibt es auch die Möglichkeit, durch einen zeitlichen Versatz der Freigabe von Zufahrten Linksabbieger einer Richtung vor dem Gegenverkehr freizugeben. Solche „Vorgabezeiten“ nach Abschnitt 2.6.3 werden hier nicht als „signaltechnisch zeitweilig gesichert“ betrachtet, da diese Vorgabezeit nicht angezeigt ist und Fußgänger und Radverkehr gleichzeitig freigegeben werden. Nicht angezeigte Zugabezeiten (Nachlauf) gelten als erweiterte Räumzeiten und werden nicht als zeitweilig gesicherte Führung von Linksabbiegern betrachtet.

Form der LA-Signalisierung	Fg/Rf-Signalisierung	Mehr-Phasensystem			
		I		II	
Vorgabezeit	konfliktfrei *)				
	bedingt verträglich				
Zugabezeit	konfliktfrei *)				
	bedingt verträglich				

*) bei Fußgängerverkehr nur mit separaten Rechtsabbiegefahrstreifen möglich

Abbildung 2-4: Zeitweilig gesicherte Signalisierung der Linksabbieger

2.4 Einsatzbedingungen der signaltechnischen Sicherung von Linksabbiegern in den Richtlinien

Werden die Linksabbieger ungesichert geführt, sind zur Steuerung des Verkehrsablaufs an einer vierarmigen Kreuzung lediglich zwei Phasen notwendig. Vom Standpunkt der Leistungsfähigkeit empfahl die RiLSA (1981) eine 2 Phasensteuerung solange zu bevorzugen, wie der Verkehrsablauf nicht durch gestaute wartepflichtige Abbieger gestört wird. Begründet wurde dies mit dem Anstieg der Summe der erforderlichen Zwischenzeiten bei einer Steuerung mit mindestens drei Phasen. Im Hinblick auf die Dauer der Umlaufzeit gilt es, die Summe der erforderlichen Zwischenzeiten gering zu halten. Jedoch sollten Linksabbieger nur bei geringer Stärke eines der beiden nicht verträglichen Ströme ungesichert geführt werden (s. RiLSA (1981 und 1992)).

Linksabbieger sind nach RiLSA (1992) generell gesichert zu führen, wenn ihnen in der Knotenpunktzufahrt mindestens zwei Fahrstreifen zur Verfügung stehen. Außerdem ist die gesicherte Führung der Linksabbieger umso dringlicher,

- je schneller im Gegenverkehr gefahren wird,
- je zügiger der Linksabbiegestrom geführt wird,
- je stärker der linksabbiegende Verkehr oder der zu kreuzende Verkehr ist
- je schlechter die Sicht auf die zu kreuzenden Ströme ist und
- je mehr die Aufmerksamkeit der Linksabbieger durch die Verkehrsbedingungen beansprucht wird (z.B. mehrstreifiger Gegenverkehr oder Straßenbahn)

Besondere Erwähnung finden in den Richtlinien auch die gleichzeitig freigegebenen Fußgänger und Radverkehrsströme. Diese stellen linksabbiegende Verkehrsteilnehmer vor zusätzliche Schwierigkeiten bei bedingt verträglicher Freigabe.

Auch in der Teilfortschreibung der RiLSA 2003 werden keine Veränderungen an diesen Einsatzempfehlungen für gesicherte Linksabbieger formuliert.

Die Vorgabezeiten und Zugabezeiten zeitweilig gesichert geführten Linksabbieger werden unterschiedlich behandelt.

Sollen Linksabbieger eine **Vorgabezeit** erhalten, werden besondere Überlegungen hinsichtlich der Sicherung der Linksabbieger vorab verlangt (s. RiLSA (1992), Kap. 2.3.1.2). Vorgabezeiten können den Linksabbiegern durch ein Hilfssignal (Grünpfeil für gesichert, Gelbblinker für ungesichert) angekündigt werden. Über ein im Knotenpunkt installiertes einfeldiges Richtungssignal (Grünpfeil) wird dem Linksabbieger ein gesicherter Zeitanteil angezeigt. Die Anzeigedauer muss wenigstens die Mindestfreigabe von $t_f = 5$ s betragen. Nach dem Ende der Anzeigedauer ist der Ablauf der Zwischenzeit zum Gegenverkehr und den parallelen nichtmotorisierten Verkehrsströmen unerlässlich, bevor diese freigegeben werden dürfen. Weiterhin sollen die Linksabbieger nach dem Verlöschen des Grünpfeils durch ein gelbes Blinklicht, das über dem Richtungssignal angeordnet ist, vor den einsetzenden übergeordneten Verkehrsströmen gewarnt werden.

Ergibt sich an zwei benachbarten Knotenpunkten eine Übereckbeziehung, wird eine Vorgabezeit für Linksabbieger als wirkungsvoll angesehen, wenn die Knotenpunktabstände kurz sind und kein Platz für ausreichende Stauräume vorhanden ist.

Nach Beendigung der Freigabezeit sowie dem Ablauf der Zwischenzeiten des Gegenverkehrs und der nichtmotorisierten parallelen Verkehrsströme kann dem Linksabbiegerverkehr eine **Zugabezeit** ermöglicht werden. Die Zugabezeit wird durch ein einfeldiges Richtungssignal mit Grünpfeil (Diagonalgrün) links im Knotenpunkt angezeigt. Der Signalgeber ist so anzubringen, dass er für den Linksabbieger erst im Knotenpunkt deutlich sichtbar ist und bei der Beobachtung des Signalgebers der Gegenverkehr gleichzeitig beachtet werden kann. Zugabezeiten sind in jeder Dauer (größer als die Mindestfreigabezeit) nutzbar.

In der verkehrsabhängigen Steuerung sollen nach RiLSA (1992) Vorgabezeiten nicht verändert werden und ein Tausch zwischen Phasen mit Vorgabezeiten und Phasen mit Zugabezeiten darf nicht stattfinden.

3 Stand der Erkenntnisse - Literaturlauswertung

Die Bundesländer sind verpflichtet, laufend eine Statistik über alle Unfälle auf öffentlichen Wegen und Plätzen, bei denen Personen getötet oder verletzt oder Sachschäden verursacht worden sind, zu führen. Diese Statistiken werden anschließend zu einer Bundesstatistik zusammengeführt. Jedes Jahr wird vom Statistischen Bundesamt ein Jahresbericht herausgegeben, das verschiedene Auswertungen für das gesamte Bundesgebiet enthält (Statistisches Jahrbuch).

Die Aufnahme der Verkehrsunfälle erfolgt auf standardisierten Blättern (Verkehrsunfallanzeige) und wird von der Polizei durchgeführt. Über die Rubriken „Charakteristik der Unfallstelle“ und „Lichtsignalanlage“ können Informationen gewonnen werden, ob sich der Verkehrsunfall

an einem Knotenpunkt ereignete und wenn ja, ob dort eine Lichtsignalanlage vorhanden und ob diese zum Zeitpunkt des Verkehrsunfalls in oder außer Betrieb war. Eine Auswertung der Verkehrsunfälle über die Charakteristik der Unfallstelle fehlt jedoch im statistischen Jahrbuch, so dass keine Aussagen diesbezüglich aus der allgemeinen Statistik getroffen werden können. Aktuelle Erkenntnisse über die Verkehrssicherheit von Linksabbiegern an lichtsignalgeregelten Kreuzungen können daher nur aus der Literatur sowie aus Untersuchungen anhand der Daten der Polizei entnommen werden.

Tabelle 3-1 zeigt die wichtigsten größeren Untersuchungen aus den vergangenen Jahren zum Verkehrsablauf und der Verkehrssicherheit der Linksabbieger.

Literaturquelle		Knotenpunkte				Unfälle	
Verfasser	Jahr	Ortstage	Ort	Anzahl	mit LSA	Zeitraum	Anzahl
Baier/Schlabbach	1976	innerorts	Darmstadt	19	19	1972-74	1629
Zibuschka	1979	innerorts	Niederösterreich	86	86	1973-78	2243
Zibuschka	1980	innerorts	Niederösterreich	69	69	1973-78	1998
Hoffmann/Zmeck	1982	innerorts	Berlin, Nürnberg	44	44	1972-75	4414
Sturm	1989	außerorts	HS, RP, BY	66	42	1984-86	1538
Voß	1994	außerorts	Köln u. .a	92	31	1985-90	6013
Brenner et. al.	1997	außerorts	BW, BY	12	12	1989-95	k. A.
Eckstein/Meewes	2002	außerorts	NRW, BW	74	19	1990-95	2502

Tabelle 3-1: Übersicht der Eingangsdaten aus den einzelnen Untersuchungen

3.1 Charakteristik des Unfallgeschehens

Die Auswertung der Verkehrsunfälle an ausgewählten Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen (LSA-Knoten) in Darmstadt von BAIER/SCHLABBACH (1976) ergab, dass 36 % der Unfälle dem Unfalltyp Abbiegeunfall zugeordnet werden konnte, mit dem Zusatz „Linksabbiegerbeteiligung“ waren es noch 24 %. Diese Unfälle ereigneten sich fast ausschließlich mit dem geradeausfahrenden Gegenverkehr. Kollisionen mit dem gegenüberliegenden Rechtsabbieger werden als seltene Zufallsereignisse eingeordnet. An der Mehrzahl der Knotenpunkte waren keine signaltechnischen Sicherungsmaßnahmen für Linksabbieger vorhanden. Zusammenstöße von Linksabbiegern mit dem Gegenverkehr stellten nach den Auffahrunfällen den zweithäufigsten Unfalltyp an den untersuchten LSA-Knoten dar.

Im Unterschied zur heutigen Einteilung der Unfälle nach dem siebenstelligen Unfalltypenkatalog sind bei der Auswertung von ZIBUSCHKA (1979) in Niederösterreich die Abbiege-Unfälle und die Einbiege-Unfälle zusammen-

gefasst worden. Der Anteil der Abbiege-/Einbiegeunfälle lag bei 31 %, ist jedoch aufgrund der Einteilung nicht mit den Werten aus Deutschland vergleichbar.

Weiterführend hat ZIBUSCHKA (1980) hat seine Untersuchungen in Niederösterreich an signalgeregelten Knotenpunkten vertieft und konzentrierte sich speziell auf die Unfälle mit Linksabbiegerbeteiligung. Von den 1998 Unfällen wurden 525 Unfälle als Abbiegeunfälle mit Linksabbiegerbeteiligung (keine Differenzierung mit/ohne Linksabbiegerschutz) registriert. Dies entspricht einem Anteil von 26,3 % am Gesamtunfallgeschehen, was auch die Untersuchungen von BAIER/SCHLABBACH (1976) ergaben (24 %).

STURM (1989) hat die Ergebnisse aus der Literatur zu den wichtigsten Unfalltypen an Knotenpunkten mit LSA zusammengetragen. Die Anteilswerte sind Tabelle 3-2 zu entnehmen. Zusätzlich sind eigene Ergebnisse von Untersuchungen der Unfalldaten im Freistaat Sachsen angegeben.

Unfalltypen	Baier / Schlabbach (1976) - io	Zibuschka (1979) io	Brüde/ Larsson (1986)	Bielefeld/ Schmidt (1987)	Meewes (1988)		Sturm 1989 - ao		TUD - SA. (2004/05)	
					io	ao	kein Schutz	LA- Schutz	io	ao
Abbiegen	36	31	24**	32	39	40	32	3	24	22
Einbiegen	15		4							
Kreuzen		13	18							
Längsverkehr	38	29*	25	34	21	30	35	62	46	50
Summe	89	72	71	86	84	91	84	87	88	88

Anmerkung: * nur Auffahrunfälle

**nur Linksabbiegeunfälle

**Tabelle 3-2 Anteile einzelner Unfalltypen an der Gesamtunfallzahl für Knotenpunkte mit LSA [%],
aktualisiert aus STURM (1989) und erweitert mit Unfällen aus Sachsen**

Die Summe der Anteile der Unfalltypen Abbiegen, Einbiegen-/Kreuzen und Längsverkehr liegen an Knotenpunkten innerorts zwischen 84 und 89 %, ausgenommen die Ergebnisse von ZIBUSCHKA (1979) und BRÜDE/LARSSON (1986), und außerorts zwischen 87 und 91 %.

Den größten Anteil an den Unfallzahlen sind überwiegend dem Unfalltyp 6 „Unfälle im Längsverkehr“ zuzuordnen. Der Anteil des Unfalltyps 3 „Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle“ bewegt sich zwischen 16 und 24 % relativ konstant. Bei den Abbiegeunfällen sind deutlich Unterschiede zu erkennen. Der Anteil in Sachsen ist nur halb so groß im Vergleich zu den Werten von Meewes, die STURM (1989) aus einem Vortragsskript entnommen hat. Dies wird damit begründet, dass in beiden Untersuchungen unterschiedliche Kollektive verwendet worden sind. In den Werten für Sachsen sind alle Unfälle enthalten, wogegen Meewes nur die Unfallkategorien 1 bis 4 ausgewertet hat. Der Einfluss der Signalsteuerung wird aus den Ergebnissen von STURM (1989) sehr eindeutig: Berechnet sich für LSA-Knotenpunkte ohne Linksabbiegersicherung ein Anteil von 32 %, steht dem ein Anteil von 3 % für LSA-Knotenpunkte mit Linksabbiegerschutz in allen Zufahrten entgegen.

3.2 Anzahl und Schwere der Verkehrsunfälle

Den Einfluss der signaltechnischen Linksabbiegerführung auf die Unfallkategorie hat ZIBUSCHKA (1980) untersucht. Dafür verwendete er die Unfallgewichtsziffer, in die Unfälle mit Leichtverletzten und Unfälle mit Sachschaden mit dem Wert 1 eingehen, wogegen die Zahl der Unfälle mit Schwerverletzten 70fach und der Unfälle mit Getöteten 130fach erhöht worden sind. (Heute ist es üblich, diese Gewichtung aus volkswirtschaftlichen Kostenätzen vorzunehmen.)

An den untersuchten Knotenpunkten lag der Anteil der Unfälle mit Personenschaden bei 40 %. Wurde für den Linksabbieger keine eigene Phase vorgesehen, dann war der Anteil der Unfälle mit Personenschaden mit 62 % deutlich über dem Mittelwert. Demgegenüber beträgt

dieser Anteil bei eigener Linksabbiegephase sowie bei Unfällen ohne Linksabbiegerbeteiligung 31 %.

Dieser Unterschied fällt bei der Unfallschwere noch deutlicher aus. Für Linksabbieger ohne eigene Phase berechnet sich eine mittlere Unfallgewichtsziffer von 18,5, hingegen mit eigener Phase von nur 5,8, was noch unter der Unfallgewichtsziffer aller sonstigen Unfälle von 7,5 liegt.

Der Professur Straßenverkehrstechnik liegen die von der Polizei aufgenommenen Unfälle im Freistaat Sachsen der Jahre 2004 und 2005 in zwei Datenbanken komplett vor. Sie können mit dem Computerprogramm EUSka (elektronische Unfalltypensteckkarte) ausgewertet und grafisch dargestellt werden. Die Absolutwerte sind in Tabelle 3-3 zusammengetragen. Es ergeben sich folgende Ergebnisse:

- In den beiden Jahren ereigneten sich insgesamt 248.921 Unfälle von denen genau 180.456 Unfälle (73 %) innerhalb und 68.465 Unfälle (28 %) außerhalb geschlossener Ortschaften zugeordnet werden können.
- Der Anteil der Unfälle an Knotenpunkten nach den Angaben der Unfallanzeigen lag bei 31 %, wobei innerorts 37 % und außerorts 15 % der Unfälle an Knotenpunkten verzeichnet worden sind.
- Die meisten Unfälle an Knotenpunkten ereigneten sich, wenn keine Lichtsignalanlage vorhanden war (69 %). Wurde der Verkehr mittels einer Lichtsignalanlage geregelt (im Mittel 31 %), dann lag der Anteil der Unfälle innerorts bei 33 % und außerorts bei 20 %.
- An Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage zeigte sich, dass 88 % der Unfälle bei LSA in Betrieb und 12 % bei abgeschalteter oder ausgefallener LSA passierten.
- Bezogen auf alle Verkehrsunfälle in Sachsen ergab sich ein Anteil von 8 % für die Unfälle an Knotenpunkten mit LSA in Betrieb. Dabei zeigte sich ein Unterschied bei der Ortslage. Der Unfallanteil der Knotenpunkte innerorts lag mit 11 % höher als außerorts mit 3 %, was offensichtlich mit der Dichte von LSA-Knoten im Straßennetz zusammenhängt.
- Von den Verkehrsunfällen an Knotenpunkten ereigneten sich 28 % an Knotenpunkten mit LSA (in Betrieb), 29 % innerorts und 17 % außerorts.

Jahr	alle Unfälle			alle Knotenpunkte			Knotenpunkt nur KP mit LSA			nur LSA in Betrieb		
	alle	io	ao	alle	io	ao	alle	io	ao	alle	io	ao
2004	124.719	88.031	36.688	38.435	32.779	5.656	12.046	10.862	1.184	10.596	9.559	1.037
2005	124.202	92.425	31.777	37.921	33.278	4.643	11.702	10.865	837	10.383	9.667	716
Summe	248.921	180.456	68.465	76.356	66.057	10.299	23.748	21.727	2.021	20.979	19.226	1.753

Tabelle 3-3: Übersicht der Unfallzahlen im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004 und 2005

Von den 20.979 Unfällen an Knotenpunkten mit LSA in Betrieb hatten 3.299 Unfälle mindestens einen verunglückten Beteiligten zu beklagen. Dies entspricht einem Anteil von 16 %. Die Struktur der Unfallkategorie ist in Abbildung 3-1 differenziert nach den Unfalltypen und getrennt nach der Ortslage dargestellt. Die höchsten Anteile schwerer Unfälle (mit Personenschaden oder schwerwiegendem Sachschaden) an der Zahl der Gesamtunfälle ergaben sich bei Unfällen der Unfalltypen 3 (Einbiegen-/Kreuzen-Unfall) und 2 (Abbiegeunfall). Die Anteile lagen für E/K-Unfälle zwischen 43 und 51 % sowie für Abbiegeunfälle zwischen 33 und 37 %. Außerorts waren die Abbiegeunfälle schwerer als innerorts. Der Anteil der Abbiegeunfälle mit Personenschaden lag innerorts über dem Wert für den Bereich außerorts.

Die Unfälle mit Linksabbiegerbeteiligung werden zu dem Unfalltyp 2 zugeordnet. Da zu den Abbiegeunfällen auch der Konflikt zwischen einem Abbieger und mit einem aus gleicher Richtungkommenden Verkehrsteilnehmer Fahrzeug gezählt wird, wobei der Abbieger auch nach rechts gefahren sein kann, müssen die Abbiegeunfälle weiter gefiltert werden, um Aussagen über die Zahl der Unfälle mit Linksabbiegerbeteiligung zu erhalten. Hierbei sind nur die Unfälle von Bedeutung, wo Linksabbieger mit einem übergeordneten Fahrzeug aus der Gegenrichtung zusammenstießen. Dafür wurden nur die Abbiegeunfälle berücksichtigt, die mit der Unfallart 5 (Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt) gekennzeichnet waren. Dieser Unfallart werden nicht nur alle

Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle hinzugezählt, sondern auch die Kollisionen mit Fahrzeugen, die in andere Straßen abbiegen wollten. Die Unfallstruktur für die Konstellation Unfalltyp 2 und Unfallart 5 ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

An Knotenpunkten mit eingeschalteter LSA waren 6 % der Unfälle dem Linksabbiegen mit dem Gegenverkehr zuzuordnen. Der Anteil der schweren Unfälle lag innerorts bei 53 % und außerorts bei 55 %. Es zeigt, dass sich bei Unfällen zwischen Linksabbiegern und dem Gegenverkehr häufiger schwere Unfälle ereignen gegenüber allen Unfällen (alle Unfalltypen), und zwar innerorts und außerorts.

In den Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 sind die zeitlichen Verläufe dieser Unfälle dargestellt. Sie ereigneten sich hauptsächlich von Montag bis Freitag und im Nachmittagsspitzenverkehr von 15 bis 19 Uhr (innerorts) bzw. von 14 bis 18 Uhr (außerorts).

HOFFMANN/ZMECK (1982) haben bei ihren stichprobenhaften Auswertungen zum Unfallgeschehen der Linksabbieger an ausgewählten Berliner Knotenpunkten bei verschiedenen Steuerungsprogrammen festgestellt, dass die mittlere Tagesganglinien des Unfallgeschehens nicht mit typischen Belastungsganglinien für Stadtstraßenquerschnitte zu vergleichen sind. Auffällig waren, vergleichend zu den Ergebnissen aus Sachsen (Abbildung 3-4), die geringen Unfallzahlen in den Morgen- und Vor-

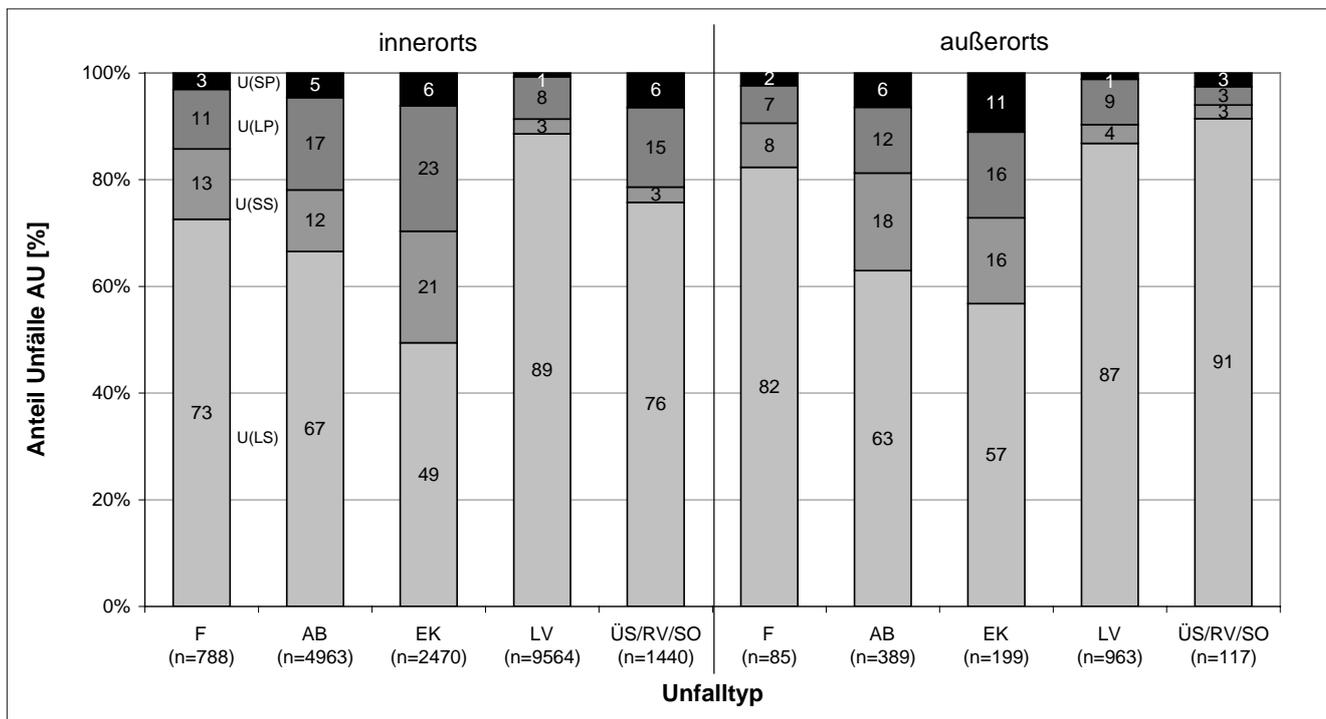


Abbildung 3-1: Struktur der Unfallkategorie für die Unfälle an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005 unterschieden nach den Unfalltypen

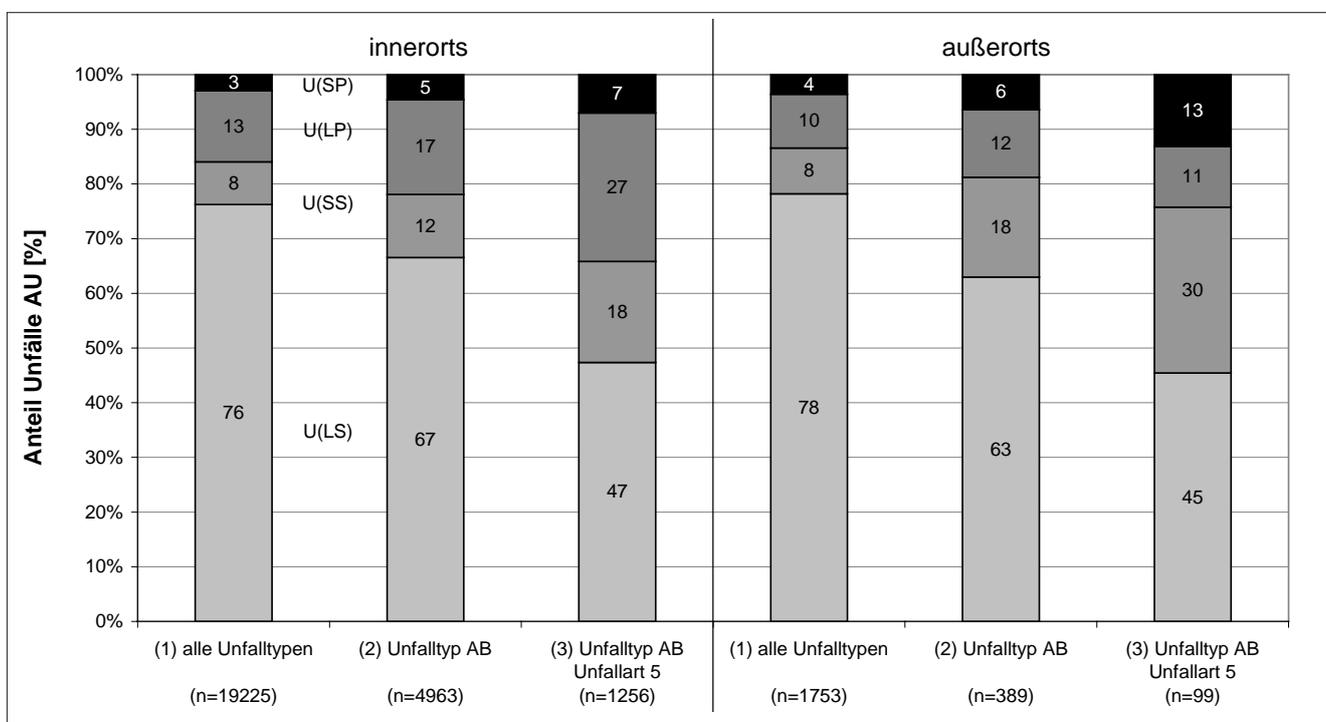


Abbildung 3-2: Struktur der Unfallkategorie für die Unfälle an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005 für alle Unfälle (1), die Unfälle beim Abbiegen (2) und diejenigen Abbiegeunfälle mit Zusammenstoß mit dem Gegenverkehr (3)

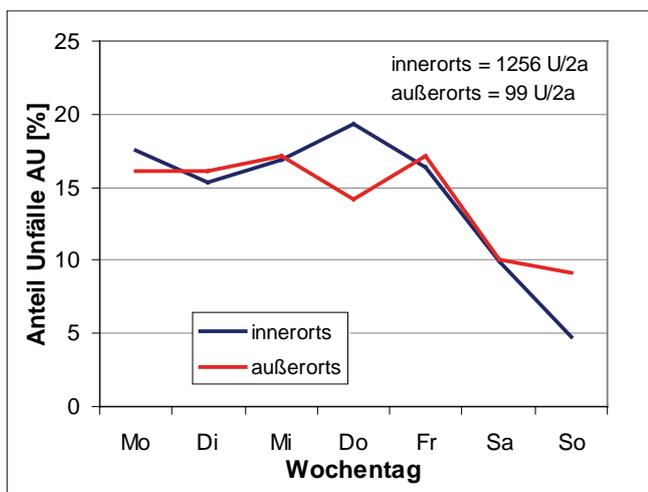


Abbildung 3-3: Wochenganglinie der Abbiegeunfälle mit der Unfallart 5 an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005

mittagsstunden sowie die höhere Werte im Nachmittagsverkehr. Als Ursache wurden die Überlagerung von Berufspendler- und Gelegenheitsverkehr sowie die geringere Konzentration in den Abendstunden genannt. Abweichend zu den Werten aus Sachsen haben HOFFMANN/ZMECK (1982) nahezu eine Gleichverteilung der Unfallhäufigkeiten über die Wochentage ermittelt.

Um den Einfluss der Verkehrsstärke auf die Anzahl der Unfälle zu untersuchen, lagen ZIBUSCHKA (1979) Verkehrsstärken aus 8-Stunden-Zählungen vor, die für den gesamten Knotenpunkt auf Tageswerte [Pkw-E/24 h] hochgerechnet worden sind. Für die 86 LSA-Knotenpunkte berechneten sich Tageswerte zwischen 5.500 und 38.000 Pkw-E/24 h. An den Kreuzungen sank die Zahl der Abbiege-/Einbiegeunfälle bis zur Verkehrsstärke von 15.000 Pkw-E/24 h auf 2 Unfälle pro Jahr und steigt dann im weiteren Verlauf auf 3,2 Unfälle pro Jahr bei 35.000 Pkw-E/24 h. An Einmündungen war die Zahl der Abbiege-/Einbiegeunfälle bis zu einer Verkehrsstärke von 20.000 Pkw-E/24 h (rund 0,5 Unfälle pro Jahr) rückläufig und nahm anschließend zu auf 1,5 Unfälle pro Jahr bei 35.000 Pkw-E/24 h. Die hohen Unfallzahlen bei geringen Belastungen begründet ZIBUSCHKA (1979) damit, dass hauptsächlich höhere Geschwindigkeiten des entgegen-

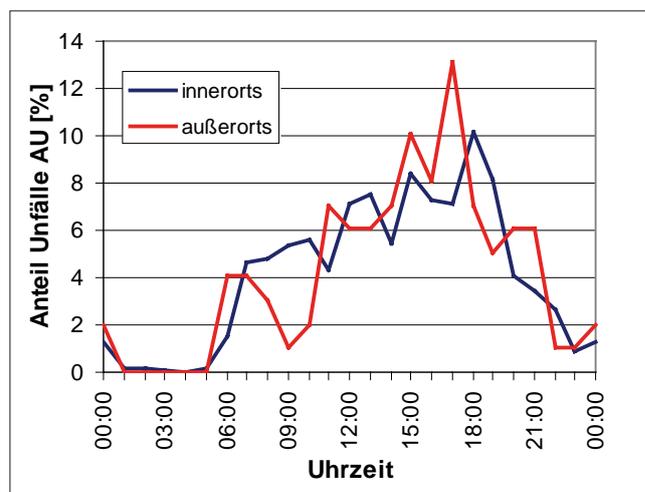


Abbildung 3-4: Tagesganglinie der Abbiegeunfälle mit der Unfallart 5 an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage (in Betrieb) im Freistaat Sachsen für die Jahre 2004+2005

kommenden Geradeausverkehrs durch den Linksabbieger falsch eingeschätzt werden.

Der Einfluss der Konfliktverkehrsbelastung, bestehend aus den Linksabbiegern und den Gegengeradeausfahrern auf die Zahl der Unfälle zeigt Abbildung 3-5. Mit zunehmender Verkehrsstärke (3.000 bis 30.000 Pkw-E/24 h) steigt die Zahl der Unfälle mit und ohne Linksabbiegerschutz an. An Knotenpunkten mit 2 Phasensteuerung ereigneten sich bei vergleichbarer Verkehrsstärke mehr Unfälle. ZIBUSCHKA (1980) gibt einen Sicherheitsgewinn von 60 % für Kreuzungen mit eigenen Linksabbiegerphasen an.

Dieser Zusammenhang zwischen Unfallzahl und Tagesverkehrsstärke am Knotenpunkt konnten HOFFMANN/ZMECK (1982) aus ihren Unfalluntersuchungen in Berlin nicht finden. Weiterhin bestand kein Zusammenhang zwischen Linksabbiegerunfälle und den Tagesverkehrsstärken der Linksabbieger und Gegengeradeausfahrern (einzeln sowie in Summe und den Gewichtung 1:1 bzw. 2:1). Vielmehr wird vermutet, dass ein Einfluss der vorherrschenden Verkehrsstärke zum Zeitpunkt des Unfalls besteht. Da keine stündlichen Verkehrsstärken vorlagen, konnte diese Hypothese nicht überprüft werden.

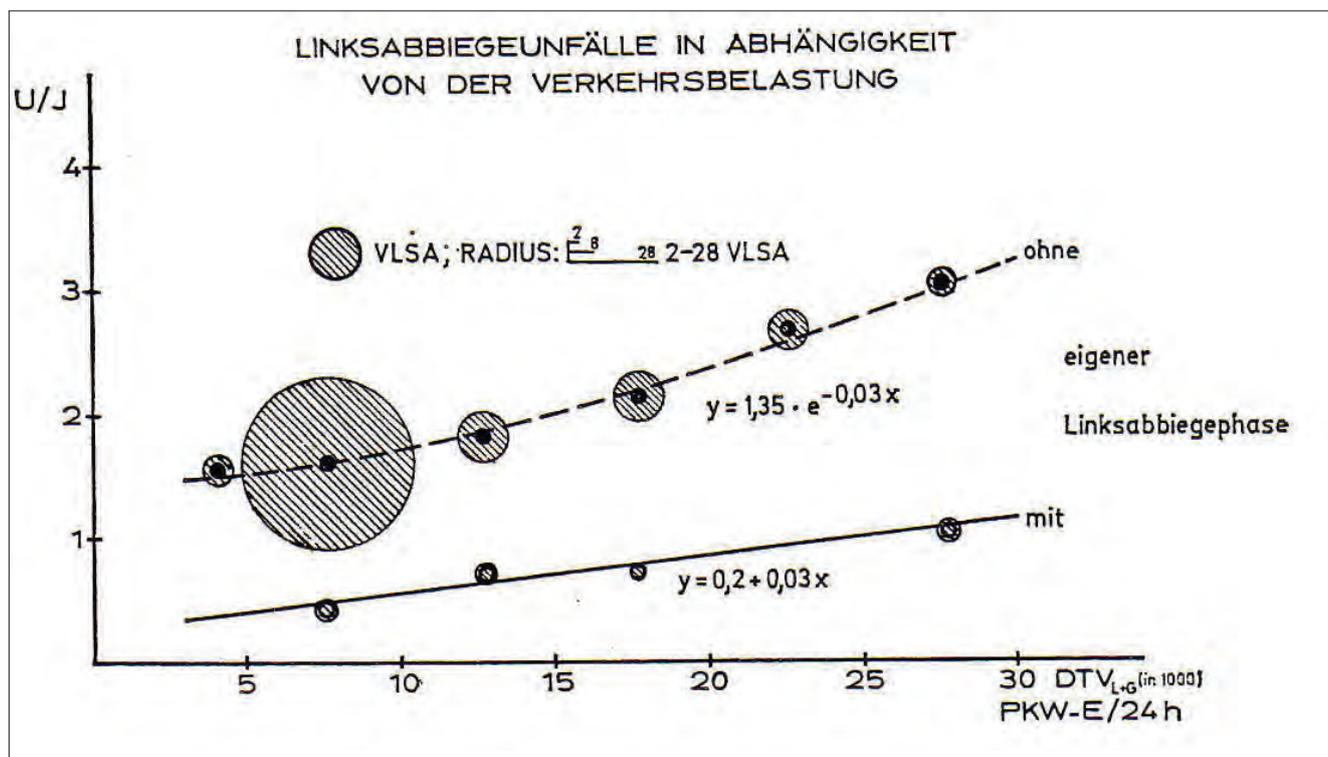


Abbildung 3-5: Zusammenhang zwischen der Zahl der Unfälle/Jahr und der Konfliktverkehrsbelastung mit und ohne eigene Linksabbiegephase von ZIBUSCHKA (1980)

Eine weitere Ursache für Linksabbiegerunfälle sehen HOFFMANN/ZMECK (1982) in der hohen Informationsflut, die auf den durchsetzenden Linksabbieger gleichzeitig einwirken und verarbeitet werden müssen. Dies sind Informationen über den weiteren Fahrweg, über den Signalisierungszustand und über das Verhalten der übergeordneten Verkehrsteilnehmer, insbesondere des Gegenverkehrs. Bei falscher Erfassung und Verarbeitung der Informationen sind Konfliktsituationen in höherem Maße möglich.

3.3 Unfallhäufigkeit und Auffälligkeit

VOß (1994) hat das Unfallgeschehen für 92 innerörtliche Knotenpunkte ausgewertet, von denen 20 ohne LSA und 31 mit LSA ausgestattet waren. Besonderes unfallauffällig zeigten sich die Kreuzungen mit LSA, für die sich eine Unfalldichte von 10 Unfällen pro Knotenpunkt und Jahr ergaben. Für Kreuzungen ohne LSA berechnete sich dage-

gen eine niedrigere Unfalldichte von 7 Unfällen pro Knotenpunkt und Jahr.

Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Unfallschwere ist der Unterschied zwischen beiden Betriebsformen noch deutlicher. Mit einer Unfallkostendichte von 192.000 DM je Knotenpunkt und Jahr lag der volkswirtschaftliche Schaden an Kreuzungen mit LSA fast doppelt so hoch im Vergleich zu Kreuzungen ohne LSA.

Diese Ergebnisse gelten aber nicht für Einmündungen, da die Auswertungen einen unauffälligeren Knotenpunkttypen ergaben, wenn eine LSA vorhanden war. Auch die Unfallkostendichte war an Einmündungen mit LSA kleiner als ohne LSA. Hinzu kommt, dass an Einmündungen ohne LSA mehr und schwerere Unfälle sich ereignen als an Kreuzungen ohne LSA. Ist eine LSA vorhanden, dann sind Einmündungen nur halb so auffällig wie Kreuzungen und die Unfallschwere ist deutlich geringer.

3.4 Unfallgefahr und Sicherheitsgrad

Das Risiko, in einen Unfall verwickelt zu werden oder dabei zu verunglücken, wird mit der Unfallrate UR (Unfallgefahr) beschrieben. Sie bildet das Verhältnis aus der Anzahl der Unfälle und der Anzahl der Überfahrten am betrachteten Knotenpunkt im gleichen Zeitraum $[U/(106 \text{ Kfz})]$ und ist das Maß für das Risiko des Verkehrsteilnehmers, in einen Unfall verwickelt zu werden.

Die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten, die durch Straßenverkehrsunfälle bezogen auf 1000 Knotenpunktüberfahrten (€/1000Kfz) entstehen, werden als Unfallkostenrate UKR (Sicherheitsgrad) bezeichnet.

3.4.1 Geometrie des Knotenpunktes

Für die nähere Betrachtung der Linksabbiegeunfälle haben BAIER/SCHLABBACH (1976) 65 Fahrbeziehungen an 19 Knotenpunkten ausgewählt. Für jede Linksabbiegebeziehung wurde das Verhältnis aus den Unfällen vom Typ Abbiegen mit Linksabbiegebeteiligung und der Verkehrsstärke berechnet. Als Bezugsverkehrsstärke wurde zum einen die Summe des wartepflichtigen Stromes und zum anderen die Summe der beteiligten Ströme (Linksabbieger + Gegenverkehrsfahrzeuge) verwendet. Als Grundlage dienen Verkehrserhebungen an den untersuchten Knotenpunkten, die sich durch 4 bis 7 h-Zählungen ergaben und auf einen DTV-Wert hochgerechnet wurden. Die berechneten Unfallraten UR (auch als relative Unfallziffer oder Unfallrelativzahl bezeichnet) in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen sind in der Tabelle 3-4.

Die Ergebnisse der Untersuchung in Bezug auf die Knotenpunktgeometrie lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Für die untersuchten Linksabbiegebewegungen berechneten sich mittlere relative Unfallziffern von 3,5 Unfällen je 1 Mio. Linksabbieger und 0,75 Unfällen je 1 Mio. Linksabbieger + Gegenverkehr.
- Mit zunehmender Anzahl der Gegenverkehrsfahrstreifen erhöhen sich die Unfallraten. Besonders deutlich ist die Zunahme, wenn die Gegenverkehrsstärke nicht berücksichtigt wird.
- Der optimale Abbiegeradius liegt bei 20 m. Vor allem bei größeren Radien steigt die Unfallrate an, da sowohl die Abbiegegeschwindigkeit als auch die Länge der kritischen Konfliktfläche zunehmen.
- Mit steigendem Versatz der entgegengerichteten Linksabbiegefahrstreifen zueinander und mit starken Linksabbiegerströmen in beiden Richtungen ergeben sich höhere Unfallraten aufgrund zunehmend widrigerer Sichtbedingungen für den Linksabbieger zu den bevorrechtigten Kraftfahrzeugströmen.
- Alle drei Einflüsse sind voneinander unabhängig.
- Steigungen und Gefälle zeigen keinen nachweisbaren Einfluss.

HOFFMANN/ZMECK (1982) haben dagegen keinen maßgebenden Einfluss der Knotenpunktgeometrie auf die Verkehrssicherheit nachweisen können. Vielmehr traten Überlagerungen verschiedener Einflussfaktoren auf, die aber nicht voneinander getrennt werden konnten.

mittlere UR bezogen auf	Gegenfahrstreifen		Abbiegeradius [m]					Versatzbreite [m]		
	einer	mehrere	10-17	18-22	23-27	28-37	> 37	0	2-7	9-12
Linksabbieger	1,4	4,2	3,2	1,4	2,1	3,69	7,3	1,9	3,0	6,1
LA + Gegenverkehr	0,5	0,8	0,5	0,3	0,5	0,8	1,7	0,5	0,5	0,6

Tabelle 3-4: Abhängigkeiten der mittleren relativen Unfallziffer von BAIER/SCHLABBACH (1976)

3.4.2 Verkehrstechnische Führung der Linksabbieger

Ein wichtiger Grund der Untersuchungen von BAIER/SCHLABBACH (1976) war u. a. die umstrittene Frage des Einsatzes von Vorgabezeiten zu untersuchen. Die Verwendung von Vorgabezeiten erfolgte in Darmstadt häufig an Knotenpunkten, an denen die Linksabbieger auf gemischten Fahrstreifen geführt wurden. Ein Verkehrssicherheitsproblem durch diese Form der Linksabbiegerführung konnte aus den Unfallzahlen von 3 Kreuzungen allgemein nicht abgeleitet werden. Probleme zeigte diese Regelungsform bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen z. B. an weiträumigen Kreuzungen mit großen Abbiegeradien. Durch den „Hessischen Lichtzeichenerlass“ wurden Vorgabezeiten-Regelungen wenig später untersagt. Auch durch das Anzeigen von Zugabezeiten (Nachgabezeiten) ergab sich keine veränderte Verkehrssicherheit.

VOß (1994) hat bei seinen Untersuchungen an Knotenpunkten innerorts eine höhere Unfallgefahr ermittelt, wenn an Kreuzungen und Einmündungen keine LSA vorhanden war. Wird die Unfallschwere hinzugezogen, dann sind Kreuzungen mit LSA unsicherer als ohne LSA. Bei Einmündungen ist eine höhere Sicherheit gegeben, wenn

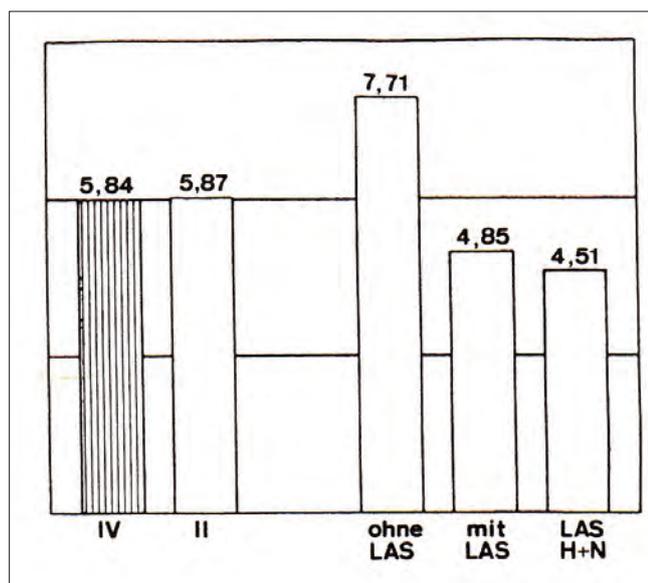


Abbildung 3-6: Unfallkostenraten (DM/100 Kfz) in Abhängigkeit von Grundformvariante und signal-technisch gesicherter Führung der Linksabiegeströme (alle Unfälle) – STURM (1989)

eine LSA vorhanden ist. Bei seinen Untersuchungen mit Schwerpunkt in Köln waren die meisten LSA ohne Linksabbiegerphase bzw. -schutz geschaltet.

STURM (1989) hat das Unfallgeschehen an 66 Knotenpunkten im Zuge von Außerortsstraßen untersucht. Die Knotenpunkte gliedern sich in 24 Knotenpunkte ohne LSA, die plangleich (II) oder teilplangleich (IV) sind, und in 42 plangleiche Kreuzungen mit LSA. Seine Auswertungen zeigen, dass die höchste Unsicherheit von Knotenpunkten mit LSA und ohne Linksabbiegersicherung (ohne LAS) ausgeht (Abbildung 3-6). Würde auf den Einsatz der LSA verzichtet werden, hätte dies zur Folge, dass die Unsicherheit am Knotenpunkte (II) sinkt und die LSA nur zur Steigerung der Kapazität beiträgt. Damit müsste der Betrieb von LSA in dieser Form in Frage gestellt werden.

