

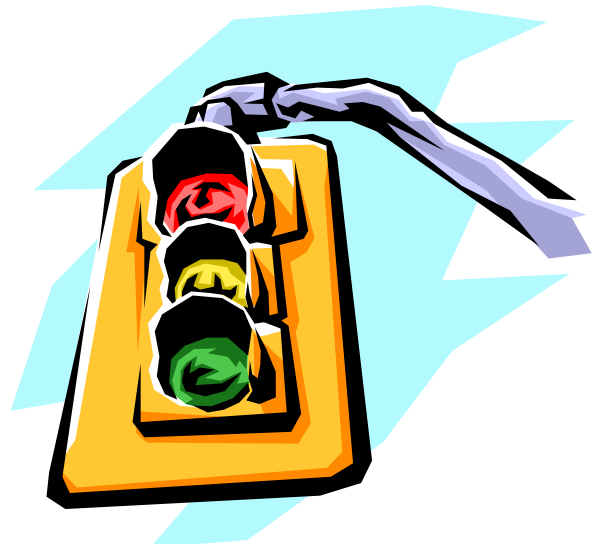


Softwarepraktikum

Teil: Eingebettete Systeme

Sommersemester 2003

Einleitung und Problembeschreibung



Einleitung und Problembeschreibung

Die ES-Teilaufgabe des Softwarepraktikums soll auf Themen der Vorlesung „Entwicklung von Softwaresystemen“ aufbauen und Fähigkeiten im Bereich der Eingebetteten Systeme vertiefen. Im Praktikum sollen die in der Vorlesung eingeführten Prinzipien, Techniken, Methoden und Werkzeuge an einer praktischen Aufgabe erprobt und die Vorteile bei deren Einsatz verdeutlicht werden.

Die Aufgabe soll innerhalb eines Zeitraums von zwölf Wochen bearbeitet werden, wobei alle Phasen des Software-Entwicklungsprozesses durchlaufen werden, auch wenn einige davon nur angedeutet werden können. Zu diesen Phasen gehören: **Analyse**, **Entwurf**, **Implementierung**, **Integration** und **Test**.

Die Größe der **Gruppe**, die gemeinsam eine Aufgabe bearbeitet, ist auf sechs Studierende festgelegt. Innerhalb dieser Gruppe werden **Teilgruppen** von zwei Personen gebildet, die idealerweise zusammen am Rechner arbeiten, wobei abwechselnd einer dem anderen bei der Arbeit über die Schulter schauen sollte. Desweiteren ist die Kommunikation zwischen den einzelnen Teilgruppen innerhalb der ganzen Gruppe wichtig.

1 Inhalt und Ziel der Aufgabe

Ziel der Praktikumsaufgabe ist die Entwicklung einer **Ampelsteuerung** (im Fachjargon **Lichtsignalsteuerung**) für einen Ausschnitt aus dem Straßennetz der Innenstadt von Kaiserslautern. Die Anforderungen an das System aus Kundensicht werden in der **Problembeschreibung** in Abschnitt 2 präzisiert.

Das zu entwickelnde System soll die gesamte Steuerungslogik, eine Benutzerkonsole („**Graphical User Interface**“, **GUI**) und die Ankopplung zum physikalischen System (die **Umgebung** des Eingebetteten Systems) über vorgegebene **Schnittstellen** umfassen (siehe Abbildung 1).

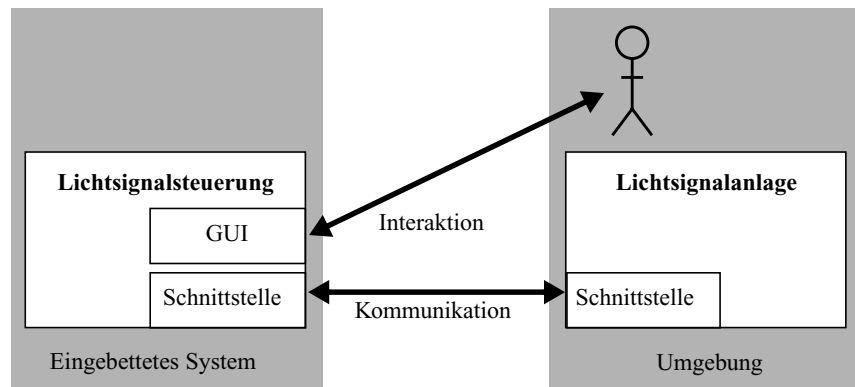


Abbildung 1 Eingebettetes System und Umgebung

Während der Analyse-Phase der Systementwicklung findet zunächst eine Modellierung der **Struktur** und des **Verhaltens** des Systems mit Hilfe der **Modellierungssprache UML (Unified Modeling Language [BRJ99]¹)** statt. Diese Modelle stellen eine Eingabe für die anschließenden Entwurfs- und Implementierungs-Phasen dar. Zusätzlich dienen diese Modelle *nach* der Systementwicklung der Dokumentation und müssen deshalb stets auf dem aktuellen Stand gehalten werden.

1. Die angegebenen Literaturreferenzen finden sich am Ende der jeweiligen Aufgabenbeschreibungen, hier in Abschnitt 4.

Der Entwurf wird hier nicht explizit durchgeführt, da zum Einen die Techniken und eingesetzten Werkzeuge gleich bleiben und zum Anderen das Resultat der Analyse – so wie wir sie durchführen – für die anschließende Implementierung ausreicht.

Die Implementierung erfolgt in der **Programmiersprache Java**. Es wird Wert auf die Dokumentation der implementierten Objekte gelegt, weshalb der Einsatz von **javadoc-Kommentaren** verbindlich ist und die erzeugte Dokumentation zusammen mit ergänzenden **HTML-Dokumenten** abzuliefern ist.

Nach der Integration der Resultate der einzelnen Teilgruppen erfolgt der abschließende Test des Gesamtsystems. Dazu wird die physikalische Umgebung (Lichtsignalanlage) durch einen **Simulator** ersetzt.