Mit dem Einsatz von Lichtsignalanlagen und der Sicherung von Linksabbiegern auf mindestens einem Straßenzug (mit LAS) nimmt die Sicherheit des Knotenpunktes deutlich zu. Die höchste Verkehrssicherheit ist bei vollständiger Sicherung der Linksabbieger (LAS H+N) gegeben.

In MEEWES (2000) sind die Unfallkosten für einen Außerortsknotenpunkt mit verschiedenen Verkehrsregelungen dargestellt (vgl. Abbildung 3-7). Der Verkehrsablauf an diesem Knotenpunkt wurde bis einschließlich 1991 mit einer Vorfahrtregelung ohne LSA betrieben. Aus der Unfalluntersuchung ging er als Unfallhäufungsstelle (UHS) hervor. Als geeignete Maßnahme gegen das Unfallgeschehen wurde eine Lichtsignalanlage installiert, die keine Sicherung der Linksabbieger vorsah. Die Unfallkosten für den Zeitraum von 8 Monaten stiegen von 1,23 auf 1,98 Mio. DM an, was einer Zunahme um 61 % entspricht und somit eine deutliche Verschlechterung des Unfallgeschehens zur Folge hat. Daraufhin erhielten die durchsetzenden Linksabbieger eine zusätzliche gesicherte Zugabezeit und die Unfallkosten halbierten sich von 1,98 auf 0,96 Mio. DM im Untersuchungszeitraum. Im Folgejahr wurde dann der Linksabbieger komplett gesichert geführt. Die Unfallkosten verringerten sich deutlich auf 0,36 Mio. DM. Ohne Linksabbiegerschutz ergaben sich 5,5 Mal höhere Unfallkosten gegenüber der gesicherten Verkehrsregelung.

ECKSTEIN/MEEWES (2002) und MEEWES (2003) haben die Verkehrssicherheit an 74 Landstraßenknotenpunkten im Zuge von einbahnigen, zweistreifigen Landstraßen untersucht. Als Unterscheidungsmerkmale dienten die Knotenpunktgrundform und die Betriebsform. Es zeigte sich, dass Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage nicht unbedingt sicherer sind als Verkehrszeichen geregelte Knotenpunkte ohne LSA. Kommt lediglich eine 2-Phasensteuerung zum Einsatz (ohne Linksabbiegerschutz), dann hat diese Betriebsform mit dem Vorfahrtknoten die höchste Unfallkostenrate. Die Verkehrssicherheit kann nur erhöht werden, wenn die Signalsteuerung mit Linksabbiegerschutz ausgerüstet worden ist. Durch den Linksabbiegerschutz bei mehrphasiger Signalsteuerung wird die Unfallkostenrate halbiert. Da die Mehrkosten einer drei- bzw. vierphasigen Lichtsignalsteuerung vergleichsweise gering sind, sollten Lichtsignalsteuerungen mit nur zwei Phasen für den Neu- oder Umbau nicht zugelassen werden (ECKSTEIN/MEEWES (2002), Abbildung 3-8).

In einer Pilotstudie hat EVERT (1994) das Verständnis von Lichtsignalregelungen beim Linksabbiegen in der Schweiz

näher untersucht. Zum Untersuchungszeitpunkt konnte für die Abwicklung des Linksabbiegers aus 5 verschiedene Lichtsignalregelungen ausgewählt werden. Neben einem Vollgrün waren 4 Grünpfeilvarianten möglich, von denen eine Variante eine komplette Sicherung der Linksabbieger anzeigte und die drei restlichen Varianten mit verschiedenen Gelbblinkern zusätzlich auch den Vorrang anderer Verkehrsströme hingewiesen hat. Der Vergleich der Varianten wurde nicht mit der Unfallstatistik geführt, stattdessen wurden Probanden die alle Regelungen mit verschiedenen Fahrstreifenaufteilungen gezeigt. In einer vorgegebenen kurzen Zeit mussten 6 Fragen zur Verkehrsregelung beantwortet werden. Die Regelung bei Grünpfeil (gesichertes Linksabbiegen) wurde von sehr vielen Befragten (72 %) eindeutig verstanden. Große Schwierigkeiten hatten die Befragten mit der Regelung bei Vollgrün. Daher kam der EVERT zu dem Schluss, dass statt dem Vollgrün die Pfeilregelung mit Gelbblinker zum Einsatz kommen sollte. In Deutschland ist diese Variante nach StVO nicht möglich.

Auch ALLENBACH/HUBACHER (2002) kamen bei ihren statistischen Auswertungen von Verkehrsunfällen an

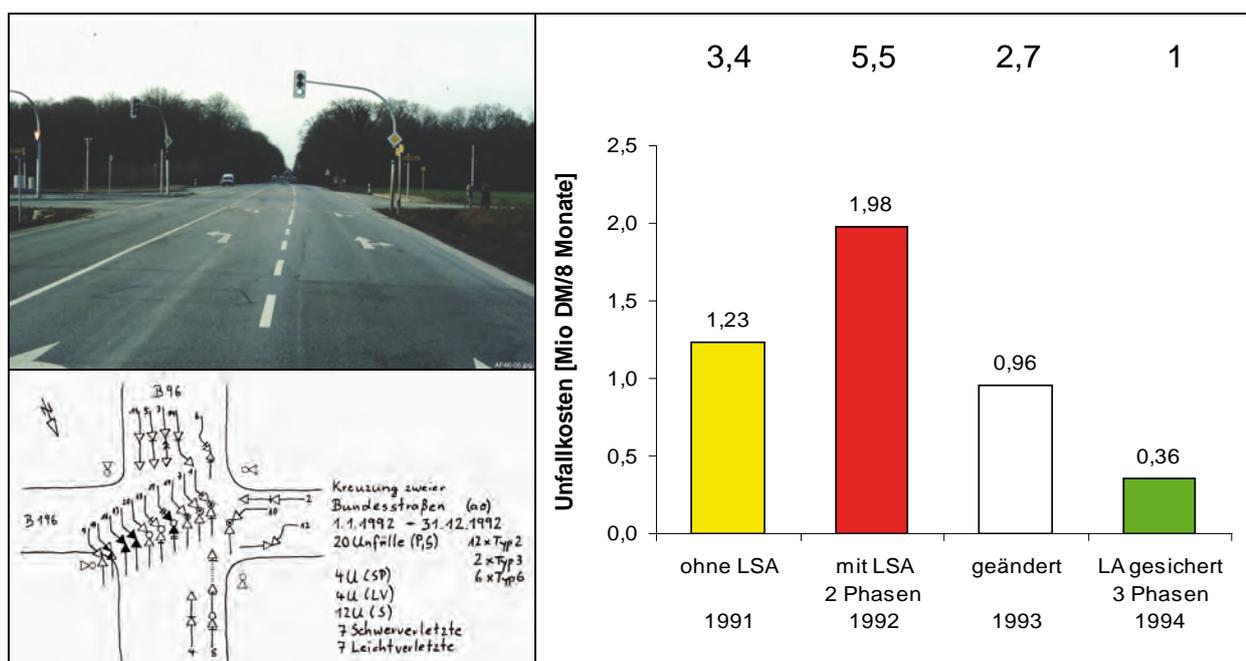


Abbildung 3-7: Unfalldiagramm eines Außerortsknotenpunktes für das Jahr 1992 und ein Vergleich der Unfallkosten für verschiedene Verkehrsregelungen im Zeitraum von 1991 bis 1994 aus Meewes (2000)

Knotenpunkten mit LSA und den darauf aufbauenden Modellen zu dem Ergebnis, dass Vollgrün wo immer möglich zu vermeiden sind. Im Knoteninnenbereich zeigte sich eine starke Risikoerhöhung, wenn Sichtbehinderungen durch abbiegende Fahrzeuge möglich sind, was insbesondere bei Unfällen durch Fahrzeuge von Konfliktströmen eine bedeutsame Rolle spielt.

In den USA werden Linksabbieger häufig ungesichert geführt. Zusätzlich werden gesicherte Vorgabezeiten (Lead Phasing) sowie Zugabezeiten (Lag Phasing) gesendet. Die Verknüpfung einer gesicherten mit einer ungesicherten Phase für linksabbiegende Verkehrsteilnehmer wird als PPLT (Protected Permissive Left-Turn) bezeichnet. Zur Realisierung des PPLT müssen sowohl Signale für das gesicherte als auch für das ungesicherte Linksabbiegen zur Verfügung stehen. Am häufigsten werden für den Linksabbieger Signalgeber mit 4 oder 5 Leuchtfeldern verwendet, die horizontal als auch vertikal angebracht werden können. Ein Beispiel für eine Kombination von Vorgabezeit und Durchsetzen zeigt Abbildung 3 9. Als Grund für den Einsatz einer solchen Verkehrsregelung wurden vor allem die Minimierung der Verkehrsbehinderung durch den Linksabbieger, die Steigerung der Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes, ein geringerer Kraftstoffverbrauch, eine bessere Umweltverträglichkeit eine Erhöhung der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit und eine Verminderung der Halte festgestellt. Verkehrs-

behinderungen gehen um 30 bis 50 % zurück. Besonders effektiv sei diese Verkehrsregelung in Verbindung mit koordinierten Phasensystemen. Dabei sind vor allem die Minimierung der Wartezeiten für Linksabbieger als auch die größere Flexibilität bei der Wahl der Länge der Freigabezeiten von Bedeutung.

Im Mittelpunkt der Untersuchung von BREHMER et al. (2003) stand die Begreifbarkeit der verschiedenen möglichen signaltechnischen Führungen der Linksabbieger. Es zeigte sich u. a., dass bei ungesicherter Führung die vorhandenen Zeitlücken im übergeordneten Gegenstrom nur selten genutzt werden. Auch zeigten sich Probleme beim Phasenablauf. Durchsetzende Linksabbieger deuteten den Signalisierungszustand Rot für die Geradeausfahrer und Gelbblinken für die Linksabbieger als ein gesichertes Abfließen der Linksabbieger. Dabei war die Freigabe der übergeordneten Gegenrichtung noch nicht beendet worden, so dass Kollisionen nicht auszuschließen sind. Diese Fehlinterpretation der Linksabbieger wird auch „yellow trap“ (gelbe Falle) genannt.

BASHA/BOX (2003) untersuchten an verschiedenen Knotenpunkten in Phoenix/Arizona die Unfälle mit Vor- oder Zugabezeiten für Linksabbieger. Dabei bezogen sie sich nur auf die Linksabbiegeunfälle mit Frontalzusammenstoß. Bei ihren Recherchen fanden sie heraus, dass 45 % der Knotenpunktsunfälle in den USA durch Linksabbieger

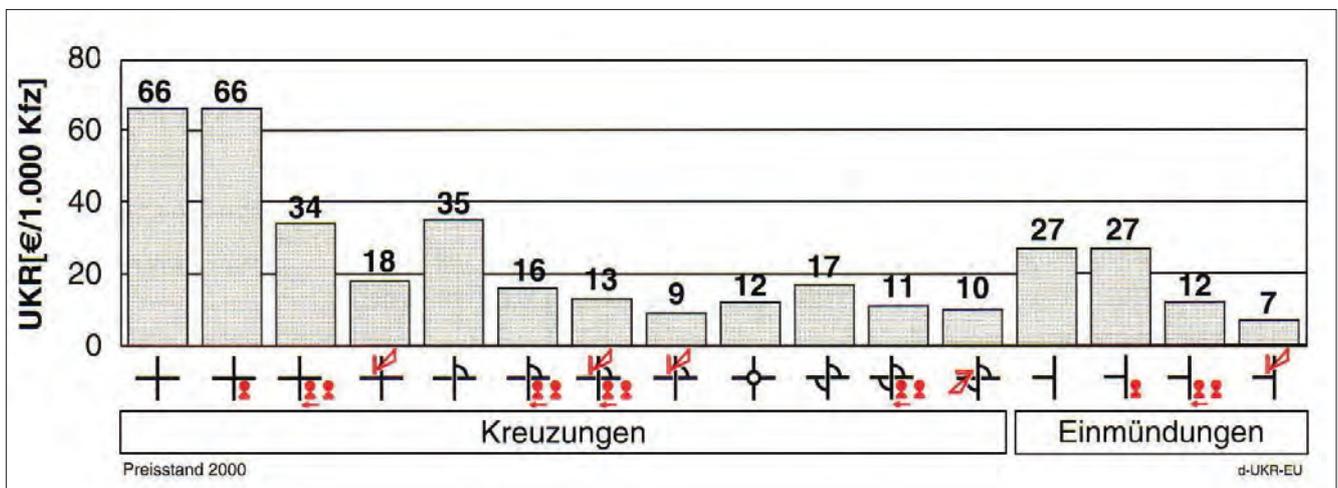


Abbildung 3-8: Unfallkostenrate (UKR) für verschiedene Knotenpunkttypen (Preisstand 2000, Bezugsjahr 2000) – ECKSTEIN/MEEWES (2000)

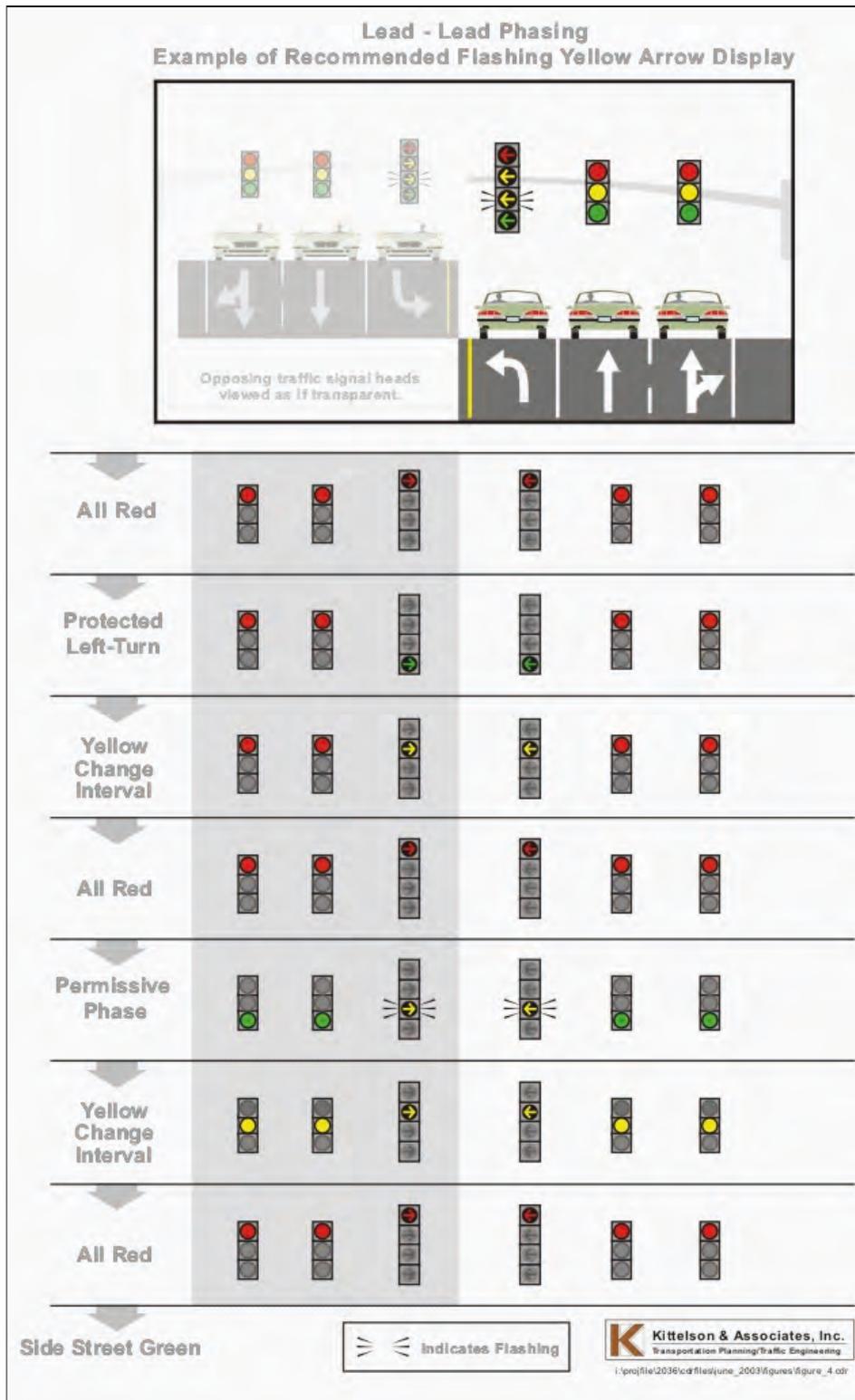


Abbildung 3-9: Beispiel für eine Kombination aus gesicherter und ungesicherter Signalisierung für Linksabbieger aus den USA. (<http://projects.kittelson.com/pplt/index.html>)

verursacht werden. Bei einer Stichprobe von 107.000 signalisierten Knotenpunkten zeigte sich, dass an 29 % der Anlagen ein Mix aus gesicherten und ungesicherten Linksphasen vorhanden war, davon 83 % mit Vorlaufzeit, 11 % mit Zugabezeit und 6 % mit Vor- und Zugabezeit. In der Untersuchung wurden die Unfälle an 8 Knotenpunkten mit Vorgabezeit und 14 Knotenpunkte mit Zugabezeit miteinander verglichen. Dabei ergaben sich keine Sicherheitsvorteile für die Vor- oder die Zugabezeit. Unterschiede zeigten sich beim Vergleich der gesicherten und der ungesicherten Führung. Das Linksabbiegen mit eigener Phase stellte sich als eine deutlich sichere Signalisierungsform dar. Dagegen sind Signalprogramme mit einer Kombination von gesicherter und ungesicherter Linksabbiegerführung leicht unsicherer im Vergleich zu den reinen ungesicherten Linksabbiegerführungen.

3.4.3 Steuerungsverfahren

BRENNER et al. (1997) haben die Sicherheitsrisiken an Lichtsignalanlagen herausgearbeitet, die sich durch den zeit- und/oder verkehrabhängigen Einsatz von mehr als einem Steuerungsverfahren ergeben. Dafür wurde zuerst das Unfallgeschehen an den relevanten Knotenpunkten untersucht. Der Einfluss aus dem Steuerungsverfahren (Festzeitsteuerung, Signalprogrammmanpassung und Signalprogrammabbildung) wurde bei den Unfalltypen 3 (nur durch Rotlichtmissachtung) und 6 (nur Auffahrkonflikt vor der Haltlinie) gesehen. Alle weiteren Unfalltypen sowie witterungsbedingte Ursachen sind in dieser Untersuchung vernachlässigt worden. Die berechneten Unfallraten sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst.

Unfalltyp	Festzeit	SP-Anpassung	SP-Bildung
Vorfahrt	0,08	0,11	0,19
Längsverkehr	1,25	1,11	0,38
Summe	1,33	1,22	0,57

Tabelle 3-5: Mittlere Unfallrate pro Jahr für verschiedene Steuerungsverfahren aus BRENNER et al. (1997)

Mit zunehmender Flexibilität der Steuerung stieg das Risiko der Rotlichtüberfahrt mit Unfallfolge an (Vorfahrt). Die mittlere Unfallrate im Längsverkehr (Auffahrkonflikt) nahm hingegen ab. Zusammengefasst zeigte sich, dass von den flexibleren Verfahren eine niedrigere Unfallgefahr ausging. Aussagen zum Einfluss der Steuerungsverfahren auf die Führungsmöglichkeiten des Linksabbiegers wurden nicht getroffen.

3.4.4 Verkehrsbelastungen

Bei ihren Untersuchungen in Darmstadt fanden BAIER/SCHLABBACH (1976) keine gesicherten statistischen Zusammenhänge zwischen den relativen Unfallziffern (Unfallrate) und der Verkehrsbelastung oder dem Belastungsverhältnis Linksabbieger: Gegenverkehr war nicht nachweisbar.

ZIBUSCHKA (1979) hat im Gegensatz zu den Untersuchungen von BAIER/SCHLABBACH (1976) die Verkehrsstärke des gesamten Knotens zur Berechnung der Unfallrate verwendet. Dabei zeigte sich, dass die Wahrscheinlichkeit (Unfallrate) in einen Abbiege-/Einbiegeunfall verwickelt zu werden, bei kleinen Knotenverkehrsstärken am höchsten ist. Die Unfallrate sinkt mit zunehmender Verkehrsstärke. Ab der Knotenverkehrsstärke von 23.000 Pkw-E/24 h sind die Unfallraten annähernd konstant bei einem Wert von 0,25 Unfällen/1 Mio. Pkw-E.

Auch bei seiner speziellen Untersuchung der Unfälle mit Linksabbiegerbeteiligung konnte Zibuschka (1980) einen Zusammenhang zwischen der Unfallrate und der Konfliktverkehrsbelastung (hier: Summe aus Linksabbieger und Gegengeradeausfahrzeuge) ermitteln. Er unterschied dabei auch zwischen ungesicherter und gesicherter Führung der Linksabbieger. Die Wahrscheinlichkeit an einem Unfall beteiligt zu sein, ist bei kleinen Verkehrsstärken und ohne separate Linksabbiegerphase sehr hoch (Abbildung 3-10). Mit zunehmender Verkehrsstärke der übergeordneten Gegengeradeausfahrzeuge werden die Zeitlücken zum Durchsetzen kleiner, so dass ein Abfließen der Linksabbieger nur während des Phasenwechsels möglich ist. Bei gesicherter Linksabbiegerführung ist die Unfallgefahr deutlich kleiner. Der Einfluss der Verkehrsstärke ist gering, die Unfallrate sinkt linear mit zunehmender Ver-

kehrsstärke minimal. Bei kleinen Verkehrsstärken ist die Unfallrate bei gesicherter Linksabbiegerführung deutlich niedriger gegenüber der ungesicherten Führung.

Auch KREBS/KLÖCKNER (1977) haben einen Zusammenhang zwischen Unfallrate und Verkehrsstärke feststellen können. Im Bereich zwischen 1.000 und 16.000 Fz/d nahm die Unfallrate mit zunehmender Verkehrsstärke ab. STURM (1989) stellt diesen Rückgang der Unfallrate in Frage. Die Ergebnisse von früheren Untersuchungen ließen ihn zu dem Schluss kommen, dass der positive Einfluss breiter Fahrbahnen den „wahren“ Einfluss der Verkehrsstärke verdeckt. Nach seinen Aussagen zeigten die ausgewerteten Literaturangaben einen Anstieg der Unfallrate bei zunehmender Verkehrsstärke an. Die Ergebnisse von KREBS/KLÖCKNER (1977) führt STURM (1989) auf eine mögliche Auswertung von Kollektiven mit sehr kleinen Verkehrsstärken oder eine Überlagerung der Einflüsse von Fahrbahnbreite und Verkehrsstärken zurück.

ZWIRNER (2004) zeigte stellvertretend das Unfallgeschehen an einem einzelnen Knotenpunkt mit LSA in Karlsruhe. An dieser Unfallhäufungsstelle traten sehr viele Abbiegeunfälle zwischen Linksabbiegern und dem Geradeausfahrern der Gegenrichtung auf. Die nähere Untersuchung der UHS ergab, dass nach dem Erkennen der ausreichend großen Zeitlücke für das in erster Po-

sition stehende Fahrzeug und dem passieren der Konfliktfläche der nachfolgende Linksabbieger durch den Mitschleppereffekt ohne Beachtung des übergeordneten Verkehrsstroms dem ersten Fahrzeug folgte. Begünstigt wurde diese Situation noch durch die verhältnismäßig geringe Verkehrsstärke der Geradeausfahrer und durch die Sicht-behinderungen der gegenüberstehenden Linksabbieger (Abbildung 3-11).

3.5 Aussagen zum Verkehrsablauf

Wartepflichtige Linksabbieger haben während der Freigabezeit nur dann die Möglichkeit abzufließen, wenn im Gegenverkehr ausreichend lange Zeitlücken vorhanden sind. Die dabei auftretenden Probleme vergleicht KRÜGER (1985) mit denen an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage:

- Mindestzeitlücken, die erforderlich sind, um ein gefahrloses Durchsetzen des bevorrechtigten Stromes zu ermöglichen, werden falsch eingeschätzt.
- Vorhandene Zeitlücken werden aus Gründen ungenügender Sichtverhältnisse und unterschiedlichen Geschwindigkeitsverhaltens der Kraftfahrer im bevorrechtigten Fahrzeugstrom nicht richtig beurteilt.
- Bei zunehmender Wartezeit (Phasendauer) wächst die Bereitschaft der Kraftfahrer zu riskanten Verhalten.

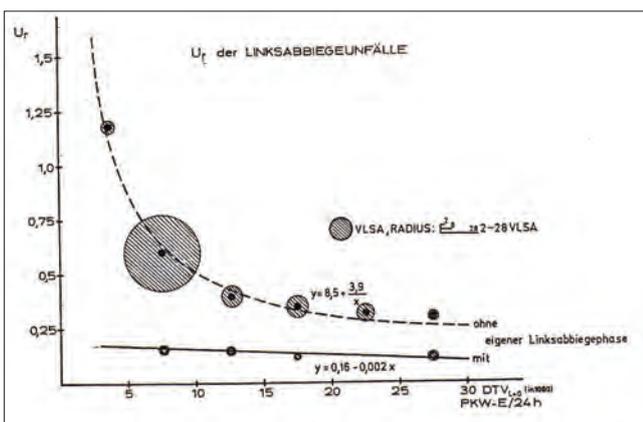


Abbildung 3-10: Zusammenhang zwischen der Unfallrate (Unfälle/1 Mio. Pkw-E) und der Konfliktverkehrsbelastung mit und ohne eigene Linksabbiegerphase von ZIBUSCHKA (1980)

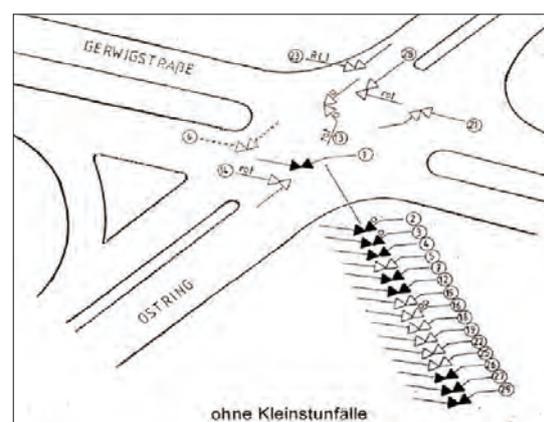


Abbildung 3-11: Unfalldiagramm von einem Knotenpunkt mit LSA in Karlsruhe an dem Linksabbieger im Gegenverkehr durchsetzen von ZWIRNER (2004)

- Durch den sog. Mitschleppeneffekt ist die Anzahl derjenigen Fahrzeuge, die gemeinsam eine angebotene Zeitlücke im bevorrechtigten Verkehrsstrom annehmen, größer als die Länge der Zeitlücke zulässt.
- Das Kreuzen der eigenen Fahrspur durch Fahrzeuge einer wartepflichtigen Fahrtrichtung verursacht bei Kraftfahrern der bevorrechtigten Fahrtrichtung Unsicherheiten und unerwartete Reaktionen, was zu Gefährdungen nachfolgender Fahrzeuge führt (Auf-fahrerunfälle).
- Unterschiedliche Annahmefähigkeiten von Zeitlücken führen zu Behinderungen zwischen Fahrzeugen der wartepflichtigen Fahrtrichtung.

Nach dem Ende der Freigabezeit können die Linksabbieger, wenn keine Zugabezeit vorgesehen ist, während des Phasenwechsels räumen. Um dabei Kollisionen mit den nachfolgenden freigegebenen Strömen zu vermeiden, wird in FGSV (1981) eine Verlängerung der Zwischenzeiten vorgeschlagen, was KRÜGER (1985) so begründet:

- Der Mitschleppeneffekt führt dazu, dass Fahrzeuge des Fahrzeugstroms, der während der Freigabezeit im Knotenpunkt gestaut wurde, die Haltlinie nach Rotbeginn überfahren.
- Der Räumvorgang der im Knotenpunkt wartenden Fahrzeuge beansprucht eine größere Zeit als bei der Bemessung der erforderlichen Zwischenzeiten idealisierend angenommen wird, da
 - a) wartende Fahrzeuge erst nach einer Orientierungszeit die zur Beobachtung der bevorrechtigten Fahrtrichtung und zur Entscheidung zur Weiterfahrt notwendig ist, den Räumvorgang einleiten,
 - b) räumende Fahrzeuge aus dem Stand anfahren müssen.
- Die Bereitschaft zu riskanten Frühstarts vergrößert sich bei denjenigen wartepflichtigen Kraftfahrern, die längere Wartezeiten umgehen wollen.

In der Fachliteratur wird stets über die kongruierenden Größen Sicherheit und Kapazität geschrieben. Eine höhere Sicherheit für Linksabbieger wird mit einer vollständig gesicherten Führung erzielt. Dies hat zur Folge, dass die Kapazität des Knotenpunktes sinkt, da sich die

zum Abfließen ungenutzte Zwischenzeitsumme auf Grund der höheren Anzahl der Phasen im Umlauf erhöht. BAIER/SCHLABBACH (1976) und ZIBUSCHKA (1980) haben 2 und 4 Phasensteuerungen an vierarmigen Kreuzungen rechnerisch miteinander verglichen. Dabei ergab sich, dass bei üblichen Umlaufzeiten (60-90 s) der Anteil der Zwischenzeiten an der Umlaufzeit für ein Zweiphasensystem bei 14-20 % liegt, gegenüber einem Anteil von 25-40 % für ein Vierphasensystem. Die Leistungsfähigkeit sinkt bei einer 4 Phasensteuerung gegenüber einer 2 Phasensteuerung um 12 % (Umlaufzeit $t_U = 90$ s) bis 25 % (Umlaufzeit $t_U = 60$ s). Die Verfasser führen zu den rechnerischen Leistungsfähigkeiten weitere Verluste an, da bei einem Zweiphasensystem die nicht genutzten Freigabezeiten der übergeordneten Gegenrichtung durch den Linksabbieger in Anspruch genommen werden und die Zwischenzeiten dem Abfließen der aufgestauten Linksabbieger dienen.

Bei seinen theoretischen Untersuchungen zur Problematik der durchsetzenden Linksabbieger hat DEIST (1972) über Simulationsläufe ermittelt, dass die eigene Phase, der aus Gründen der Sicherheit und der Flexibilität in der Programmauswahl der Vorzug zu geben ist, auch leistungsmäßig günstiger ist. Dies gilt besonders im Spitzenstundenverkehr, wo Linksabbieger durch die hohe Verkehrsstärke des übergeordneten Verkehrs nicht durchsetzen können.

ZIBUSCHKA (1980) empfiehlt aufgrund seiner Sicherheitskenntnisse in erhöhtem Maße dort den Einbau eigener Linksabbiegephasen, wo „genügend Leistungsreserven“ vorhanden sind. Weiterhin kann durch Linksabbiegephasen mit Bedarfsanmeldung ein optimaler Kompromiss zwischen Kapazität und Verkehrssicherheit erzielt werden.

HOFFMANN/ZMECK (1982) haben den Verkehrsablauf im werktäglichen Tagesverkehr für drei verschiedene Formen des Linksabbiegers (ohne Sicherung, mit Vor- oder Zugabezeiten) an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten näher untersucht. Eine Befragung im Jahre 1976 zeigte, dass rund 6.900 LSA (in 49 Städten der alten Bundesländer) 50 % der Linksabbieger ungesichert geführt werden.

Eine Vorgabezeit war für 5 % der Linksabbiegerströme (meist im Zuge von „Grünen Wellen“) vorgesehen, 25 % hatten Zugabezeiten (die restlichen 20 % eine eigene Phase). Durch die verkehrstechnischen Messungen konnten folgende Ergebnisse gewonnen werden:

- Die meisten Linksabbieger fließen in der Vorgabezeit ab. Da Linksabbieger bereits während der Freigabezeit des Gegenverkehrs abbiegen können, wartet nur ein kleinerer Teil auf den Schutz der Zugabezeit. Dieser Anteil ist von der Auslastung der Gegenverkehrszufahrt abhängig und ist größer bei Kenntnis der Zugabezeit. Dies weisen die Verfasser anhand der Abbildung 3-12 nach: Die Anteile „kritischer“ d. h. ungesicherter Linksabbieger sind bei gleichen Linksabbiegeverkehrsstärken in Zugabezeiten deutlich geringer als bei Vorgabezeiten und ungesicherter Freigaben.
- Vorgabezeiten unter 10 s Dauer sind nicht sinnvoll, da infolge der Einfahrzeit in den Knotenpunkt und der Orientierungszeit nur wenige Linksabbieger in der gesicherten Phase abbiegen können.

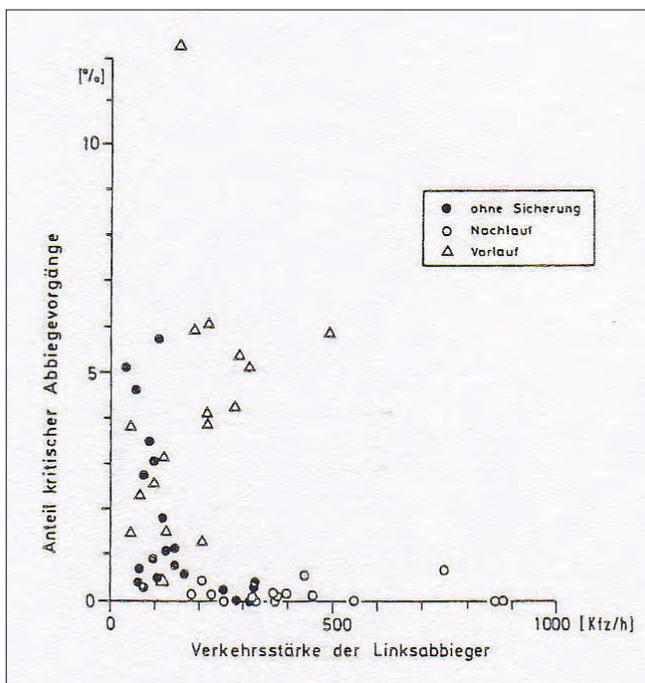


Abbildung 3-12: Anteil kritischer Abbiegevorgänge in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke von HOFFMANN/ZMECK (1982)

- Nur 7 % aller Abbiegevorgänge werden durch die Annahme von Zeitlücken des Gegenverkehrs abgewickelt. Davon sind 94 % der durchsetzenden Linksabbieger der Pkw und Krad und lediglich 6 % den Schwerlastfahrzeugen zuzuordnen.
- 18 % der Zeitlückenannahmen erweisen sich als „kritische“ Fahrvorgänge (Zeitlücken < 3 s), da weitere Folgen nur durch eine Reaktion des Gegenverkehrsfahrzeugs vermieden werden konnten. Kritische Zeitlücken treten am häufigsten am Ende der Vorgabezeiten beim Anfahren des Gegenverkehrs auf. Vor allem bei hoher Auslastung im Linksabbiegestrom wurde ein Mitschleppeffekt beobachtet.

Bei Lichtsignalanlagen mit Zugabezeit wurde beobachtet, dass der Räumvorgang der Linksabbieger nach Durchfahrt des Gegenverkehrs später begonnen hat als bei anderen Signalprogrammen (vgl. Linksabbieger mit eigener Phase). Die Linksabbieger orientieren sich in der Mehrzahl am Verhalten der Gegenverkehrsfahrzeuge am Ende der Freigabezeit. Er ist damit abhängig, ob die Fahrer des Gegenverkehrs die Gelb-/Rotzeit noch zum Abfließen nutzen. Durch Hilfssignale (zweifellig) konnte keine Beeinflussung des Fahrverhaltens der Linksabbieger (Beginn oder Ende des Räumvorganges) erreicht werden.

Anlehnend an die Untersuchungsmethodik von HOFFMANN/ZMECK (1982) hat auch KRÜGER (1985) die Suche nach verkehrstechnischen Kenngrößen zur Beschreibung der Sicherheit an Knotenpunkten mit LSA mit Hilfe der Verkehrskonflikttechnik vorgenommen. Die Auswertung amtlicher Unfallstatistiken führte nach Aussage des Verfassers wegen einer Vielzahl enthaltener Unzulänglichkeiten zu keinen befriedigenden Ergebnissen. Für voll ausgelastete Konfliktpunkte mit hohen Linksabbiegeranteilen ergaben sich folgende Tendenzen:

- Kritische Fahrmanöver nehmen zahlenmäßig zu, wenn
 - bei gleicher Stärke der Linksabbieger der Anteil des Gegenverkehrs zunimmt,
 - bei gleicher Belastungssumme der Anteil des Gegengeradeausverkehrs zunimmt,
 - mehr Zeitlücken durch Linksabbieger angenommen werden.

- Kritische Fahrmanöver nehmen zahlenmäßig ab, wenn
 - bei gleicher Stärke des Geradeausstromes der Anteil der Linksabbieger zunimmt,
 - bei gleicher Stromrelation die Belastungssumme zunimmt.

Weiterhin gibt KRÜGER an, dass bei Linksabbiegeranteilen unter 15 % an der Konfliktpunktbelastung jedes Abbiegemanöver zu kritischen Situationen führt. Messungen, um die Richtigkeit des ermittelten Ansatzes zu überprüfen und seine Parameter ggf. zu kalibrieren, wurden aufgrund des zu hohen Mess- und Aufbereitungsaufwandes nicht durchgeführt. Dafür kam eine Idealisierung der Grenzwertfunktion als quantitative Annäherung an die ermittelten Funktionen unter Berücksichtigung der aufgezeigten Tendenzen zum Einsatz.

Aus seinen Untersuchungsergebnissen hält KRÜGER ungesichert Freigaben und daraus resultierende kleine Phasenzahlen u. a. für unbedenklich bei:

- sehr geringen Verkehrsstärken von Abbiegeströmen ($< 1 \text{ Fz/Umlauf}$),
- einstreifigen Knotenpunktzufahrten mit ausreichenden Aufstellplätzen im Knotenpunkt,
- überwiegendem Pkw-Verkehr,
- kleinen Umlaufzeiten und
- kurzen Räumwegen für die Abbieger.

Eine Bevorzugung der ungesicherten Freigabe von Linksabbiegern schlägt KRÜGER vor, wenn u. a.:

- sie auf einem eigenen Fahrstreifen geführt werden,
- sie vollständig in den Räumzeiten abfließen können, ohne Fahrzeuge der nachfolgenden Phase zu behindern und
- ihre Verkehrsstärke größer ist als diejenige des Gegenverkehrs.

Da diese Bedingungen nicht immer zutreffen, schlägt KRÜGER vor, dass im Einzelfall geprüft werden sollte, zu welchen Vorteilen Phasentrennungen gegenüber der gleichzeitigen Freigabe führen. Vereinfachend sollte davon ausgegangen werden, dass Phasentrennungen dann

zu Verbesserungen führen, wenn u. a. folgende Fälle bei ungesicherter Freigabe eintreten:

- Linksabbieger können nicht vollständig in den Räumzeiten abfließen,
- die Verkehrsstärke der Linksabbieger sind kleiner als diejenigen des Gegenverkehrs,
- Abbieger werden beim Abflussvorgang behindert und
- bei kombinierter Spurführung werden nachfolgende Fahrzeuge anderer Ströme durch wartepflichtige Abbieger behindert.

4 Berechnungsverfahren und Auswirkungen

4.1 Das Bemessungsverfahren nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS 2001

Das Bemessungsverfahren nach HBS im Kapitel 6 ersetzt alle bisher gebräuchlichen verkehrstechnischen Verfahren für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage, soweit nicht Einzelheiten, z. B. zur Ermittlung der Zwischenzeiten nach den RiLSA ergänzend zu verwenden sind. Dies wird auch in der Teilfortschreibung der RiLSA 2003 zum Ausdruck gebracht.

Das Bemessungsverfahren sieht grundsätzlich die in Abbildung 4-1 dargestellten Arbeitsschritte vor. Im Einzelnen bedeutet dies folgendes Vorgehen:

- Die Knotenpunktgeometrie inklusive der Anzahl Fahrstreifen in allen Zufahrten muss bekannt sein. Ebenso sind die Verkehrsstärken als Bemessungsverkehrsstärken (maßgebende Stunde), die Verkehrsströme und die Zusammensetzung der Verkehrsbelastung nach Fahrzeugarten darzustellen.
- Mithilfe der Ausgangsdaten wird ein Phasensystem ausgewählt. Dieser Phasenablauf wird im weiteren Verlauf des Bemessungsverfahrens noch einmal korrigiert, wenn dadurch die Summe der Zwischenzeiten minimiert werden kann.
- Als nächstes erfolgt die Ermittlung der Zeiten für die Phasenübergänge, d.h. die Zwischenzeiten, die sich aus Überfahrzeiten, Räumzeiten und Einfahrzeiten zusammensetzen, sowie die Festlegung der Mindestfreigabezeiten.
- Parallel dazu werden die Sättigungsverkehrsstärken berechnet, die sich theoretisch ergeben würden, wenn eine volle Stunde Freigabezeit gesendet würde. Dazu ist der Zeitbedarf der einzelnen Fahrzeuge zugrunde zu legen, d.h. unterschiedlich für Pkw und Schwerverkehr, für Geradeausfahrer und Abbieger usw.
- Mithilfe der ermittelten Werte kann eine wartezeitoptimale Umlaufzeit berechnet werden, die auf praktikable Werte gerundet wird (60, 90 oder 100 s). Unter Berücksichtigung der Verkehrsbelastung werden die verfügbaren Freigabezeiten auf die Signalgruppen verteilt.

- Die Kapazität der Fahrstreifen ergibt sich als Produkt aus Sättigungsverkehrsstärke und Freigabezeitanteil.
- Das HBS liefert Zusammenhänge zwischen diesen Kapazitäten und den Wartezeiten der einzelnen Ströme.

Dieses Verfahren gilt für die Ermittlung der notwendigen Parameter einer Festzeitsteuerung. Da hoch ausgelastete Knotenpunkte auch mit verkehrabhängiger Steuerung in Zeiten der Spitzenstunde in eine Festzeitsteuerung übergehen, soll vorrangig auch dieses Verfahren zur Grundlage der Abschätzung gemacht werden. Im Rahmen der Simulation werden aber auch die Auswirkungen verkehrabhängiger Steuerungen untersucht.

4.1.1 Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke

Die Sättigungsverkehrsstärke q_s [Fz/h] ist eine wichtige Eingangsgröße zur Berechnung der Signalprogrammdaten (Umlaufzeit und Wartezeit) und der Qualitätsgrößen (z. B. Wartezeit). Sie gibt an, wie viele Fahrzeuge in einer signalisierten Knotenpunktzufahrt je Fahrstreifen abfließen können, wenn in der betrachteten Zufahrt eine Stunde Dauergrün gesendet wird:

$$q_s = \frac{3600}{t_B} \quad (4-1)$$

mit q_s = Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h]
 t_B = Zeitbedarfswert [s/Fz].

Zur Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärke für einen Verkehrsstrom sieht das HBS 2001 ein analytisches und ein empirisches Verfahren vor.

Mit dem **analytischen Berechnungsverfahren** wird die Sättigungsverkehrsstärke näherungsweise aus einer Standardsättigungsverkehrsstärke unter der Berücksichtigung von Abminderungsfaktoren bestimmt. Der Sättigungsverkehrsstärke unter Standardbedingungen wird in Abhängigkeit der zu erwartenden Freigabezeit ermittelt.