Nebenläufigkeit soll auf unterschiedlichen Granularitätsstufen betrachtet werden. Schon während der Analyse werden Objekte als autonome **Prozesse** modelliert. Bei der Implementierung werden diese dann bei Bedarf auf **Threads (Leichtgewichtsprozesse)** abgebildet. Die Kopplung zum Simulator während des Tests erfolgt mittels **JavaRMI**, welches die Realisierung einer verteilten Applikation erlaubt.

2 Dictionary und Problembeschreibung

2.1 Dictionary

In der in Abschnitt 2.2 folgenden Problembeschreibung tauchen Begriffe aus der betrachteten Anwendungsdomäne auf. Diese sollen hier kurz erklärt werden. Eine solche Sammlung von Begriffen und deren Erklärung findet sich bei jeder Entwicklung eines größeren Systems und wird **Dictionary** genannt.

Lichtsignalsteuerung: Die L. steuert die einzelnen →Lichtsignalanlagen, so dass eine sichere und schnelle Führung des Verkehrs gewährleistet ist.

Verkehrsleitsystem: Das Verkehrsleitsystem besteht aus →Lichtsignalanlagen und weiteren technischen Einrichtungen zur Beeinflussung des Verkehrs (z.B. Dauerlichtzeichen, Parkleitsystem).

Lichtsignalanlage: L. entspricht dem verkehrsrechtlichen Begriff Lichtzeichenanlage (siehe §37 StVO). Sie fasst die →Signalgeber eines →Knotenpunkts zusammen.

Signalgeber: Die eigentliche „Ampel“. Der S. stellt einen Aktuator für das Eingebettete System dar. Der S. besitzt typischerweise die Lichtsignale ROT, ROT- und-GELB, GRÜN, GELB und evtl. DUNKEL.

Phase: In einer P. sind die freigegebenen Verkehrsströme zusammengefasst (z.B. geradeaus und rechts, nur links, etc.). Der Übergang zwischen den Phasen erfolgt typischerweise mit einer gewissen Verzögerung, um den Fahrzeugen das Räumen des →Knotenpunkts zu ermöglichen.

Detektor: Der D. liefert ein Signal, wenn ein Fahrzeug in den Erfassungsbereich des D. eintritt. Solange sich das Fahrzeug im Erfassungsbereich befindet wird kein weiteres Signal erzeugt, d.h. ein D. meldet ein Ereignis („Event“). Ein D. ist typischerweise ein Sensor für das Eingebettete System.

Knotenpunkt: Im K. kreuzen sich Straßen oder fließen zusammen.

Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus einem Signallageplan für einen einfachen Knotenpunkt:

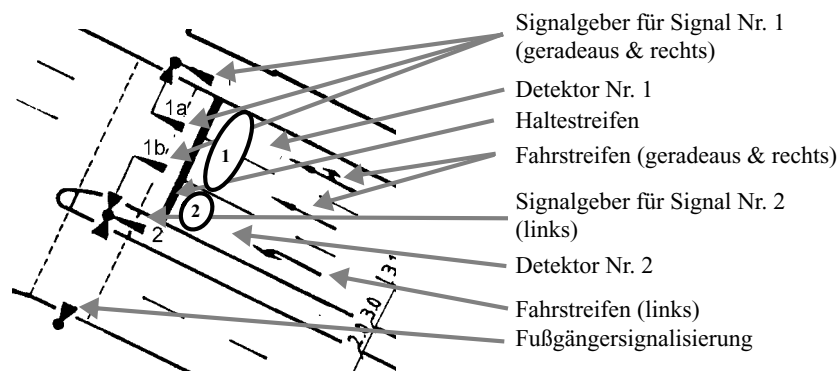


Abbildung 2 Signallageplan

Die Signalgeber einer Kreuzung sind beginnend bei 1 durchnummeriert. Falls die Signalgeber für eine Richtung mehrfach ausgelegt sind, so werden die zusätzlichen Signalgeber in den Plänen mit Kleinbuchstaben bezeichnet. Für die Ansteuerung der Signalgeber genügt es den Signalgeber mit der eindeutigen Nummer (ohne Kleinbuchstaben) anzusprechen. Zusätzlich verfügt jeder Signalgeber über eine

Fehlererkennung, die meldet, falls ein Lichtsignal nicht angezeigt werden kann, was beispielsweise bei Ausfall einer Leuchte auftritt.

Die Detektoren melden ein Fahrzeug auf denjenigen Fahrspuren, für die ein Signalgeber zuständig ist, d.h. bei mehreren Fahrspuren für eine Richtung gibt es daher auch nur einen Detektor. Die Nummerierung der Detektoren entspricht der der Signalgeber.

2.2 Problembeschreibung

Die Stadtverwaltung von Kaiserslautern tritt an Sie heran und möchte, dass Sie (als aufstrebende Informatikerinnen und Informatiker) ein Verkehrsleitsystem für die Innenstadt von Kaiserslautern entwickeln. Besonders die Verkehrsführung in den Knotenpunkten im Bereich der Fruchthalle stellt sich auf Grund von Verkehrsmessungen als unbefriedigend heraus. Die Stadtverwaltung liefert Ihnen die folgende Problembeschreibung:

Lichtsignalsteuerung für die Burg-, Fruchthall- und Spittelstraße im Bereich der Fruchthalle:

Ausgangspunkt für die Entwicklung der Lichtsignalsteuerung sollen die existierenden Lichtsignalanlagen (mit den Nummern 7, 8, 9, 10 und 12) sein. Pläne sind beigelegt (siehe). Diese enthalten auch detaillierte Signallagepläne für die einzelnen Lichtsignalanlagen.

Das System soll die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Die Signalgeber müssen so geschaltet werden, dass es auf keinen Fall zur gleichzeitigen Freigabe konfliktionärer Verkehrsströme kommt.
- Die Dauer des ROT-Signals jedes einzelnen Signalgebers darf 1,5 Minuten nicht überschreiten, wenn kein Fahrzeug wartet.
- Die Lichtsignalanlage 8 soll mindestens alle 2,5 Minuten für die Dauer von 30 Sekunden auf ROT geschaltet werden, um Fußgängern das Überqueren der Kreuzung zu ermöglichen.
- Der Verkehrsdurchsatz (d.h. die Anzahl der Fahrzeuge, die durch die beeinflussten Straßenbereiche geführt werden) und die durchschnittliche Wartezeit (d.h. die Zeit, in der ein Fahrzeug auf GRÜN warten muss oder in einer Schlange steht) sollen optimiert werden.

- Auf den Hauptverkehrsschienen (die Fruchthallstraße von West nach Ost, die Burgstraße von Ost nach West und die Spittelstraße in beide Richtungen) soll das Konzept der „Grünen Welle“ realisiert werden.
- Das Verkehrsleitsystem soll auch bei Fehlfunktion einzelner Signalgeber oder ganzer Lichtsignalanlagen sicher sein und weitestgehend funktionsfähig bleiben.
- Über eine einfache grafische Benutzerkonsole müssen Verkehrsstatistiken abgerufen, Fehlerzustände angezeigt und Eingriffe in die Steuerung vorgenommen werden können.

Desweiteren sollen die Straßenverkehrsordnung (siehe 3.1, besonders §37) und die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA, siehe 3.3), falls nicht widersprüchlich zu obigen Punkten, zu Grunde gelegt werden.

3 Unterlagen

3.1 Auszug aus der Straßenverkehrs-Ordnung

§37 Ampeln und andere Lichtzeichen

(1) Lichtzeichen gehen Vorrangregeln, vorrangregelnden Verkehrsschildern und Fahrbahnmarkierungen vor.

(2) Wechsellichtzeichen haben die Farbfolge Grün-Gelb-Rot-Rot und Gelb (gleichzeitig)-Grün. Rot ist oben, Gelb in der Mitte und Grün unten.

1. An Kreuzungen bedeuten:

Grün: „Der Verkehr ist freigegeben“.

Er kann nach den Regeln des §9 abbiegen, nach links jedoch nur, wenn er Schienenfahrzeuge dadurch nicht behindert.

Grüner Pfeil: „Nur in Richtung des Pfeiles ist der Verkehr freigegeben“.

Ein grüner Pfeil links hinter der Kreuzung zeigt an, daß der Gegenverkehr durch Rotlicht angehalten ist und daß Linksabbieger die Kreuzung in Richtung des grünen Pfeils ungehindert befahren und räumen können.

Gelb ordnet an: „Vor der Kreuzung auf das nächste Zeichen warten“.

Keines dieser Zeichen entbindet von der Sorgfaltspflicht.

Rot ordnet an: „Halt vor der Kreuzung“. Nach dem Anhalten ist das Abbiegen nach Rechts auch bei Rot erlaubt, wenn rechts neben dem Lichtzeichen Rot ein Schild mit grünem Pfeil auf schwarzem Grund (Grünpfeil) angebracht ist. Der Fahrzeugführer darf nur aus dem rechten Fahrstreifen abbiegen. Er muß sich dabei so verhalten, daß eine Behinderung oder Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer, insbesondere des Fußgänger- und Fahrzeugverkehrs der freigebenden Verkehrsrichtung, ausgeschlossen ist.

Schwarzer Pfeil auf Rot ordnet das Halten, schwarzer Pfeil auf Gelb das Warten nur für die angegebene Richtung an.

Ein einfacher Signalgeber mit Grünpfeil zeigt an, daß bei Rot für die Geradeaus-Richtung nach rechts abgebogen werden darf.

2. An anderen Straßenstellen, wie an Einmündungen und an Markierungen für den Fußgängerverkehr, haben die Lichtzeichen entsprechende Bedeutung.

3. Lichtzeichenanlagen können auf die Farbfolge Gelb-Rot beschränkt sein.

4. Für jeden von mehreren markierten Fahrstreifen (Zeichen 295, 296 oder 340) kann ein eigenes Lichtzeichen gegeben werden. Für Schienenbahnen können besondere Zeichen, auch in abweichenden Phasen, gegeben werden; das gilt auch für Linienomnibusse und Taxen, wenn sie einen vom übrigen Verkehr freigehaltenen Verkehrsraum benutzen.

5. Gelten die Lichtzeichen nur für Fußgänger oder nur für Radfahrer, so wird das durch das Sinnbild eines Fußgängers oder eines Fahrrads angezeigt. Für Fußgänger ist die Farbfolge Grün-Rot-Grün; für Radfahrer kann sie so sein.

Wechselt Grün auf Rot, während Fußgänger die Fahrbahn überschreiten, so haben sie ihren Weg zügig fortzusetzen.

6. Radfahrer haben die Lichtzeichen für Fußgänger zu beachten, wenn eine Radwegfurt an eine Fußgängerfurt grenzt und keine gesonderten Lichtzeichen für Radfahrer vorhanden sind.

(3) Dauerlichtzeichen über jedem Fahrstreifen lassen den Verkehr nur in der einen oder anderen Richtung zu.

Rote gekreuzte Schrägbalken ordnen an:

„Der Fahrstreifen darf nicht benutzt werden, davor darf nicht gehalten werden“.

Ein grüner, nach unten gerichteter Pfeil bedeutet:

„Der Verkehr auf dem Fahrstreifen ist freigegeben“.