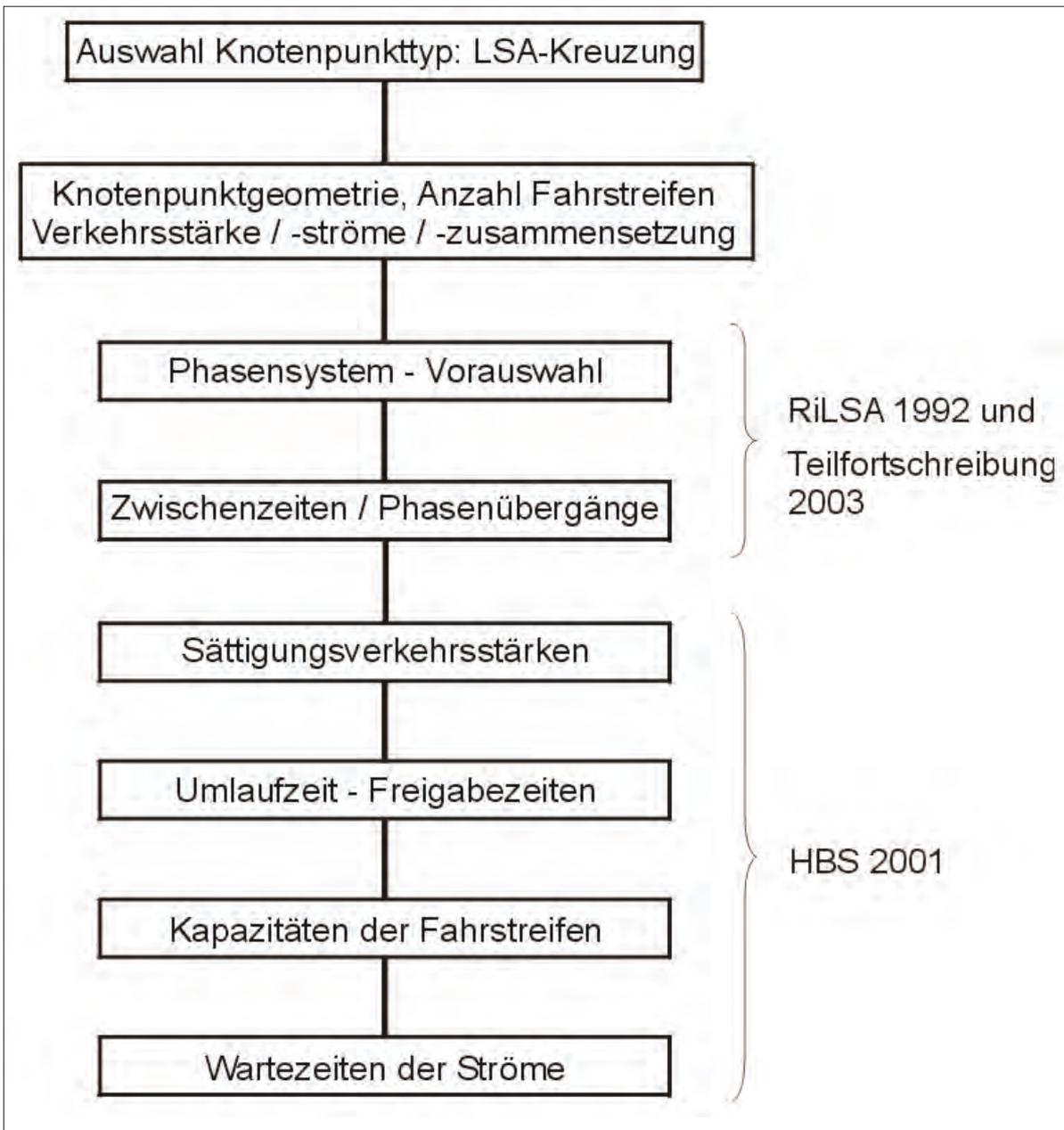


Abbildung 4-1: Bemessungsverfahren für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage

Dafür sind im HBS 2001 unter der Voraussetzung, dass der Schwerverkehrsanteil (SV-Anteil) kleiner 2 % beträgt, folgende Ausgangswerte angegeben:

- $t_F > 10 \text{ s} \rightarrow q_{S,st} = 2000 \text{ Pkw/h,}$
- $t_F = 10 \text{ s} \rightarrow q_{S,st} = 2400 \text{ Pkw/h}$
und
- $t_F = 06 \text{ s} \rightarrow q_{S,st} = 3000 \text{ Pkw/h.}$

Bei kurzen Freigabezeiten ($\leq 10 \text{ s}$) und hohem Zufluss hat sich allgemein gezeigt, dass sich rechnerisch kleinere Zeitbedarfswerte während der Grünzeit ergeben, weil noch verstärkt während der Gelbzeit in den Knotenpunkt eingefahren wird, so dass höhere Sättigungsverkehrsstärken angenommen werden können. Liegt die Freigabezeit zwischen 6 und 10 s, ist die Sättigungsverkehrsstärke zwischen beiden Werte zu interpolieren.

Nach der Aufstellung eines Signalzeitenplans ist zu überprüfen, ob möglicherweise kurze Freigabezeiten auftreten. Der Ausgangswert der Sättigungsverkehrsstärke ist dann anschließend noch anzupassen.

Bauliche Gegebenheiten, meteorologische Bedingungen sowie die Art der verkehrlichen Zusammensetzung des betrachteten Verkehrsstromes wirken unterschiedlich auf die Sättigungsverkehrsstärke ein. Besonders der Anteil von Schwerlastfahrzeugen (Busse, Lkw und Lastzüge) hat einen starken Einfluss auf die Sättigungsverkehrsstärke.

Im HBS 2001 sind für die folgenden fünf Angleichungsfaktoren Werte berechenbar:

- Schwerverkehrsanteil,
- Fahrstreifenbreite,
- Abbiegeradius,
- Fahrbahnlängsneigung und
- Fußgängerverkehr.

Die Richtwerte zur Ermittlung der Angleichungsfaktoren sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Werden für einen bestimmten Verkehrsstrom mehrere Angleichungsfaktoren berechnet ($f \neq 1,00$), schlägt das HBS 2001 vor, nur zwei Faktoren zur Anpassung der Sättigungsverkehrsstärke an realitätsnahe Verhältnisse zu berücksichtigen. Schnabel/Lohse (1997) begründen dies damit, dass bei der Verwendung mehrerer Angleichungsfaktoren Überlagerung der einzelnen Einflüsse auftreten und dadurch zu niedrige Sättigungsverkehrsstärken bestimmt werden. Es wird empfohlen, neben dem Schwerverkehrsanteil nur noch eine dominierende Einflussgrößen in Ansatz zu bringen. Damit gilt:

$$q_S = f_1 \times f_2 \times q_{S,st} \tag{4-2}$$

mit

q_S = Sättigungsverkehrsstärke für die konkrete Bedingung [Fz/h]

f_1, f_2 = Angleichungsfaktoren (höchstens zwei ansetzen) [-]

$q_{S,st}$ = Standardsättigungsverkehrsstärke nach Tabelle 4-1 [Pkw/h]

Einflussgröße		Angleichungsfaktor
Schwerverkehrsanteil	SV < 2 % SV = 2 ... 15 % SV > 15 %	$f_{SV} = 1,00$ $f_{SV} = 1 - 0,0083 e^{0,21 SV}$ $f_{SV} = 1 / (1 + 0,015 \times SV)$
Fahrstreifenbreite	2,60 m 2,75 m ≥ 3,00 m	$f_b = 0,85$ $f_b = 0,90$ $f_b = 1,00$
Abbiegeradius	R ≤ 10 m ≤ 15 m > 15 m	$f_R = 0,85$ $f_R = 0,90$ $f_R = 1,00$
Fahrbahnlängsneigung	Steigung + 5 % + 3 % Ebene 0 % Gefälle - 3 % - 5 %	$f_S = 0,85$ $f_S = 0,90$ $f_S = 1,00$ $f_S = 1,10$ $f_S = 1,15$
Fußgängerverkehr	stark mittel schwach	$f_F = 0,80$ $f_F = 0,90$ $f_F = 1,00$

Tabelle 4-1: Ermittlung der Angleichungsfaktoren nach HBS 2001

Sättigungsverkehrsstärken sind immer separat für alle am Knotenpunkt vorhandenen Verkehrsströme im Kraftfahrzeugverkehr zu berechnen. Wird eine Fahrstreifen von zwei Verkehrsströmen z.B. Linksabbieger und Geradeausverkehr gemeinsam benutzt, ist anschließend in Abhängigkeit des Verkehrsstärkeanteils z.B. des Linksabbiegers die Sättigungsverkehrsstärke für den Mischfahrstreifen q_{SM} zu bestimmen:

$$q_{SM} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k a_i / q_{Si}} \quad (4-3)$$

mit

q_{SM} = Sättigungsverkehrsstärke des Mischfahrstreifens [Fz/h]

a_i = Verkehrsstärkeanteil des Stroms i auf dem Mischfahrstreifen [-]

q_{Si} = Sättigungsverkehrsstärke des Stroms i [Fz/h]

k = Anzahl der Ströme auf dem Mischfahrstreifen [-]

Die Sättigungsverkehrsstärke kann auch auf der Grundlage von Verkehrsmessungen bestimmt werden. Im Anhang A des HBS 2001 (s. S. 6-75f) werden zwei **empirische Verfahren** zur Ermittlung der tatsächlichen Sättigungsverkehrsstärke für einen Fahrstreifen vorgeschlagen:

- Um das *Querschnittsverfahren* einsetzen zu können, sind in allen Umläufen vollausgelastete Zufahrtstreifen notwendig. Durch eine Messung der Freigabezeiten und der direkten Zählung der Kraftfahrzeuge, die in den entsprechenden Freigabezeiten ungestört abgeflossen sind, kann die Sättigungsverkehrsstärke einfach bestimmt werden. Die Messungen sollten in den Spitzenverkehrsstunden durchgeführt werden, da in diesen verkehrsreichen Zeiten die Kapazität des betrachteten Fahrstreifens voll in Anspruch genommen wird.
- Für den Einsatz des *Zeitlückenverfahrens* sind vollausgelastete Zufahrten nicht zwingend erforderlich. Nach dem Beginn der Freigabezeit wird für jedes Fahrzeug auf einem bestimmten Fahrstreifen der Zeitpunkt

notiert, wenn der Fahrzeugbug die Haltlinie erreicht hat. Voraussetzung für diese Verfahren ist jeweils eine ausreichend lange stehende Fahrzeugkolonne bei Freigabezeitbeginn. Für die Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke ist die Zeit von Freigabezeitbeginn bis zur Überfahrt des Fahrzeugbugs des letzten Kolonnenfahrzeuges – maximal jedoch die geschaltete Freigabezeit – zu stoppen.

In beiden Verfahren sind nur die Fahrzeuge zu berücksichtigen, die aus dem Stand angefahren sind und innerhalb dieser Freigabeperiode abfließen konnten. Die Anzahl der Schwerverkehrsfahrzeuge ist zusätzlich zu notieren. Bei vollausgelasteten Zufahrten sind die Gelb- und Rotfahrer zu markieren. Die Sättigungsverkehrsstärke q_{Si} für jedes Beobachtungsintervall berechnet sich zu

$$q_{Si} = \frac{3600 \cdot n_i}{t_{Fi}} \quad (4-4)$$

mit

q_{Si} = Sättigungsverkehrsstärke der Fahrzeugkolonne i [Fz/h]

n_i = Anzahl der eingefahrenen Fahrzeuge einschließlich der Fahrzeuge in der Überfahrzeit [Fz]

t_{Fi} = geschaltete Freigabezeit [s]

Um ein gesichertes Ergebnis zu erhalten, schlägt das HBS 2001 eine Messreihe von mindestens 20 Kolonnen vor. Die Sättigungsverkehrsstärke q_S des untersuchten Fahrstreifens berechnet sich über das arithmetische Mittel

$$\bar{q}_S = \frac{\sum_{i=1}^k q_{Si}}{k} \quad (4-5)$$

wert aus den Einzelwerten:

mit

q_{Si} = Sättigungsverkehrsstärke der Fahrzeugkolonne i [Fz/h]

k = Anzahl der Beobachtungswerte [-]

4.1.2 Berechnung der Umlaufzeit und der Freigabezeiten

Vor der Ermittlung der Umlaufzeit muss für jeden Fahrstreifen das Verkehrsflussverhältnis b bestimmt werden. Es berechnet sich als Quotient aus der entsprechenden Zuflussverkehrsstärke q_i und der dazugehörigen Sättigungsverkehrsstärke q_{Si} . Das größte Verkehrsflussverhältnis $b_{\text{maßg},i}$ in jeder Phase geht in die Berechnung der Umlaufzeit ein. Die Summe der maßgebende Verkehrsflussverhältnisse bilden das Gesamtflussverhältnis B .

Die Umlaufzeit für einen Einzelknotenpunkt wird für einen bestimmten Verkehrsstärkezustand berechnet. Dabei erreichen die Wartezeiten für die Kraftfahrzeugströme den Minimalwert. Diese wartezeitoptimale Umlaufzeit kann nach HBS 2001 (*Webster-Formel*) wie folgt berechnet werden:

$$t_U = \frac{1,5 \cdot T_Z + 5}{1 - \sum_{i=1}^p q_{\text{maßg},i} / q_{Si}} \quad (4-6)$$

mit

t_U = wartezeitoptimale Umlaufzeit [s]

p = Anzahl der Phasen [-]

$q_{\text{maßg},i}$ = maßgebende Fahrstreifenverkehrsstärke der Phase i [Fz/h]

q_{Si} = zugehörige Sättigungsverkehrsstärke für den maßgebenden Strom der Phase i [Fz/h]

T_Z = Summe der maßgebenden Zwischenzeiten [s]

Die erforderliche Freigabezeit für den maßgebenden Fahrstreifen der Phase i bestimmt sich zu

$$t_{Fi} = \frac{b_{\text{maßg},i}}{B} \cdot (t_U - T_Z) \quad (4-7)$$

mit

t_{Fi} = Freigabezeit für den maßgebenden Fahrstreifen der Phase i [s]

$b_{\text{maßg},i}$ = Verkehrsflussverhältnis des maßgebenden Fahrstreifens der Phase i [-]

B = Summe der Verkehrsflussverhältnisse der maßgebenden Phasen [-]

t_U = gewählte Umlaufzeit [s]

T_Z = Summe der maßgebenden Zwischenzeiten [s]

4.1.3 Kapazität der Fahrstreifen

Die Berechnung der Kapazität für Linksabbieger ist abhängig von der gewählten Signalisierungsform dieser Verkehrsströme. Hierbei wird zwischen den gesichert geführten Linksabbiegern und den nicht gesichert geführten Linksabbiegern unterschieden.

Nach HBS 2001 wird für **gesichert geführte Linksabbieger** der gleiche Ansatz verwendet, der auch für unbehindert fahrende Geradeausströme zum Einsatz kommt. Die Sättigungsverkehrsstärke stellt die maximale Kapazität des betrachteten Fahrstreifens dar. Aufgrund der vorliegenden Nutzungsansprüche der Knotenpunktsfläche durch konfligierende Verkehrsströmen an einem signalisierten Knotenpunkt kann einem Fahrstreifen über eine Stunde kein Dauergrün gesendet werden. Die tatsächlich vorhandene Kapazität eines Fahrstreifens stellt nur einen Anteil der Sättigungsverkehrsstärke dar. Dieser bestimmt sich aus dem Freigabezeitanteil f (Quotienten der Freigabezeit t_F des betrachteten Fahrstreifens und der Umlaufzeit t_U).

Die Kapazität C für einen gesichert geführten Linksabbiegestrom auf einem separaten Fahrstreifen bzw. für einen Mischfahrstreifen mit Zufahrtfreigabe berechnet sich wie folgt:

$$C = f \times q_S \quad (4-8)$$

mit

C = Fahrstreifenkapazität [Fz/h]

f = Freigabezeitanteil ($f = t_F / t_U$) [-]

q_S = Sättigungsverkehrsstärke des Fahrstreifens [Fz/h]

Nicht gesichert geführte Linksabbieger müssen den Knoteninnenraum mit den bedingt verträglichen Verkehrsströmen aus der Gegenrichtung während ihrer Freigabezeit gemeinsam benutzen. Aufgrund der Vorfahrtregelung nach § 9 Abs. 3 und 4 StVO sind die Linksabbieger wartepflichtig und können nur bei ausreichenden Zeitlücken im übergeordneten Verkehrsstrom abfließen. Die Kapazität für nicht gesichert geführte Linksabbieger C_{LA} setzt sich nach HBS 2001 aus zwei Bestandteilen zusammen:

- Linksabbieger, die während der Grünzeit der bevorrechtigten Gegenrichtung bei ausreichend großen Zeitlücken durchsetzen können C_D ,
- Linksabbieger, die sich im Knoteninnenraum aufgestellt haben und während des Phasenwechsels abfließen C_{PW} .

Die Kapazität für nicht gesichert geführte Linksabbieger berechnet sich somit zu:

$$C_{LA} = C_D + C_{PW} \quad (4-9)$$

mit

C_{LA} = Kapazität der nicht gesichert geführten Linksabbieger [Fz/h]

C_D = Kapazität beim Durchsetzen [Fz/h]

C_{PW} = Kapazität während des Phasenwechsels [Fz/h]

Die Kapazität C_D bestimmt sich näherungsweise aus der Kapazitätsgrundformel für wartepflichtige Nebenströme bei Vorfahrtknotenpunkten, die noch auf die Verhältnisse der Lichtsignalsteuerung angepasst worden ist

- bei einstreifigem Gegenverkehr näherungsweise nach der Beziehung

$$C_D = \frac{3600 \cdot f - q \cdot t_C}{t_f} \cdot e^{-q(t_0 - t_C)/(3600 \cdot f - q \cdot t_C)} \quad (4-10)$$

mit

C_D = Kapazität beim Durchsetzen [Fz/h]

q = Stärke des Gegenverkehrsstroms in der Freigabezeit des Linksabbiegeverkehrs [Fz/h]

f = Freigabezeitanteil für die Linksabbieger [-]

t_g = erforderliche Grenzzeitlücke (5,7 s) [s]

t_f = Folgezeitlücke (3,0 s) [s]

t_0 = Nullzeitlücke ($t_g - t_f / 2 = 4,2$ s) [s]

t_C = Mindestzeitlücke im einstreifigen Gegenstrom (1,8 s) [s]

- und bei mehrstreifigem Gegenverkehr

$$C_D = \frac{3600 \cdot f}{t_f} \cdot e^{-q \cdot t_0 / (3600 \cdot f)} \quad (4-11)$$

mit

q = Gesamtverkehrsstärke des Gegenverkehrs [Fz/h]

Nach Beendigung der Freigabezeit der übergeordneten Gegenrichtung können die im Knoteninnenraum aufgestellten Linksabbieger während des Phasenwechsels abfließen. Die Kapazität C_{PW} berechnet sich zu:

$$C_{PW} = N_A \times U \quad (4-12)$$

mit

C_{PW} = Kapazität während des Phasenwechsels [Fz/h]

N_A = Anzahl der Aufstellplätze im Knoteninnenraum [Fz]

[Fz]

U = Anzahl der Umläufe pro Stunde (3600 / tU) [s]

tU = Umlaufzeit [s]

Ein möglicher Einfluss der während des Phasenwechsels abfließenden Linksabbieger auf das Anfahrverhalten der nachfolgenden Kraftfahrzeugströme ist in den Formeln nicht berücksichtigt. Bei einer hohen Anzahl von Aufstellflächen oder einem hohen Schwerlastanteil sind die Zwischenzeiten teilweise nicht ausreichend dimensioniert, um eine Behinderung der nachfolgenden Ströme auszuschließen.

Aus der ermittelten Kapazität für einen nicht gesichert geführten Linksabbiegestrom kann eine fiktive Freigabezeit berechnet, die ihm im Mittel pro Umlauf quasi zum gesicherten Abfließen zur Verfügung steht:

$$t_F = C_{LA} \times t_U / q_S \quad (4-13)$$

mit

t_F = fiktive Freigabezeit [s]

C_{LA} = Kapazität eines nicht gesichert geführten Linksabbiegestroms [Fz/h]

q_S = Sättigungsverkehrsstärke des Linksabbiegestroms [Fz/h]

Das HBS 2001 weist daraufhin, dass Linksabbiegen mit Durchsetzen meist nur bei kleinen Knotenpunkten und schwachem Linksabbiegeverkehr (etwa < 180 Kfz/h) angewandt werden kann.

Aus der Addition der Kapazitäten aller am Knotenpunkt vorhandenen Fahrstreifen berechnet sich die Knoten-

punktkapazität des betrachteten lichtsignalgeregelten Knotenpunkts C_K :

$$C_K = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4-14)$$

mit

C_K = Gesamtkapazität des Knotenpunkts mit LSA [Fz/h]

n = Anzahl der Fahrstreifen [-]

C_i = Kapazität eines Fahrstreifens [Fz/h]

4.1.4 Wartezeit der Kraftfahrzeugströme

Zur Einteilung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs an lichtsignalgeregelten Knotenpunkten wird im HBS 2001 als Bewertungsgröße die mittlere Wartezeit w verwendet. Die Wartezeit im Kraftfahrzeugverkehr beschreibt den gesamten Zeitverlust gegenüber einer behinderungsfreien Fahrt. Die Wartezeit unterteilt sich in zwei Bestandteile:

- Grundwartezeit w_I – resultiert aus der Sperrung der Knotenpunktzufahrt ohne Berücksichtigung des Reststaus,
- Reststauwartezeit w_{II} – wird durch die Fahrzeuge hervorgerufen, die während der Freigabezeit nicht abfließen konnten.

Die mittlere Wartezeit w für ein Fahrzeug eines Fahrstreifens berechnet sich bei festzeitgesteuerter Verkehrsregelung wie folgt:

$$w = w_I + w_{II} \quad (4-15a)$$

$$w = \frac{t_U \cdot (1-f)^2}{2 \cdot (1-q/q_S)} + \frac{3600 \cdot N_{GE}}{f \cdot q_S} \quad (4-15b)$$

mit

w = mittlere Wartezeit eines Kraftfahrzeugs [s]

t_U = Umlaufzeit [s]

f = Freigabezeitanteil [-]

q = Verkehrsstärke auf dem betreffenden Fahrstreifen [Fz/h]

q_S = zugehörige Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h]

N_{GE} = mittlerer Stau am Ende der Grünzeit für den betrachteten Untersuchungszeitraum (i. d. R. 1 Stunde) [Fz]

Der mittlere Reststau bei Grünende berechnet sich in Abhängigkeit des Sättigungsgrades (Zufluss/maximaler Abfluss). Im HBS 2001 sind für feste Sättigungsgrade Berechnungsgleichungen vorgegeben. In Tabelle 4-2 sind die Formeln für einen Untersuchungszeitraum zusammengefasst. Ergeben sich bei der Ermittlung des Sättigungsgrades Zwischenwerte, bestimmt sich der mittlere Stau bei Grünende durch lineare Interpolation. Berechnet sich für einen Fahrstreifen ein Sättigungsgrad $g \leq 0,65$, dann kann davon ausgegangen werden, dass sich dort kein Reststau bildet ($w_{II} = 0$ s).

Entsprechend der Knotenpunktkapazität kann auch die Gesamtwartezeit am Knotenpunkt für das Zeitintervall T berechnet werden:

$$w_K = \left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot q_i \right) / 3600 \quad (4-16)$$

mit

w_K = Gesamtwartezeit des Knotenpunkts mit LSA [h/T]

n = Anzahl der Fahrstreifen [-]

w_i = mittlere Wartezeit eines Fahrzeuges des Fahrstreifens i [s]

q_i = Verkehrsstärke auf dem Fahrstreifen i [Kfz/T]

Aus den berechneten mittleren Wartezeiten lassen sich abschließend für jeden Fahrstreifen die Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs nach HBS 2001 bestimmen. Die Grenzwerte der mittleren Wartezeiten für den Kraftfahrzeugverkehr in nicht koordinierten Zufahrten sind in der Tabelle 4-3 enthalten. Aussagen über die Qualität des Verkehrsablaufs für einen kompletten Knotenpunkt werden im HBS 2001 nicht gegeben.

Werden mittlere Wartezeiten berechnet, die den Qualitätsstufen A bis D zugeordnet werden können, ist der Verkehrszustand als stabil anzusehen. Der Verkehrsablauf auf den Fahrstreifen lässt sich von „geringfügig befahren“ (Stufe A) bis mit „ständigem Rückstau belegt“ (Stufe D) beschreiben. Die Kapazität des Fahrstreifens soll mit der Qualitätsstufe E beschrieben werden. Die Kapazi-

Sättigungsgrad	Gleichungen zur Bestimmung des mittleren Reststaus für einen Untersuchungszeitraum T, der U Umläufe umfasst
$g_1 \leq 0,65$	$N_{GE} = 0$
$g_2 = 0,90$	$N_{GE} = \frac{1}{0,26 + m/150}$
$g_3 = 1,00$	$N_{GE} = 0,3476 \cdot \sqrt{n_c} \cdot U^{0,565}$
$g_4 = 1,20$	$N_{GE} = [n_c \cdot (g - 1) \cdot U + 25 - 20 \cdot g] / 2$ $N_{GE} = 0,1 \cdot n_c \cdot U + 0,5$
$g_5 > 1,20$	$N_{GE} = n_c \cdot (g - 1) \cdot U / 2$
Zwischenwerte	$N_{GE,g} = N_{GE,gi} + \frac{N_{GE,gi+1} - N_{GE,gi}}{g_{i+1} - g_i} \cdot (g - g_i)$
N_{GE} n_c m U T t_U q	Anzahl der gestauten Fahrzeuge bei Grünende [Fz] maximal Anzahl abfließender Fahrzeuge ($t_F \cdot q_S / 3600$) [Fz] mittlere Eintreffenzahl ($q \cdot t_U / T$) [Fz] Anzahl der Umläufe im Untersuchungszeitraum [-] Untersuchungszeitraum ($U \cdot t_U$) [s] Umlaufzeit [s] Verkehrsstärke [Fz/T]

Tabelle 4-2: Berechnungsgleichungen zur Bestimmung des mittleren Reststaus für einen Untersuchungszeitraum T

QSV	A	B	C	D	E	F
w [s]	≤ 20	≤ 35	≤ 50	≤ 70	≤ 100	> 100

Tabelle 4-3: Grenzwerte für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Kraftfahrzeuge in nicht koordinierten Zufahrten (HBS 2001)

tätsberechnungen von SCHNABEL/KORN (2004) zeigten, dass mit dem Verfahren nach HBS 2001 der Qualitätsstufe E kein eindeutiger Wartezeitgrenzwert zugeordnet werden kann. Für den Knotenpunkt berechneten sich im Kapazitätsfall mittlere Wartezeiten zwischen 102 und 168 s, was für alle Ströme die Qualitätsstufe F bedeutete und eine Überlastung des gesamten Knotenpunktes.

4.2 Vergleich des Verfahrens nach HBS 2001 mit anderen Verfahren

Das Bemessungsverfahren nach HBS 2001 ist eine fortgeschriebene und aktualisierte Version des Bemessungsverfahrens nach den RiLSA 1992. Insofern ergeben sich aus den RiLSA 1992 keine grundsätzlich anderen oder weiterführenden Ansätze. Unterschiede gibt es dagegen zu den amerikanischen Verfahren aus dem Highway Capacity Manual sowohl in den Versionen HCM 1994, die SCHOLZ (2000) analysiert hat und im HCM 2000, dass von WU (2003) vergleichend zum HBS dargestellt wurde. Daraus bleiben folgende Unterschiede zum HBS 2001 bemerkenswert:

- Die Grundsättigungsverkehrsstärke, die sich bei optimalen Verhältnissen und einer vollen Grünzeitstunde einstellen würde, ist im HBS 2001 höher als im HCM 2000. Die Unterschiede in den Grundsättigungsverkehrsstärken sind mit 2000 Pkw/h (HBS 2001) gegenüber 1900 Pkw/h (HCM 1994 und 2000) vergleichsweise gering. Die in der Realität anzutreffende Sättigungsverkehrsstärke bzw. der Zeitbedarfswert für Linksabbieger in eigener Phase werden im Rahmen dieser Untersuchung ermittelt.
- Zur Angleichung an die tatsächlichen Verhältnisse sind aber Abminderungsfaktoren vorgesehen. Dabei enthält das HCM 1994 insgesamt 8, das HCM 2000 sogar 11 Abminderungsfaktoren, die alle gleichzeitig angesetzt werden. Im HBS-Verfahren gibt es 5 Abminderungsfaktoren, von denen höchstens 2 gleichzeitig verwendet werden sollten. Außerdem ist die Grundsättigungsverkehrsstärke im HBS 2001 abhängig von der Größe der Freigabezeit, denn der Zeitbedarfswert ist bei längeren Freigabezeiten größer. Als bedeutsame Abminderungsfaktoren gelten Fahrstreifenbreite, Schwerverkehrsanteil, Längsneigung und Abbiegeradius. Es soll im Rahmen dieser Arbeit geprüft werden, inwieweit die zusätzliche Berücksichtigung von mehr als 2 Abminderungsfaktoren zu bedeutsamen Unterschieden führt.
- Nach HBS 2001 werden für die Zwischenzeiten tabellarische Orientierungswerte für den Typ "kleiner Knotenpunkte" und "großer Knotenpunkte" angegeben. Auch im HCM 2000 werden für Ströme, die nicht in einer gemeinsamen Phase abgewickelt werden, einheitliche Zwischenzeiten von 4 bzw. 5 s verwendet. Nach RiLSA 1992 müssen dagegen individuelle Zwischenzeitenbe-

rechnungen in Abhängigkeit von Einfahr- und Räumgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Knotenpunktgeometrie ermittelt werden.

- Nach HCM 2000 werden kürzere Zwischenzeiten im Vergleich zum HBS 2001 verwendet, die somit insgesamt zu höheren Kapazitäten führen. Ansonsten - bei Verwendung gleicher Zwischenzeiten - unterscheiden sich die Ergebnisse von HBS und HCM nur unwesentlich (WU 2003).

Ein sehr grundsätzlicher Unterschied zeigt sich bei der Annahme, wie bedingt verträgliche Linksabbieger den Gegenverkehr durchsetzen:

- Im Verfahren des HBS 2001 wird unterstellt, dass der Gegenverkehr über die Gesamtlänge der Freigabezeit gleichmäßig verteilt ist. Die Kapazität der Linksabbieger wird nach der Theorie der Grenzzeitlücken berechnet, d.h. Linksabbieger treffen auf eine zufällige Verteilung der Fahrzeugankünfte im Gegenverkehr. Die Zeitlücken darin sind dann exponential verteilt und es gibt Erkenntnisse über angenommene und abgelehnte (Grenz- und Folge-) Zeitlücken.
- Im HCM 2000 wird ebenso wie im HCM 1994 ein Zeitbereich angesetzt, währenddessen Linksabbieger nicht abfließen können, weil der Gegenverkehr mit der Sättigungsverkehrsstärke fließt und keine ausreichenden Zeitlücken vorhanden sind. Anschließend folgt ein Zeitbereich, in dem Linksabbieger ebenso wie beim HBS 2001 nach der Zeitlückentheorie den Gegenverkehr durchsetzen können.
- Dazu kommt noch ein Unterschied in der Behandlung des Freigabezeitendes. Im HBS wird der Abfluss der bei Grünzeitende noch aufgestauten Fahrzeuge im Knotenpunktinnenbereich berücksichtigt, ein zusätzliches Überfahren bei Gelb wird im Normalfall nicht angesetzt (mit Ausnahme sehr kurzer Freigabezeiten). Beim HCM gilt der Abfluss nach Grünzeitende als Mindestkapazität, wird aber nicht hinzu addiert. Dafür wird aber die Gelbzeit (abzüglich Anfahrzeitverlust) als zusätzliche Freigabezeit berücksichtigt.

Das Verfahren aus dem HCM erscheint realistischer, das HBS ist aber einfacher zu handhaben. Diese beiden grundsätzlich unterschiedlichen Philosophien stellt Abbildung 4-2 dar.

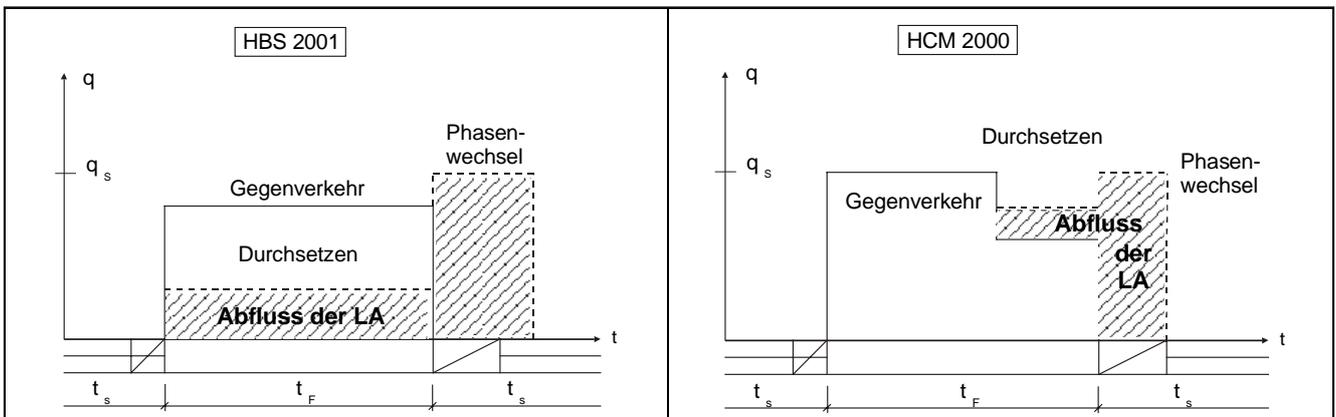


Abbildung 4-2: Ermittlung der Kapazität für bedingt verträgliche Linksabbieger (qualitativ)

4.3 Beispiel: Knotenpunktzufahrt mit unterschiedlicher Signalisierung der Linksabbieger

Eine Anwendung des HBS-Verfahrens für die Zufahrt auf einem lichtsignalgeregelten Knotenpunkt mit unterschiedlicher Signalisierung der Linksabbieger zeigen die nachfolgenden Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5. Darin ist dargestellt, welche Fahrzeuganzahlen in der Stunde als Linksabbieger bei einer Umlaufzeit von $t_U = 90$ s abfließen können, wenn ein Gegenverkehr mit $q = 250$ Fz/h (Beispiel 1) bzw. $q = 450$ Fz/h (Beispiel 2) auf einem Fahrstreifen gekreuzt werden muss. Für die Linksabbiegeströme wird in den vier Fällen eine Sättigungsverkehrsstärke von $q_S = 1700$ Fz/h angenommen. Als Ergebnis ist ebenfalls die mittlere Wartezeit dieser Linksabbieger und die Einstufung der Qualitätsstufe QSV nach HBS abzulesen. Die Einzelheiten der Berechnung sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

Im Einzelnen lässt der Vergleich beider Belastungsfälle in den Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5 erkennen, dass sich Linksabbieger bei höherer Verkehrsstärke des Gegenverkehrs wegen der kleinen Zeitlücken nur in geringerem Umfang durchsetzen können. Die gesicherte Freigabe sieht dann für die Kapazität und Verkehrsqualität der Linksabbieger deutlich günstiger aus. Dies besagt allerdings noch nichts über die Verkehrsqualität des gesamten Knotenpunktes.

Abbildung 4-3 stellt das Ergebnis für die Wartezeiten im Linksabbiegestrom im Vergleich der beiden Verkehrsstärken im Gegenverkehr für die unterschiedlichen Signalisierungen der Linksabbieger dar. Deutlich zu erkennen ist die Zunahme der Wartezeit bei nicht gesicherter Signalisierung der Linksabbieger und hoher Gegenverkehrsstärke. Dies führt zur Abstufung der Verkehrsqualität nach HBS 2001 von B nach C bzw. D.

In Abbildung 4-4 sind die Wartezeiten der Linksabbieger für den Verkehrsstärkebereich von 0 bis 600 Fz/h in der übergeordneten Gegenrichtung dargestellt. Bei gesicherter Führung der Linksabbieger gibt es keine Einfluss durch den Gegenverkehr. Die Wartezeit bleibt über den gesamten Verkehrsstärkebereich konstant bei 38 s. Bei der nicht gesicherten und den zeitweilig gesicherten Signalisierungsformen steigt die Wartezeit mit zunehmender Verkehrsstärke der Gegenrichtung sukzessive an. Im Bereich von 400 Fz/h sind die mittleren Wartezeiten für gesicherter und nicht gesicherte Linksabbiegerführungen gleich lang. Anschließend steigt die Wartezeit bei nicht gesicherter Linksabbiegerführung sehr stark an. Die Wartezeiten bei zeitweilig gesichertem Linksabbiegen sind bei Vorgabezeit geringfügig kürzer gegenüber bei Zugabezeit.

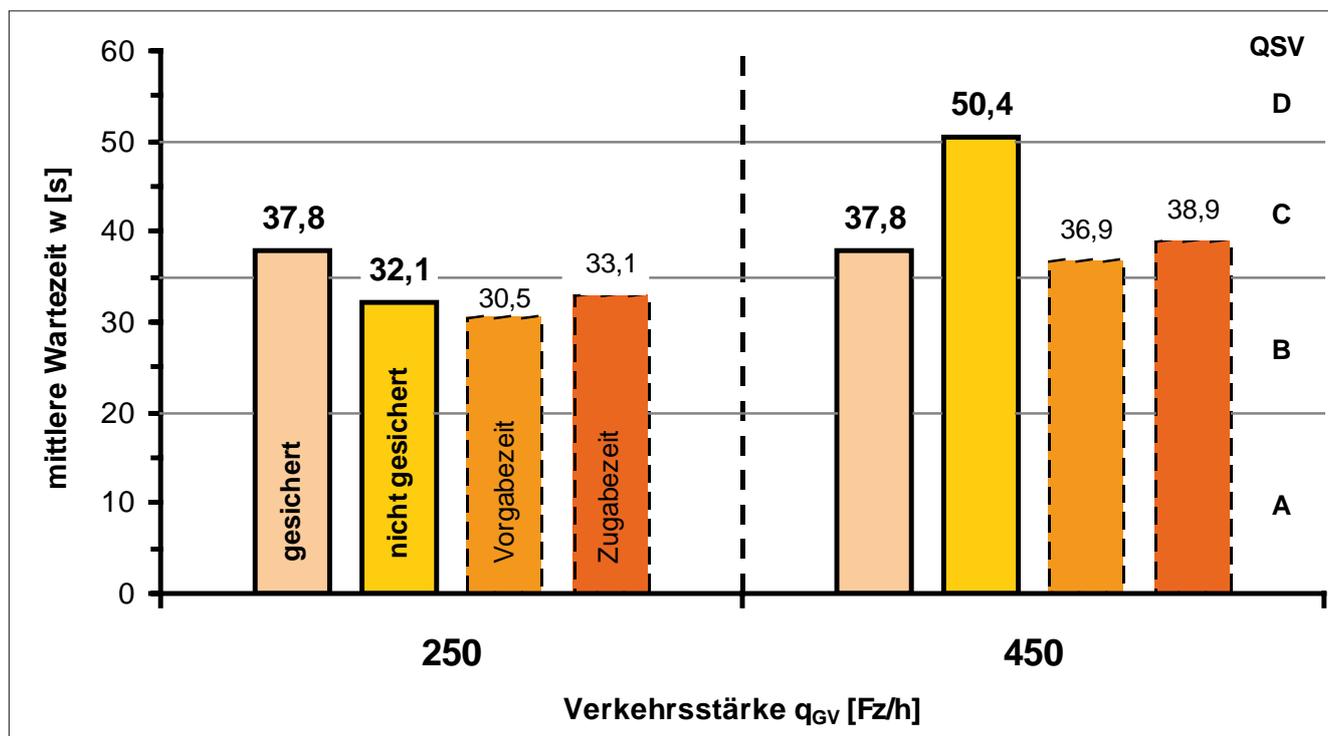


Abbildung 4 3: Mittlere Wartezeit der Linksabbieger und Verkehrsstärke des Gegenverkehrs

Ausgangs- und Berechnungsgrößen		gesichert geführte LA	nicht gesichert geführte LA	zeitweilig gesichert geführte LA	
				- Vorgabezeit -	- Zugabezeit -
q _{GV}	[Fz/h]	250	250	250	250
q _{LA}	[Fz/h]	100	100	100	100
t _{FV}	[s]	0	0	5	0
t _{FD}	[s]	0	40	35	32
t _{FZ}	[s]	10	0	0	8
C _F	[Fz/h]	189	228	263	285
N _A	[Fz]	2	2	2	2
C _{PW}	[Fz/h]	0	80	80	0
C _{LA}	[Fz/h]	189	308	343	285
w	[s]	37,8	32,1	30,5	33,1
QSV	[-]	C	B	B	B

Tabelle 4-4: Kapazität C_{LA} und Wartezeit w für einen Linksabbiegefahrstreifen (q_{LA} = 100 Fz/h) bei unterschiedlicher Form der Signalisierung und einer Verkehrsstärke des übergeordneten Gegenverkehrs von q_{GV} = 250 Fz/h

Ausgangs- und Berechnungsgrößen		gesichert geführte LA	nicht gesichert geführte LA	zeitweilig gesichert geführte LA - Vorgabezeit -	- Zugabezeit -
q_{GV}	[Fz/h]	450	450	450	450
q_{LA}	[Fz/h]	100	100	100	100
t_{FV}	[s]	0	0	5	0
t_{FD}	[s]	0	40	35	32
t_{FZ}	[s]	10	0	0	8
C_F	[Fz/h]	189	67	126	167
N_A	[Fz]	2	2	2	2
C_{PW}	[Fz/h]	0	80	80	0
C_{LA}	[Fz/h]	189	147	206	167
w	[s]	37,8	50,4	36,9	38,9
QSV	[-]	C	D	C	C

Tabelle 4-5: Kapazität C_{LA} und Wartezeit w für einen Linksabbiegefahrstreifen ($q_{LA} = 100$ Fz/h) bei unterschiedlicher Form der Signalisierung und einer Verkehrsstärke des übergeordneten Gegenverkehrs von $q_{GV} = 450$ Fz/h

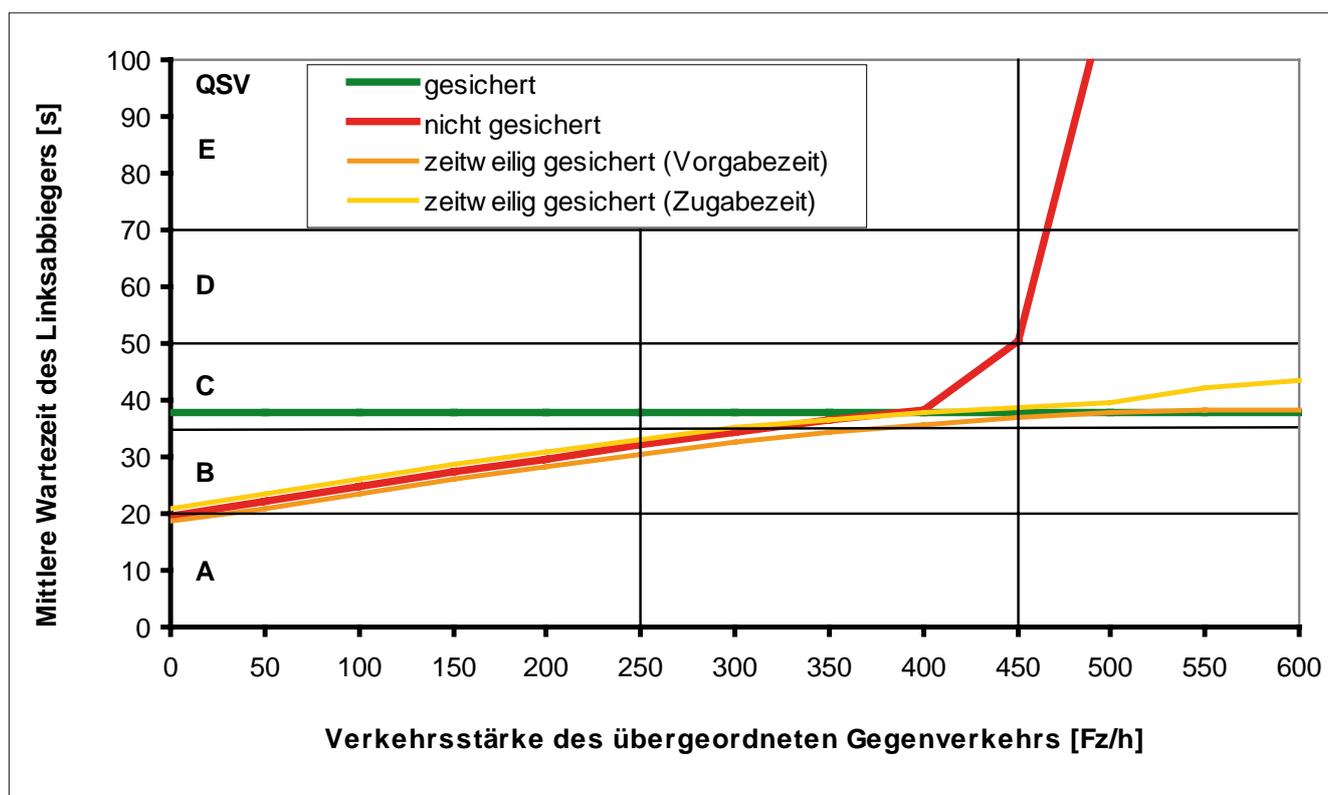


Abbildung 4-4: Mittlere Wartezeit der Linksabbieger bei verschiedenen Signalsteuerungen des Linksabbiegeverkehrs in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des Gegenverkehrs

4.4 Zu überprüfende Grundlagen

Ein Vergleich der verkehrstechnischen Leistungsfähigkeit und der zu erzielenden Verkehrsqualitätsstufen bei vorgegebenen Belastungsverhältnissen an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten ist mithilfe der Berechnungsverfahren auch theoretisch d.h. ohne Beobachtungen vor Ort möglich. Ein Vergleich unterschiedlicher Signalisierungsformen liefert Ergebnisse, die auf den Voraussetzungen der oben beschriebenen Berechnungsverfahren beruhen. Inwieweit die dort getroffenen Annahmen aber zutreffen, soll im Rahmen der vorliegenden Untersuchung in den folgenden relevanten Punkten überprüft werden:

- Zu klären ist, welche Sättigungsverkehrsstärken, d. h., welche Zeitbedarfswerte, für Linksabbieger in der Realität eintreten. Dabei ist zwischen dem Durchsetzen von Gegenverkehrsströmen (bei gleichzeitiger Freigabe) und dem ungestörten Abfließen (bei gesicherter Freigabe) zu unterscheiden.
- Es ist zu klären, ob die Annahme nach HBS 2001 zufällig verteilter Fahrzeugankünfte im Gegenverkehr bei bedingt verträglicher Freigabe in der Realität zutrifft. Dazu müssen Zeitlückenverteilungen an lichtsignalgesteuerten Geradeausströmen erhoben und analysiert werden.
- Zu klären ist, welche Abflussverhältnisse während des Phasenüberganges, d.h. nach Grünzeitende des bedingt verträglichen oder des gesichert freigegebenen Linksabbiegers anzutreffen sind. Dabei ist insbesondere auch darauf zu achten, welche Störungen des nachfolgenden Querverkehrs dadurch eintreten können.
- Die Größe der Zwischenzeiten und die Auswirkungen unterschiedlicher Voraussetzungen, die diese Zwischenzeiten bestimmen (Knotenpunktgeometrie) sind zu überprüfen.