Ein gelb blinkender, schräg nach unten gerichteter Pfeil ordnet an:

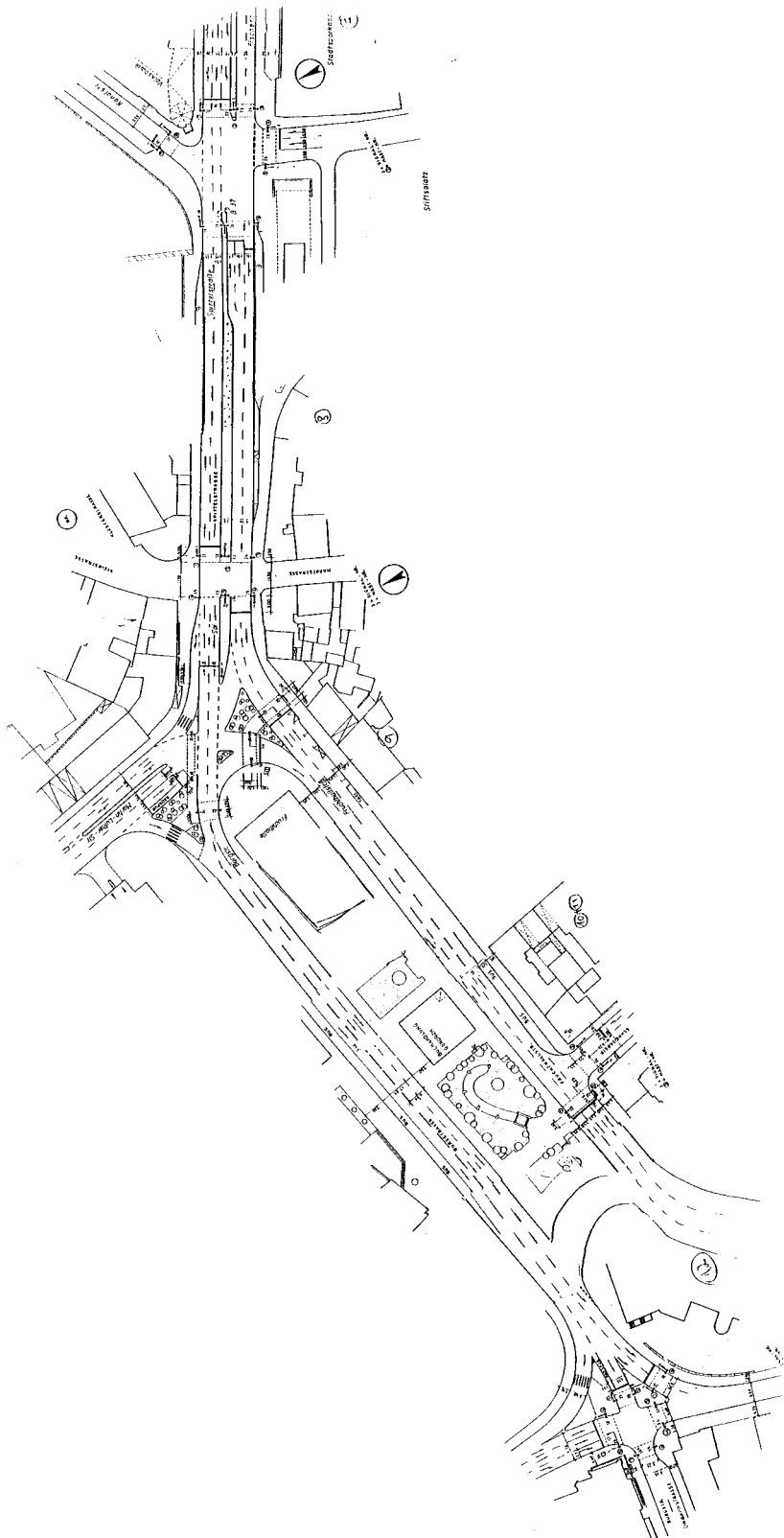
„Fahrstreifen in Pfeilrichtung wechseln“.

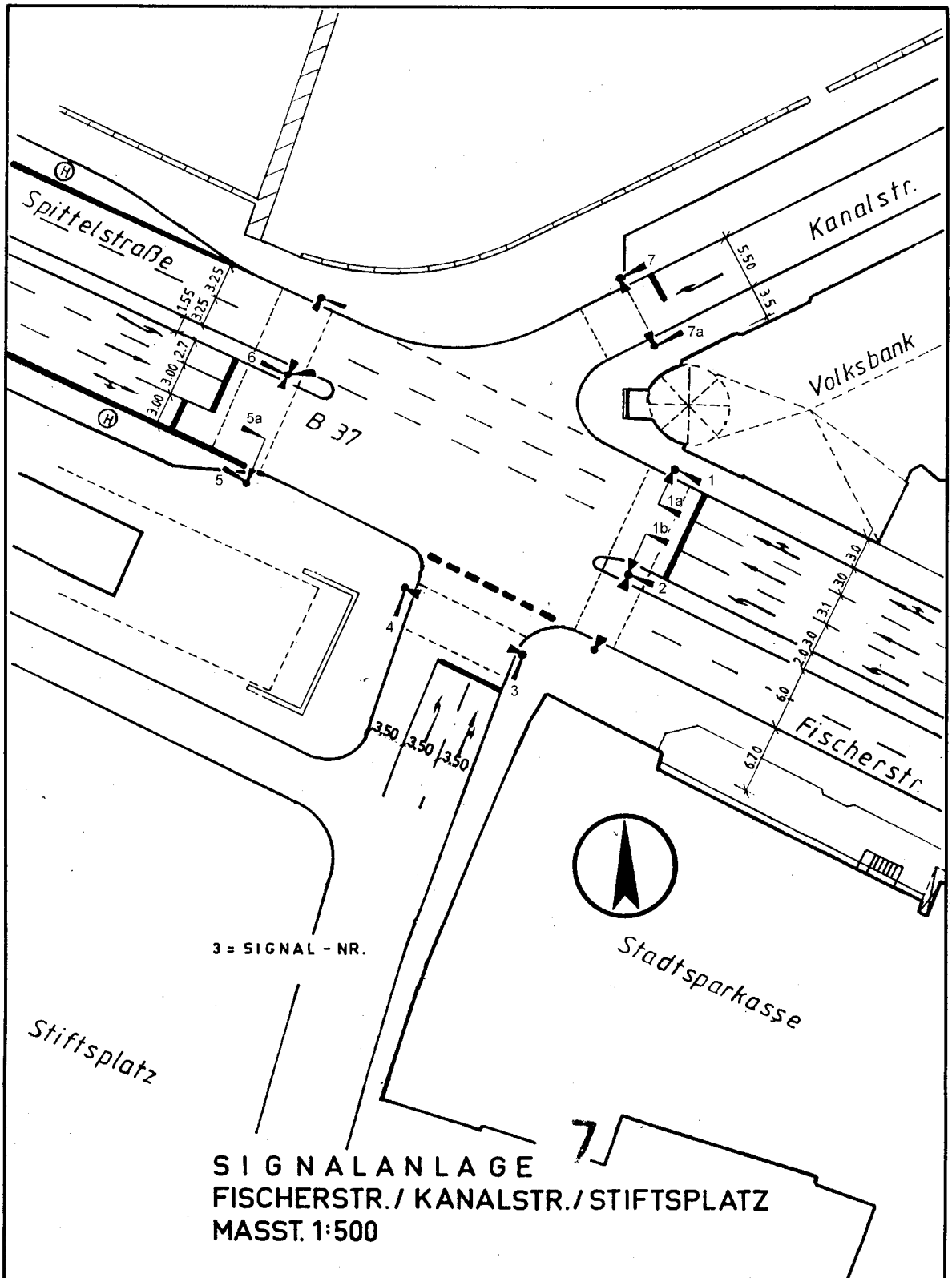
(4) Wo Lichtzeichen den Verkehr regeln, darf nebeneinander gefahren werden, auch wenn die Verkehrsdichte das nicht rechtfertigt.