Diese Auswirkungen bzw. Berechnungsgrundlagen sollen im Rahmen der Untersuchung empirisch, d. h. durch Beobachtungen an dafür geeigneten Knotenpunkten, analysiert werden. Mit den so gefundenen Ergebnissen werden in beispielhaften Berechnungen und Simulationen die Auswirkungen unterschiedlicher Signalisierungs-

formen an typischen Knotenpunkten dargestellt werden. Dabei sollen solche Szenarien untersucht werden, die als praktikabel gelten können.

5 Ermittlung von verkehrstechnischen Ausgangswerten

5.1 Auswahl von Untersuchungsfällen

Als Rahmenbedingungen für günstige Untersuchungsfälle wird vorgeschlagen, nach folgenden Kriterien vorzugehen:

- Es sollen Knotenpunkte mit einstreifiger Führung des Geradeausverkehrs in allen Richtungen untersucht werden. Mehrstreifige Gegenverkehrsströme setzen in aller Regel aus Sicherheitsgründen die gesonderte Signalisierung der Linksabbieger voraus und würden auch gesonderte Anforderungen an das Durchsetzen stellen.
- Der Einfluss parallel geführter nicht motorisierter Verkehrsteilnehmer soll bei der Untersuchung nicht berücksichtigt werden. In der Aufgabenstellung sind Landstraßenknotenpunkte ohne Fuß- und Radwege ausdrücklich benannt. Dies steht im Zusammenhang mit den Unfalluntersuchungen, die an Landstraßenknotenpunkten zu Erkenntnissen über die Sicherheitsgrade unterschiedlicher Signalisierungsformen geführt haben (Eckstein, Meewes 2002). Die Berücksichtigung von Fußgängern und Radfahrern würde jedenfalls zu Veränderungen der Ergebnisse führen, da bei gesicherter Freigabe keine Beeinträchtigung bzw. Minderung der Verkehrsqualität eintritt, während bei nicht gesicherter Freigabe diese wirksam wird.
- Die Auswahl der Untersuchungsfälle soll nach Möglichkeit auch die maßgeblichen Abminderungsfaktoren berücksichtigen, d.h. neben dem Schwerverkehrsanteil sollten keine deutliche Längsneigung, keine ungewöhnlichen Fahrstreifenbreiten und keine besonders großen oder besonders kleinen Abbiegeradien vorliegen. Dabei wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen auch typische Knotenpunkte vorgelegen haben bzw. durch die Mittelung vieler untersuchter Knotenpunkte solche Besonderheiten weitgehend ausgeschlossen werden können. Der Einfluss der Abminderungsfaktoren wird dessen ungeachtet bei der Variation von Berechnungsbeispielen analysiert und diskutiert werden.
- Nach der Anzahl Fahrstreifen in Haupt- und Neben-

richtung lassen sich insgesamt 6 Knotenpunktformen unterscheiden, die in Abbildung 5-1 dargestellt sind. Abbildung 5-1 enthält zusätzlich Angaben, welche Formen der Signalisierung den Knotenpunktformen typischerweise zugeordnet werden können. Die einzelnen Knotenpunktformen können noch durch Anlage von Tropfen in den wartepflichtigen Zufahrten und die Anlage von Rechtsabbiegefahrstreifen oder Ausfahrkeil in Untergruppen eingeteilt werden. Eine Übersicht darüber enthält Anhang 2.

Die genannten Rahmenbedingungen stellen eine Reihenfolge der Strenge von Auswahlbedingungen dar. Die Einstreifigkeit des Gegenverkehrs muss eingehalten sein, Fußgänger und Radfahrer sollten keine Rolle spielen, d. h., es könnte ausnahmsweise ein Knoten betrachtet werden, der zwar eine Fußgängerfurt hat, wenn diese aber so gut wie nie auf Anforderung freigeschaltet wird. Besonderheiten in Längsneigung, Abbiegeradien oder Breite der Fahrstreifen sollte einen Knotenpunkt nicht unbedingt als Untersuchungsfall disqualifizieren, weil der Einfluss auch rechnerisch berücksichtigt werden kann. Die 4. Randbedingung (Tropfen, Dreiecksinsel) dient ausschließlich der Gruppierung der Untersuchungsfälle.

Es wird nicht möglich sein, alle Fälle empirisch zu untersuchen, aber eine Abbildung mithilfe der Berechnungsverfahren sollte anschließend durchgeführt werden. Es wird weiter vorgeschlagen, die Kombinationen von Knotenpunktformen und Sicherung der Linksabbieger Nr. 1/3/4 und 6 vorrangig zu beurteilen.

Eine Auflistung aller lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte auf Landstraßen im Freistaat Sachsen, die ausgewertet wurde, hat nur zu wenigen geeigneten Untersuchungsfällen geführt. Einmündungen gelten grundsätzlich auch als geeignete Untersuchungsfälle, da bei der Überprüfung von Zeitlückenannahmen, Zeitverbrauch bei der Überfahrt und Verhalten nach Grünzeitende an Einmündungen keine grundsätzlichen Unterschiede zu entsprechend gestalteten Zufahrten von Kreuzungen vermutet werden.

Knotenpunktformen	1	2	3	4	5	6
Art der Sicherung der Linksabbieger						
gesichert	-	x	x	x	x	x
eigene Phase	-	x	x	x	x	x
Zufahrtfreigabe	x	-	-	-	-	-
nicht gesichert	x	x	x	(-)	(x)	(x)
zeitweilig gesichert	(x)	(x)	(x)	(-)	(x)	(x)
Vorgabezeit	x	x	x	(-)	x	x
Zugabezeit	x	x	x	(-)	x	x

Anmerkung: x Untersuchungsfälle
(x) nach Regelwerk möglich, aber aus Sicherheitsgründen zu vermeiden
(-) nach Regelwerk zu vermeiden, aber in Einzelfällen anzutreffen
- nicht sinnvoll/nicht anzutreffen

Abbildung 5-1: Kategorisierung der Abwicklung des Linksabbiegeverkehrs an lichtsignalgeregelten Landstraßenknotenpunkten nach der Knotenpunktform und der Art der Signalisierung in der Hauptrichtung



a) nicht gesichert signalisierter Linksabbieger auf separatem Fahrstreifen

b) zeitweilig gesicherter Linksabbieger auf einem Mischfahrstreifen

Abbildung 5-2: Zwei verschiedene Formen der Signalisierung für Linksabbieger am Knotenpunkt B 170 Bannewitz/OBI bei Dresden

Zwei grundsätzlich geeignete Fälle werden in den Abbildungen von Abbildung 5-2 dargestellt. Dadurch, dass in unterschiedlichen Zufahrten verschiedene Regelungen für die Linksabbieger bezüglich der Signalisierung und der baulichen Ausgestaltung getroffen wurden, können unterschiedliche Untersuchungsfälle an diesen Knotenpunkten bereits realisiert werden. Es müssen allerdings Bedingungen hoher Verkehrsbelastung vorgefunden werden, da eine Beobachtung von Zeitlückenannahme eine Übersättigung der wartepflichtigen Verkehrsströme bedingt.

5.2 Überprüfung der Abminderungsfaktoren zur Bestimmung der Sättigungsverkehrsstärken für Linksabbiegefahrstreifen

Das HBS 2001 enthält die aktuelle Berechnungsmethode zur empirischen Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärken. Unter idealen baulichen (Radius > 15 m, Fahrstreifenbreite $\geq 3,00$ m, keine Fahrbahnlängsneigung), betrieblichen (Freigabezeiten > 10 s) und verkehrlichen (Schwerverkehrsanteil < 2 %, schwacher Fußgängerverkehr) Bedingungen kann von einer Sättigungsverkehrsstärke $q_{S,st} = 2000$ Pkw/h (Zeitbedarfswert $t_B = 1,8$ s) ausgegangen werden. Die Ermittlung der Faktoren zur

Angleichung der Sättigungsverkehrsstärke an die tatsächlichen Bedingungen ist in Tabelle 4-1 zusammengefasst, von denen nur zwei maximal verwendet werden sollen.

Die Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke unter Standardbedingung für einen Fahrstreifen erfolgt mit festen und variierenden Einflüssen. Zu den **festen Größen** zählen alle Einflüsse, die durch die bauliche Gestaltung des Knotenpunktes hervorgerufen werden. Im Verfahren nach HBS 2001 werden die Größen

- Fahrstreifenbreite (Abweichung von der Normalfahrstreifenbreite 3,00 bis 3,50 m),
- Fahrtrichtung (abbiegende Fahrzeuge in Abhängigkeit des Abbiegeradius) und
- Neigungsverhältnisse (durchgehende Steigungen und Gefälle)

berücksichtigt. Mit diesen festen Einflussgrößen können, auch ohne Messungen und Angaben zur verkehrlichen und betrieblichen Situation, Aussagen über die zu erwartende Sättigungsverkehrsstärke für einen Fahrstreifen getroffen werden.

Nach Messungen an verschiedenen Tagen können die Auswertungen für einen Fahrstreifen unterschiedliche

Sättigungsverkehrsstärken ergeben, was auf die **variierenden Größen** zurückgeführt werden kann. Folgende Einflussgrößen sind im HBS 2001 vorgesehen:

- Schwerverkehrsanteil (Anteil der Schwerlastfahrzeuge),
- Fußgängerverkehr (abbiegende Fahrzeuge durch bevorrechtigte Fußgänger beeinflusst) und
- Freigabezeit (Berücksichtigung der Gelbfahrer bei kurzen Freigaben von 6 bis 10 s).

Der Effekt der bei verschiedenen Witterungsverhältnissen auftreten kann, wird im HBS 2001 nur angesprochen. Da Signalprogramme allgemein nicht für Regenzustände und winterliche Verhältnisse konzipiert werden, wird diesem Einfluss nicht weiter nachgegangen.

In der Literatur finden sich weitere Einflussgrößen, die nicht in das aktuelle Berechnungsverfahren im HBS 2001 Einzug gehalten haben, u. a.:

- Fahrstreifenlage (am Bord, nicht am Bord)
AXHAUSEN/FELLENDORF/HOOK (1989) wollten mit ihren Messungen die Fahrstreifenlage aufgrund ihrer Literaturrecherche (signifikanter Einfluss auf die Sättigungsverkehrsstärke um 140 Pkw-E/h) näher untersuchen. Wegen zu starker Korrelationen zwischen den Einflussgrößen konnte der Einfluss der Fahrstreifenlage in der Regression nicht erfasst werden. Die Autoren legen nahe, dass der Zeitbedarf auf einem innenliegenden Fahrstreifen gegenüber einem in Bordnähe um 0,2 s niedriger ist.
- ein- und mehrstreifiges Abbiegen
In SCHNABEL (1975) und SCHNABEL/LOHSE (1997) sind Einflüsse auf die Anzahl der Fahrstreifen für eine Abbiegebeziehung angegeben. Sind mehr als ein Abbiegefahrstreifen vorhanden, ist ein höherer Zeitbedarf zu berücksichtigen. Messungen von SCHOLZ (2004) zeigten dagegen, dass bei zweistreifigem Linksabbiegen (Radien > 15 m) mit Sättigungsverkehrsstärken von 2060 Fz/h auf dem linken Fahrstreifen und 1970 Fz/h auf dem rechten Fahrstreifen (SV-Anteil < 2 %) keine negativen Einflüsse vorhanden sind.
- Linksabbiegen mit Durchsetzen
Werden die Linksabbieger nicht gesichert geführt, er-

höht sich nach AXHAUSEN/ FELLENDORF/HOOK (1989) der Zeitbedarf für Geradeausfahrer um 0,1 s.

- Charakter des Straßenraums
AXHAUSEN/FELLENDORF/HOOK (1989) haben die subjektive Größe des Charakters des Straßenraums in Kombination mit der Fahrstreifenbreite als sog. „optische Breite“ näher untersucht. Zu diesem optischen Eindruck zählten die Einflüsse von Markierung, Bepflanzung, Einblick in den folgenden Straßenraum und viele andere Kriterien. Bei einem unübersichtlichen Fahrstreifenverlauf und einer Fahrstreifenbreite < 3 m sollte der Zeitbedarf um 0,3 bis 0,4 s erhöht werden.
- Weitere Einflussfaktoren sind die von HOFFMANN/ NIELSEN (1994) benannten Reisezweck und Wetter.

Das amerikanische Verfahren im HCM 2000 zieht neben den im HBS 2001 einbezogenen Faktoren zur Abminderung der Sättigungsverkehrsstärke weitere Einflussgrößen heran, die alle direkt berücksichtigt werden. Es gilt folgende Beziehung:

$$s = s_o \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_T \cdot f_{pb} \quad (5-1)$$

mit

s: tatsächliche Sättigungsverkehrsstärke für den Untersuchungsfall

s_o : Basiswert der Sättigungsverkehrsstärke (so = 1900 Pkw/h)

N: Anzahl der Fahrstreifen (Bildung von Fahrstreifengruppen)

f: Angleichungsfaktoren für folgende Einflüsse

w: Fahrstreifenbreite

HV: Schwerverkehrsanteil

g: Fahrbahnlängsneigung

T: Abbieger

pb: Fußgänger/Radfahrer

(Links- sowie Rechtsabbieger)

LU: Fahrstreifennutzung

p: Parkaktivitäten (Ein- und Ausparken)

a: Gebietstyp (Zentrum, andere Gebiete)

bb: haltende Busse (Fahrgastwechsel)

siehe
HBS
2001

nicht
im
HBS
2001

5.2.1 Mess- und Berechnungsverfahren

Zur Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke auf der Basis von eigenen Verkehrsmessungen haben sich in den letzten Jahren zwei Messverfahren bewährt, die auch im HBS 2001 empfohlen werden:

- Querschnittsverfahren und
- Zeitlückenverfahren.

Das Querschnittsverfahren setzt voraus, dass der zu untersuchende Fahrstreifen dauerhaft überlastet ist. Aus der Anzahl der während der Freigabe abgeflossenen Fahrzeuge und der Länge der Freigabezeit kann Sättigungsverkehrsstärke einfach berechnet werden:

$$q_{Si} = \frac{3600 \cdot n_i}{t_{Fi}} \quad (5-2)$$

mit

q_{Si} = Sättigungsverkehrsstärke der Fahrzeugkolonne i [Fz/h]
 n_i = Anzahl der eingefahrenen Fahrzeuge einschließlich der Fahrzeuge in der Überfahrzeit [Fz]
 t_{Fi} = geschaltete Freigabezeit [s]

Bei der Anwendung des Querschnittsverfahrens ist vorab zu klären, ob die Fahrzeuge, die nach Beendigung der Freigabe die Haltlinie noch überfahren (Gelb- und Rotfahrer), in die Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke mit einfließen. Für kurze Freigabezeiten sieht das HBS 2001 höhere Sättigungsverkehrsstärken von 3000 Pkw/h bei 6 s Freigabezeit und noch 2400 Pkw/h bei 10 s Freigabezeit vor. Bei den Zwischenwerten soll interpoliert werden. Damit hat sich das HBS 2001 an die praktische Verhältnisse im Straßenverkehr angepasst und lässt bei kleinen Freigabezeiten einen Gelbfahrer zu. Dies hat zur Folge, dass schon in der Planungsphase bei der Erstellung und der Bewertung von Signalprogrammen die Gelbfahrer positiv berücksichtigt werden. Dem § 37 StVO Abs. 2, Nr. 1 ist jedoch zu entnehmen, dass das Farbbild „Gelb“ anordnet: "Vor der Kreuzung auf das nächste Zeichen warten". Das Verfahren im HBS 2001 ist damit nicht gesetzeskonform, wenn die Gelbfahrer mit eingerechnet werden. Die Gelb-

fahrer sind bei der Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärke nicht zu berücksichtigen, da sonst eine zu hohe Kapazität berechnet werden würde, die der Verkehrssicherheit am Knotenpunkt entgegenwirkt. Sind in der Praxis dennoch Gelbfahrer zu beobachten, dann verringern sich die Wartezeiten im Vergleich zum berechneten Wert. Anzumerken ist, dass im aktuellen HCM-Verfahren die Gelbzeit immer als Freigabezeit angesehen wird.

Für das Zeitlückenverfahren sind vollausgelasteten Fahrstreifen nicht zwingend erforderlich. Von einer stehenden Fahrzeugkolonne werden nach Beginn der Freigabezeit die Zeitpunkte jedes einzelnen Fahrzeuges notiert, wenn Sie mit dem Fahrzeugbug die Haltlinie überfahren. Somit kann die Sättigungsverkehrsstärke für jede einzelne Fahrzeugposition berechnet werden.

Bei seinen Untersuchungen zur Ermittlung aktueller Werte und Formeln für die im HBS 2001 aufgeführten Angleichungsfaktoren hat SEHM (2005) bei der Auswertung seiner Messungen beide Verfahren stellvertretend an drei Messorten gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Mit dem Zeitlückenverfahren konnte SEHM keine Differenzierung mit/ohne Gelbfahrer vornehmen, da diese den Messquerschnitt an 2 bis 3 verschiedenen Positionen im Fahrzeugpulk passierten. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Querschnittsverfahren kleinere Sättigungsverkehrsstärken berechnet werden, wenn die Gelbfahrer vernachlässigt werden. Die Abweichungen zum Zeitlückenverfahren bewegen sich zwischen 5 und 24 %. Mit zunehmender Länge der gesendeten Freigabezeit verringern sich die Abweichungen zwischen beiden Verfahren. Im Bereich der Mindestfreigabezeit gibt es deutliche Unterschiede. Vergleicht man das Querschnittsverfahren mit und ohne Gelbfahrer, dann ist die Sättigungsverkehrsstärke bei kleinen Freigabezeiten im MIT-Fall fast doppelt so groß. Aufgrund der besseren Einsetzbarkeit und der weniger ausgeprägten Schwankungen ist das Zeitlückenverfahren vorzugsweise einzusetzen.

MÜCK (2002) hat bei seinen Untersuchungen zum Schätzverfahren für den Verkehrsstand an Lichtsignalanlagen auch die Sättigungsverkehrsstärken berechnet.

Seine ermittelten Werte lagen für einen Geradeausfahrstreifen im Frühverkehr mit einem SV-Anteil von 10 % zwischen 1400 und 1600 Fz/h. Nach HBS 2001 berechnet sich jedoch eine Sättigungsverkehrsstärke von 1860 Fz/h. MÜCK (2002) weist darauf hin, dass die tatsächlichen Werte von denen in der Literatur empfohlenen Werten abweichen können. Aus seiner Berechnungsbeschreibung geht aber hervor, dass er das Querschnittsverfahren eingesetzt hat, was gegenüber dem Zeitlückenverfahren kleinere Sättigungsverkehrsstärken ermittelt (Abbildung 5-3).

Aus den einzelnen Messreihen können für jede einzelne Fahrzeugposition der Zeitbedarfswert berechnet werden. Somit ist es möglich, die Sättigungsverkehrsstärke für unterschiedliche Freigabezeitintervalle zu bestimmen. Die Berechnung der Zeitbedarfswerte kann über das arithmetische Mittel erfolgen. AXHAUSEN/FELLEN-DORF/HOOK (1989) verwendeten bei ihren Berechnungen den Median der Folgezeitlücken. Abbildung 5-4 zeigt den Verlauf der Folgezeitlücken der Mediane und

der Mittelwerte. Sie weisen daraufhin, dass der Median im Gegensatz zur Mittelwertbildung extrem langsam anführende Fahrzeuge eliminiert. Die Verfasser wollten aber genau diesen Effekt nutzen, um Fahrzeugpuls in die Berechnung mit einfließen zu lassen, die zu Beginn der Freigabezeit nicht zur stehenden Fahrzeugkolonne gehörten. Die größeren Zeitlücken gehen bei der Medianbildung nur sehr schwach ein. Im HBS 2001 und auch in SCHNABEL/SCHOLZ/POHL (2005) wird als Voraussetzung angegeben, dass die Überfahrzeiten nur von den Fahrzeugen zu erfassen sind, die in „dichter Packung“ in der Signalzufahrt stehen. Die Aufnahme von Fahrzeugen, die erst nach dem Beginn der Freigabezeit am Knotenpunkt eintreffen, ist nur dann in die Messreihe aufzunehmen, wenn sie vor Anfahrt des letzten Pulkfahrzeuges bereits zum Stehen kamen. Ein Vergleich von Median und Mittelwert mit den Messwerten aus SEHM (2005) zeigt einen geringen Unterschied zwischen beiden Verläufen (siehe Abbildung 5-5). Der Median führt zu geringfügig kleiner Zeitbedarfswerten, was unwesentlich größere Sättigungsverkehrsstärken bedeutet.

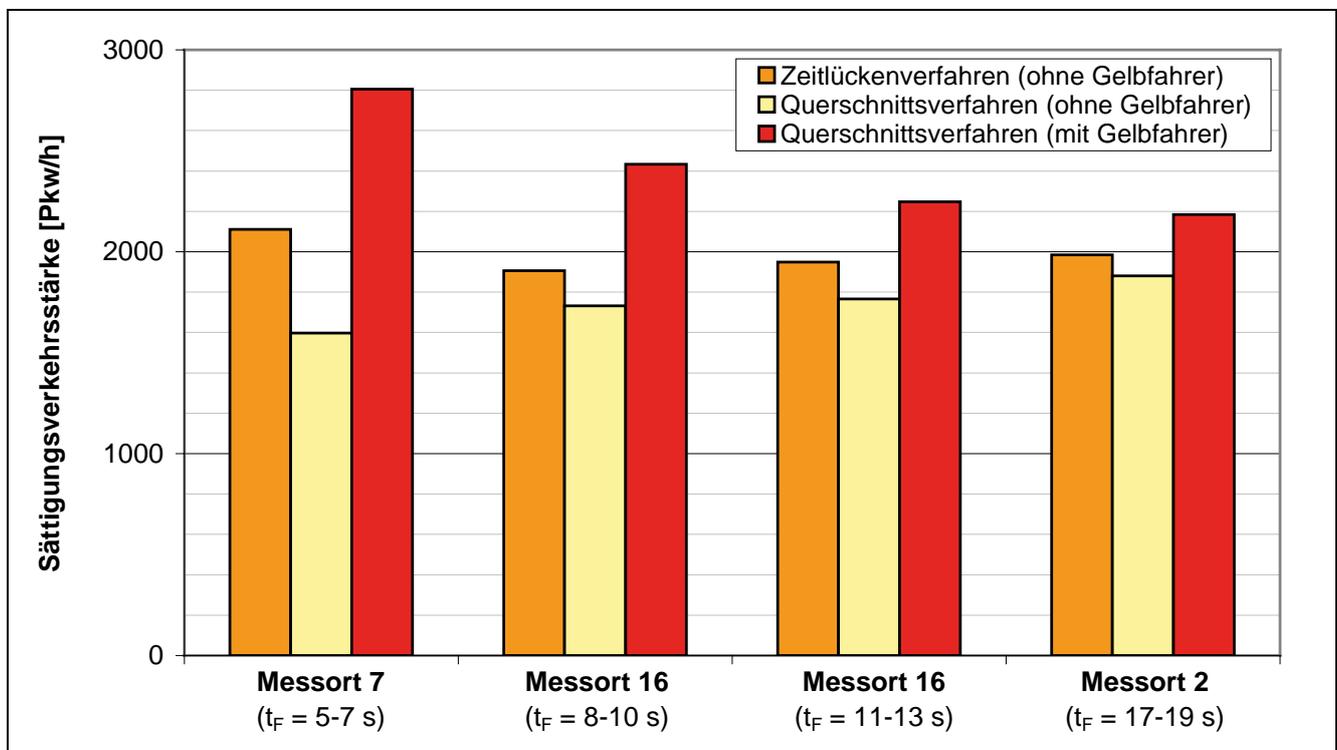


Abbildung 5-3: Vergleich der berechneten Sättigungsverkehrsstärken mit dem Zeitlückenverfahren und dem Querschnittsverfahren für kleine und mittlere Zeitlücken normiert auf eine einheitlichen Radius von $R = 55$ m (SEHM [2005])

Der Anfahrzeitverlustwert entspricht dem zeitlichen Mehrbedarf, der sich beim Anfahren des Fahrzeugpulkus aus dem Stand gegenüber der behinderungsfreien Durchfahrt ergibt. SCHNABEL/SCHOLZ/POHL (2005) weisen daraufhin, dass in der Verkehrstechnik heute meist vereinfacht ohne den Anfahrzeitverlustwert gerechnet wird, was als ausreichend angesehen wird. Mit der Zerlegung in Teilgeraden sowie der Verwendung von nicht linearen Beziehungen werden keine günstigeren Ergebnisse erzielt.

Linksabbiegern werden häufig nur kurze gesicherte Freigabezeiten angeboten, so dass der Anfahrzeitverlustwert nicht vernachlässigt werden kann. Er soll daher Einfluss auf die Grundsättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger durch eine Differenzierung in zwei verschiedene Freigabezeitgruppen nehmen.

5.2.2 Grundsättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger

Um eine Sättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger unter Standardbedingungen als Ausgangswert zu definieren, muss nach HBS 2001 der Ausgangswert von 2000 Pkw/h mit dem Angleichungsfaktor Abbiegeradius abgemindert werden. Der Abbiegeradius wird aus der mittleren Fahrlinie des Linksabbiegers bestimmt. Der Einfluss des Radius beginnt im HBS 2001 erst bei einem Wert $R \leq 15$ m. Bei größeren Radien wird die Sättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger gleich der für Geradeausfahrer gesetzt.

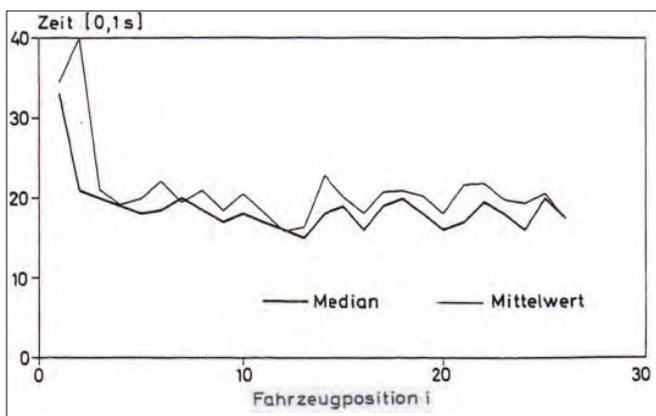


Abbildung 5-4: Verlauf der Mediane und Mittelwerte der Folgezeitlücken aus AXHAUSEN/FELLENDORF/HOOK (1989)

Aus ihren Verkehrsmessungen berechneten AXHAUSEN/FELLENDORF/HOOK (1989) für Linksabbieger einen Zeitbedarf von 1,85 s auf normalen und ebenen Fahrstreifen, was einer Sättigungsverkehrsstärke von 1945 Pkw/h entspricht. Für Geradeausfahrer ergaben sich die im HBS 2001 angegebenen 2000 Pkw/h. Für kurze Freigaben soll nach Ansicht der Verfasser der Zeitbedarf um 0,15 s auf 2,00 s erhöht werden (Sättigungsverkehrsstärke von 1800 Pkw/h), was im Widerspruch zum HBS-Verfahren steht.

SEHM (2005) hat an 10 Knotenpunkten die Zeitbedarfswerte der Linksabbieger für reine Pkw-Kolonnen gemessen. Die Abbiegeradien an den Knotenpunkten lagen zwischen 16 und 55 m und damit über dem Bereich, der im HBS 2001 als unbeeinflusst dargestellt ist. Die Mittelwerte der einzelnen Knotenpunkte sind in Abbildung 5-6 dargestellt. Auf Grund der Ergebnisse hat SEHM den großen Radienbereich in zwei Teile untergliedern und mit jeweils einem festen Wert versehen. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 5-1 den HBS-Werten gegenübergestellt. Die Messungen zeigen, dass sich auch bei größeren Radien ($R > 15$ m) für die Linksabbieger im Vergleich zu den Geradeausfahrern durch den Abbiegevorgang eine kleinere Sättigungsverkehrsstärke einstellt.

Aus den Messwerten von SEHM (2005) wurde noch untersucht, ob für kurze Freigaben mit anderen Sättigungsverkehrsstärken zu rechnen ist. Bei Nichtbeachten der Gelbfahrer zeigt sich, dass mit kleineren Sättigungsverkehrsstärken zu rechnen ist.

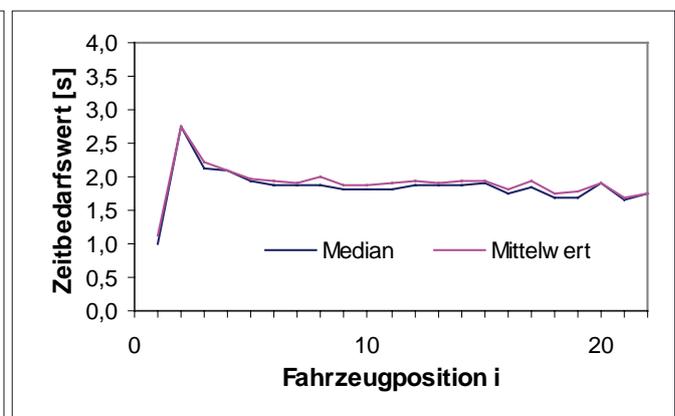


Abbildung 5-5: Verlauf der Mediane und Mittelwerte der Folgezeitlücken aus den Messdaten von SEHM (2005)

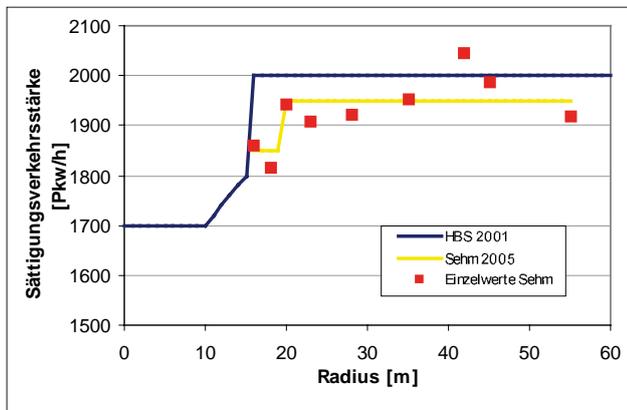


Abbildung 5-6: Vergleich der Messwerte von SEHM (2005) mit dem HBS 2001

Daher werden die HBS-Werte im weiteren Verlauf der Untersuchungen für die kleinen Radien ($R \leq 15$ m) eingesetzt. Für Verkehrsabläufe mit kurzen Freigabezeiten ($t_F = 6-10$ s) werden von den HBS-Werten ($t_F > 10$ s) 50 Pkw/h abgezogen. Bei großen Radien ($R > 15$ m) werden die Werte von SEHM verwendet.

5.2.3 Ermittlung der Größenordnung wichtiger Angleichungsfaktoren

Zur Abminderung der Grundsättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger kommen drei Einflussgrößen in Betracht. Dazu zählen die beiden festen Größen Längsneigung und Fahrstreifenbreite sowie die variierende Größe Schwerlastverkehr.

Für die Fahrbahnbreite konnten keine Veränderungen zum HBS nachgewiesen werden. Die Unterschiede bei Fahrstreifenbreiten zwischen 3,00 und 3,75 m sind vernachlässigbar. Für kleinere Breiten ergaben sich keine Beispiele. Daher werden für die Fahrbahnbreite die HBS-Werte verwendet.

Den Einfluss der Längsneigung hat SEHM (2005) an zwei Knotenpunkten untersucht. In der Zufahrt mit einer Steigung von 3,7 % zeigte sich lediglich beim Pulkspitzenfahrzeug eine langsamere Anfahrt mit einem Zeitverlust von 0,7 s im Vergleich zur ebenen Zufahrt. Bereits beim zweiten Kolonnenfahrzeug ergab sich nur noch ein ge-

Radius	HBS (2001)		SEHM (2005)	
	$t_F = 6-10$ s	$t_F > 10$ s	$t_F = 6-10$ s	$t_F > 10$ s
$R \leq 10$ m	2550-2040	1700	---	---
$10 < R \leq 15$ m	2700-2160	1800	---	---
$15 < R \leq 20$ m	3000-2400	2000	1800	1850
$20 < R \leq 55$ m	3000-2400	2000	1900	1950

Tabelle 5 1: Grundsättigungsverkehrsstärken für einstreifiges Linksabbiegen in Abhängigkeit des Radius

ringer Unterschied von 0,1 s, der dann mit dem 8. Kolonnenfahrzeug nicht mehr messbar war. SEHM weist aber daraufhin, dass aufgrund der geringen Anzahl an Messorten noch keine allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten getroffen werden können. Die geringen Unterschiede ergeben sich aus der Betrachtung der Zeitbedarfswerte. Daraus kann aber nicht die tatsächliche Sättigungsverkehrsstärke berechnet werden, da die höheren Zeitbedarfswerte der ersten Kolonnenfahrzeuge nicht berücksichtigt werden. Dies kann nur dadurch erreicht werden, wenn die Sättigungsverkehrsstärke aus dem Zeitbedarfssummenwert berechnet wird. SCHNABEL/SCHOLZ/POHL (2005) weisen daraufhin, dass in die Auswertung immer nur die Kolonnen zu verwenden sind, die eine gleichgroße Anzahl an Fahrzeugen besitzen, um bei der Regressionsrechnung Verzerrungen durch ungleichmäßige Klassenbelegungen zu vermeiden.

SCHOLZ (2003) hat die Einflüsse von Steigungen an LSA-Knotenpunkten näher untersucht. Die Ergebnisse für Steigungen zwischen 2 und 5 % sind Abbildung 5-7 dargestellt. Daraus lässt sich folgender Zusammenhang definieren:

$$f_s = 1 - 0,014 \times s^2 + 0,01 \times s \quad (5-3)$$

mit

f_s = Angleichungsfaktor für die Längsneigung [-]

s = Längsneigung [%]

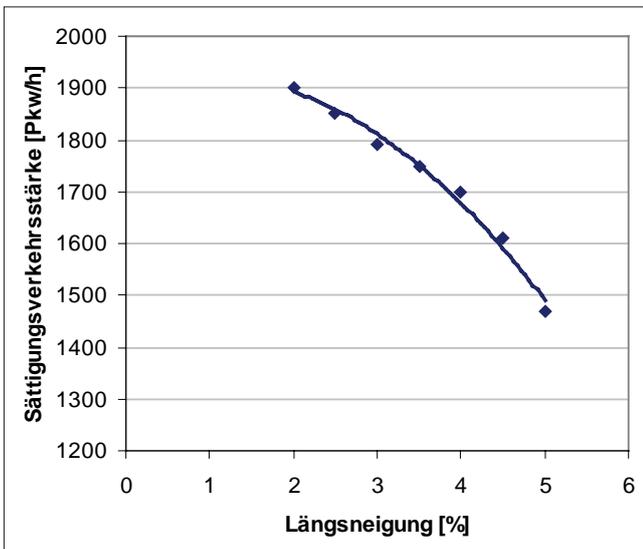


Abbildung 5-7: Sättigungsverkehrsstärken in Abhängigkeit der Längsneigung aus den Messungen von SCHOLZ (2003)

Mit der Gleichung 5-3 sind Sättigungsverkehrsstärken berechnet worden und in Tabelle 5-2 mit dem Berechnungsverfahren nach HBS 2001 verglichen. Bei Steigungen zwischen 2 und 3 % weichen die Werte voneinander nur geringfügig ab. Bei 5 % Steigung sind doch deutliche Unterschiede vorhanden. Die Messungen von SCHOLZ (2003) ergaben um mindestens 200 Pkw/h niedrigere Sättigungsverkehrsstärken, als mit dem HBS-Verfahren berechnet werden.

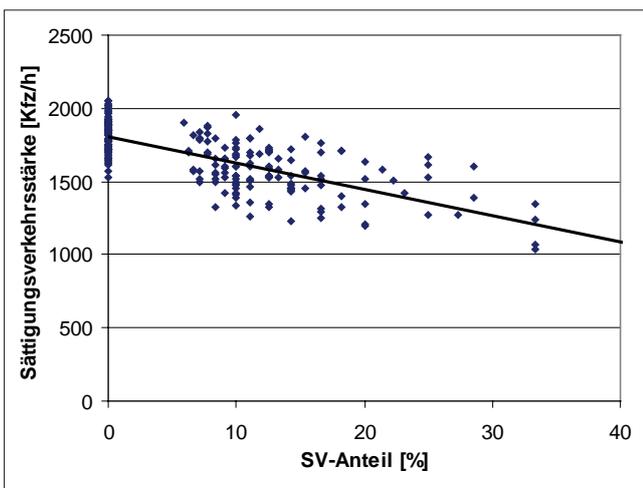


Abbildung 5-8: Sättigungsverkehrsstärken in Abhängigkeit des SV-Anteils von SEHM (2005) für einen LA-Fahstreifen mit $R = 18$ m

Längsneigung	HBS (2001)		SCHOLZ (2003)	
	$t_F = 6-10$ s	$t_F > 10$ s	$t_F = 6-10$ s	$t_F > 10$ s
s = + 5 %	2550-2040	1700	1450	1490
s = + 3 %	2700-2160	1800	1760	1810
s = + 2 %	3000-2400	1867	1850	1900
Ebene	3000-2400	2000	1900	1950
s = - 2 %	3000-2400	2000	---	---
s = - 3 %	3300-2640	2200	---	---
s = - 5 %	3450-2760	2300	---	---

Tabelle 5-2: Sättigungsverkehrsstärken für einstreifiges Linksabbiegen in Abhängigkeit von der Längsneigung (Radius $R > 20$ m)

Für Gefällestrrecken konnten keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden. Daher wird vorgeschlagen, mit den HBS-Werten zu rechnen.

Einen sehr starken Einfluss auf die Sättigungsverkehrsstärke hat der Schwerlastanteil. In den Untersuchungen von SCHOLZ (2003) wurden neben der Längsneigung auch der Schwerlastanteil ermittelt. Auch SEHM (2005) hat diesen Einfluss näher betrachtet. Aus beiden Arbeiten

Längsneigung	HBS (2001)		SCHOLZ (2003)	
	$t_F = 6-10$ s	$t_F > 10$ s	$t_F = 6-10$ s	$t_F > 10$ s
SV = 0 %	3000-2400	2000	1900	1950
SV = 5 %	2930-2345	1950	1820	1870
SV = 10 %	2795-2235	1865	1745	1790
SV = 15 %	2420-1935	1615	1665	1710
SV = 20 %	2305-1845	1540	1590	1630
SV = 30 %	2070-1655	1380	1435	1470

Tabelle 5-3: Sättigungsverkehrsstärken für einstreifiges Linksabbiegen in Abhängigkeit des SV-Anteils (Radius $R > 20$ m)

lässt sich folgende Beziehung ableiten, die für SV-Anteile bis 30 % verwendet werden können:

$$f_{SV} = 1 - 0,0082 \times SV \quad (5-4)$$

mit

f_{SV} = Angleichungsfaktor für den Schwerlastanteil [-]
 SV = Schwerlastanteil [%]

Bei höheren SV-Anteilen sind vor Ort eigene Messungen durchzuführen und daraus die entsprechende Sättigungsverkehrsstärke zu ermitteln. Die berechneten Sättigungsverkehrsstärken aus einer Messung von SEHM (2005) sind in Abbildung 5-8 dargestellt.

Eine Gegenüberstellung der Werte mit dem HBS-Verfahren und den mit Gleichung 5-4 berechneten Werten ist in Tabelle 5-3 zu finden. Der Vergleich zeigt, dass sich mit dem HBS-Verfahren bei kleinen bis mittleren SV-Anteilen (max. 10 %) höhere Sättigungsverkehrsstärken ergeben. Für die SV-Anteile von 2 bis 15 % liegt im HBS 2001 eine Exponentialfunktion vor, die zwischen 10 und 15 % SV-Anteil sehr stark fällt. Dieser Verlauf wird durch die Hyperbelfunktion für SV-Anteile größer 15 % wieder korrigiert. Aus den Messungen von SCHOLZ (2003) und

SEHM (2005) geht hervor, dass für den SV-Anteil einfachheitshalber eine lineare Beziehung zur Abminderung der Sättigungsverkehrsstärke verwendet werden kann.

Die aktualisierten Angleichungswerte und -formeln sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Sie sind zur Berechnung der tatsächlichen Sättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger beim einstreifigen Linksabbiegen einzusetzen.

Bei seinen theoretischen Berechnungen hat WIEDEMANN (1987) für konstante Netto-Zeitabstände die momentane Leistungsfähigkeit eines Fahrstreifens (Sättigungsverkehrsstärke) berechnet. Mit zunehmender Geschwindigkeit erhöhten sich die Kapazitäten, je kleiner der Netto-Zeitabstand desto höher die Kapazitätsdifferenz. Linksabbieger fahren i. d. R. kleinere Geschwindigkeiten als Geradeausfahrer. Unterschiede ergeben sich durch den Radius, die sich in der Grund-sättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger (Tabelle 5-4) widerspiegeln. Die höheren Geschwindigkeiten an Knotenpunkten außerhalb geschlossener Ortschaften können vom Linksabbieger nicht gefahren werden. Ein zusätzlicher Einfluss der Geschwindigkeit ist daher nicht zu empfehlen.

Einflussgröße		Freigabezeit (ohne Gelbfahrer)	
		$t_F = 6-10 \text{ s}$	$t_F > 10 \text{ s}$
Linksabbieger ($q_{S, st-LA}$)	$R \leq 10 \text{ m}$	1650	1700
	$10 < R \leq 15 \text{ m}$	1750	1800
	$15 < R \leq 20 \text{ m}$	1800	1850
	$20 < R \leq 55 \text{ m}$	1900	1950
Fahrbahnbreite (f_b)	$b = 2,60 \text{ m}$	0,85	
	$b = 2,75 \text{ m}$	0,90	
	$b \geq 3,00 \text{ m}$	1,00	
Längsneigung (f_s)	$+2 \leq s \leq +5 \%$	$1 - 0,0114 \cdot s^2 + 0,01 \cdot s$	
	$s = 0 \%$	1,00	
	$s = -3 \%$	1,10	
	$s = -5 \%$	1,15	
Schwerlastanteil (f_{SV})	$0 < SV \leq 30 \%$	$1 - 0,0082 \cdot SV$	
Anmerkung: aus HBS 2001 aus SCHOLZ (2003) aus SEHM (2005)			

Tabelle 5-4: Aktualisierte Angleichungsfaktoren für den Fahrzeugabfluss aus lichtsignalgeregelten Zufahrten

5.3 Überprüfung der Gesetzmäßigkeiten zum bedingt verträglichen Linksabbiegen und Aussagen zum Verhalten bei innerer Mehrphasigkeit

Beim Linksabbiegen ohne gesicherte Freigabezeit müssen die Linksabbieger den übergeordneten Gegenverkehr beachten. Gemäß der Aufgabenstellung ist der Fußgänger- und Radverkehr zu vernachlässigen. Dieser Vorgang entspricht dem Linksabbiegen an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage, an dem die Linksabbieger bei einer ausreichend langen Zeitlücke im Gegenstrom durchsetzen. Bei ausgelasteten Fahrstreifen der bevorrechtigten Ströme können die Linksabbieger den Knoteninnenbereich lediglich nach dem Ende der Freigabezeit im Phasenwechsel verlassen. In diesem Fall werden häufig zusätzliche gesicherte Freigabezeiten angeboten, die vor oder nach der Freigabezeit der übergeordneten Ströme gesendet werden. Der Verkehrsablauf während dieser Vor- oder Zugabezeiten entspricht den Abflussbedingungen der gesicherten Führung.

5.3.1 Mess- und Berechnungsverfahren

In die Berechnung der Kapazität der durchsetzenden Linksabbieger fließen im Verfahren nach HBS 2001 die Grenz- und Folgezeitlücken ein.

Zur Ermittlung der **Grenzzeitlücke** sind in der Literatur verschiedene Verfahren über Annahme und Ablehnung von Zeitlücken durch die jeweils ersten wartepflichtigen Fahrzeuge zu finden. WEINERT (2001) hat diese Verfahren tabellarisch zusammengefasst. Zur Ermittlung der Grenzzeitlücken hat Sie die Maximum-Likelihood-Methode nach TROUTBECK verwendet, das nach Ihrer Auffassung ein übliches statistisches Verfahren darstellt, um Parameter von stochastischen Verteilungen schätzen zu können. Als Wahrscheinlichkeitsfunktion wurde die Log-Normalverteilung gewählt, weil sie rechtsschief ist und keine negativen Werte aufweist. Die Likelihood-Funktion ist wie folgt definiert:

$$L^* = \prod_{i=1}^n [F(y_i) - F(x_i)]$$

$$\Rightarrow L = \sum_{i=1}^n \ln [F(y_i) - F(x_i)] \quad (5-5)$$

mit

y_i = Logarithmus der vom i-ten Fahrer angenommenen Lücke
= ∞ , wenn keine Lücke angenommen wird

x_i = Logarithmus der größten vom i-ten Fahrer abgelehnten Lücke

= 0, wenn keine Lücke abgelehnt wird, d. h., die Lücke angenommen wird

L^* = Wahrscheinlichkeit von n Fahrern, deren angenommene Lücke y_i und größte abgelehnte Lücke x_i ist

L = Logarithmus von L^*

$f()$, $F()$ = Wahrscheinlichkeits- und Verteilungsfunktion der Normalverteilung.

Für das Verfahren sind nur die Zeitlücken von wartepflichtigen Fahrzeugführer zu verwenden, die sich konsistent verhalten, d.h. sie benötigen eine bestimmte Grenzzeitlücke $t_{g,i}$, die größer ist als alle abgelehnten Zeitlücken. Die erste Zeitlücke, die größer ist als $t_{g,i}$, wird angenommen. Es ist aber zu bedenken, dass durchsetzende Fahrer bei langen Haltezeiten manchmal eine ausreichende Zeitlücke nicht annehmen und daraufhin eine kürzere Zeitlücke dann zum Abfließen wählen. Eine vollständige konsistente Verhaltensweise der Fahrzeugführer wird sich nicht ergeben. Diese Werte sollten daher in diesem Verfahren nicht verwendet werden, solange der Anteil dieser Fahrer vernachlässigbar klein ist. Bei überwiegend inkonsistentem Verhalten kann dieses Verfahren nicht eingesetzt werden.

Der Mittelwert der Grenzzeitlücke m berechnet sich dann:

$$m = e^{\mu + 0,5 \cdot \sigma^2} \quad (5-6)$$

mit

μ , σ^2 = Parameter, die über ein Gleichungssystem die logarithmische Maximum-Likelihood-Funktion maximieren.

WEINERT (2001) hat aus der Literatur entnommen, dass bei einem Datenumfang von 100 wartepflichtigen Fahrzeugen die Standardabweichung der Grenzzeitlücke unter 0,3 Sekunden fällt. Sie weist jedoch daraufhin, dass in diesem Umfang nicht immer erfasst werden kann und man sich bei angemessenem Untersuchungsaufwand zwangsläufig mit diesen Ergebnissen begnügen muss.

Zur Bestimmung der Zeitlücken im übergeordneten Fahrzeugstrom muss vorab die Lage des Messquerschnittes festgelegt werden, die von der Knotenpunktgeometrie und der Abwicklung der Rechtsabbieger (mit/ohne Dreiecksinsel) abhängig sein kann. In Abbildung 5-9 ist der Messquerschnitte für zwei unterschiedliche Rechtsabbiegerführungen dargestellt, die an Vorfahrtnoten sowie an Knotenpunkten mit ungesicherter Linksabbiegerführung gleichermaßen einsetzbar sind.

Begrifflich wird zwischen den Zeitlücken lags und gaps unterschieden. Die lag ist die Zeitlücke von Beginn des Haltens des wartepflichtigen Linksabbiegers in erster Position im Knoteninnenbereich bis zum Erreichen des Messquerschnittes durch den Fahrzeugbug des nächsten übergeordneten Geradeausfahrers oder Rechtsabbiegers. Alle folgenden Zeitlücken, die vom Linksabbieger abgelehnt oder angenommen werden, werden mit gaps bezeichnet. Die Bestimmung des Beginns und des Endes der lags unterliegt Messungenauigkeiten. Die lag kann nicht immer eindeutig bestimmt werden und führt bei einer großen Anzahl angenommener lags zu einer fehler-

haften Grenzzeitlücke. WEINERT (2001) geht davon aus, dass die nur aus gaps abgeleiteten Grenzzeitlücken den tatsächlichen Werten entsprechen. Daher hat sie die lags in ihren Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Die mittlere **Folgezeitlücke** hat WEINERT (2001) aus den wartepflichtigen Linksabbiegern errechnet, die sich im ständigen Rückstau befanden. Die Folgezeitlücke ist der zeitliche Abstand des Fahrzeugführers zum Vordermann, der vor dem Abbiegevorgang hinter ihm stand und in dieselbe Zeitlücke im übergeordneten Strom einfuhr. Aus den Einzelwerten hat sie dann den Mittelwert gebildet.

Das von WEINERT (2001) angewandte Verfahren wird als aussagefähig angesehen, da es zu plausiblen Ergebnissen führt, die bis dahin bekannte Literatur berücksichtigt und auch die Basis des HBS 2001 darstellt.

5.3.2 Ungesichertes Linksabbiegen ohne zusätzliche Vor- oder Zugabezeit

Das Verfahren im HBS 2001 sieht zur Berechnung der Kapazität der Linksabbieger beim Durchsetzen mit dem Gegenverkehr eine Grenzzeitlücke von 5,7 s vor. Dieser Wert ist bereits in SCHNABEL (1975) angegeben und unabhängig davon wurde diese Grenzzeitlücke auch im „HBS-Vorläufer“ von BRILON/GROßMANN/BLANKE (1993) verwendet. Eine Differenzierung nach der Ortslage ist nicht vorgesehen, so dass innerorts und außerorts mit der gleichen Zeitlücke zu rechnen ist. Der zeitliche Abstand

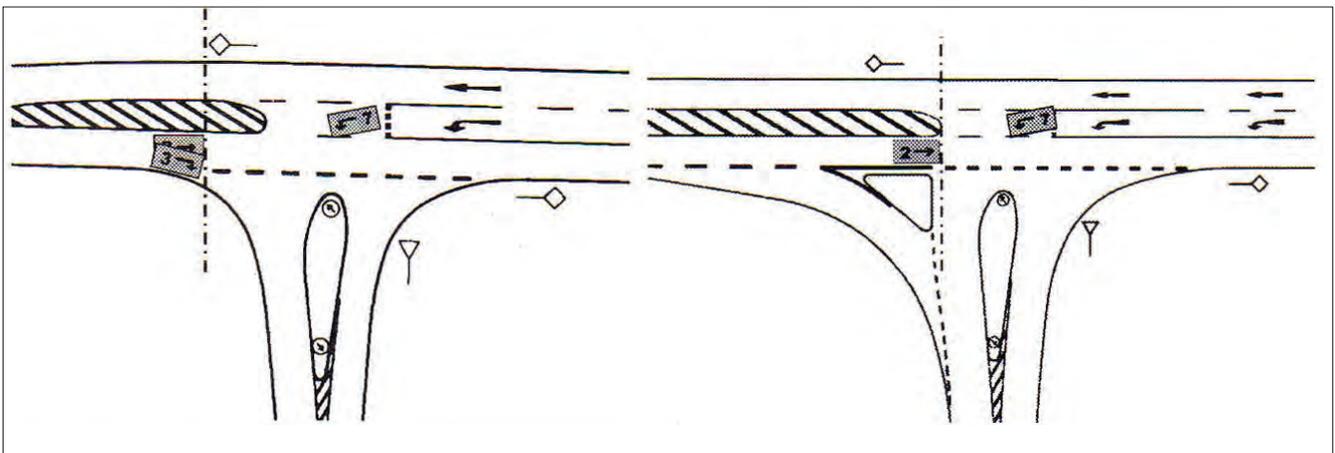


Abbildung 5-9: Beispiele für Bezugsquerschnitte für Hauptstromfahrzeuge aus Weinert (2001)

zwischen zwei hintereinander abfließende Linksabbieger (Folgezeitlücke) wird im HBS 2001 mit einem Wert von 3,0 s benannt. Unterschiede zwischen innerorts und außerorts sind auch nicht angegeben, was auf fehlende Empirie hindeutet.

BRETSCHNEIDER (2006) hat die Grenz- und Folgezeitlücken an 6 Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage im Innerortsbereich ermittelt. Dabei wurden bei den Berechnungen nur die Umläufe berücksichtigt, bei denen für den wartepflichtigen Linksabbieger beim Abfließen keine Behinderungen durch Fußgänger und Radfahrer auftraten, was somit einem Außerortscharakter nahe kommt.

Aus dem HBS-Verfahren für Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage geht hervor, dass die Zeitlücken sich hinsichtlich der Ortslage unterscheiden. Weiterhin haben die Untersuchungen von BRILON/WEINERT (2001) und WEINERT (2001) an Außerortsknotenpunkten gezeigt, dass die Grenzzeitlücke abhängig von der Lage des Knotenpunktes und dem Vorhandensein von Rechtsabbiegeeinrichtungen (auch Folgezeitlücke) ist. Die Werte für den Innerortsbereich sind geringfügig kleiner als die Werte für Knotenpunkte mit LSA. In Tabelle 5-5 sind die Grenz- und Folgezeitlücken vergleichend dargestellt.

Die höheren Zeitlückenwerte im Außerortsbereich begründet WEINERT (2001) mit der höheren Anzahl an ortsunkundigen Verkehrsteilnehmern. In Ballungsgebieten muss mit überwiegend ortskundigen Fahrern gerechnet werden und entspricht somit den Abläufen im Innerortsbereich, die in den Spitzenverkehrszeiten sehr stark von Berufspendlerverkehr geprägt sind. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass sich die Fahrer aufgrund der Ortskenntnis anders verhalten als an unbekanntem Knotenpunkten. Einen Einfluss der Geschwindigkeit der Fahrzeuge des übergeordneten Stromes auf die Zeitlücken der Linksabbieger konnte WEINERT (2001) nicht finden. BRILON/GROßMANN/-BLANKE (1993) haben aus früherer Literatur ganz unterschiedliche Aussagen zu einem möglichen Einfluss der Geschwindigkeit entnommen. Dabei ergaben sich uneinheitliche Verläufe der Zeitlücken für Linksabbieger bei ansteigender mittlerer Geschwindigkeit, die teilweise Zu- oder Abnahmen der Zeitlückenwerte aufzeigten.

Die Einflüsse auf die Grenz- und Folgezeitlücken sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst. Ein Vergleich der Untersuchungen von WEINERT (2001) und von BRETSCHNEIDER (2006) zeigt uneinheitliche Auswirkungen der Einflussfaktoren auf die Zeitlücken. BRETSCHNEIDER (2006) gibt

Verfahren	Grenzzeitlücke t_g [s]					Folgezeitlücke t_f [s]		
	außerorts (außer-/innerhalb von Ballungsräumen) (mit/ohne Rechtsabbiegeeinrichtung)				innerorts	außerorts		innerorts
	außerhalb		innerhalb			RA-Einrichtung		
	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne		
WEINERT (2001) (ohne LSA)	6,4	5,9	6,0	5,5	5,5	2,9	2,5	3,1
HBS 2001 (ohne LSA)	6,4	5,9	6,0	5,5	5,5	2,9	2,6	2,6
BRILON/GROßMANN/ BLANKE (1993)	5,7					2,5		
HBS 2001 (mit LSA)	5,7					3,0		
BRETSCHNEIDER (2006) (mit LSA)	-, -	-, -	-, -	-, -	5,5 - 6,0	-, -	-, -	2,2 - 2,5

Tabelle 5-5: Vergleich der Grenz- und Folgezeitlücken für Knotenpunkte mit und ohne Lichtsignalanlage

für „normale“ Bedingungen eine Grenzzeitlücke von 5,8 s und eine Folgezeitlücke von 2,3 s an. Bei ihren Untersuchungen gaben die berechneten Zeitlücken einen Einfluß durch die Längsneigung und die Länge der Freigabezeit vor. Bei einer Längsneigung von 2,5 % (Steigung) berechnete sie deutlich geringere Wert von 4,8 s und 1,8 s. Sie begründet diese Abnahme jedoch mit den Sichtbedingungen auf die übergeordneten Fahrzeuge, die im Gefälle frühzeitig erkennbar waren. Bei unterschiedlichen Längen der Freigabezeiten zeigte sich eine Verringerung der Grenzzeitlücke bei zunehmender Freigabezeit. Die Länge der Freigabezeit bezieht sich allerdings auf die Grünzeit der Linksabbieger und nicht der übergeordneten Gegenrichtung. Hierbei wurde nicht beachtet, dass die Zugabezeiten einen Sonderfall darstellen und nicht mit in die Länge der Freigabezeiten einfließen dürfen. Auch sind andere Einflüsse (unterschiedliche Verkehrsstärke, Längsneigung) nicht herausgerechnet worden. Somit zeigen die Ergebnisse eine Tendenz, werden aber im weiteren Verfahren nicht berücksichtigt.

Zur Überprüfung der konstanten Zeitlücken für ungesicherte Linksabbieger an Knotenpunkten im Innerorts- und Außerortsbereich nach HBS 2001 wurden Grenzzeitlücken mit der Maximum-Likelihood-Methode ermittelt. Für die Knotenpunktform 6 nach Abbildung 5-1 (separate Fahrstreifen für Linksabbieger, Geradeausfahrer und Rechtsabbieger sowie Dreiecksinsel für Rechtsabbieger) sind die Verteilungen in Abbildung 5-10 dargestellt. Die jeweils erste gemessene Zeitlücke nach einem Schwerlastfahrzeug ist nicht in die Berechnung mit eingeflossen. Es zeigte sich, dass diese Zeitlücken auf Grund der Länge des Schwerlastfahrzeuges sehr groß waren und in keinem Verhältnis zu den Zeitlücken zwischen zwei Pkws standen, auch wenn die Nettoweglücke zwischen Pkw-Pkw und Pkw-Lkw/Lastzug gleich lang war.

Mit der Maximum-Likelihood-Methode konnte eine Grenzzeitlücke von 5,0 s und eine Folgezeitlücke von 2,5 s berechnet werden. Beide Zeitlücken liegen unter den Werten aus dem HBS 2001. Obgleich der Knotenpunkt

Einflussgrößen	WEINERT (2001)		BRETSCHNEIDER (2006)	
	Grenzzeitlücke	Folgezeitlücke	Grenzzeitlücke	Folgezeitlücke
Ohne Einflussgröße	0,4048*	0,2060*	5,75	2,33
Knotenart	nein	nein	---	---
Lage des Knotenpunktes	ja (0,3499)	nein	---	---
Rechtsabbiegeeinrichtungen auf Hauptstraße	ja (0,1440*)	ja (0,1827*)	---	---
Verkehrsstärke der Hauptströme	ja (0,3333*)	nein	nein	nein
Freigabezeit	-	-	ja ($t_F \uparrow - t_g \downarrow$)	ja ($t_F \uparrow - t_f \uparrow$)
Wartezeiten	nein	nein	---	---
Schwerverkehrsanteil im Hauptstrom	nein	nein	---	---
Geschwindigkeiten im Hauptstrom	nein	nein	---	---
Längsneigung	nein	nein	ja ($t_F \uparrow - t_g \downarrow$)	ja ($t_F \uparrow - t_f \downarrow$)
Sichtweite	nein	nein	---	---

Erklärung: *Reststreuung $s_{y,x}^2$ in $[s^2]$, \uparrow Zunahme bzw. \downarrow Abnahme der Länge der Zeitlücke

Tabelle 5-6: Zusammenstellung der Einflüsse auf die Zeitlücken

außerhalb eines Ballungsgebietes liegt und WEINERT (2001) dann von einem höheren Anteil ortsunkundiger Fahrer ausgeht, waren die Linksabbieger größtenteils Anwohner eines anschließenden Wohngebietes oder Fahrzeugführer aus der unmittelbaren Umgebung, die sich auf dem Weg zum Einkauf befanden und somit ortskundige Autofahrer. Daher sind die niedrigen Werte nicht allgemeingültig. Es ist davon auszugehen, dass regionale Unterschiede und knotenspezifische Bedingungen – vergleichbar mit der Sättigungsverkehrsstärke – einen Einfluss auf die Größen der Grenz- und Folgezeitlücken haben.

In 67 Fällen war dem Linksabbieger in 1. Position erst nach dem Ende der Freigabezeit der übergeordneten Geradeausfahrer im Knoteninnenbereich das Abfließen möglich. Maximal konnten sich 3 Fahrzeuge im Knoteninnenbereich aufstellen, was nicht in jedem Umlauf zu verzeichnen war. Das Abflussverhalten dieser Linksabbieger in Abhängigkeit der Fahrzeugposition ist in Abbil-

dung 5-10 (rechts unten) grafisch dargestellt. Bei 45 von 67 Geradeausfahrten (67 %) lag der Ankunftszeitpunkt an der Konfliktfläche nach dem Ende der Freigabezeit, bei 11 Geradeausfahrern sogar über 3 s nach Freigabezeitende. Im Anschluss konnten die Linksabbieger abfließen. Ableitend aus den Beobachtungen und den Messwerten zum Abflussverhaltens kann davon ausgegangen, dass die Linksabbieger sich hauptsächlich an dem Verhalten der übergeordneten Fahrzeuge orientieren. In einigen Fällen sind die Linksabbieger erst dann auf die Konfliktfläche gefahren, wenn der Geradeausfahrer schon vor seiner Haltlinie stand. Die Zeitlücke der nachfolgenden Linksabbieger lag im Mittel bei 2,6 s und damit über der Folgezeitlücke beim Durchsetzen. Auch nachfolgende Linksabbieger orientieren sich noch am Verhalten der Fahrzeuge der Gegenrichtung. Geht man von den Zwischenzeiten aus dem HBS 2001 aus (7 s), erreichten 61 % der Fahrer in 2. und 91 % der Fahrer in 3. Position die Konfliktfläche in der Grünzeit der Querrichtung, die dann die Fahrzeuge der Querrichtung beim Abfließen behindern.

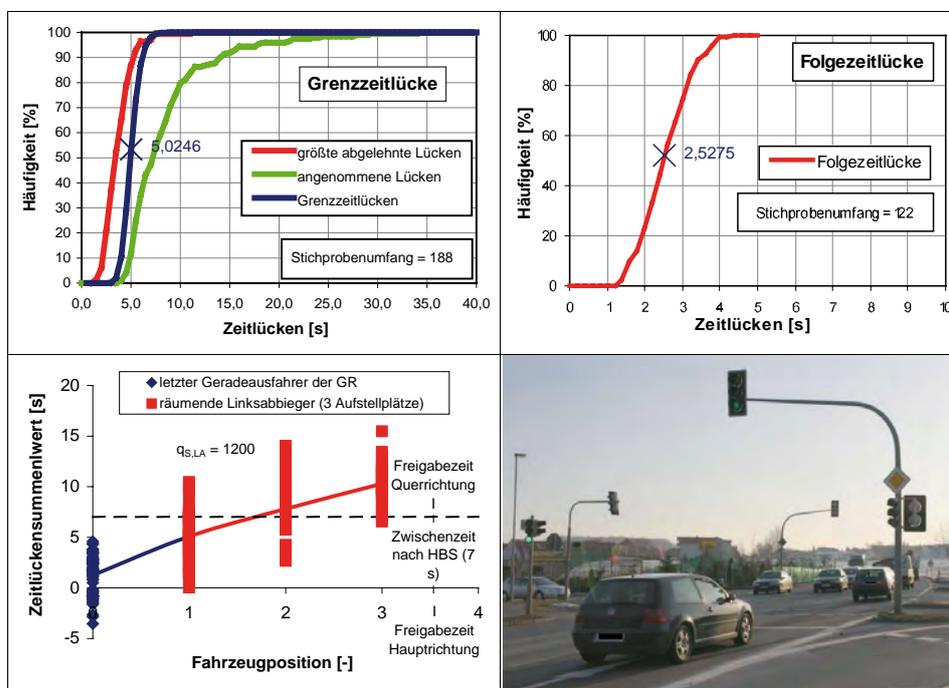


Abbildung 5-10: Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücke für einen ungesicherten Linksabbieger mit jeweils einem separaten Fahrstreifen für Geradeausfahrer und Rechtsabbieger (mit Dreiecksinsel und aus der Signalisierung genommen) in der Gegenrichtung an einem Innerortsknotenpunkt außerhalb des Ballungsgebietes sowie das Abflussverhalten nach Ende der Freigabe im übergeordneten Strom

5.3.3 Zeitweilig gesichertes Linksabbiegen mit Zugabezeit

In den Spitzenverkehrszeiten können ungesicherte Linksabbieger häufig nicht während der Grünzeit der übergeordneten Ströme aus der Gegenrichtung (Geradeausfahrer und Rechtsabbieger) abfließen. Die Zeitlücken sind nicht ausreichend lang, um im Gegenverkehr durchsetzen zu können. Die Linksabbieger können anschließend den Knoteninnenbereich während des Phasenwechsels oder in einer nachfolgend gesendeten Zugabezeit abfließen. Bei den Untersuchungen von BRETSCHEIDER (2006) nahmen 250 von 553 Linksabbiegern (45 %) bei einer ungesicherten Linksabbiegerführung eine Zeitlücke im übergeordneten Verkehrsstrom an. An den Knotenpunkten mit einer zeitweilig gesicherten Linksabbiegerführung haben von 2721 Linksabbiegern nur 547 Fahrzeugführer durchsetzt (20 %). Die Werte lassen vorerst daraus schließen, dass die Fahrzeugführer an Knotenpunkten mit eingerichteter Zugabezeit weniger bereit sind, eine geeignete Zeitlücke während der ungesicherten Freigabe anzunehmen.

In Abbildung 5-11 sind die Ergebnisse einer Videomesung an einem Knotenpunkt mit zeitweilig gesicherter Linksabbiegerführung (Zugabezeit) dargestellt. Der bevorrechtigte Fahrzeugstrom (geradeaus + rechts) wurde über einen Mischfahrstreifen geführt und eine Freigabezeit von 18 s gesendet. Nach der Freigabezeit muss bis zum Beginn der Zugabezeit noch eine Zwischenzeit 6 s abgewartet werden. Die Länge der Zugabezeit war ebenso 6 s lang. Für diese Auswertung sind nur die Umläufe verwendet worden, in denen keine Schwerlastfahrzeuge über den Knotenpunkt fahren.

Aus den Messungen konnten 34 Umläufe ausgewertet werden. Für die übergeordneten Fahrzeugströme ergibt sich ein nahezu linearer Verlauf der Zeitlückensummen über die Fahrzeuganzahl. Der zeitliche Abstand zwischen den Fahrzeugen beträgt im Mittel 1,97 s. Dies entspricht einer Sättigungsverkehrsstärke von 1830 Kfz/h. Bis einschließlich der 7 Fahrzeugposition fahren die Gegenstromfahrzeuge alle bei Grün. Ab dem achten Fahrzeug erhöht sich sukzessive der Anteil der Fahrzeug, die die Konfliktfläche nach dem Ende der Freigabezeit erreichen

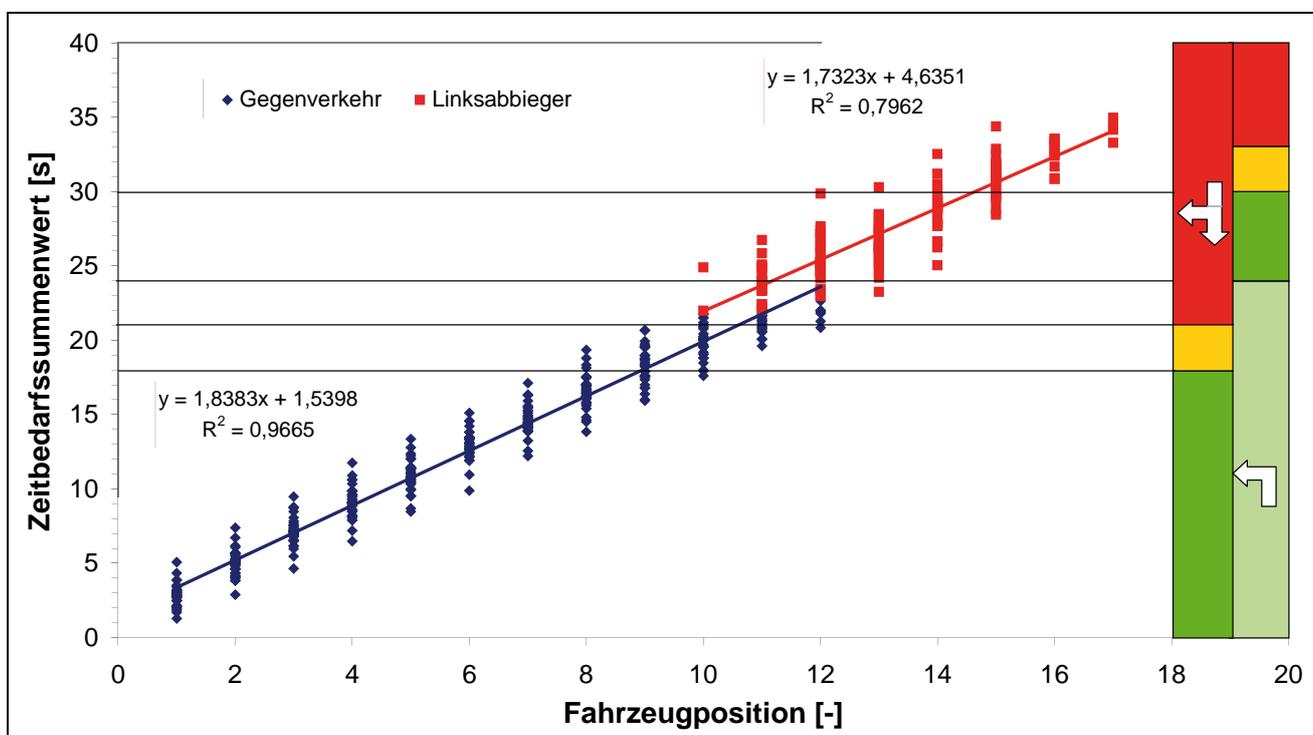


Abbildung 5-11: Messergebnisse für eine Steuerung mit nicht gesicherter Linksabbiegerführung und anschließender Zugabezeit

ten. Im übergeordneten Fahrzeugstrom wurden 362 Fahrzeuge erfasst, von denen 56 Fahrzeuge bei Signalbild „Gelb“ und 19 bei Signalbild „Rot“ die Konfliktfläche mit dem Fahrzeugbug erreichten. 19 % der Fahrzeugführer sind somit nach der Freigabezeit noch in den Knotenpunkt eingefahren. Damit konnten während des Phasenwechsels kaum Linksabbieger vorzeitig abfließen. Der räumliche Vorsprung der Linksabbieger bei zeitweilig gesicherter Linksabbiegerführung (Knoteninnenbereich) zu denen bei gesicherter Führung (Haltlinie) ist damit kaum noch vorhanden. Weiterhin konnte sehr häufig beobachtet werden, dass die Linksabbieger erst nachdem das erste Fahrzeug der Gegenrichtung an der Haltlinie zum Stehen kam, mit dem Räumvorgang begonnen haben (vgl. Beispiel in Kap. 5.3.2). Auch zeigte das Verhalten der Linksabbieger ab der zweiten Fahrzeugposition, dass durch das Abbremsen vor dem Befahren der Konfliktfläche die Linksabbieger auch in nachfolgenden Positionen sich in der Zugabezeit vielmals an dem Gegenverkehr orientieren und nicht auf den Räumpfad achten. Dies führt dann zu großen Zeitlücken im abfließenden Linksabbiegerstrom. Insgesamt wurden bei der Zeitlückenmessung

135 Linksabbiegern erfasst, von denen kein Fahrzeugführer im Gegenverkehr durchsetzte.

In Abbildung 5-12 sind die Zeitpunkte des Erreichens der Konfliktfläche durch gestaute Linksabbieger in Abhängigkeit ihrer Fahrzeugposition im Linksabbiegerpulk dargestellt. Etwas mehr als die Hälfte der Pulkspitzenfahrzeuge fließt mit Beginn der Zugabezeit ab. Die restlichen Linksabbieger können den theoretischen Vorteil der Zugabezeit nutzen und schon während des Phasenwechsels abfließen. Der Zeitpunkt des zweiten Linksabbiegers streut dagegen sehr stark zwischen den zeitlichen Grenzen der Zugabezeit. Die Messungen ergaben bis zum Ende der Zugabezeit lange Zeitlücken von über 2 s zwischen 2 aufeinanderfolgenden Fahrzeugen. Stellt man die Messwerte von SEHM (2005) für gesicherte Linksabbiegersignalisierung gegenüber, so sind die Zeitlücken in der Zugabezeit deutlich länger, als bei gesicherter Linksabbiegerführung.

Einen ersten Vergleich der Verkehrsstärke zwischen den unterschiedlichen Signalisierungen stellt Tabelle 5-7 dar. Aus den Messungen sind die mittleren Zeitlückensum-

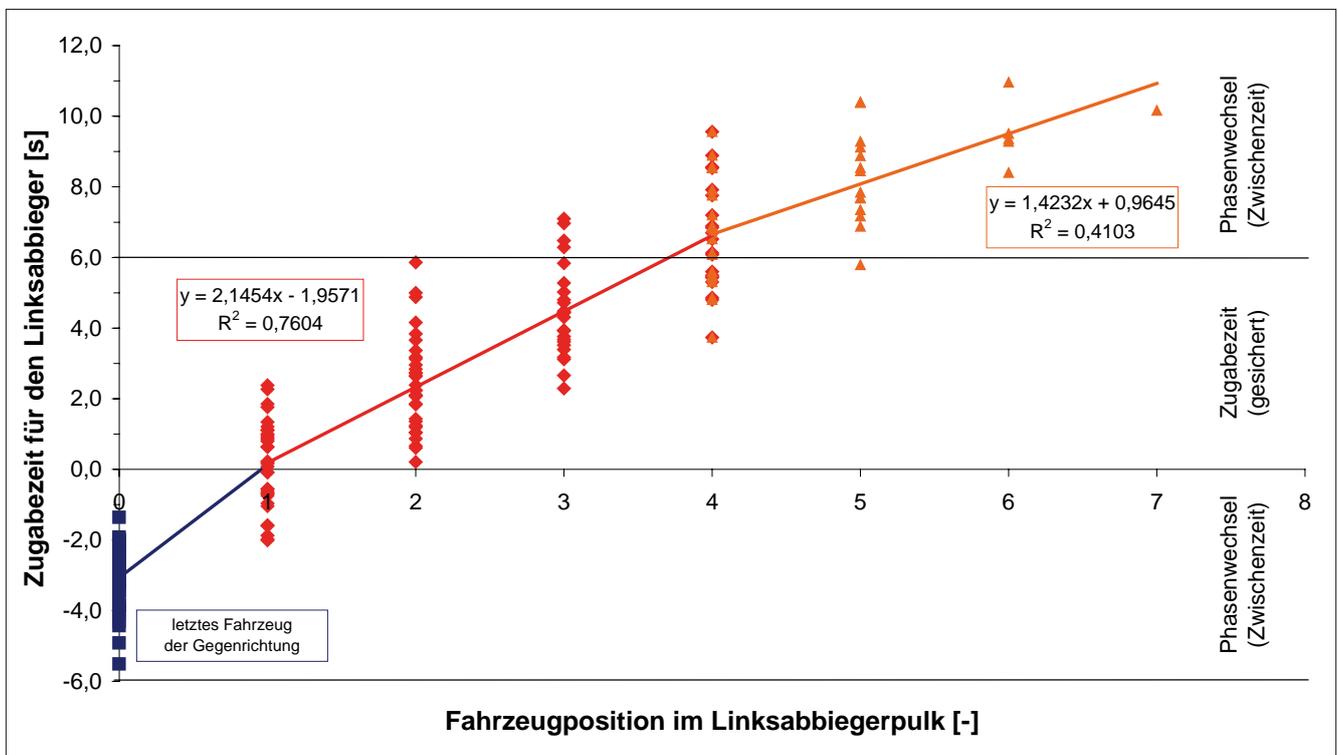


Abbildung 5-12 Abfluss der Linksabbieger nach dem Ende der Freigabezeit der übergeordneten Gegenrichtung

menwerte für die ersten Linksabbieger berechnet worden. Als Ausgangswert für den Grünbeginn wurde bei den ungesicherten und den zeitweilig gesicherten Linksabbiegersignalisierung der Zeitpunkt genommen, an dem das letzte Fahrzeug der Gegenrichtung die Konfliktfläche erreicht hat. Da zu diesem Zeitpunkt der Linksabbieger noch nicht in die Konfliktfläche einfahren kann, wurde von der ersten Zeitlücke (von Bug des letzten Fahrzeuges der Gegenrichtung bis Bug des ersten Linksabbiegers jeweils beim Einfahren auf die Konfliktfläche) die Zeit von 0,43 s abgezogen, was der Zeit entspricht, die ein mit 50 km/h fahrendes Fahrzeug für eine Länge von 6 m (Fahrzeuglänge) benötigt. Mit dem Zeitlückenverfahren wurde aus den Summenwerten die Sättigungsverkehrsstärke berechnet.

Mit einer 4 Phasensteuerung ergeben sich die größten Sättigungsverkehrsstärken (q_s). Diese Werte zeigen auch, dass sich bei kurzen Freigabezeiten keine Sättigungsverkehrsstärken über 2400 Fz/h, wie im HBS 2001 angegeben, berechnen lassen. Ungesicherte Linksabbieger weisen beim Abfließen während des Phasenwechsels die kleinste Sättigungsverkehrsstärke auf. Vor allem der Linksabbieger in der ersten Position orientiert sich ausschließlich am Fahrverhalten der übergeordneten Fahrzeugführer der Gegenrichtung, da ihm kein weiteres Signal zur Verfügung steht, wenn er nach dem Überfahren der Haltlinie in den Knoteninnenbereich eingefahren ist. Die Sättigungsverkehrsstärke für Linksabbieger mit Zugabezeit (zeitweilige Sicherung) liegt zwischen den Werten für gesicherte und ungesicherte Signalisierung. Der räumliche Vorteil bei zeitweiliger Sicherung wird durch die längeren Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen im Vergleich zur gesicherten Signalisierung aufgebraucht. Für zeitweilige Sicherung (Zugabezeit) wird eine Sättigungsverkehrsstärke von 1700 Fz/h verwendet.

Signalisierung der Linksabbieger	Mittlerer Zeitlückensummenwert [s]					Sättigungsverkehrsstärke [Fz/h]	
	Grünbeginn	1. LA	2. LA	3. LA	4. LA	nach 3. LA	nach 4. LA
gesichert	0	1,2	3,7	5,9	7,9	1840	1820
ungesichert	0	3,4	6,1	8,6	k. A.	1250	----
zeitweilig gesichert	0	2,8	5,1	7,1	9,2	1520	1560

Tabelle 5-7: Vergleich von Sättigungsverkehrsstärken bei unterschiedlicher Linksabbiegersignalisierung für die ersten 3 und 4 Linksabbieger (LA)

6 Ergebnisse der verkehrstechnischen Berechnungen

6.1 Ausgangsbedingungen für die Berechnungen

Für den Vergleich der unterschiedlichen Steuerungsvarianten sind Simulationsläufe durchgeführt worden. Für die Simulationen wurden folgende Eingangsgrößen aus den aktuellen Regelwerken und den neueren Untersuchungsergebnissen verwendet:

- Umlaufzeit $t_U = 60$ s,
- Zwischenzeitenberechnung nach RiLSA (1992)¹,
- Geschwindigkeiten in der Zufahrt $v = 70$ km/h und somit Gelbzeiten von 5 s,
- Geschwindigkeiten im Knoteninnenbereich für die Abbiegeströme zwischen 25 und 30 km/h,
- keine Gelbfahrt, wenn sich das Fahrzeug bei Gelbbe-ginn mehr als 10 m vor der Haltlinie befindet,
- Sättigungsverkehrsstärken für den Geradeausfahrer von $q_S = 2000$ Fz/h, für den Linksabbieger von $q_S = 1950$ Fz/h ($t_F > 10$ s) bzw. $q_S = 1900$ Fz/h ($t_F: 6-10$ s) und für den Rechtsabbieger von $q_S = 1800$ Fz/h, $q_S = 1700$ Fz/h für zeitweilig gesicherte Linksabbieger,

- Grenz- bzw. Folgezeitlücken für durchsetzende Linksabbieger von 5,9 s bzw. 2,5 s ohne Rechtsabbiegeeinrichtung und 6,4 s bzw. 3,0 s mit Rechtsabbiegeeinrichtung,
- Keine Schwerlastfahrzeuge, nur reine Pkw-Ströme und
- keine nicht motorisierten Verkehrsteilnehmer.

Die unterschiedlichen Knotenpunktformen wurden mit verschiedenen Steuerungsvarianten simuliert, die in Tabelle 6-1 zusammengefasst dargestellt sind. Jede Signalisierungsvariante wurde mit sechs verschiedenen Startzufallszahlen simuliert.

Bei der festen Freigabezeit wurden – ausgehend von maximalen Zufluss in allen Fahrstreifen (1000 Fz/(h*Fahrstreifen)) – die Verkehrsstärken der übergeordneten Rechtsabbieger und Geradeausfahrer schrittweise verringert. Somit ergeben sich größere Zeitlücken, die bei ausreichender Größe vom Linksabbieger genutzt werden können. Zuerst wurde die maximale Verkehrsstärke ohne Linksabbiegereinfluss bestimmt (Grundknotenkapazität) und im weiteren Verfahren mit den Anteilswerten 0,8 - 0,6 - 0,5 - 0,4 - 0,3 - 0,2 - 0,1 - 0,0

Phasen	Linksabbieger				Gegenrichtung			
	Signalisierung		Freigabe		Verkehrsstärke (C)		Rechtsabbieger	
	ungesichert	gesichert	fest	variabel	fest (C)	variabel ($\leq C$)	ungesichert	gesichert
2	Vollscheibe	---	ja	---	---	ja	Vollscheibe	---
	Vollscheibe	Vorgabezeit (Diagonalgrün)	a 5 s	---	---	ja	Vollscheibe	---
			b ---	≥ 5 s	ja	---	Vollscheibe	2-feldiges Ri.-signal
	Vollscheibe	Zugabezeit (Diagonalgrün)	a 5 s	---	---	ja	Vollscheibe	---
b ---			≥ 5 s	ja	---	Vollscheibe	2-feldiges Ri.-signal	
4	---	Ri.-signal	---	≥ 5 s	ja	---	---	Ri.-signal

Tabelle 6-1: Übersicht der simulierten Signalisierungsvarianten mit Festzeitsteuerung

¹ unter Berücksichtigung der praktischen Umsetzung, bei der die Freigabezeit nicht vor Ende der Gelbzeit beginnt

verkleinert. Der Fall „ohne Geradeausfahrer und Rechtsabbieger“ dient zur Bestimmung (theoretisch) der größtmöglichen Verkehrsstärke für den Linksabbieger.

Bei der variablen Freigabezeit sind die Verkehrsstärken der Geradeausfahrer und Rechtsabbieger nicht verändert worden. Um in jedem Umlauf einen gesättigten Zustand zu erhalten, sind die Verkehrsstärken der zufließenden Verkehrsströme für alle Fahrbeziehungen mit 1000 Fz/h je Fahrstreifen gewählt worden. Zuerst ist von einer Mindestfreigabezeit für den Linksabbieger von $t_F = 5$ s ausgegangen worden, so dass sich für die Geradeausfahrer und Rechtsabbieger eine maximale Freigabezeit ergab. Anschließend wurden die Freigabezeit für den Linksabbieger schrittweise um 2 s bis zum Maximum erhöht. Die Freigabezeiten für den übergeordneten Gegenverkehr bewegen sich immer vom Maximum bis zur minimalen Freigabezeit nach RiLSA (1992) von $t_{F,min} = 5$ s. Die Fälle „keine Linksabbieger“ bzw. „keine Rechtsabbieger/Geradeausfahrer“ sind zur Bestimmung der theoretischen Werte maximaler Abflussmöglichkeiten verwendet worden.

6.2 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

6.2.1 Große Kreuzungen mit Dreiecksinseln (Fall 6)

Betrachtet wird eine Kreuzung, die in allen Zufahrten drei Fahrstreifen aufweist. Jede Fahrbeziehung (Linksabbieger, Geradeausverkehr und Rechtsabbieger) wird über einen eigenen Fahrstreifen geführt, der Rechtsabbieger fließt frei, d.h. außerhalb der Signalregelung neben der Dreiecksinsel ab (Abbildung 6-1). Für den Fall der signaltechnischen Sicherung des Linksabbiegers ist dieser Rechtsabbiegestrom allerdings signaltechnisch ebenfalls gesichert (Ausnahme: „Diagonalpfeil“ mit Vorgabezeit oder Zugabezeit).

Der geometrische Fall der großen Kreuzung mit freien Rechtsabbiegern neben Dreiecksinseln wird ausführlich mit allen Verläufen der Verkehrsstärke von Linksabbiegern, Gegenverkehr und Gesamtverkehrsstärke des Knotenpunktes dargestellt und interpretiert. Die Verläufe der Zusammenhänge bei den anderen Geometrien und anderen Umlaufzeiten haben einen qualitativ ähnlichen

Verlauf. Deshalb werden die weiteren Untersuchungsfälle nur noch bezüglich der gegenüber Fall 6 auftretenden Unterschiede interpretiert.

Die Simulationen gehen aufgrund der Größe der Kreuzung von einer Umlaufzeit $t_U = 90$ s aus. Bei einer Vollauslastung aller Knotenpunktzufahrten ergibt sich für den Geradeaus-/Rechtsabbiegeverkehr eine Freigabezeit $t_F = 39$ s und bedeutet eine maximale Verkehrsstärke des Geradeausverkehrs von 815 Kfz/h (der freie Rechtsabbieger fließt unabhängig davon ab). Abbildung 6-2 zeigt diese Verkehrsstärke des Gegenverkehrs (Geradeausfahrer) in Abhängigkeit der Zunahme der Linksabbiegerbelastung für unterschiedliche Phasensysteme und Regelungsformen des Linksabbiegers.

Im Fall der einfachen Zweiphasenregelung findet der Linksabbieger keine eigene gesicherte Zeit vor. Linksabbieger können daher bevorzugt während des Phasenwechsels abfließen. Bei höchster Auslastung im Gegenverkehr können daher je Umlauf bis zu drei Fahrzeuge abfließen, die sich aufgrund der geometrischen Größe des Knotenpunktes im Knoteninnenbereich aufgestellt haben. Dies führt zu einer maximalen Verkehrsstärke der

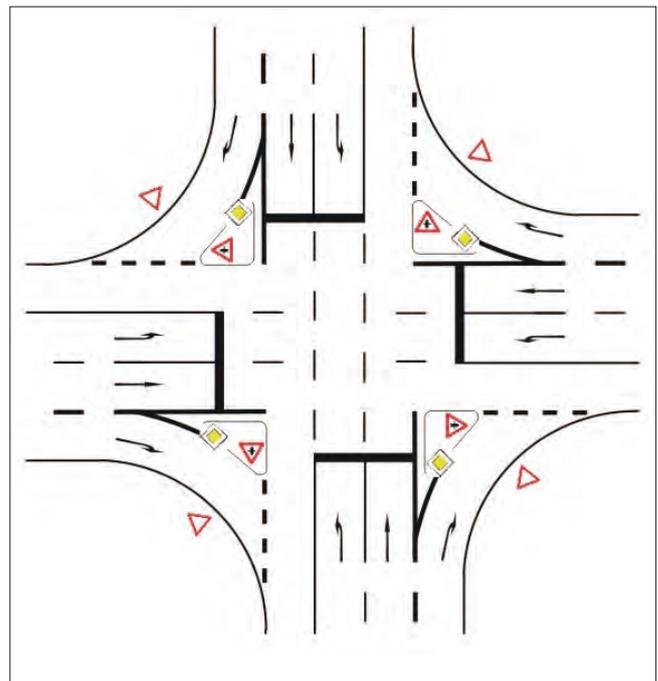


Abbildung 6-1: Fall 6: Große Kreuzung mit Dreiecksinseln

Linksabbieger von ca. 120 Fz/h bei gleichzeitig maximaler Verkehrsstärke der Gegenrichtung. Eine deutliche Erhöhung der Verkehrsstärke der Linksabbieger ist erst dann zu beobachten, wenn die Verkehrsstärke der Gegenrichtung unter 400 bis 500 Fz/h fällt: Bei 400 Fahrzeugen in der Gegenrichtung können ca. 215 Fahrzeuge als Linksabbieger abfließen, d. h. ca. 100 Fz/h finden ausreichend große Lücken im Gegenverkehr. Geht die Verkehrsstärke des Geradeausverkehrs noch deutlicher zurück, so können mehr Linksabbieger abfließen. Wenn allerdings die Verkehrsstärke der Linksabbieger stärker wird als diejenige der Geradeaus-/Gegenverkehrsströme, findet in der Regel eine Veränderung der Knotenpunktgeometrie oder der Regelungsart statt, da dann die Linksabbieger die dominierenden Ströme werden und z.B. mehr als einen Fahrstreifen erhalten oder der Knotenpunkt umgebaut wird. Deshalb werden die im schraffierten Bereich dargestellten Kurvenverläufe als nicht bedeutsam betrachtet, vor allem nicht für ungesicherte Linksabbiegerfreigabe.

Wird in einer 2 Phasensteuerung eine Vorgabezeit oder Zugabezeit eingerichtet, so fehlt diese Zeit für den Gegenverkehr im Umlauf. Dies führt zu einem Rückgang der Verkehrsstärke des Gegenverkehrs bei gleichzeitiger Zunahme der Verkehrsstärke der Linksabbieger. Die Ergebnisse bei Vor- und Zugabezeit unterscheiden sich nur geringfügig. Wird die zusätzliche Freigabezeit für den Linksabbieger fest begrenzt, so tritt der Abbruch der Gegenverkehrsmöglichkeiten bei einer Verkehrsstärke von ca. 700 Fz/h auf, da die Freigabezeit auf 28 s reduziert werden muss.