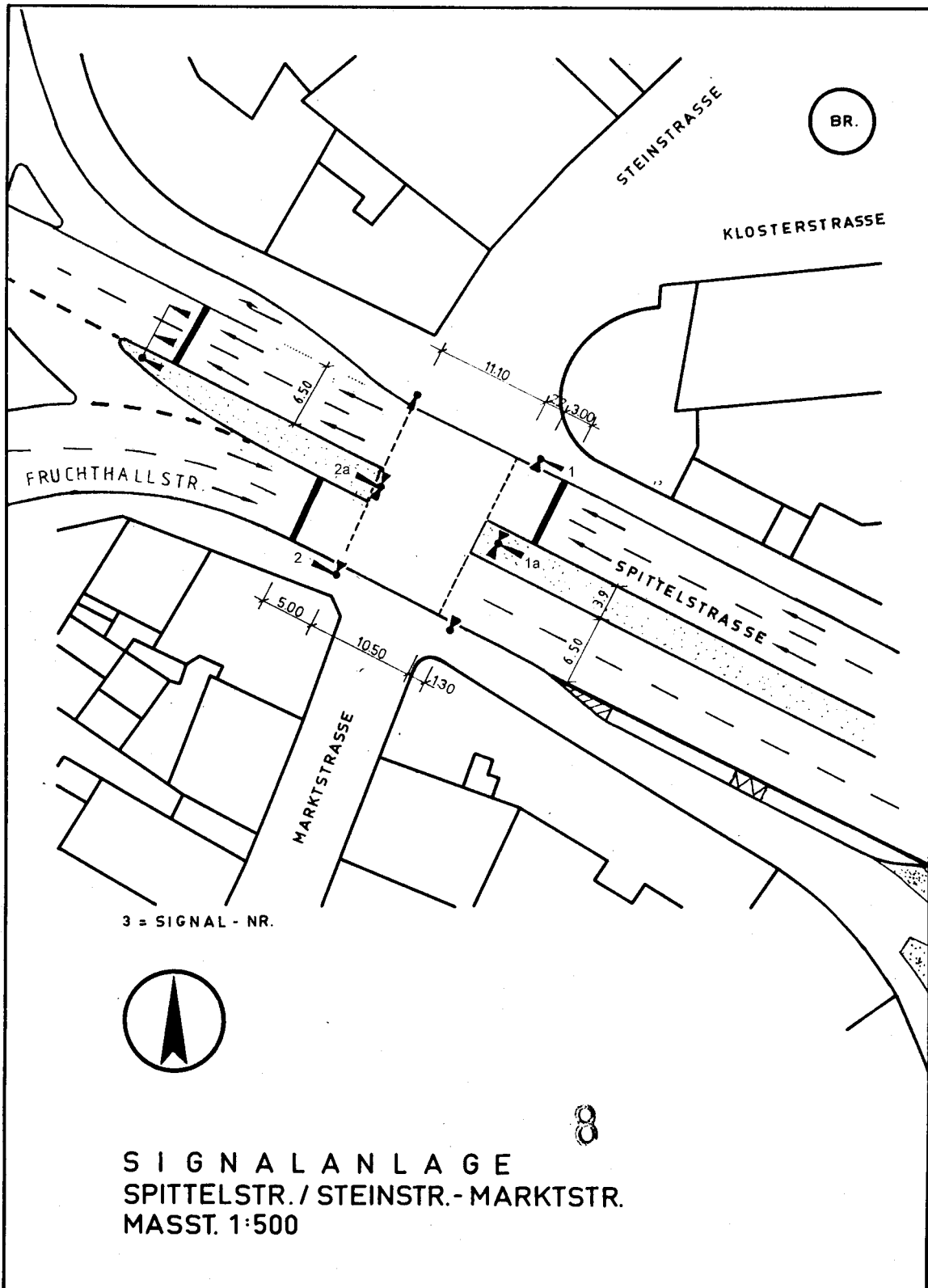
Quelle: <http://www.datenschutz-berlin.de/gesetze/strasse/stvo.htm>