Bei variabler Zugabe-/Vorgabezeit verlängern sich die Verläufe zugunsten der Verkehrsstärke der Linksabbieger wie in Abbildung 6-2 zu sehen. Die Ergebnisse bei einer Vorgabezeit sind bezüglich der Leistungsfähigkeit jedenfalls etwas günstiger als bei einer Zugabezeit, da wie die Untersuchungen in Kapitel 5.3.3 gezeigt haben, selbst bei Erscheinen des diagonalen Grünpfeils Linksabbieger

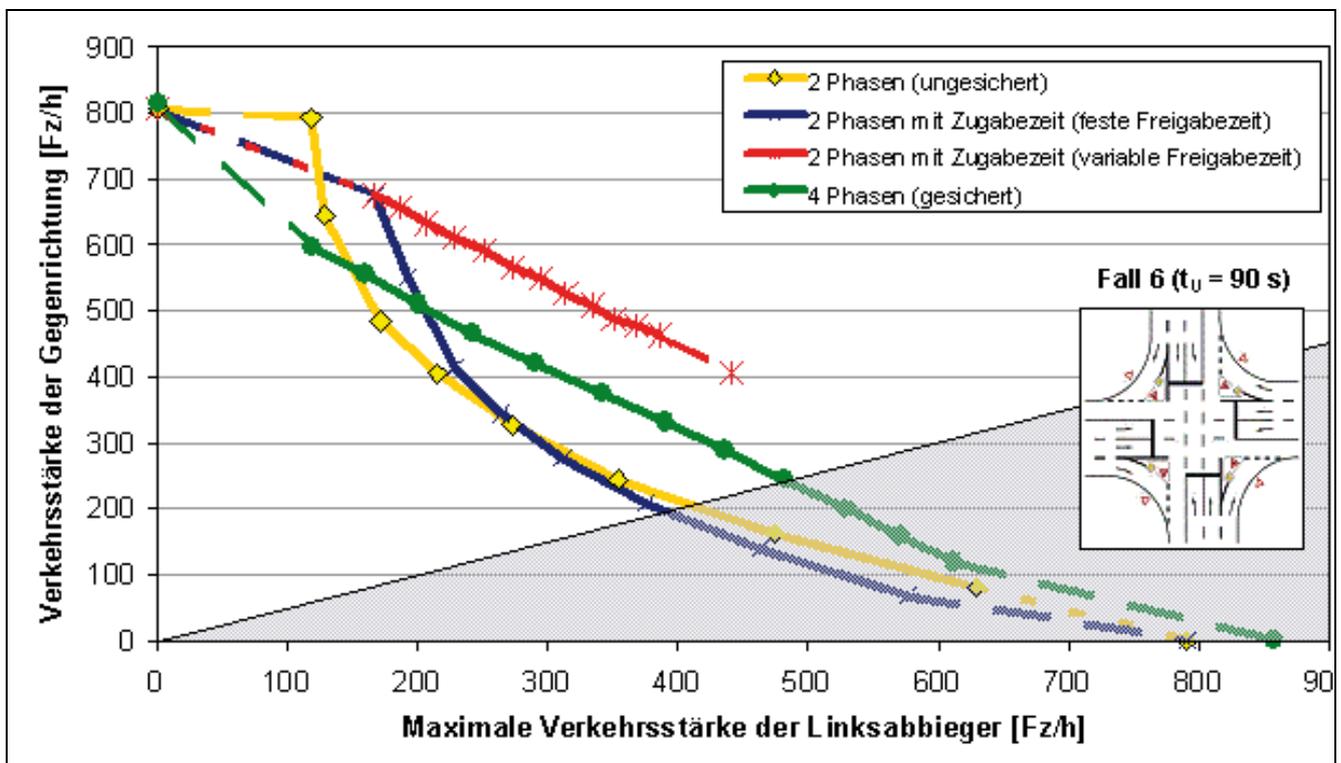


Abbildung 6-2: Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Geradeausfahrer für große Kreuzungen mit Dreiecksinseln (Fall 6) für eine Umlaufzeit von 90

nicht unverzüglich fahren, während bei einer Vorgabezeit der Start der Linksabbieger unmittelbar mit Freigabezeitbeginn erfolgt.

Im Fall der gesicherten Freigabe in allen Zufahrten (4 Phasensteuerung) wird unterstellt, dass die Phase für Linksabbieger verkehrsabhängig geschaltet wird. Bei dem untersuchten hoch ausgelasteten Knotenpunkt wird die Phase sehr häufig in Anspruch genommen werden. Falls bei geringeren Anforderungen der Linksabbieger nur einzelne Linksabbiegephasen angefordert werden, ergeben sich Zwischenwerte unterhalb 120 Linksabbieger/h bis zur Vollausnutzung der Freigabezeiten im Geradeausverkehr bei nahezu keinem Linksabbiegeverkehr. In der Realität dürften diese Fälle selten auftreten, da aus Sicherheitsgründen regelmäßig Sonderphasen für den Linksabbieger eingeschaltet werden, auch wenn am Detektor keine Anmeldung vorliegt: Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Fahrzeuge vom Sensor nicht erkannt worden sind.

Je häufiger Linksabbiegephasen angefordert werden und diesen Anforderungen auch stattgegeben wird, desto stärker geht die Verkehrsstärke des Gegenverkehrs aufgrund veränderter Freigabezeiten zurück. Der Unterschied in der Leistungsfähigkeit insgesamt zeigt sich aber, dass die gesicherte Freigabe der Linksabbieger mit einer 4 Phasensteuerung bei Verkehrsstärken von deutlich mehr als 200 Fz/h als Linksabbieger mehr Gegenverkehrsfahrzeuge zulässt als bei ungesicherten Durchsetzen des Linksabbiegers.

Insgesamt lassen sich also im Vergleich der Steuerungsvarianten folgende Eckwerte erkennen:

- Bis zu ca. 120 Linksabbiegern/h ist durch das Abfließen dieser Fahrzeuge während des Phasenwechsels ein Abbiegen ohne Sonderphase und damit ohne Einschränkung des Gegenverkehrs möglich.
- Bereits bei nur geringer Zunahme der Linksabbieger (z.B. 200 linksabbiegende Fahrzeuge/h), hat die gesicherte Freigabe mit einer 4 Phasensteuerung deutliche Leistungsfähigkeitsvorteile für die Gegenrichtung.
- Das Maximum des Vorsprungs für die gesicherte Frei-

gabe liegt bei etwa ausgewogenen Belastungsverhältnissen zwischen Gegenverkehr und Linksabbiegern im Bereich um 350 Fz/h.

- Von der Leistungsfähigkeit her günstiger ist die gesicherte Freigabe des Linksabbiegers in einer Zugabezeit, wenn diese variabel nach Bedarf geschaltet wird. Allerdings kann diese Freigabezeit nicht beliebig verlängert werden, da für die Gegenrichtung im Geradeausverkehr eine Mindestgrünzeit reserviert bleibt und auch in der Gegenrichtung Linksabbieger auftreten können, die ebenfalls eine Freigabezeit erhalten sollen. Daher endet der Verlauf dieser Verkehrsstärkelinien mit variabler Freigabezeit im mittleren Bereich der Verkehrsbelastung.

Diese Betrachtung schließt ausschließlich den Linksabbiegerstrom und seinen gegengerichteten Geradeausstrom ein. Wegen der Dreiecksinseln bleibt der Rechtsabbieger in der Gegenrichtung außer Betracht. Wie sich diese Schaltungen bei gleichen Voraussetzungen auf die Gesamtleistungsfähigkeit des Knotenpunktes auswirken zeigt Abbildung 6-3. Dort ist abzulesen, welche Gesamtverkehrsstärke ein Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage abwickeln kann, wenn bestimmte Anteile dieser Gesamtbelastung durch Linksabbieger verursacht werden und verschiedene Steuerungssysteme installiert sind. Im Einzelnen lässt Abbildung 6-3 Folgendes erkennen:

- Die Gesamtbelastung des hier untersuchten Knotenpunktes liegt maximal bei knapp 7000 Fz/h. Dies wird erreicht, wenn zwei Phasen eingerichtet sind, der Linksabbiegeranteil aber nicht mehr als 7 % beträgt und diese Linksabbieger vollständig während des Phasenwechsels abfließen können.
- Bei gesicherter Freigabe der Linksabbieger mit einer 4 Phasensteuerung vermindert sich die Gesamtleistungsfähigkeit auf etwas mehr als 6000 Fz/h wegen der notwendigen Zwischenzeiten und der Notwendigkeit, die Rechtsabbieger auch neben den Dreiecksinseln zeitweise zu sperren (Eine gesicherte Linksabbiegephase darf nur geschaltet werden, wenn kein feindlicher Strom gleichzeitig freigegeben ist). Diese Abminderung könnte u. U. vermieden werden, wenn die Dreiecksinsel derart aufgeweitet wird, dass der freie Rechtsabbieger nicht mehr als Wartepflichtiger in den Knotenpunkt

einfließt, sondern anschließend in Form einer Verflechtungsstrecke in die durchgehende Fahrbahn zugeführt wird.

- Bei zunehmenden Linksabbiegeanteilen zwischen 7 % bis ca. 18 % nähern sich die Leistungsfähigkeiten der unterschiedlichen Regelungsformen an und erreichen zwischen 20 und 25 % vergleichbare Werte, die bei etwa 5800 Fz/h liegen.
- Bei weiter zunehmenden Linksabbiegeranteilen gewinnt in der Gesamtleistungsfähigkeit eine Regelung ohne Linksabbiegeschutz deshalb, weil die Rechtsabbieger dort frei fließen können.
- Die anscheinend hohe Leistungsfähigkeit von Regelungen mit Zugabezeit, vor allem wenn diese variabel gestaltet ist, gilt nur unter der Voraussetzung, dass die freien Rechtsabbieger ohne Signalanlage abfließen können. Aus Sicherheitsgründen sowie aus Leistungs-

fähigkeitsgründen setzt dies aber die bereits erwähnte geometrisch aufwändige Lösung voraus, bei der mit Verflechtungsfahrbahnen diese Rechtsabbieger problemlos in den Hauptstrom eingefädelt werden können.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass die unter diesen geometrischen Randbedingungen um ca. 20 % höhere Leistungsfähigkeit des Knotenpunktes dadurch zustande kommt, dass bei gesicherter Freigabe der Linksabbieger die gegenüberliegenden Rechtsabbiegeströme zeitweise gesperrt werden müssen. Allerdings kommt dieser Vorteil nur zum Tragen, wenn der Linksabbiegeranteil deutlich unter 10 % oder 30 % und mehr an der Gesamtbelastung beträgt. In häufig auftretenden Belastungsverhältnissen sind die Gesamtleistungsfähigkeiten nur unwesentlich verschieden.

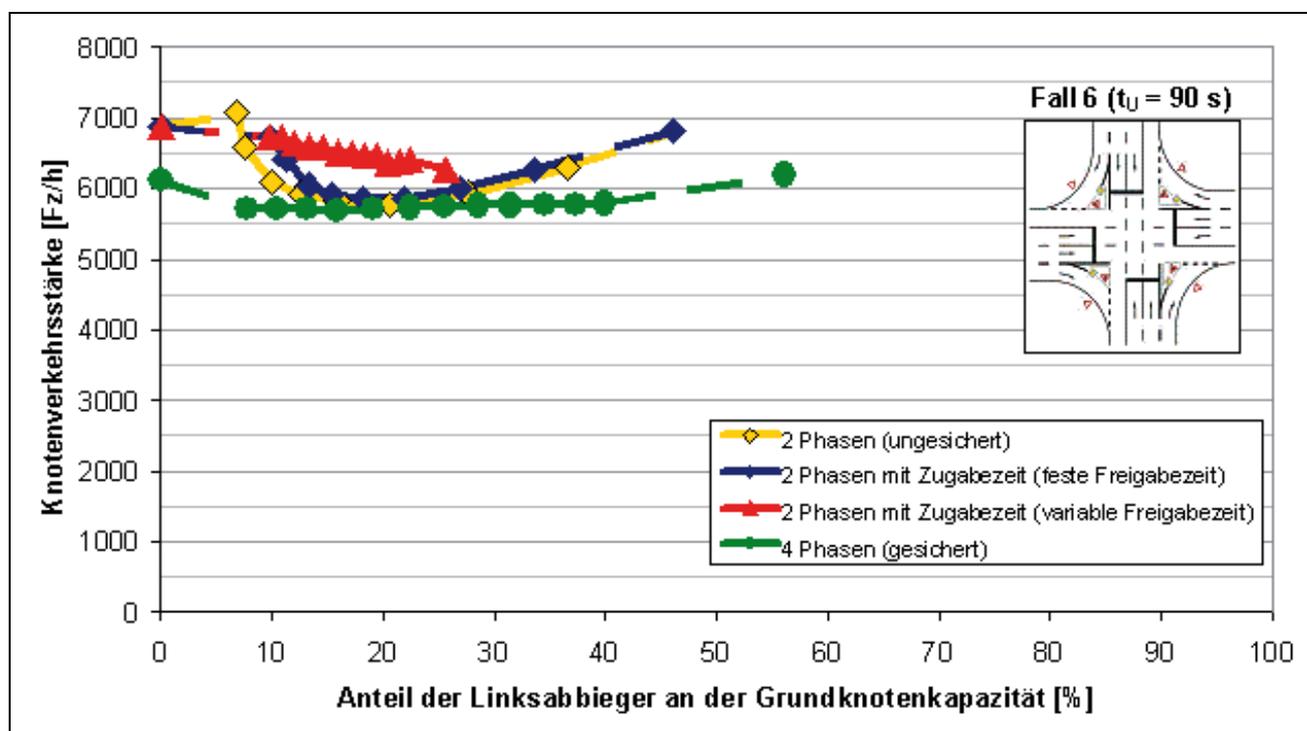


Abbildung 6-3: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für große Kreuzungen mit Dreiecksinseln (Fall 6) für eine Umlaufzeit von 90 s

6.2.2 Große Kreuzung ohne Dreiecksinseln (Fall 4)

Untersucht wurde eine große Kreuzung ohne Dreiecksinseln (Abbildung 6-4) und mit einer Umlaufzeit von 90 s, um den Vergleich zum Fall 6 (entsprechende Geometrie mit Dreiecksinseln) herstellen zu können. Außerdem wird dieser Fall auch mit 60 s Umlaufzeit berechnet. Dies dient auch der Vergleichbarkeit mit kleinen Knotenpunkten mit nur einem Fahrstreifen je Zufahrt, die tendenziell mit kleinen Umlaufzeiten betrieben werden.

Bei 90 s Umlaufzeit ergibt sich das in Abbildung 6-5 gezeigte Bild bezüglich der Verkehrsstärken auf der Konfliktfläche Linksabbieger/Gegenverkehr. Der Gegenverkehr besteht in diesem Fall aus Geradeaus- und Rechtsabbiegeverkehr. Der Rechtsabbieger ist regelmäßig in die Signalregelung einbezogen (das statische Grünpfeilschild nach Zeichen 720 StVO findet auch bei zweiphasiger Steuerung keine Anwendung; die verkehrstechnischen Auswirkungen sind vergleichbar denjenigen von Dreiecksinseln).

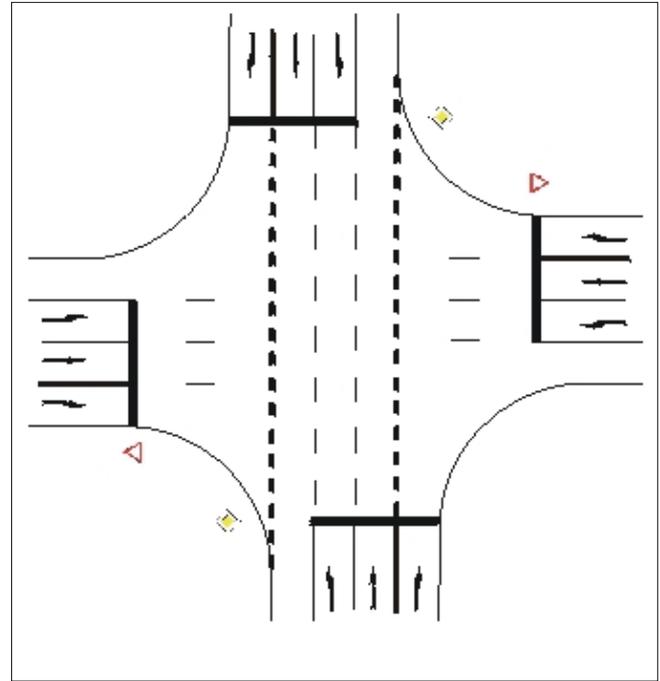


Abbildung 6-4: Fall 4: Große Kreuzung ohne Dreiecksinseln

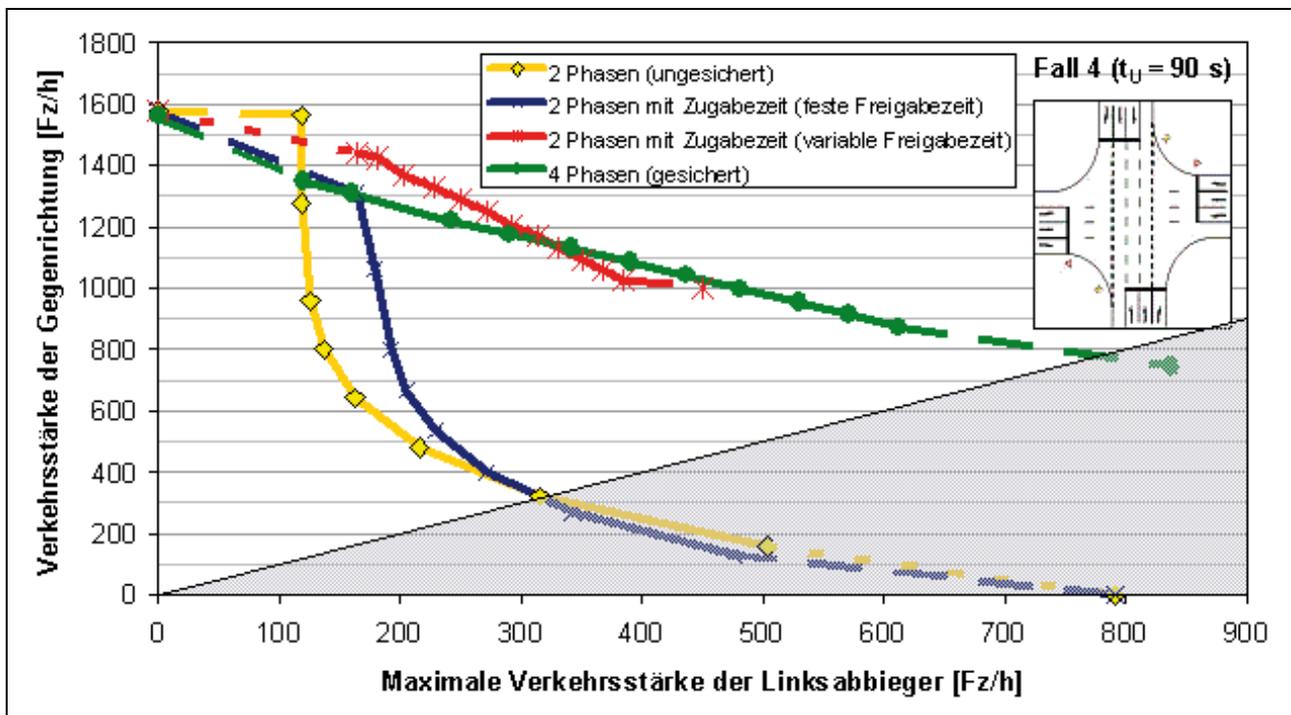


Abbildung 6-5: Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 90 s

Im Unterschied zur Kreuzung mit Dreiecksinseln beträgt die Verkehrsstärke der Gegenrichtung knapp 1600 Fz/h, da zwei Fahrstreifen vorhanden sind. Eine geringe Abminderung der doppelten Verkehrsstärke bei Fall 6 kommt aus geänderten Zwischenzeiten.

Der Verlauf der Verkehrsstärkerückgänge bei unterschiedlichen Phasensystemen ist qualitativ ähnlich wie im Fall 6 (mit Dreiecksinseln), ist allerdings in der quantitativen Auswirkung erheblich größer: Die Leistungsfähigkeitsrückgänge der ungesicherten Freigabe sind erheblich, da der Gegenverkehr in zwei Fahrstreifen ankommt. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit ausreichend großer Zeitlücken für das Durchsetzen der Linksabbieger erst dann in ausreichendem Maße gegeben, wenn die Verkehrsstärke in der Gegenrichtung sehr klein wird (weniger als 500 Fz/h). Bei der gesicherten Freigabe im 4-Phasen-System sind dagegen bei hoher Linksabbiegerbelastung Verkehrsstärken zwischen 800 und 1000 Fz/h problemlos abzuwickeln. Dies kommt auch daher, dass

gleichzeitig Rechtsabbieger parallel zum gegengerichteten Linksabbiegeverkehr freigegeben werden können.

Nutzt man diese Freigabemöglichkeit für den Rechtsabbieger parallel zum gegengerichteten Linksabbiegeverkehr bei variabler Zugabezeit ebenfalls aus, so ergibt sich ebenfalls ein sehr günstiger Leistungsverlauf der Gegenrichtung. Da diese Lösung aber nicht für alle Linksabbieger gleichzeitig angeboten werden kann, ist der Einsatz auf unsymmetrische Belastungssituationen begrenzt (vgl. auch Abschnitt 6.3).

Die zusätzlich gesicherte Freigabe durch zweifeldige Signalgeber für Rechtsabbieger wird in aller Regel dann zum Einsatz kommen, wenn aufwändige Steuerungsverfahren möglich sind. Daher wird dieser Fall dargestellt bei variabler Zugabezeit für Linksabbieger. Im Fall fester Zugabezeit wird von einer wenig flexiblen Steuerungsmöglichkeit ausgegangen und auf die gesonderter Freigabe der Rechtsabbieger verzichtet.

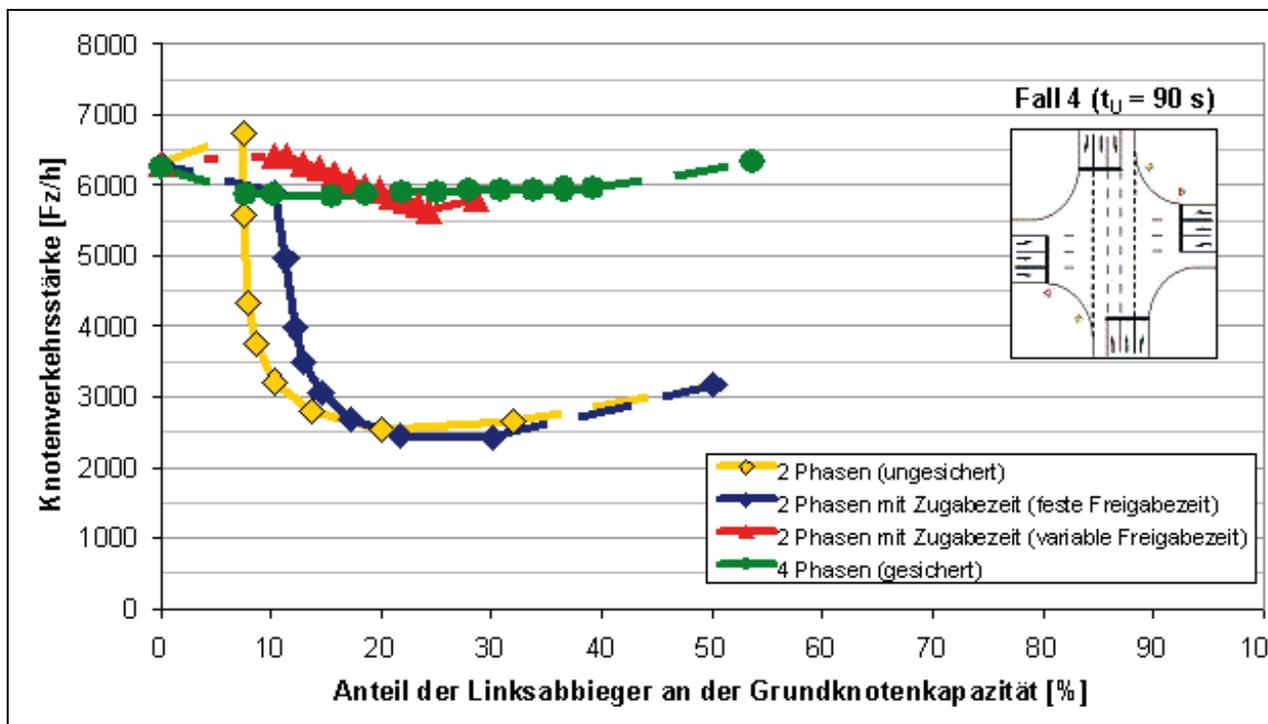


Abbildung 6-6: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 90 s

Die Leistungsfähigkeit des gesamten Knotenpunktes in Abhängigkeit des Linksabbiegeanteils zeigt Abbildung 6-6. Folgende Ergebnisse sind dieser Abbildung zu entnehmen:

- Die Gesamtverkehrsstärke liegt bei maximal 6300 Fz/h. Dies ist mehr als bei gesicherter Freigabe im Fall 6, aber weniger als beim Zweiphasensystem im Fall 6. Der Grund liegt an den Dreiecksinseln, die im Fall 6 ein freies Fließen der Rechtsabbieger ermöglichen, während im Fall 4 Rechtsabbieger zumindest zeitweise signaltechnisch gesichert werden müssen (wenn Linksabbieger gesichert freigegeben werden) und im anderen Fall sich mindernd auf den Abfluss der Linksabbieger auswirken.
- Der Rückgang der Gesamtknotenkapazität für den Fall nicht gesicherter Linksabbieger ist erheblich: Bei nennenswerten Linksabbiegeranteilen von bereits ca. 10 % beträgt der Rückgang schon mehr als 40 % gegenüber dem Ursprungswert. Bei mittleren Linksabbiegerantei-

len sind nur noch deutlich weniger als 3000 Fz/h über den Knotenpunkt zu bewältigen.

- Bei gesicherten Linksabbiegeströmen mit einer 4-Phasensteuerung bleibt dagegen die Gesamtkapazität des Knotenpunktes im Bereich um 6000 Fz/h unabhängig vom Linksabbiegeranteil.

Im Fall von mehr als einem Fahrstreifen des Gegenverkehrs, der hier untersucht wurde, ist daher die gesicherte Führung des Linksabbiegers nicht nur aus Sicherheitsgründen dringend erforderlich, sondern auch aus Leistungsfähigkeitsüberlegungen unbedingt zu empfehlen.

Wird die Umlaufzeit auf 60 s zurückgenommen, so ergibt sich für die Kapazität der Konfliktfläche das in Abbildung 6-7 gezeigte Bild: Die Leistungsfähigkeit ist geringer wegen des größeren Zwischenzeitenanteils an der Betriebsstunde. Die Leistungsfähigkeit der Linksabbieger sind auch deutlich geringer bei gesicherter Freigabe. So

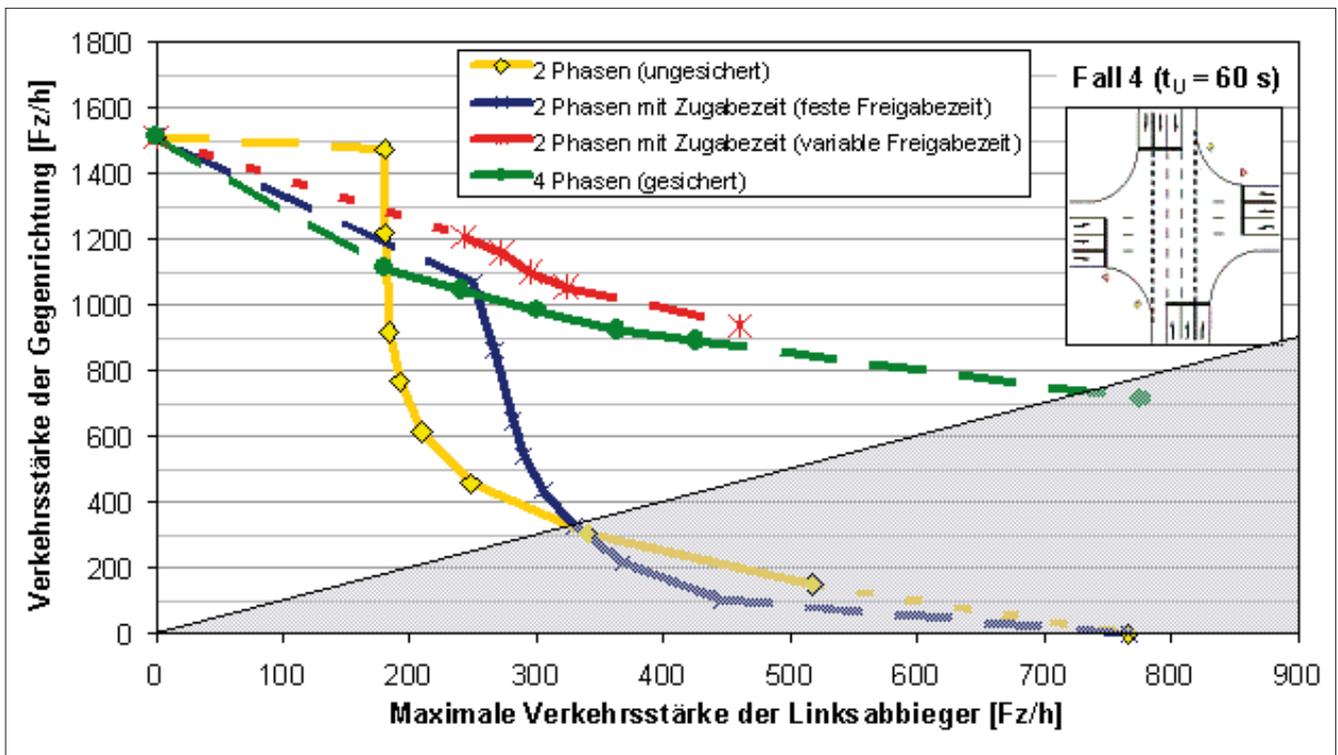


Abbildung 6-7: Vergleich des Einflusses eines konfligierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 60 s

werden beispielsweise bei 300 Linksabbiegern/h nur ca. 870 Fahrzeuge im Gegenverkehr möglich sein, während dies bei 90 s noch fast 1200 Fz/h waren. Bei den 870 Fahrzeugen des Gegenverkehrs erlaubt eine 90 s Umlaufzeit die doppelte Verkehrsstärke der Linksabbieger (mehr als 600 Fz/h). Auch auf die Zugabezeit bei variabler Länge wirkt sich der größere Zwischenzeitanteil weniger aus, als auf die insgesamt gesicherte Freigabe.

Die Gesamtkapazität des Knotenpunktes vermindert sich beim Rückgang der Umlaufzeit allerdings nur geringfügig von 6300 auf 6000 Fz/h (Abbildung 6-8). Allerdings werden bei einem für Linksabbieger gesicherten System mit 4 Phasen nur 5200 Fz/h maximal über den Knoten abgewickelt werden können. Dies ist aber – Linksabbiegeanteile von 10 % und mehr vorausgesetzt – immer noch die bei weitem günstigste Lösung, abgesehen von der variablen Zugabezeit, die ebenfalls eine Sonderform der gesicherten Freigabezeit bedeutet.

6.2.3 Geometrisch mittlere Kreuzung (Fall 3)

Die hier untersuchte Kreuzung zeichnet sich durch einen vergleichsweise häufig vorkommenden Fall mit zwei Fahrstreifen je Zufahrt aus. Der rechte Fahrstreifen ist jeweils für Geradeaus- und Rechtsabbiegeverkehr, der linke Fahrstreifen für den Linksabbiegeverkehr vorgesehen (Abbildung 6-9). Die Berechnung erfolgt mit einer Umlaufzeit von 90 s. Eine gesonderte Sicherung oder Freigabe für Rechtsabbieger ist nicht möglich wegen der gemeinsamen Nutzung mit dem Geradeausverkehr, so dass bei gesicherter Linksabbiegerfreigabe der gesamte Gegenverkehr gesperrt werden muss.

Die maximalen Verkehrsstärken an der Konfliktfläche des Linksabbiegers mit dem Gegenverkehr zeigt Abbildung 6-10. Es ist zu erkennen, dass bei geringer Linksabbiegerbelastung die Gegenrichtung bis zu ca. 830 Fz/h abfließen kann. Dies entspricht den Ergebnissen in 6.2.1

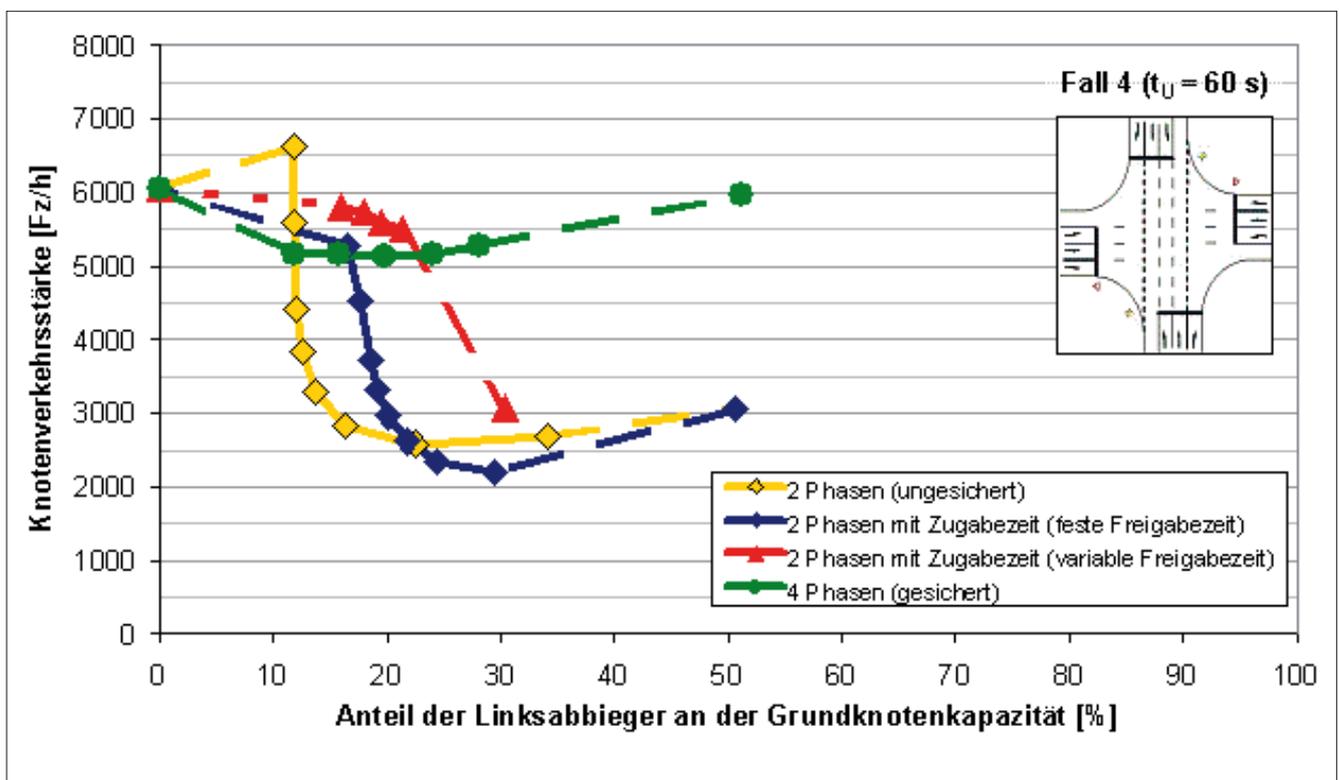


Abbildung 6-8: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für große Kreuzungen ohne Dreiecksinseln (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 60 s

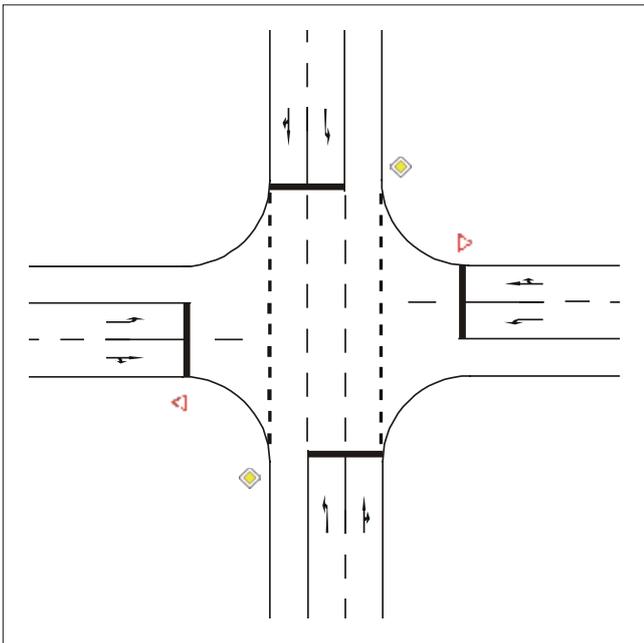


Abbildung 6-9: Fall 3: Mittlere Kreuzung

(große Kreuzung mit Dreiecksinseln), da dort ebenfalls ein Fahrstreifen für die Gegenrichtung zur Verfügung steht, der dann maximal abfließen kann. Bei mehr als 120 Linksabbiegern/h ist die Möglichkeit des Linksabbiegerabflusses während des Phasenwechsels überschritten und es sind weitere Linksabbiegemöglichkeiten nur gegeben, wenn große Zeitlücken im Gegenstrom auftreten, so dass die Verkehrsstärke des Gegenverkehrs deutlich absinken muss, z.B. auf weniger als 400 Fz/h. Bei diesen Belastungen sind regelmäßig die Leistungsfähigkeit des Gegenverkehrs bei einer 4 Phasensteuerung oder bei variabel gestalteter Zugabezeit wesentlich günstiger.

Die Gesamtkapazität des Knotenpunktes in Abhängigkeit des Linksabbiegeranteils ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Hier zeigt sich sehr deutlich der Vorteil der gesicherten Freigabe bei größeren Linksabbiegeranteilen in der Gesamtkapazität:

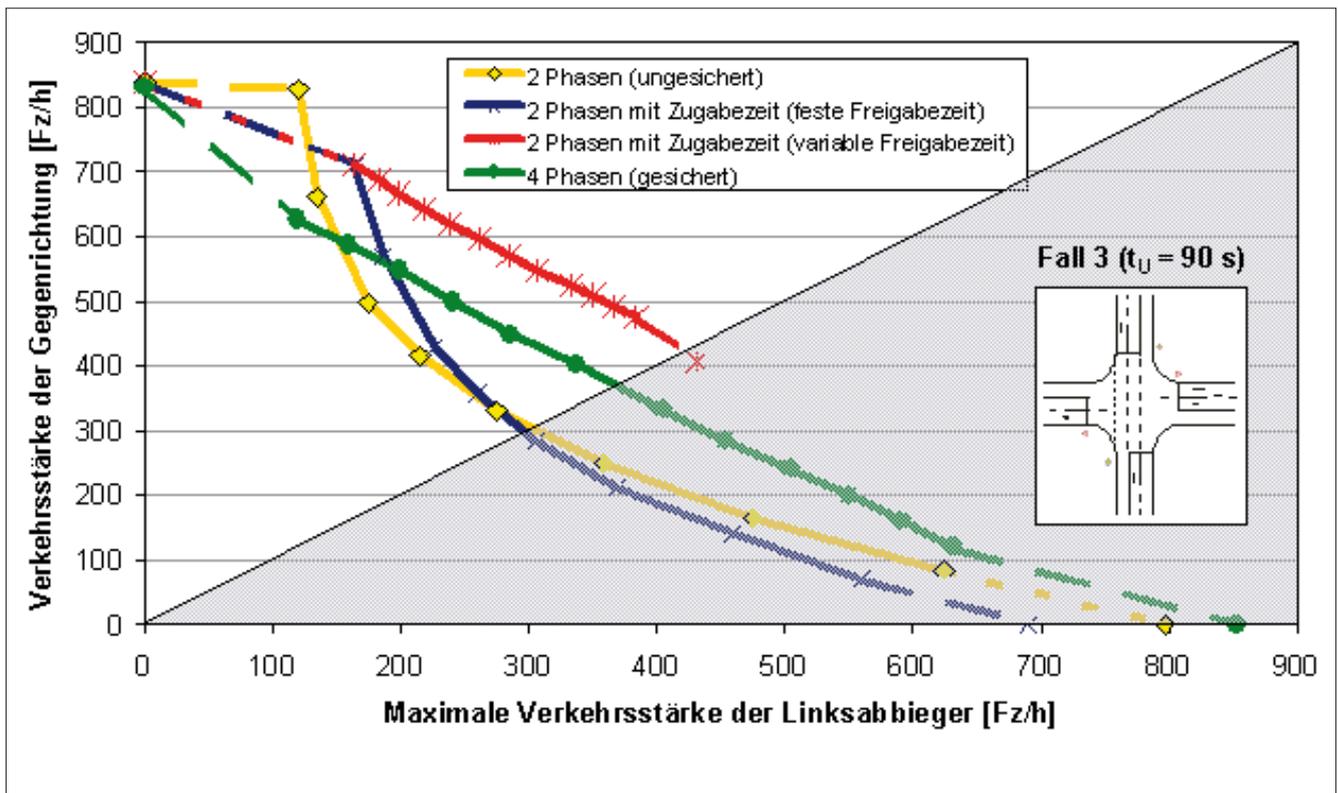


Abbildung 6-10: Vergleich des Einflusses eines konfigurierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s

- Bis zu 14 % Linksabbiegeranteil hat zwar das Zweiphasensystem eine deutlich größere Leistungsfähigkeit als alle anderen Steuerungsarten. Bei üblicherweise zu erwartenden Linksabbiegeranteilen von 20 bis 40 % ist aber diese Steuerungsform besonders ungünstig.
- Die gesicherte Freigabe für die Linksabbieger (4 Phasensteuerung) führt zu einer Gesamtkapazität des Knotenpunktes von ca. 3000 Fz/h (was in etwa der Hälfte der Kapazität von mehrstreifigen Knotenpunkten im Fall 4 entspricht).
- Die höchsten Leistungsfähigkeitsergebnisse erzielt eine Steuerung bei variabler Zugabezeit. Die Gesamtleistungsfähigkeit liegt bei ca. 3500 Fz/h. Diese Lösung kommt allerdings nur bei unsymmetrischer Belastung infrage, da sie jeweils nur für eine Richtung vorgesehen werden kann (vgl. 6.3).

Insgesamt zeigt sich also, dass bei größeren Linksabbiegeverkehren die gesicherte Freigabe immer auch unter

Leistungsfähigkeitsgesichtspunkten günstigere Werte ergibt als das Zweiphasensystem. Der Anteil der Linksabbieger ist allerdings etwas höher als bei mehrstreifigen Knotenpunktzufahrten, da dort die Verkehrsstärke der Geradeausströme wesentlich größere Werte erreichen kann. Die Absolutgröße der kritischen Linksabbiegeströme liegt in beiden Fällen bei etwa 500 Fz/h in allen Zufahrten insgesamt.

6.2.4 Kleine Kreuzung mit je einem Fahrstreifen in allen Zufahrten (Fall 1)

Diese Geometrie führt zur Nutzung der Fahrstreifen als Mischfahrstreifen für alle Verkehrsbeziehungen (Abbildung 6-12). Dies führt zu einem völlig anderen Verkehrsablauf als in den vorher betrachteten Fällen, da der Linksabbieger nicht gesondert von den anderen Verkehrsströmen fließen kann bzw. alle anderen Verkehrsströme ebenfalls von den Linksabbiegern in der gleichen Rich-

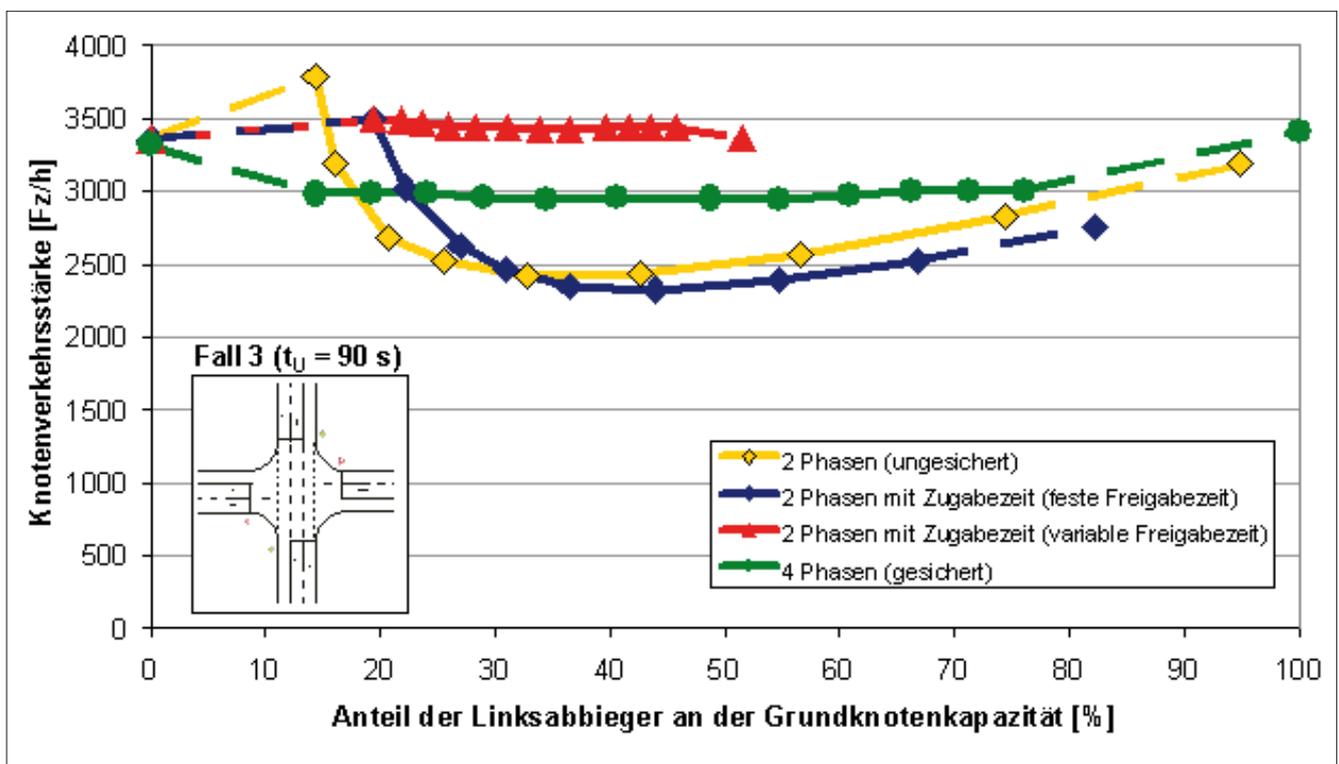


Abbildung 6-11. Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s

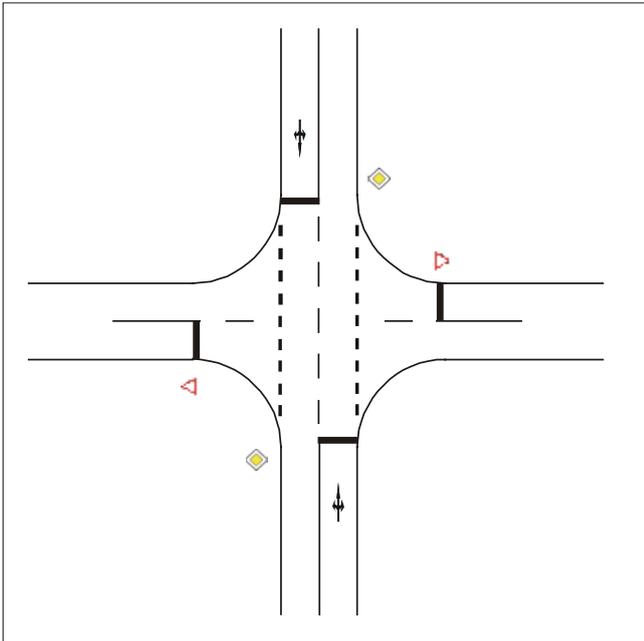


Abbildung 6-12: Fall 1: Kleine Kreuzung

tion beeinflusst werden. Die bisher verwendete Simulationsstrategie der Vollauslastung führt nur eingeschränkt zu aussagefähigen Ergebnissen, da die Linksabbieger keine Restriktionen erfahren und daher die Verkehrsbeziehungen sich ohne weitere Randbedingungen nahezu gleich verteilt herausbilden. Es wurde deshalb eine zweite Simulationsserie gerechnet, bei der die Verkehrsstärke der Linksabbieger im Rahmen eines Anteils von 10 % der Gesamtverkehrsstärke jeder Zufahrt begrenzt wurde.

In Abbildung 6-13 ist die Verkehrsstärke der Linksabbieger und der Gegenrichtung für beide Lastfälle (10 % und 33 %) dargestellt. Daraus wird Folgendes deutlich:

- Bei der Annahme des Fehlens von Linksabbiegern stellt sich eine maximale Verkehrsstärke von 800 Fz/Richtung ein. Dies entspricht in etwa den Ergebnissen bei der Simulation einer normalen Kreuzung

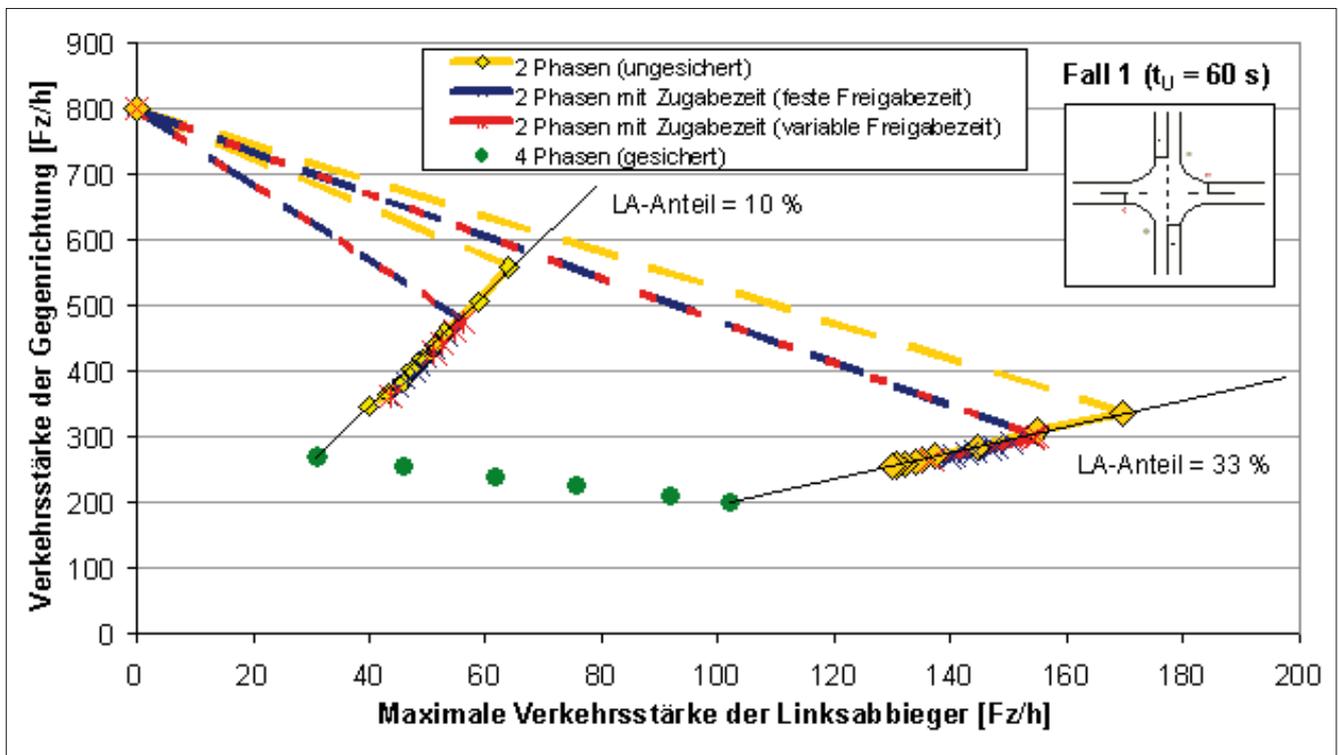


Abbildung 6-13: Vergleich des Einflusses eines konfigurierenden Linksabbiegers bei unterschiedlichen Steuerungsverfahren für den Linksabbiegeverkehr auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für kleine Kreuzungen (Fall 1) für eine Umlaufzeit von 60 s und Linksabbiegeranteilen zwischen 10 und 33 %

aus Fall 3, bei der auch nur ein Fahrstreifen für die Geradeaus-/Rechtsabbiegerichtung zur Verfügung stand.

- Bei bereits geringen Verkehrsstärken der Linksabbieger tritt ein erheblicher Rückgang der Verkehrsstärke in der Gegenrichtung auf, gleichgültig ob nur zwei Phasen geschaltet werden oder ob Zugabezeiten in fester oder variabler Länge hinzukommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einzelnen Linksabbiegern noch vorbeigefahren werden kann, die Wahrscheinlichkeit eines zweiten Linksabbiegers aber sehr hoch ist oder auch je nach Knotengeometrie ein Vorbeifahren aus fahrgometrischen Gründen nicht mehr stattfindet. Damit blockieren auftretende Linksabbieger sehr häufig die komplette Knotenpunktzufahrt.
- Verringert man die Verkehrsstärke der Linksabbieger bei gleichbleibendem Anteil an der Verkehrsstärke, so gehen ebenfalls die Fahrzeugmengen in der Gegenrichtung zurück. Lässt man mehr Linksabbieger zu und erhöht den Anteil bis auf 33 %, vermindert sich

notwendigerweise ebenfalls die Verkehrsstärke der Gegenrichtung.

- Eine gesicherte Freigabe ist nur in Form der Freigabe einzelner Zufahrten möglich. Bei festen Umlaufzeiten und gleichmäßiger Auslastung ergeben sich feste Werte, die nur vom Linksabbiegeranteil beeinflusst werden: Die Gesamtleistungsfähigkeit während der Freigabezeit bleibt konstant.

Für die Gesamtleistungsfähigkeit des Knotenpunktes bedeutet dies, dass ohne Linksabbieger (Anteil der Linksabbieger Anteil Grundknotenkapazität gegen Null) ca. 3200 Fz/h den Knoten passieren können (vgl. Abbildung 6-14). Dieser Wert verringert sich bereits bei kleinen Linksabbiegeanteilen ohne gesicherte Freigabe oder bei einer festen bzw. variablen Zugabezeit deutlich auf Werte unter zwei Drittel des Ausgangsniveaus. Dies tritt bei unterschiedlichen Anteilen des Linksabbiegeverkehrs in gleicher Weise auf.

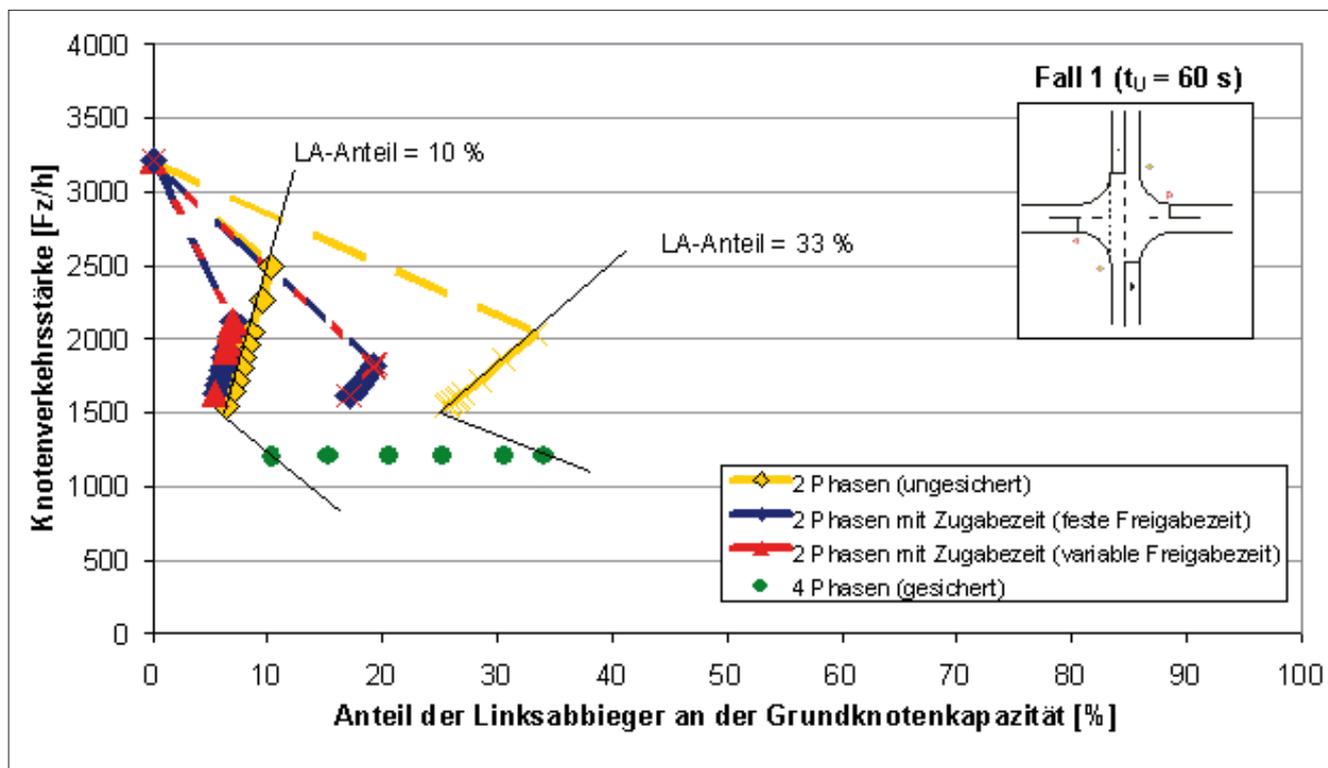


Abbildung 6-14: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für kleine Kreuzungen (Fall 1) für eine Umlaufzeit von 60 s und Linksabbiegeranteilen zwischen 10 und 33 %

Bei der Zufahrtsignalisierung können 1200 Fz/h den Knoten befahren. Das ergibt sich aus dem 4fachen der einzelnen Zufahrtverkehrsstärken in Abbildung 6-13. Dieser Wert bleibt konstant ohne Einfluss des Linksabbiegeanteils.

Insgesamt ist für derartige Geometrien festzuhalten, dass sich nur sehr ungünstige Leistungsfähigkeiten unter Berücksichtigung des Linksabbiegeverkehrs ergeben können. Es sollte daher unbedingt angestrebt werden, zumindest in den einzelnen Zufahrten nach Möglichkeit Linksabbiegestreifen zu schaffen. Die Zufahrtsignalisierung führt zu einem spürbaren Rückgang der Leistungsfähigkeit gegenüber einer 2 Phasensteuerung bzw. einer Regelung mit Zugabezeiten. Wenn auch in der Realität die hier berechneten Werte nicht mit Bestimmtheit und regelmäßig auftreten werden, weil sich im Einzelfall auch abweichende Verhaltensweisen einstellen können (z. B.: „Amerikanisches“ Linksabbiegen bei gleichzeitigem Auftreten von Linksabbiegern aus beiden Richtungen, Ausnutzen von Zeitlücken, die sich durch rechtsabbiegende Fahrzeuge im Gegenverkehr ergeben usw.), so lässt sich doch für diese Knotenpunktgeometrie keine ausreichend leistungsfähige und gleichzeitig sichere Signalisierungsform darstellen ohne Verzicht auf den Linksabbieger.

6.2.5 Kombination ungleicher Knotenpunktzufahrten an Kreuzungen

In der Realität werden sehr häufig keine völlig gleichartigen Knotenpunktzufahrten an Kreuzungen miteinander verknüpft. Meist gibt es eine höherrangige Straße mit

höherem Verkehrsaufkommen und meist auch größerer Fahrstreifenanzahl, die von einer nachrangigen Straße mit geringerer Verkehrsbedeutung und kleinerer Fahrstreifenanzahl gekreuzt wird. In diesen Fällen können mithilfe der jeweiligen Darstellung von Verkehrsstärken an den Konfliktflächen die dort sich einstellenden maximalen Leistungs-fähigkeiten aus Kombination der unterschiedlichen Verhältnisse zusammengesetzt werden. Dies gilt auch für den Fall, das einzelne Knotenpunktzufahrten andere Fahrstreifenanzahlen haben als die übrigen. In Tabelle 6-2 sind alle theoretisch möglichen Kombinationen der vier untersuchten unterschiedlichen Zufahrten dargestellt, von denen nicht alle sinnvoll oder anzutreffen sind. Die untersuchten Kombinationen sind farblich hinterlegt. Weitere sinnvolle Kombinationen sind gekennzeichnet.

Im Ergebnis stellen sich dann Werte ein, die jeweils zwischen den betrachteten Gesamtsituationen einheitlicher Bauart liegen (vgl. Abbildung 6-15 bis Abbildung 6-18).

Diese Kombinationen wurden ohne zusätzliche Simulationsrechnungen aus den vorhandenen Ergebnissen in Analogieschlüssen abgeleitet, d. h., es wurden keine neuen Zwischenzeiten in Ansatz gebracht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistungsfähigkeitsunterschiede zwischen gesicherter und ungesicherter Steuerungen im Bereich mittlerer bis hoher Linksabbiegerströme bestätigt werden. Meist hat die gesicherte Steuerungsvariante erhebliche Vorteile für die Gesamtknotenkapazität, in keinem Fall – mit Ausnahme kleiner Linksabbiegeanteile (bis zu 10 %) – ist die 2 Phasensteuerung leistungsfähiger.

KP-Form	Hauptrichtung				Dreiecksinsel	Nebenrichtung			
	Anzahl Fahrstreifen			Fall 1		Knotenpunktform			
	LA	GE	RA			Fall 3	Fall 4	Fall 6	
Fall 1	1			nein	+	-	-	-	
Fall 3	1	1		nein	+	+	-	-	
Fall 4	1	1	1	nein	-	+	+	-	
Fall 6	1	1	1	ja	-	+	+	+	

Anmerkung: KP-Formen + sinnvoll - nicht sinnvoll untersucht kombiniert

Tabelle 6-2: Kategorisierung der Knotenpunktformen

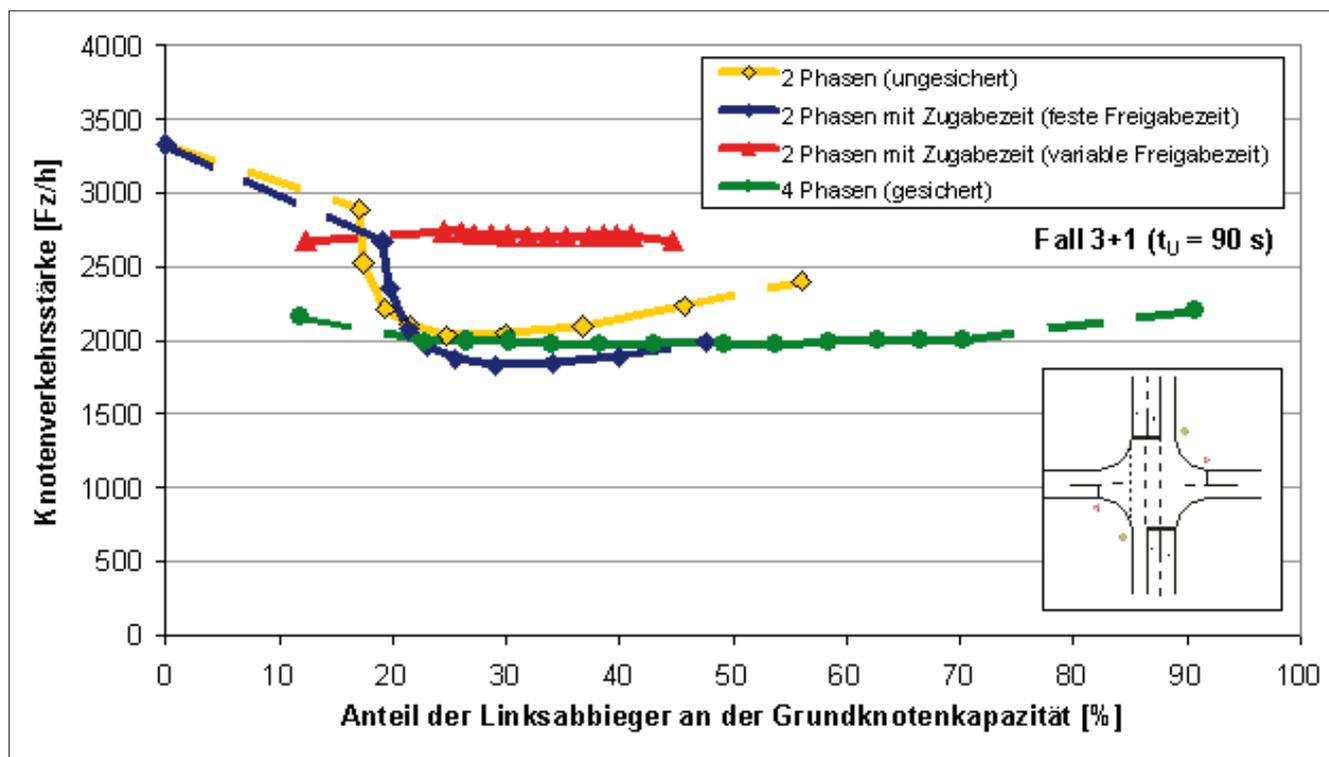


Abbildung 6-15: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 3 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 1 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s

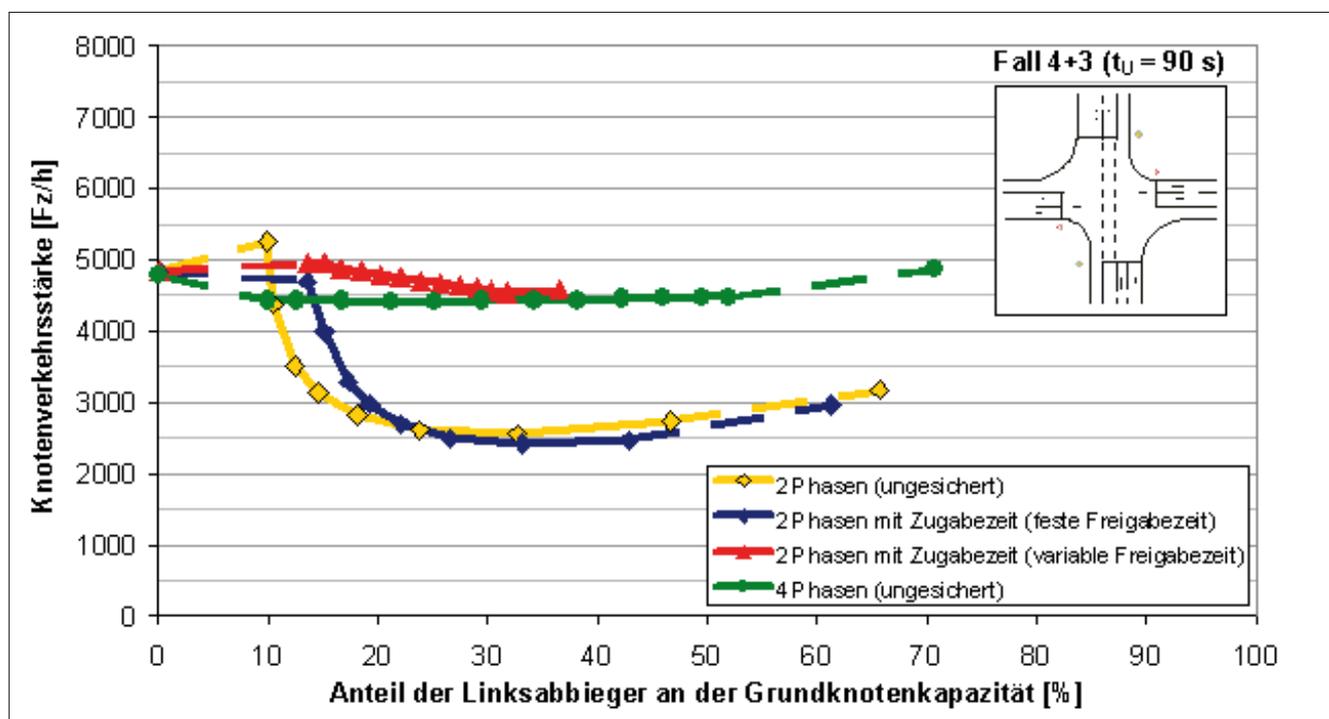


Abbildung 6-16: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 4 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 3 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s

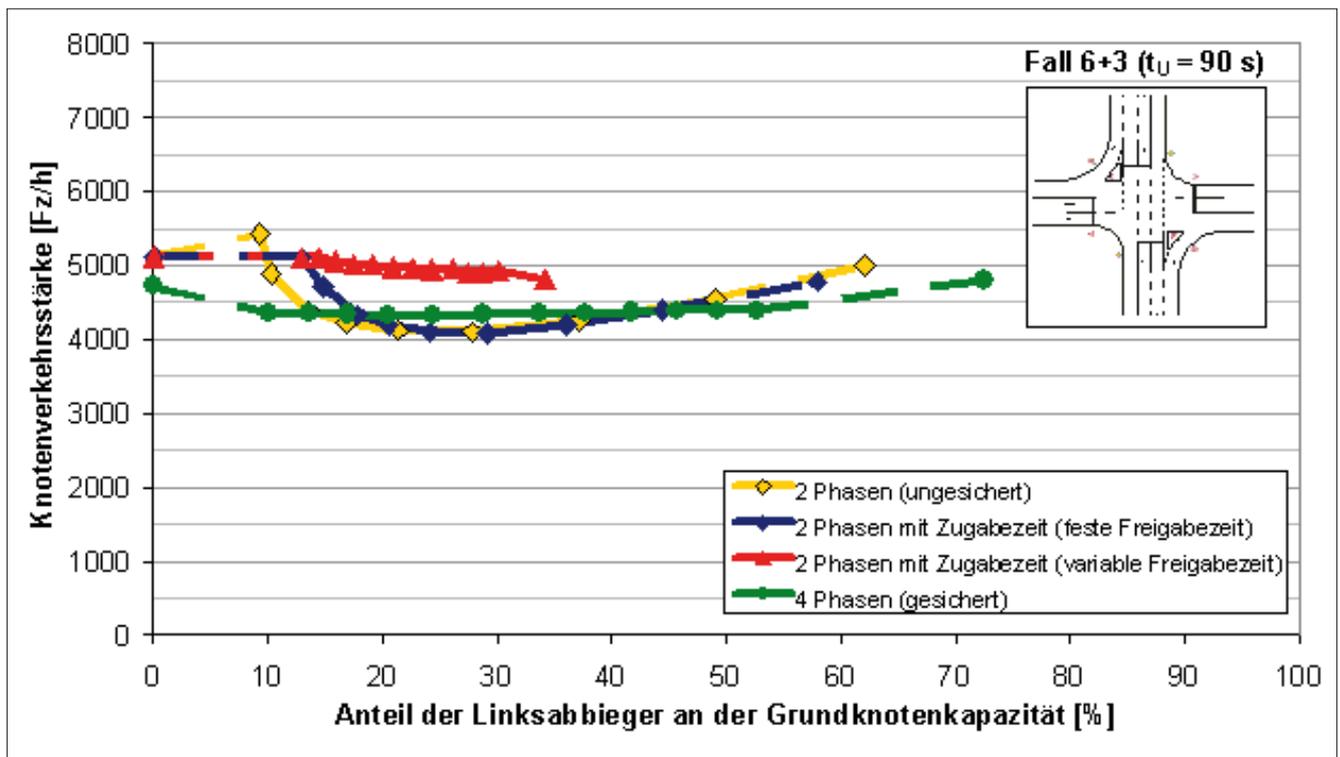


Abbildung 6-17: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 6 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 3 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s

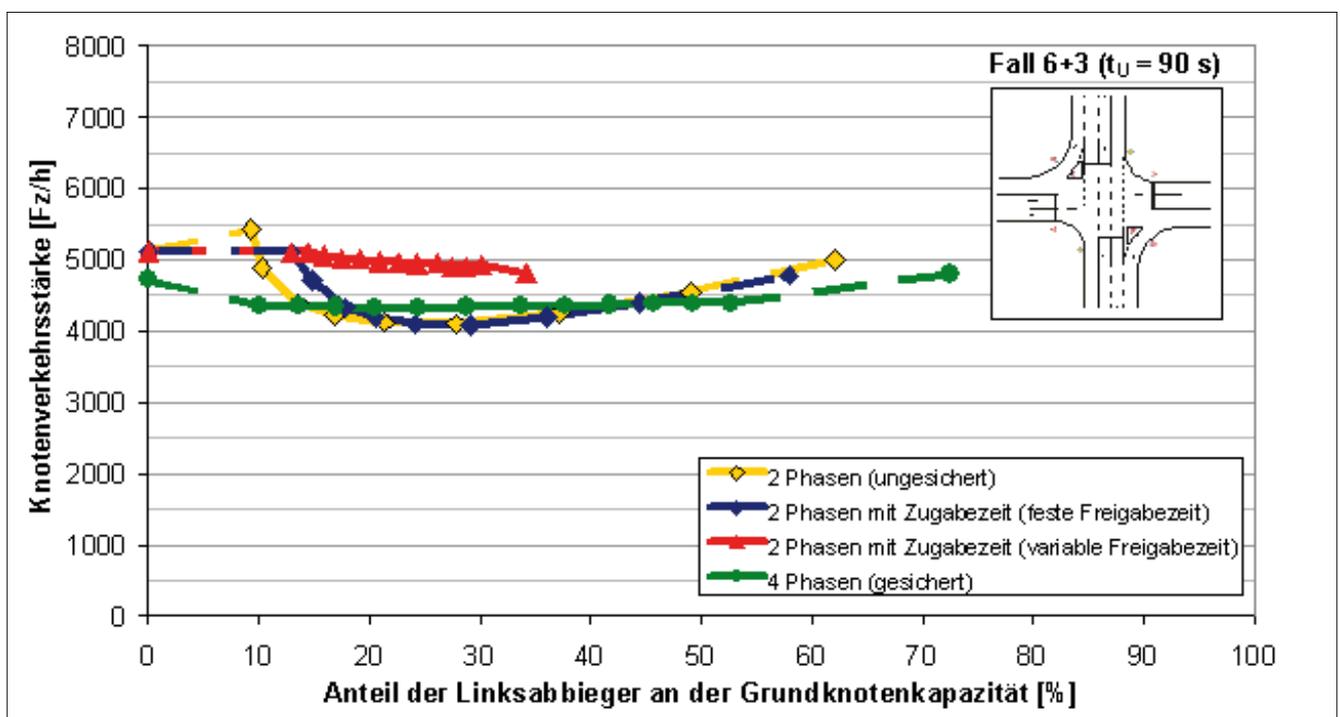


Abbildung 6-18: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen Steuerungsformen für Kreuzungen mit Zufahrten entsprechend Fall 6 in der Hauptrichtung und mit Zufahrten entsprechend Fall 4 in der Nebenrichtung für eine Umlaufzeit von 90 s

6.3 Zusätzliche Überlegungen zur Steuerung

6.3.1 Gesicherter Freigabe des Linksabbiegers als Vorgabezeit, Zugabezeit oder kombiniert jeweils mit fester und variabler Länge

Aus Gründen der Verkehrssicherheit wird in aller Regel bei einer Verlängerung der Freigabezeit zugunsten der Linksabbieger eine Zugabezeit gewählt, d. h. im Anschluss an die Freigabezeit des Gegenverkehrs wird dieser angehalten und dem Linksabbieger wird eine „Zugabezeit“ gegeben. Dies kann – um das Verständnis der Regelung zu verbessern und damit auch die Leistungsfähigkeit zu erhöhen – durch einen grünen einfeldigen Signalgeber (Diagonalgrün) angezeigt werden. Diese Anzeige führt zu einer verbesserten Zeitlückenannahme wie Tabelle 5-7 zeigt. Die Werte der gesicherten Freigabezeit für Linksabbieger werden allerdings nicht erreicht.

Wird die zusätzliche Freigabezeit nicht im Anschluss, sondern vor Beginn der Freigabe des Gegenverkehrs eingerichtet, so entsteht eine Vorgabezeit. Aus Sicherheitsgründen sollte diese Vorgabezeit möglichst nicht verwendet wer-

den, auf jeden Fall muss vor dem Einsetzen des Gegenverkehrs mit einem diagonalen Gelbpfeil gewarnt werden. Ohne Kennzeichnung ist eine Vorgabezeit nicht sicher zu betreiben. Da an Kreuzungen nicht in beiden Richtungen Zugabezeiten eingerichtet werden können, werden meist Vor- und Zugabezeiten kombiniert verwendet. Dies führt allerdings zu schwer verständlichen Signalisierungsständen, da im Knoteninnenbereich aufgestaute Linksabbieger während der Zugabezeit der Gegenrichtung vor gelb blinkendem Richtungssignal während der Sperrzeit des Hauptsignals warten müssen. In Abbildung 6-19 sind die drei Signalisierungsvarianten als Ausschnitt eines Signalzeitenplanes grafisch dargestellt.

Typische Einsatzfälle bestehen an mittleren Kreuzungen mit zwei Fahrstreifen in den Zufahrten (Fall 3), da das Vorhandensein von Linksabbiegestreifen Voraussetzung für die Sonderphase ist und andererseits bei mehrstreifigen Zufahrten generell eher gesicherte Freigaben für Linksabbieger eingerichtet werden. Deshalb wurde für Fall 3 und einer Umlaufzeit von 90 s die unterschiedliche Auswirkung verschiedener Vor- und Zugabezeitvarianten überprüft. Das Ergebnis bezüglich der Verkehrsstärken auf der Konfliktfläche zeigt Abbildung 6-20.

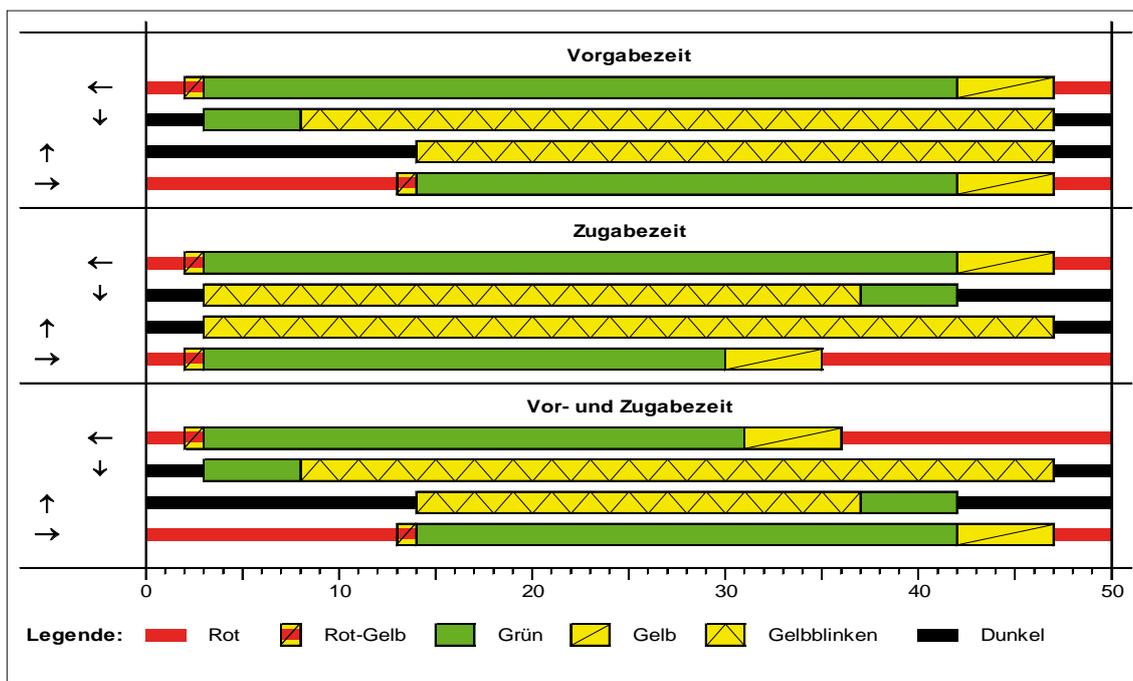


Abbildung 6-19: Gesicherte Signalisierungsvarianten für Linksabbieger bei 2 Phasensteuerung mit zeitweilig gesichertem Linksabbiegen

Dabei zeigt sich Folgendes:

- Vorgabezeiten erreichen etwas höhere Leistungsfähigkeiten als Zugabezeiten. Dies ist darin begründet, dass unmittelbar am Beginn von Vorgabezeiten gestartet wird, während bei Zugabezeiten mit Verzögerung auf den Beginn der Freigabe reagiert wird.
- Die Regelung mit Vorgabezeit oder Zugabezeit ist jeweils nur in einer Fahrtrichtung möglich. Die Gegenrichtung muss jeweils ohne eigene Freigabezeit für den Linksabbieger auskommen, d.h. die Linksabbieger haben nur den Zeitpunkt des Phasenwechsels und ansonsten die Möglichkeit zum Durchsetzen des Gegenverkehrs. Dies ist also nur sinnvoll bei unsymmetrischer Verkehrsbelastung.
- Ein Angebot für beide Fahrtrichtungen führt notwendigerweise zu einer Kombination von Vor- und Zugabezeiten. Dies erlaubt bei höheren Verkehrsstärken der Gegenrichtung eine größere Verkehrsmenge der Linksabbieger wie Abbildung 6-20 zu entnehmen ist.

Zu berücksichtigen sind aber schwer verständliche Signalzustände.

- Variable Vorgabezeiten oder Zugabezeiten können nur begrenzte Längen erhalten, da innerhalb des Umlaufs noch die Mindestfreigabezeiten für die Gegenrichtung und die anderen Phasen enthalten sein müssen. Deshalb sind nur Verkehrsstärken bis etwa zur Hälfte der maximalen Verkehrsstärke in der Gegenrichtung abzudecken. Bei maximaler Ausnutzung dieser Möglichkeiten entsteht der Übergang zu einer reinen Zufahrtsignalisierung, da die Freigabezeiten der Linksabbieger gleichzeitig die Freigabezeiten des Gegenverkehrs ausschließen und somit die Zeitbereiche zum Durchsetzen immer kleiner werden, bis sie – im Fall einer Zufahrtsignalisierung – nicht mehr die Mindestfreigabezeit ermöglichen.

Die Auswirkung auf die gesamte Knotenpunktverkehrsstärke bei diesen unterschiedlichen Behandlungen des Linksabbiegers zeigt Abbildung 6-21.

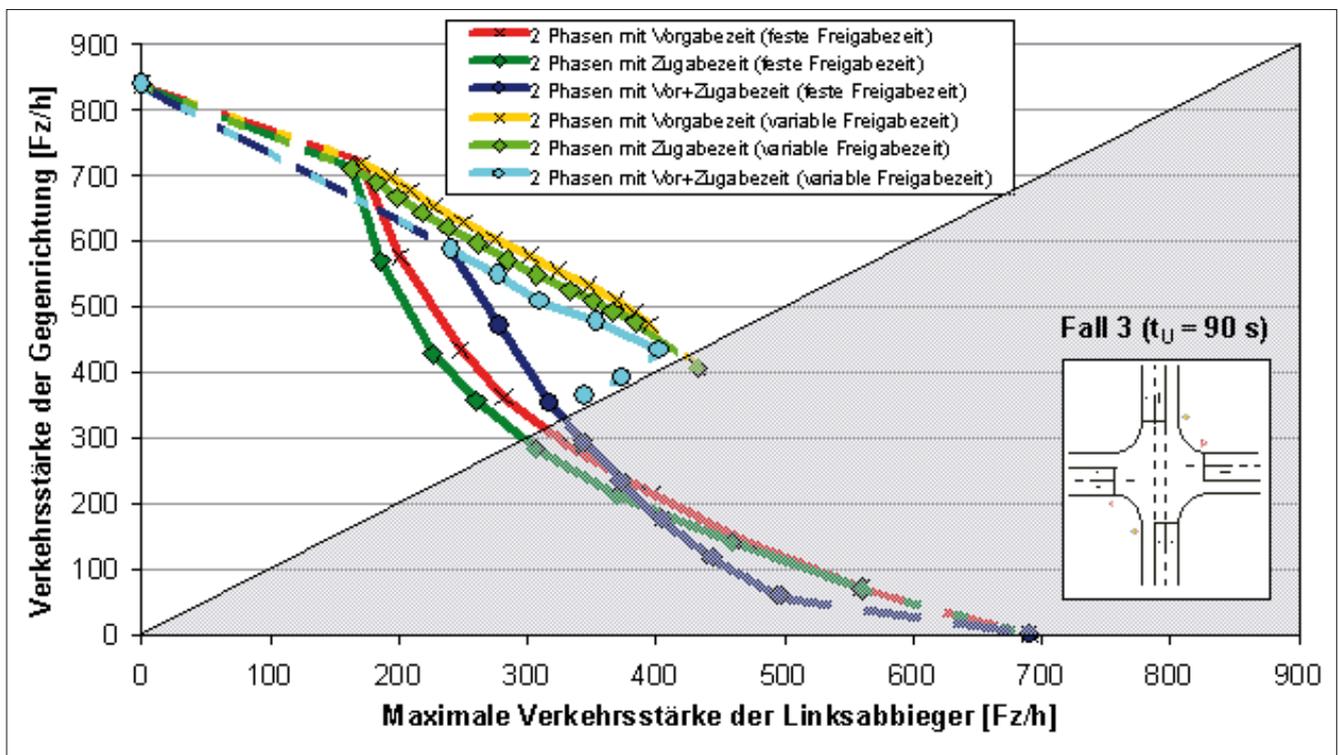


Abbildung 6-20: Vergleich des Einflusses eines konfigurierenden Linksabbiegers bei 2 Phasensteuerung mit zeitweilig gesicherter Freigabezeit auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s

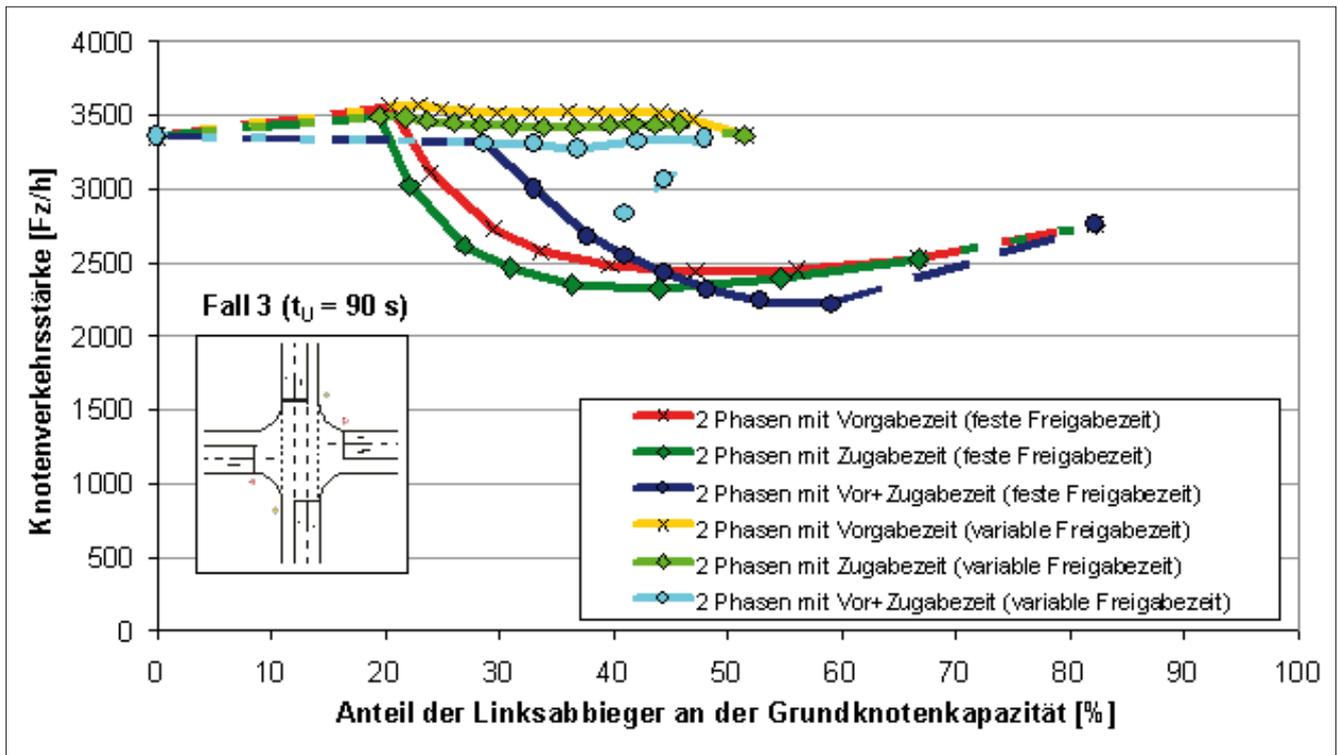


Abbildung 6-21: Knotenverkehrsstärke bei verschiedenen 2 Phasensteuerungen mit zeitweiliger Sicherung der Linksabbieger für mittlere Kreuzungen (Fall 3) für eine Umlaufzeit von 90 s

6.3.2 Form der Signalisierung des Rechtsabbiegers

In denjenigen Fällen, in denen der Rechtsabbiegestrom auf eigenem Fahrstreifen geführt wird (Fall 4 ohne Dreiecksinseln, Fall 6 mit Dreiecksinseln), verdient die Signalisierung des Rechtsabbiegers eine gesonderte Überlegung. Generell gilt, dass bei gesicherter Freigabe des Linksabbiegers mit Richtungssignal kein Strom aus der Gegenrichtung freigegeben werden darf, der eine Konfliktmöglichkeit enthält. Dazu zählt auch der rechtsabbiegende Verkehrsteilnehmer in der Gegenrichtung. Deshalb muss im Falle von Sonderphasen für Linksabbieger geprüft werden, ob für Rechtsabbieger zumindest zweifeldige Richtungssignalgeber vorhanden sein müssen (Abbildung 6-22).

Für den Fall 4 (große Kreuzung ohne Dreiecksinsel) ist dies in den Abbildung 6-23 und Abbildung 6-24 dargestellt. Der Vorteil des zusätzlichen Signalgebers liegt da-

rin, dass die Zugabezeit des Linksabbiegers gleichzeitig für die gesicherte Freigabe von Rechtsabbiegern aus dem Nebenstrom genutzt werden kann. Dadurch ergeben sich die mit (b) gekennzeichneten Verläufe von Verkehrsstärken der Linksabbieger in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des Gegenverkehrs in Abbildung 6-23. Es zeigt sich eine höhere Leistungsfähigkeit gegenüber derjenigen ohne Signalgeber für Rechtsabbieger (a).

Bei den praktischen Anwendungen wurde davon ausgegangen, dass dieser zusätzliche Aufwand vorrangig dann realisiert wird, wenn auch eine generell flexible und aufwändige verkehrsabhängige Steuerung installiert worden ist. Dies bedeutet z. B. variable Gestaltung der Freigabezeiten. Bei festen Freigabezeiten wurde ausschließlich die Variante (a), d. h. ohne zusätzlichen Signalgeber für Rechtsabbieger, berechnet.