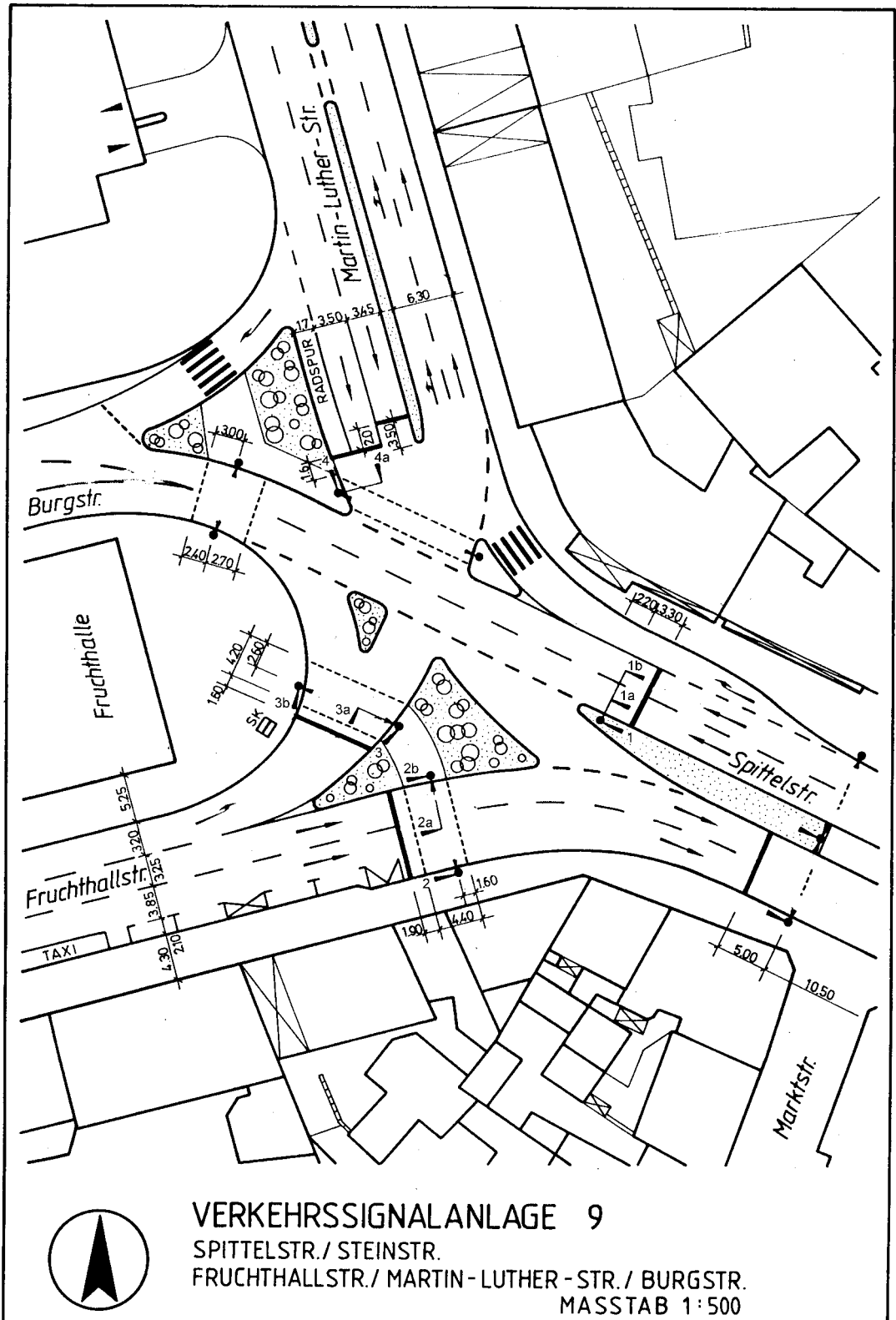
3.2 Signallagepläne

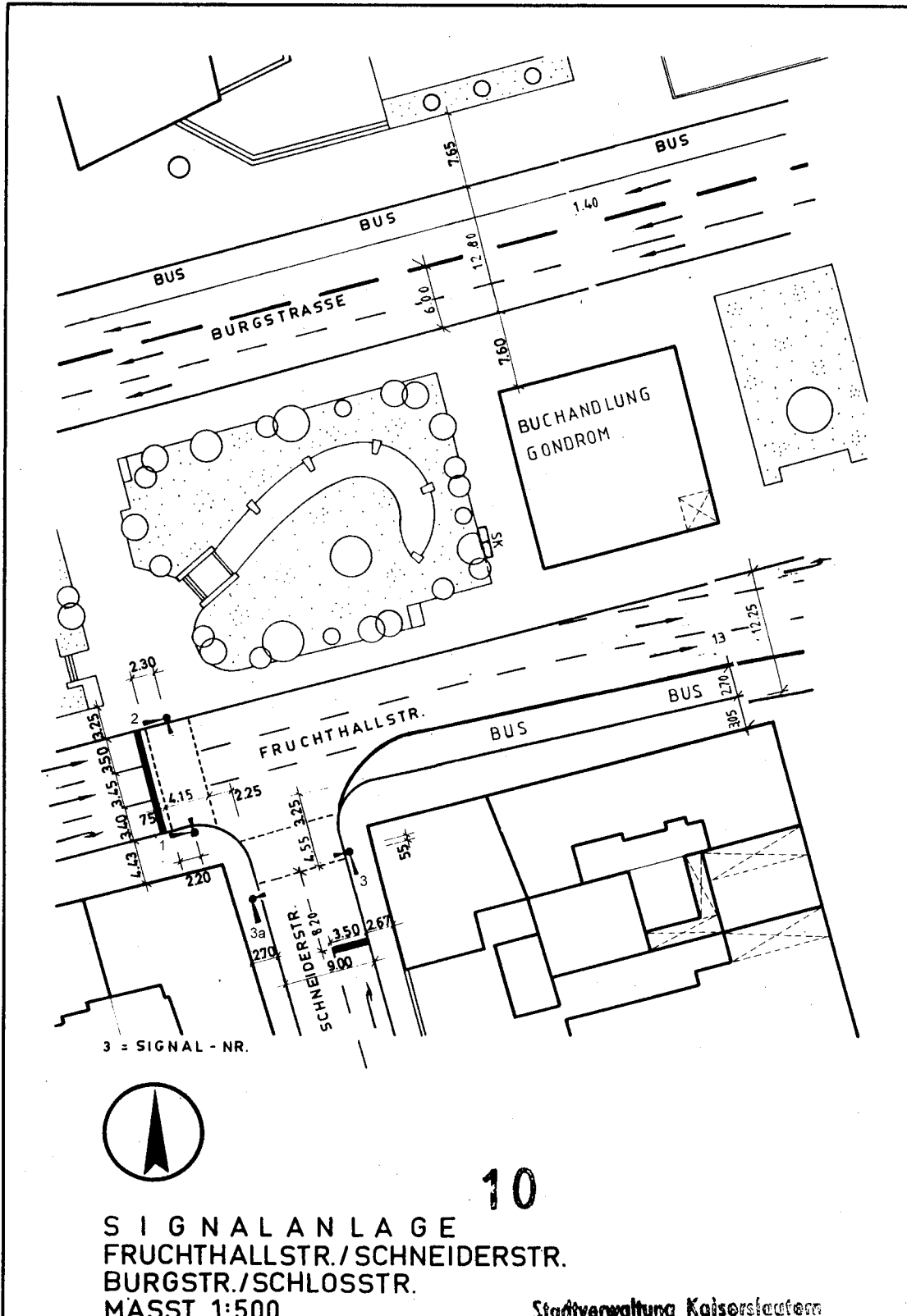
Im Folgenden werden die Signallagepläne der Lichtsignalanlagen der Innenstadt von Kaiserslautern dargestellt. Zunächst wird eine Übersicht über die Lage der einzelnen Ampeln gegeben.