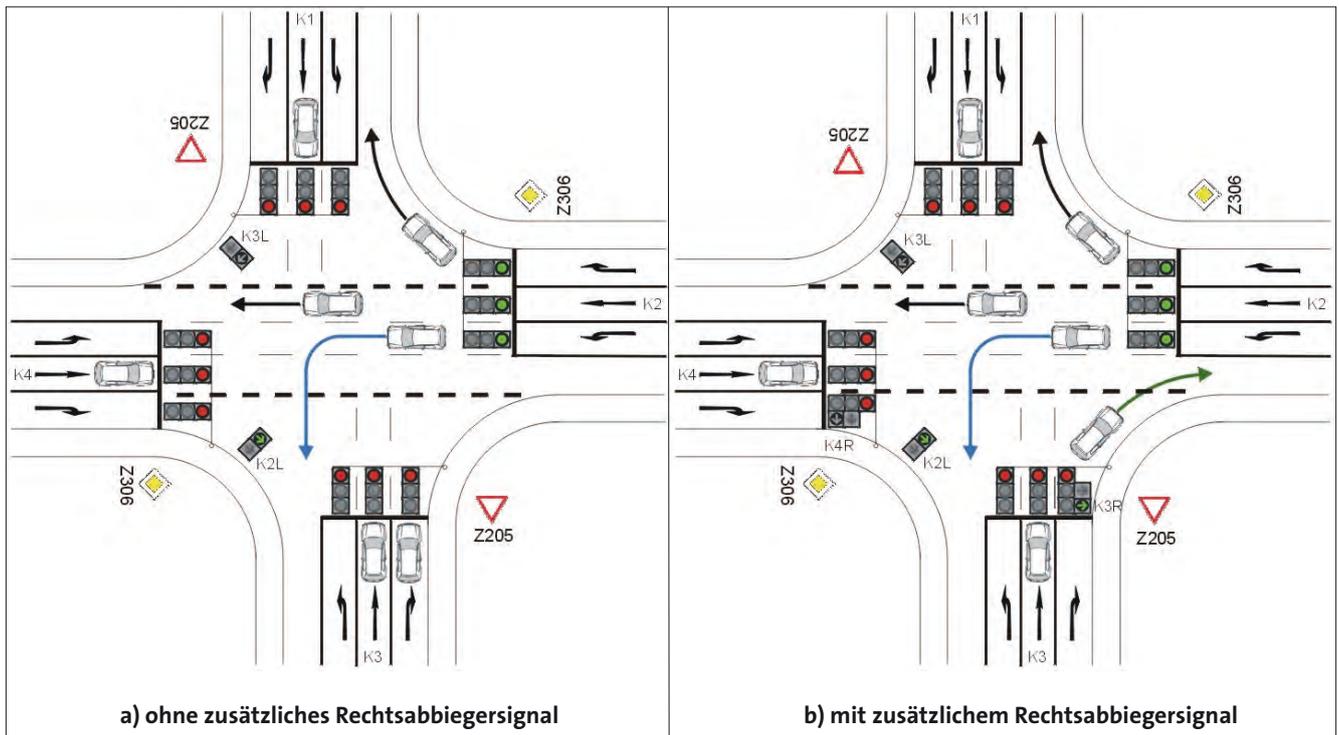


Abbildung 6-22: Mögliche Signalisierungsformen für Rechtsabbieger bei zeitweilig gesicherter Linksabbiegerführung

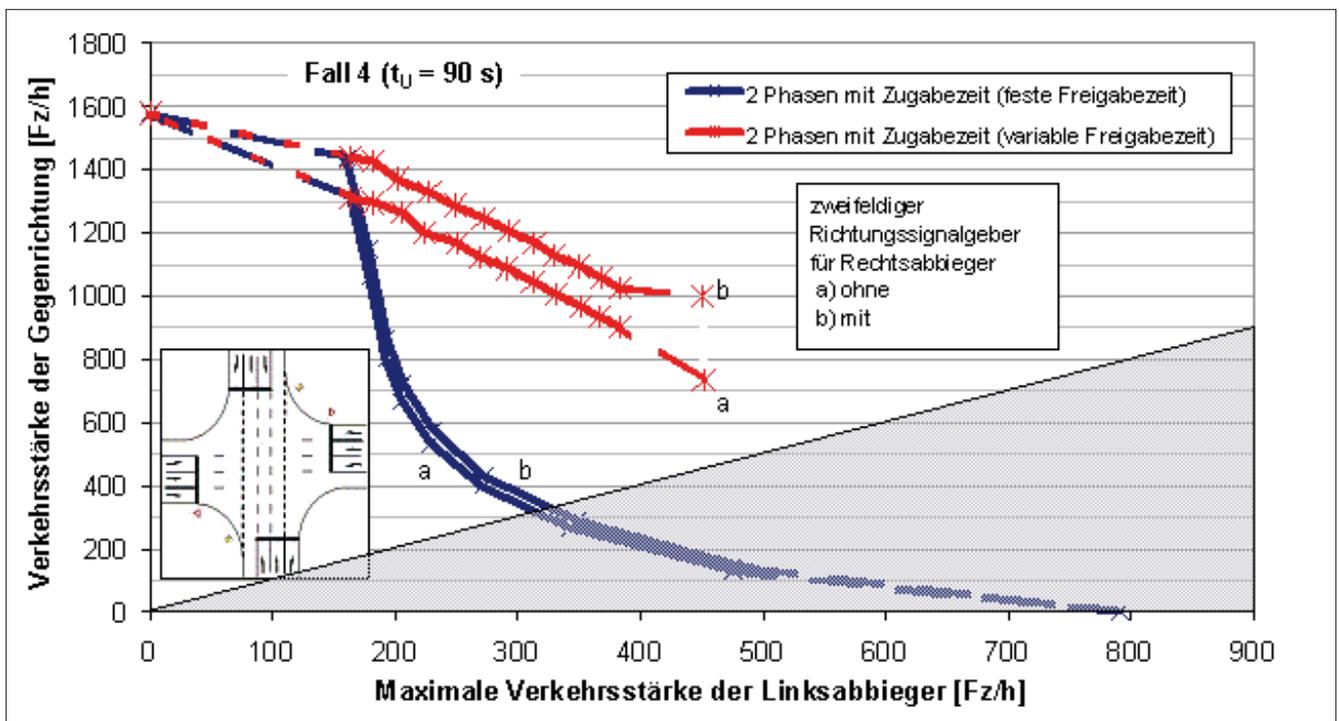


Abbildung 6-23: Vergleich des Einflusses eines konfigrierenden Linksabbiegers bei 2 Phasensteuerung mit Zugabezeit auf die maximale Verkehrsstärke der übergeordneten Gegenrichtung für große Kreuzungen (Fall 4) für eine Umlaufzeit von 90 s

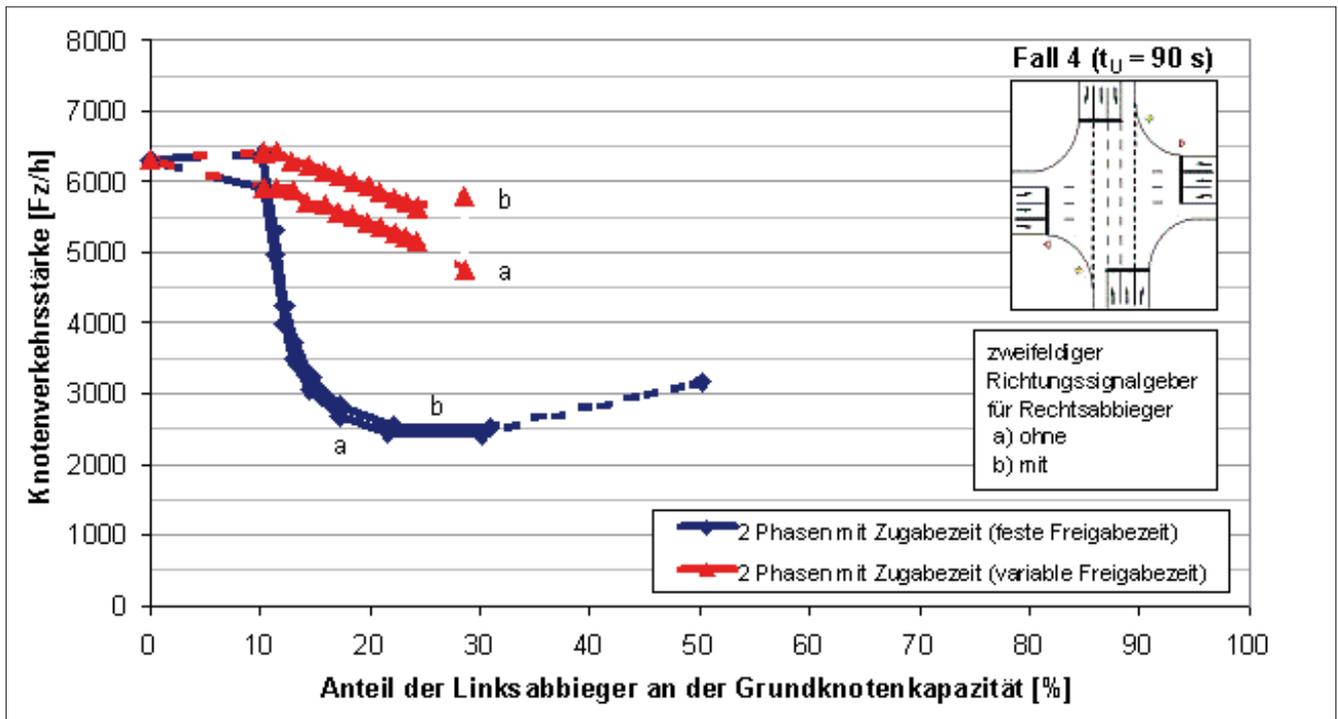


Abbildung 6-24: Knotenverkehrsstärke bei 2 Phasensteuerungen mit Zugabezeit der Linksabbieger für große Kreuzungen (Fall 4) und für eine Umlaufzeit von 90 s

6.3.3 Auswirkungen unterschiedlicher Umlaufzeiten

Generell wirken sich kürzere Umlaufzeiten derart aus, dass die Verluste bei Phasenwechseln anteilig größer werden, weil die Zwischenzeiten absolut gleiche Länge erhalten müssen. Dies führt generell zu einer Zunahme der Knotenpunktkapazität bei steigender Umlaufzeit. Allerdings erfolgt die Zunahme der Kapazität nicht linear mit der Umlaufzeit, weil auch die Verlustzeiten anteilig bei größeren Umlaufzeiten kleinere Veränderungen bewirken.

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse verkehrstechnischer Berechnungen

6.4.1 Vorschlag für Veränderungen bei der Anwendung von Bemessungsverfahren

In der umfassenden Auswertung von Literatur und bisher vorliegenden Erhebungen wurde deutlich, dass eine Vielfalt von Annahmen aus bekannten Zählungen und

Messungen Grundlage der heutigen Bemessungsverfahren sind. Dabei wird abweichenden örtlichen Besonderheiten in der Regel durch Zuschläge oder Abschläge in Form von Faktoren Rechnung getragen. Ausgangsgröße ist in jedem Fall die Sättigungsverkehrsstärke, die zum Ausdruck bringt, wie viele Fahrzeuge den Querschnitt für den theoretischen Fall einer Stunde Freigabezeit durchfahren können. Der Kehrwert davon ist der Zeitbedarfswert je Fahrzeug.

Bei den hier vorliegenden Auswertungen und eigenen Zählungen wurde gefunden, dass die bisher üblichen Sättigungsverkehrsstärken für Linksabbieger die Kapazität in der Tendenz überschätzen. Im Gegensatz zum Verfahren im HBS, bei dem lediglich Abbiegeradien von unter 15 m eine Abminderung bewirken, wurde bei den vorliegenden Messungen auch an Außerortsknotenpunkten beim Linksabbiegen mit größeren Abbiegeradien eine Veränderung zu kleineren Verkehrsstärken festgestellt. Es wird deshalb vorgeschlagen, für künftige Bemessungen von gesichert freigegebenen Linksabbiegeströmen generell

die Sättigungsverkehrsstärke von 1950 Fz/h bzw. 1900 Fz/h bei kurzen Freigabezeiten zwischen 6 und 10 s zu verwenden. Für zeitweise gesicherte Linksabbiegeströme (z.B. Zugabezeiten und Vorgabezeiten) werden 1700 Fz/h vorgeschlagen. Rechtsabbieger haben eine Sättigungsverkehrsstärke von 1800 Fz/h.

Bei der Bemessung von Linksabbiegern, die den Gegenverkehr durchsetzen müssen, ist die Annahme bzw. Ablehnung von Zeitlücken die maßgebende Größe. Die dafür erforderlichen Grenzzeitlücken (für den ersten Entscheidungsvorgang) und die darauffolgenden Zeitlücken (Folgezeitlücken) enthält das HBS 2001 Werte, die offensichtlich Mittelwerte zwischen Innerorts- und Außerortsfahrverhalten darstellen. Aus der Literatur (WEINERT 2001) können aber solche Unterschiede erkannt werden. Eigene Messungen zeigen, dass außerorts größere Zeitlücken angetroffen werden als nach dem HBS-Verfahren. Die Messungen sind allerdings nicht bundesweit repräsentativ, so dass hier kein abschließender Vorschlag gemacht werden kann. Die Bedeutung der Abweichungen dieser Werte ist aber auch nicht derart, dass sie das Ergebnis maßgebend beeinflussen könnte.

6.4.2 Mögliche Verkehrsstärken von Linksabbiegern bei hoher Belastung im Gegenverkehr

Bei allen mehrstreifigen Varianten von Knotenpunktzufahrten tritt bei geringen Linksabbiegeverkehrsstärken der Fall auf, dass bis zu ca. 120 Linksabbieger/h (bei einer Umlaufzeit von 90 s) während der Phasenwechsel abfließen können und daher auch bei ungesicherter Freigabe keine Einschränkungen des Geradeausverkehrs auftreten. Bis zu dieser Belastung hat eine gesicherte Freigabe grundsätzlich Leistungsfähigkeitseinbußen für den Gegenverkehr zur Folge, weil die Zeit für die Sonderphase dem Gegenverkehr entzogen wird. Je mehr Umläufe in einer Stunde auftreten (bei kürzeren Umlaufzeiten), desto mehr Linksabbieger können während der Phasenwechsel abgefertigt werden. Andererseits ist die Zahl aber abhängig von der Knotenpunktgeometrie (Anzahl der Aufstellplätze im Knoten).

Der kapazitätsmindernde Effekt der Sonderphase im Bereich kleiner Linksabbiegeströme ist geringer, wenn Zuga-

bezeiten eingerichtet werden. Dies ist aber nur möglich in jeweils einer Fahrtrichtung (unsymmetrische Lösung).

Sobald mehr als 120 Fahrzeuge als Linksabbieger auftreten, haben gesicherte Freigaben für diese Ströme teilweise deutlich höhere Leistungsfähigkeiten als die Zweiphasigkeit. Die Einrichtung einer Zugabezeit (die unsymmetrische Belastungsverhältnisse voraussetzt) erreicht immer bessere Werte, die in den Bereich höherer Verkehrsstärken von Linksabbiegern verschoben werden können durch variable Freigabezeiten. Treten starke Linksabbiegeströme in beiden Fahrtrichtungen auf, so muss in aller Regel eine 4 Phasensteuerung gewählt werden, wenn Vorgabezeiten vermieden werden sollen (weil sie Sicherheitsnachteile haben).

Die maximal mögliche Verkehrsstärke für Linksabbieger in Abhängigkeit des Steuerungsverfahrens bei unterschiedlichen geometrischen Ausgangssituationen zeigt Abbildung 6-25. Die dort dargestellten Werte sind aus den Diagrammen abgelesen und auf praktische Werte gerundet worden. Es wird von einer Fahrstreifenbelastung in Höhe von 600 Fz/h ausgegangen (bei zwei Fahrstreifen in der Gegenrichtung, also 1200 Fz/h). Es zeigt sich, dass bei 2 Phasensteuerung nur unwesentlich mehr Fahrzeuge als während des Phasenwechsels abfließen können. Bei gesicherter Freigabe ist dieser Wert teilweise erheblich größer, d.h. insbesondere in den Fällen mit mehreren Fahrstreifen kann in der Sonderphase durch größere Zeitanteile eine erhebliche Verkehrsleistung des Linksabbiegers erreicht werden. Die variable Zugabezeit erreicht den höchsten Abfluss der Linksabbieger, kann aber nur jeweils für eine Fahrtrichtung realisiert werden.

Eine besondere Rolle spielt der kleine Knotenpunkt mit nur einem Fahrstreifen je Zufahrt: Die Ergebnisse hier sind nicht vergleichbar mit den anderen Kreuzungen. Die Freigabe in gesicherten Phasen führt in diesen Fällen zu einer spürbaren Reduktion der Gesamtleistungsfähigkeit auf der Konfliktfläche. 300 Fahrzeuge können diese Konfliktfläche je Stunde befahren (dies ist die Kapazität der einstreifigen Knotenpunktzufahrt bei Zufahrtsignalisierung). Je größer die Linksabbiegeverkehrsstärke wird, desto kleiner ist die Leistungsfähigkeit für den restlichen Verkehr.

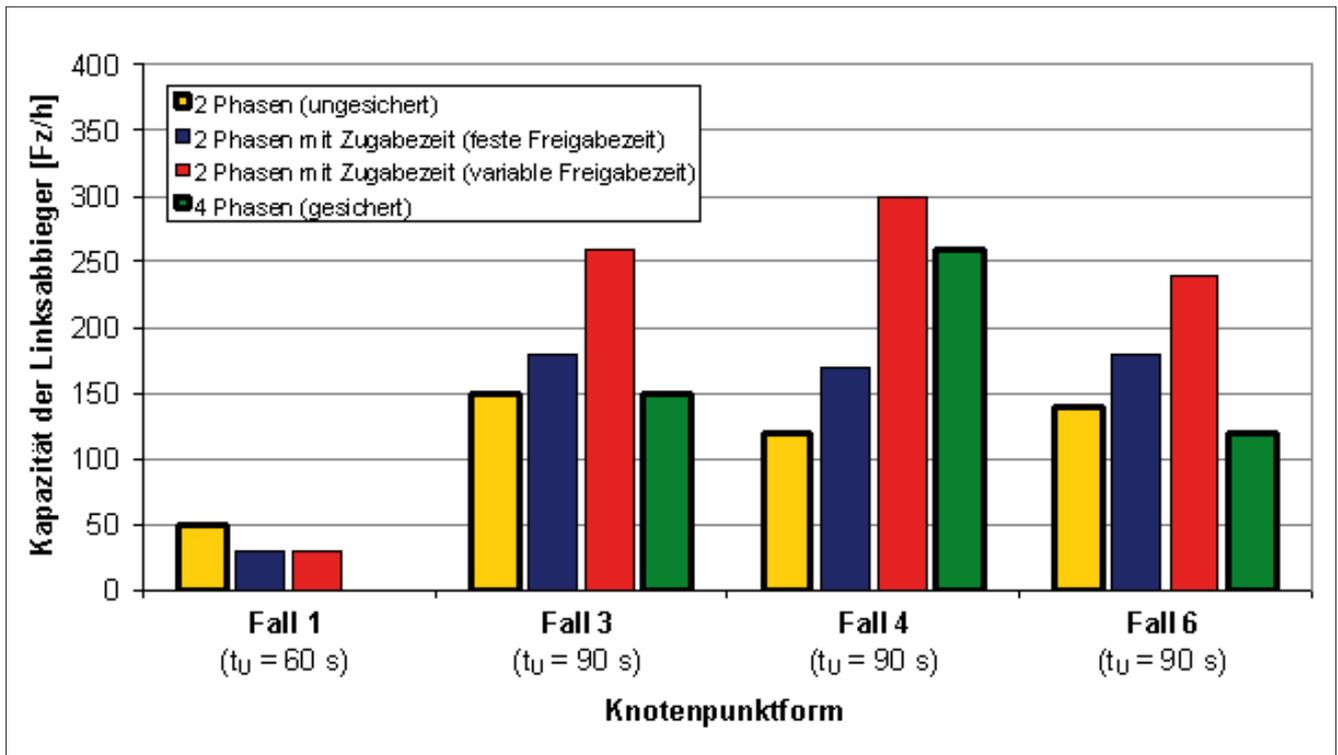


Abbildung 6-25: Kapazitäten der Linksabbieger bei einer Gegenverkehrsstärke von 600 Fz/(h*Fahrstreifen) für unterschiedliche Steuerungsvarianten der Linksabbieger und Knotenpunktformen – ein Ergebnis der Simulationsläufe

6.4.3 Gesamtkapazitäten von Knotenpunkten mit unterschiedlicher Steuerungsform

Die Gesamtkapazität am Knotenpunkt erreicht ca. 3300 Fz/h bei zweistreifigen Zufahrten und etwas über 6000 Fahrzeuge bei dreistreifigen Zufahrten. Wenn Rechtsabbieger ungehindert abfließen können (neben nicht signalisierten Dreiecksinseln) erhöht sich der Wert noch auf nahezu 7000 Fz/h.

Sobald Linksabbieger in nennenswerter Zahl auftreten, wird die Gesamtkapazität des Knotenpunktes vor allem im Fall ungesicherter Freigabe bei ca. 15 %-Anteil durch Linksabbieger (zweistreifige Zufahrten) oder 7 % (dreistreifige Zufahrten) vermindert. Die Mehrphasensysteme zeigen dagegen nur einen geringen Rückgang der Knotenpunktkapazität bei Ansteigen des Linksabbiegeranteils. Unter günstigen Verhältnissen bleibt die Gesamtkapazität nahezu konstant. Die Sicherung des Linksab-

biegers durch eine Zugabezeit, insbesondere wenn diese variabel gehalten werden kann, bringt mindestens bis in den Bereich von 20 % Linksabbiegeranteil teilweise noch deutlich höhere Gesamtkapazitäten als bei 4 Phasensteuerung.

Ein weiterer Sonderfall ist die große Kreuzung mit freien Rechtsabbiegern (Fall 6): Hier gewinnt ausschließlich die Sicherung mit Zugabezeiten an Kapazität gegenüber den ungesicherten Zweiphasensystemen, während die Mehrphasensysteme maximal gleiche Kapazitäten im Bereich mittlerer Linksabbiegeanteile erreichen können. Dies liegt daran, dass bei ungesicherten Zweiphasensystemen die Rechtsabbieger kontinuierlich frei fließen können. Der Effekt tritt also nur ein, wenn auch hoch belastete Rechtsabbiegeströme vorhanden sind. Dann wird am Umkehrschluss aber auch ein großer Linksabbiegeanteil auftreten, so dass die Werte der geringen Linksabbiegerbelastung nicht realistisch sein werden.

6.5 Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit der Sonderphasen

Negative Nutzen durch Mehrphasigkeit entstehen dadurch, dass die Kapazitäten unter bestimmten Randbedingungen nicht so groß sind wie bei ungesicherten 2 Phasensteuerungen. Volkswirtschaftliche Nachteile entstehen andererseits durch die Verschlechterung der Verkehrssicherheit. Folgende Einsatzbereiche mehrphasiger Steuerungsverfahren stellen sich in diesem Sinn als kritisch heraus:

- Knotenpunkte mit mehrstreifigen Zufahrten und geringen Linksabbiegeverkehrsstärken, die zu Anteilen von weniger als 7 bzw. 15 % der Grundknotenkapazität führen (je nach Anzahl der Fahrstreifen)
- einstreifige Knotenpunktzufahrten bei Verkehrsbelastungen von mehr als 1200 Kfz-Überfahrten/h.

Bei insgesamt geringerer Knotenverkehrsstärke als 3000 Kfz-Überfahrten (zweistreifige Knotenpunktzufahrten) bzw. 6000 Kfz/h (mehrestreifige Knotenpunktzufahrten) reicht die Kapazität mehrphasiger Systeme in jedem Fall aus. Bei höheren Linksabbiegeanteilen sind mehrphasige Systeme in aller Regel sogar leistungsfähiger als 2 Phasensteuerungen.

Es kommen daher nur Überlegungen zur wirtschaftlichen Auswirkung von Sonderphasen zum Tragen, wenn Nachteile beim Verkehrsablauf auftreten können. Die nachfolgende Abschätzung zeigt, in welcher Größenordnung Zeitverluste durch die Gewinne der Verkehrssicherheit kompensiert werden können:

Betrachtet wird ein Knotenpunkt mit zwei Fahrstreifen in jeder Zufahrt, wovon ein Fahrstreifen dem Linksabbiegeverkehr dient (Fall 3). Gegen ist eine Umlaufzeit von 90 s. Bei einem Anteil der Linksabbieger von ca. 15 % kann ein Zweiphasensystem ca. 3700 Kfz in der Spitzenstunde bewältigen. Dies führt zu einer Tagesbelastung von rund 37 000 Kfz-Überfahrten am Tag.

Pro Fahrzeug entsteht ein Gewinn durch vermiedene volkswirtschaftliche Verluste infolge von Straßenver-

kehrsunfällen in Höhe von 32 EUR bei 1000 Kfz-Überfahrten (s. ECKSTEIN, MEEWES 2002). Dies repräsentiert einen volkswirtschaftlichen Vorteil von 3,2 Ct/Fz. Unterstellt man durchschnittliche Zeitkosten der Pkw an Werktagen (5,5 EUR/h nach FGSV (1997) - EWS), so sind bis zu 20 s Zeitverlust/Fz volkswirtschaftlich zu vertreten. Dies bedeutet, dass etwa ein Drittel der Fahrzeuge eine zusätzliche Umlaufzeit hinnehmen kann. Da die Differenz der Kapazität ca. 20 % beträgt, erscheint dieser Zeitverlust im Hinblick auf die entsprechenden Gewinne bei der Verkehrssicherheit volkswirtschaftlich vertretbar.

Eine Verbesserungsmaßnahme, die z. B. in Form zusätzlicher Fahrstreifen die Zeitverluste bei Kapazitätsgpässen vermeiden hilft, dürfte bei einem Abschreibungszeitraum von 20 Jahren 6 Mio EUR zusätzlichen Aufwand erfordern (bei jährlichen Einsparungen von 430 000 EUR unter den beschriebenen Belastungsverhältnissen).

Dies ist eine Abschätzung unter denkbar ungünstigen Vorzeichen. In der Realität werden folgende Abminderungen auftreten:

- Da es sich ausschließlich um die Spitzenstunde handelt, in der die hohen Belastungen auftreten, werden auch nur beispielsweise 10 bis 20 % des täglichen Verkehrs von den Zeitverlusten betroffen sein. Dadurch könnten in den Spitzenzeiten also auch höhere Zeitverluste noch wirtschaftlich zu vertreten sein.
- In den Fällen nicht gleichmäßiger Auslastung kann mithilfe von Zugabezeiten eine gesicherte Freigabe für Linksabbieger erreicht werden. In diesem Fall ist der Rückgang der Kapazität nur etwa halb so groß wie bei einem 4 Phasensystem.

7 Einsatzempfehlungen

Aufgrund der höheren Sicherheit mehrphasiger Systeme sollten generell keine ungesicherten Zweiphasensysteme mehr zum Einsatz kommen. Aus verkehrstechnischen Gründen ergibt sich in einzelnen Fällen eine Einschränkung der Leistungsfähigkeit durch die zusätzliche Linksabbiegesicherung. Es werden folgende Einsatzempfehlungen gegeben:

- (1) Bei hohen Verkehrsbelastungen, z. B. bei Knotenverkehrsstärken von mehr als 6500 Kfz-Überfahrten/h müssen mehrere Fahrstreifen für einzelne Fahrbeziehungen angelegt werden. Dann kommt eine ungesicherte Freigabe des Linksabbiegers generell nicht infrage, weil die Sicherheit nicht zu gewährleisten ist.
- (2) Liegt die Verkehrsstärke zwischen 4600 und 6500 Fz/h, so sind meist aus allen Richtungen dreistreifige Knotenpunktzufahrten erforderlich. Gleichmäßige Auslastung der Verkehrsbeziehungen vorausgesetzt, ergibt sich ein mittlerer Linksabbiegeanteil um 25 %.
 - Wird der Rechtsabbieger neben Dreiecksinseln zeitweise frei geführt, so erreicht die 4 Phasensteuerung gleiche Kapazitätswerte wie 2 Phasensteuerungen. Die Sicherung der Linksabbieger mit einer Zugabezeit wird in aller Regel nicht mehr funktionsfähig sein, da sie eine Konzentration der Linksabbieger auf maximal zwei der vier Fahrtrichtungen erfordert (unsymmetrische Belastungszustände). Aus Sicherheitsgründen soll die Möglichkeit des Durchsetzens nicht vorgesehen werden.
 - Bei dreistreifigen Zufahrten ohne Dreiecksinseln ist die 4 Phasensteuerung bei gleichmäßiger Auslastung des Knotenpunktes auch unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten ebenso wie unter Sicherheitsgesichtspunkten die bei weitem günstigste Lösung.
- (3) Bei Gesamtbelastungen von 3000 bis 4600 Fahrzeugen in der Spitzenstunde werden Mischformen von geometrischen Knotenpunktgestaltungen auftreten. Z. B. wird in der Hauptrichtung eine Aufteilung der Fahrstreifen ähnlich Fall 4 (drei Fahrstreifen ohne Dreiecksinsel) und in der Nebenrichtung zweistreifige Zufahrten entsprechend Fall 3 auftreten. Bei gleichmäßiger Auslastung, d. h. Linksabbiegeanteilen um 25 % der Gesamtkapazität wird auch in diesen Fällen die vierphasige Steuerung verkehrstechnisch optimale Verhältnisse bieten. Möglicherweise sind hier auch Zugabezeiten alternativ zu prüfen, solange das Durchsetzen der zweistreifigen Gegenverkehre vermieden werden kann.
- (4) Für Belastungen zwischen 2000 und 3000 Fahrzeugen in der Spitzenstunde sollte bei kleinen Linksabbiegeranteilen unter 20 % die Einrichtung von Zugabezeiten geprüft werden. Bei größeren Linksabbiegeanteilen ist die 4 Phasensteuerung in jedem Fall von Vorteil.
- (5) Belastungen zwischen 1000 und 3000 Fahrzeugen in der Spitzenstunde sollten keinesfalls mit einstreifigen Zufahrten geplant werden. Eine Lichtsignalsteuerung wäre dann nur mit zweiphasigem System ausreichend leistungsfähig. Die Einrichtung eines Abbiegefahrestreifens für Linksabbieger ist unbedingt zu fordern (aus Wirtschaftlichkeitsgründen auch zu vertreten).
- (6) Bis zu 1200 Fahrzeugen in der Spitzenstunde lassen sich einstreifige Zufahrten als Zufahrtssignalisierung mit gesicherter Freigabe der Linksabbieger einrichten. Empfohlen wird der Einsatz bis zu ca. 1000 Fz/h.

Die Einsatzgrenzen der Steuerungsvarianten abhängig von der Knotenpunktform zeigt Abbildung 7-1 für die 4 Phasensteuerung und Abbildung 7-2 für die 2 Phasensteuerung mit Zugabezeit.

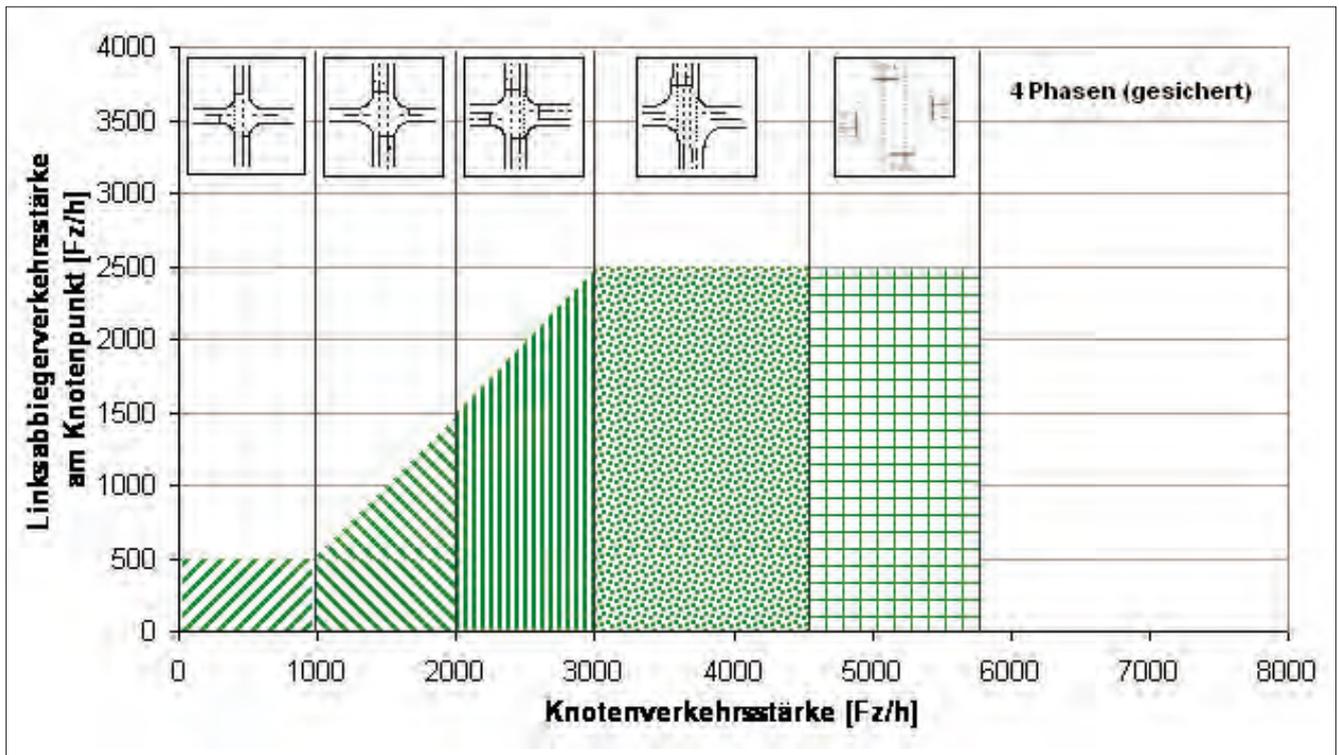


Abbildung 7-1: Einsatzgrenzen der 4 Phasensteuerung (gesichert)

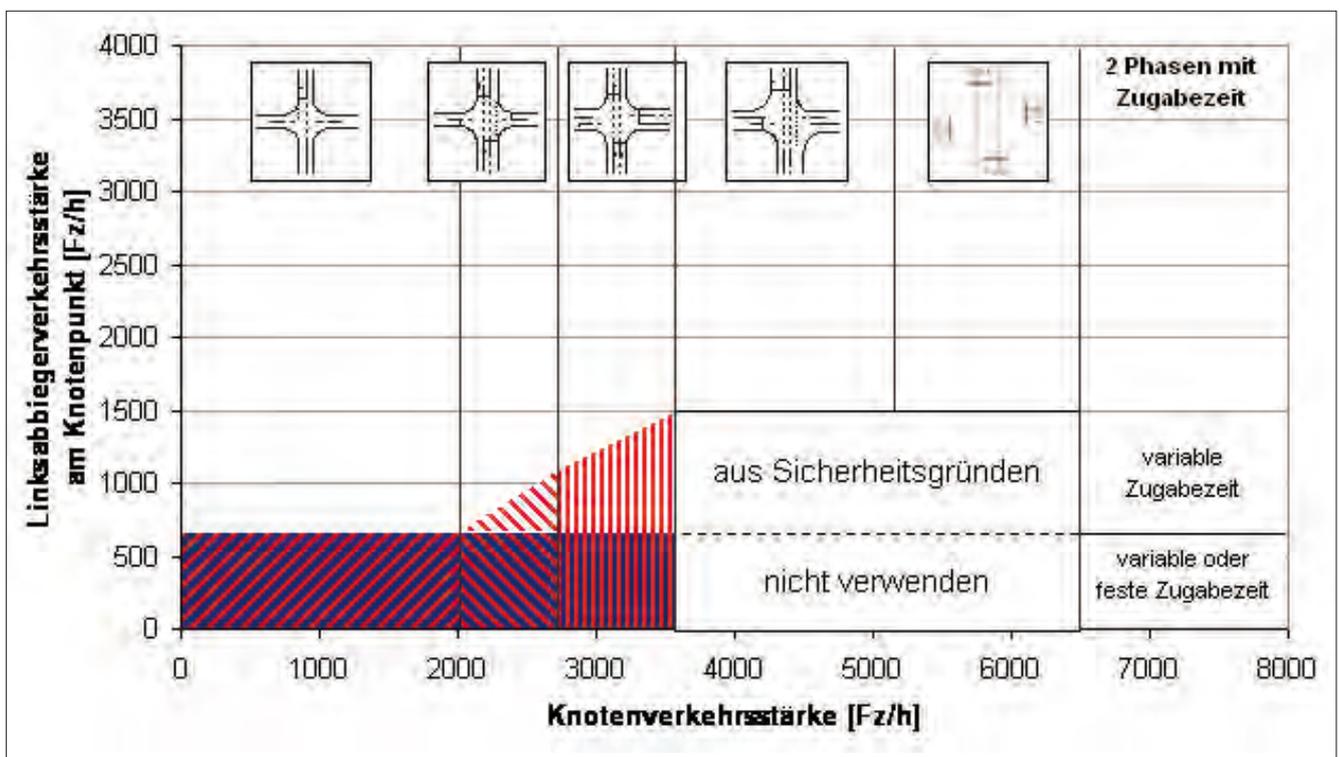


Abbildung 7-2: Einsatzgrenzen der 2 Phasensteuerung mit variabler oder fester Zugabezeit (zeitweilig gesichert)

Literaturverzeichnis

- Allenbach, R.; Hubacher, M. (2002)
Lichtsignalanlagen – Anlagespezifische Untersuchung sicherheitsrelevanter Aspekte von vierarmigen Kreuzungen im Innerortsbereich. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu. Bern
- Axhausen, K.W.; Fellendorf, M.; Hook, D. (1989)
Zur Abhängigkeit der Zeitbedarfswerte von der Knotengeometrie, Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Heft 5, S. 170-175.
- Baier, H.; Schlabbach, K. (1976)
LinksabbiegeUnfälle an Lichtsignalanlagen in Darmstadt. Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Heft 6, S. 197-204.
- Basha, P. ; Box, P. C. (2003)
A study of accidents with lead versus lag left-turn phasing. Institute of Transportation Engineers. ITE Journal, May 2003
- Brehmer, C. L. et al. (2003)
Evaluation of Traffic Signal Displays for Protected/ Permissive Left-Turn Control. Transportation Research Board. National Cooperative Highway Research Program, Report 493, Washington, D.C.
- Brenner, M. F. et al. (1997)
Sicherheitsrisiken an Lichtsignalanlagen – Untersuchung zu Sicherheitsrisiken an LSA durch den zeit- und /oder verkehrsabhängigen Einsatz von mehr als einem Steuerungsverfahren. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V44
- Bretschneider, S. (2006)
Ermittlung der Grundlagen für die Bemessung signaltechnisch nicht gesicherter Linksabbieger (mit Durchsetzen des Gegenverkehrs. Studienarbeit. Technische Universität Dresden, Professur Straßenverkehrstechnik.
- Brilon, W.; Großmann, M.; Blanke, H. (1993)
Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Hrsg. Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 669. Bonn-Bad Godesberg
- Brilon, W.; Weinert, A. (2001)
Ermittlung aktueller Grenz- und Folgezeitlücken für Außerortsknotenpunkte ohne Lichtsignalanlagen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Hrsg. Der Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Heft 828. Bonn
- Deist, H. (1972)
Zur Problematik räumbehinderter Linksabbieger an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Wasser und Verkehr.
- Eckstein, K.; Meewes, V. (2002)
Sicherheit von Landstraßen-Knotenpunkten. Mitteilungen des Institutes für Straßenverkehr Köln (ISK). Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Köln.
- Ewert, U. (1994)
Zum Verständnis von Lichtsignalregelungen beim Linksabbiegen - Pilotstudie. Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu. Bern
- FGSV (1981)
Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Herausgabe: Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.
- FGSV (1988)
Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS) - Teil: Knotenpunkte (RAS-K) Abschnitt 1: Plangleiche Knotenpunkte (RAS-K1). Herausgabe: Arbeitsgruppe Straßenentwurf. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.
- FGSV (1992)
Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Herausgabe: Arbeitsgruppe

pe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

FGSV (1997)

Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS), Aktualisierung der RAS-W 86 – Entwurf. Herausgabe: Arbeitsgruppe Verkehrsplanung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

FGSV (2000)

Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Ausgabe 2000. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

FGSV (2001)

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Ausgabe 2001, Fassung 2005. Kapitel 6 - Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage. Herausgabe: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

FGSV (2003)

Richtlinien für Lichtsignalanlagen RiLSA - Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr - Teilfortschreibung 2003. Herausgabe: Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

Hoffmann, G.; Zmeck, D. (1982)

Sicherung der Linksabbieger an Lichtsignalanlagen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Hrsg. Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 358. Bonn-Bad Godesberg

Hoffmann, G.; Nielsen, S.-M. (1994)

Beschreibung von Verkehrsabläufen an signalisierten Knotenpunkten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Hrsg. Der Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Heft 693. Bonn-Bad Godesberg

Krebs, H.; Klöckner, J. (1977)

Untersuchung über Unfallraten in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen außerhalb geschlossener Ortschaften. Forschung Straßenbau und Straßenver-

kehrstechnik. Hrsg. Der Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Heft 223. Bonn-Bad Godesberg

Krüger, J. (1985)

Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage in Abhängigkeit von der Anzahl der Phasen. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Wasser und Verkehr.

Meewes, V. (2000)

Straßenverkehrssicherheit – Materialien für Aus- und Fortbildung. Informationen des Institutes für Straßenverkehr Köln (ISK) des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.

Meewes, V. (2003)

Sicherheit von Landstraßen-Knotenpunkten. Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Hefte 4-6.

Mück, J. (2002)

Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Heft 11, S. 613-618.

Schnabel, W. (1975)

Lichtsignalgesteuerter Straßenverkehr – Planung, Entwurf und Betrieb von Straßenknoten mit Lichtsignalanlagen. Transpress VEB Verlag für Straßenwesen Berlin.

Schnabel, W.; Lohse, D. (1997)

Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 1. Verkehrstechnik. – 2., neu bearb. Aufl. – Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin.

Schnabel, W.; Korn, J. (2004)

Die Kapazität von Knotenpunkten nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001) – Teil 1. Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Heft 8, S. 387-393.

Schnabel, W.; Scholz, T.; Pohl, K. (2005)

Sättigungsverkehrsstärken in lichtsignalgesteuerten Knotenpunktzufahrten. Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Heft 10, S. 501-506.

- Scholz, T. (2000)
Verkehrstechnische Studie für den Straßenzug August-Bebel-Straße – Dresdner Straße – Frankenberger Straße mit Anschluss der Palmstraße in Chemnitz. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Professur Straßenverkehrstechnik.
- Scholz, T. (2003)
Ermittlung der Sättigungsverkehrsstärken auf Steigungsstrecken an LSA-Knotenpunkten. Im Auftrag des Straßen- und Tiefbauamtes Dresden. Technische Universität Dresden, Professur Straßenverkehrstechnik (unveröffentlicht).
- Scholz, T. (2004)
Ermittlung von Sättigungsverkehrsstärken an ausgewählten LSA-Knotenpunkten bei unterschiedlichen Bedingungen. Im Auftrag des Straßen- und Tiefbauamtes Dresden. Technische Universität Dresden, Professur Straßenverkehrstechnik (unveröffentlicht).
- Sehm, D. (2005)
Sonderphase für Linksabbieger – Beurteilung der Kriterien für die Verkehrsqualität. Studienarbeit. Technische Universität Dresden, Professur Straßenverkehrstechnik.
- Sturm, P. (1989)
Verkehrssicherheit an plangleichen und teilweise planfreien Knotenpunkten von Außerortsstraßen. Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Wasser und Verkehr.
- StVO (1970)
Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) in der Fassung vom 16. November 1970 (BGBl. I, S. 1565), zuletzt geändert durch Art. 3 des Gesetzes zur Änderung des Fernstraßenbaufinanzierungsgesetzes und straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften vom 01. September 2002 (BGBl. I, S. 3444).
- TRB Transportation Research Board (1994)
Highway Capacity Manual HCM 1994. The National Academies. National Research Council. Washington D. C.
- TRB Transportation Research Board (2000)
Highway Capacity Manual HCM 2000. The National Academies. National Research Council. Washington D. C.
- Voß, H. (1994)
Zur Verkehrssicherheit innerörtlicher Knotenpunkte - Knotenpunkte mit Lichtsignalsteuerung, mit Vorfahrtregelung durch Verkehrszeichen, Kreisverkehrsplätze. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 2, S. 68-72.
- VwV-StVO (1998)
Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) in der Fassung vom 22. Oktober 1998 (BAnz. Nr. 246b vom 31. Dezember 1998, Ber. 1999, S. 947), zuletzt geändert am 18. Dezember 2001 (BAnz. Nr. 242, S. 25513).
- Weinert, A. (2001)
Grenz- und Folgezeitlücken an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum. Schriftenreihe, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Heft 23.
- Wiedemann, R. (1987)
Mehr Leistungsfähigkeit oder mehr „Sicherheit“ an lichtsignalgesteuerten Knoten? Straßenverkehrstechnik. Heft 4, S. 114-117.
- Wu, N. (2003)
Bemessung und Bewertung von Lichtsignalanlagen - Vergleich der neuen Regelwerke HCM 2000 und HBS 2001. Straßenverkehrstechnik. Heft 12, S. 613-623.
- Zibuschka, F. (1979)
Analyse charakteristischer Unfalltypen signal geregelter Knotenpunkte. Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Heft 6, S. 188-190.
- Zibuschka, F. (1980)
Linksabbiegeunfälle an signalgeregelten Kreuzungen. Zeitschrift: Straßenverkehrstechnik, Heft 3, S. 101-103.
- Zwirner, J. (2004)
Entschärfung von Unfallhäufungsstellen. Kolloquium für Fortgeschritten im Straßenwesen – Verkehrssicherheit von Straßen. Vortragsskript, Karlsruhe



Unfallforschung der Versicherer

Wilhelmstraße 43 / 43 G, 10117 Berlin
E-Mail: unfallforschung@gdv.de
Internet: www.udv.de