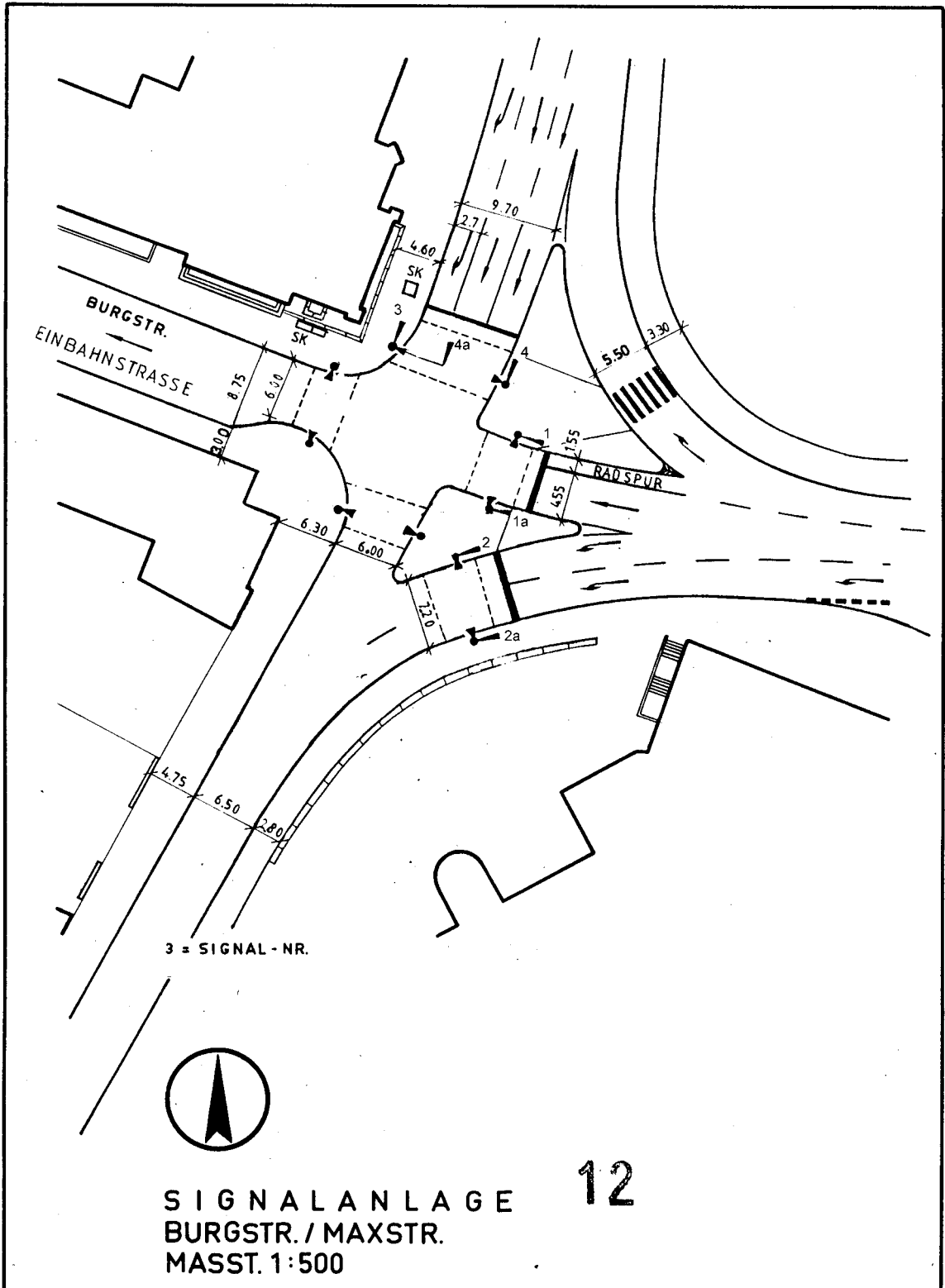












3.3 Auszug aus der RiLSA

In diesem Abschnitt werden einige wichtige Stellen aus den Richtlinien für Lichtsignalanlagen ([FSV92]) zitiert.

0. Einleitung

Die Lichtsignalsteuerung ist eine wichtige betriebliche Maßnahme für die Abwicklung des Straßenverkehrs, insbesondere da die Bereitstellung ausreichenden Straßenraums trotz zunehmender Verkehrsnachfrage kaum noch möglich ist.

Da mit einer Lichtsignalanlage*) unmittelbar in den Verkehrsablauf eingegriffen wird, indem Verkehrsströme mit gemeinsamen Konfliktflächen abwechselnd angehalten oder freigegeben werden, müssen Lichtsignalanlagen besonders sorgfältig entworfen, gebaut und betrieben werden.

Die Richtlinien enthalten grundlegende verkehrstechnische Bestimmungen und Empfehlungen für die Einrichtung und für den Betrieb von Lichtsignalanlagen und stellen eine Fortschreibung der Richtlinien von 1977/1981 dar. Inzwischen gewonnene Erkenntnisse und Erfahrungen der Praxis, unterstützt durch verkehrstechnische Untersuchungen und durch Ergebnisse verkehrswissenschaftlicher Forschungen, sind in die vorliegende Neufassung eingeflossen. Sie stellen den heutigen Stand der Technik dar.

Von den Anwendern dieser Richtlinien wird erwartet, daß sie im Sinne der allgemein angestrebten Vereinheitlichung die angegebenen Grundlagen und Grundsätze beachten. Da jedoch nicht alle in der Praxis auftretenden Fragen durch Richtlinien vollständig erfaßt werden können und der technische Fortschritt sowie gegebenenfalls besondere örtliche Gegebenheiten im Einzelfall angemessen zu berücksichtigen sind, muß davon ausgegangen werden, daß Fachleute aufgrund ihrer Sachkenntnis und Erfahrung bereit und in der Lage sind, falls erforderlich, in Eigenverantwortung von den fixierten Grundlagen und Grundsätzen abzuweichen. Die Richtlinien enthalten dementsprechend zu einer Reihe von Fragen Empfehlungen und Vorschläge, die einen Rahmen für eigenständiges ingenieurmäßiges Handeln abstecken.

*) In diesen Richtlinien wird einheitlich der Begriff „Lichtsignalanlage“ verwendet. Er entspricht dem verkehrsrechtlichen Begriff „Lichtzeichenanlage“.

Lichtsignalanlagen sind Verkehrseinrichtungen im Sinne der Straßenverkehrs-Ordnung (StVO).

Für Einrichtung und Betrieb von Lichtsignalanlagen sind neben diesen vorliegenden Richtlinien vor allem folgende Verordnungen, Bestimmungen und Richtlinien zu beachten:

- Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) und Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO).

Die StVO gibt in Teil II (§§ 36 bis 43) die Bedeutung der Verkehrszeichen, Lichtsignale (Lichtzeichen) und Verkehrseinrichtungen an. Die VwV-StVO enthält Bestimmungen für die Verwaltung zur Durchführung der StVO.

- VDE-Bestimmung für Straßenverkehrs-Signalanlagen (SVA). DIN VDE 0832.

Gegenstand der VDE-Bestimmung sind elektrotechnische Vorschriften über Schutzmaßnahmen, Baubestimmungen, Prüfung und Unterhaltung von Lichtsignalanlagen des Straßenverkehrs.

- Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOSTrab).

Die BOSTrab faßt die Vorschriften über den Straßenbahnbau und Straßenbahnbetrieb, die Signalordnung und die Durchführungsbestimmungen in einer Verordnung zusammen.

- Richtlinien über Abhängigkeiten zwischen der technischen Sicherung von Bahnübergängen und der Verkehrsregelung an benachbarten Straßenkreuzungen und -einführungen (BÜSTRA).

Die BÜSTRA enthalten Vorschriften zur Abstimmung der Signalsteuerung an Knotenpunkten im Bereich von Bahnübergängen mit der Sicherung des Bahnübergangs.

1. Grundsätze

1.1 Allgemeines

Der Entwurf einer Lichtsignalanlage umfaßt die Wahl des Steuerungsverfahrens, die verkehrstechnische Beschreibung der Steuerung, die Berechnung der Signalprogrammelemente sowie den straßenverkehrstechnischen Entwurf des Knotenpunkts, eines Straßenzugs oder eines Netzteils einschließlich der zugehörigen verkehrslenkenden Maßnahmen.

Die einzelnen Komponenten wie z. B. die Ausbildung des Knotenpunkts, die Einteilung der Zufahrten in Fahrstreifen, die Führung der Fußgänger und Radfahrer und die Signalisierung der einzelnen Verkehrsströme sind so aufeinander abzustimmen, daß bei allen vorkommenden Belastungen und Betriebsbedingungen die Voraussetzungen für einen sicheren Verkehrsablauf gegeben sind. Die Gestaltung des Verkehrsraums, die Verkehrsführung und die Signalisierung sollen eine Einheit bilden.

Auf Außerortsstraßen werden im allgemeinen nur einzelne Kreuzungen und Einmündungen signalisiert, es können sich aber auch Verkehrsführungen durch Lichtsignalanlagen über längere Strecken ergeben.

In einer Stadt bestimmt die Lichtsignalsteuerung maßgeblich die Verkehrsabwicklung im gesamten Straßennetz. Sie ist damit ein wichtiges Instrument im Rahmen eines übergeordneten Verkehrskonzepts, bei dem Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs, zur sicheren Führung des Fußgänger- und Radverkehrs, zur Bündelung der Kraftfahrzeugströme auf bestimmten Routen usw. ineinandergreifen. Die Umsetzung umfassender Verkehrskonzepte, durch die auf einer höheren Stufe die Art und Menge des in eine Stadt einfließenden Verkehrs, die Rolle des öffentlichen Verkehrs, die Behandlung des Wirtschaftsverkehrs und des ruhenden Verkehrs oder die Luftverschmutzung durch den Verkehr beeinflusst und gesteuert werden sollen, werden unter dem Begriff Verkehrs-System-Management zusammengefaßt. Damit wird zum Ausdruck gebracht, daß die Behandlung der komplexen Verkehrsprobleme eine übergeordnete Aufgabe darstellt und daß es großer organisatorischer Anstrengungen bedarf, die vielfältigen Maßnahmen zu koordinieren. Die Lichtsignalsteuerung nimmt im Verkehrs-System-Management eine wichtige Stellung ein.

1.2 Lichtsignale und Signalfolgen

Lichtsignale sind Lichtzeichen gemäß § 37 StVO. Für Lichtsignale, die den Verkehrsablauf an Kreuzungen, Einmündungen und anderen Straßenstellen steuern, wird verkehrsrechtlich der Begriff „Wechsellichtzeichen“ verwendet.

Lichtsignale für Kraftfahrzeuge haben die Signalfolge*) GRÜN – GELB – ROT – ROT und GELB (gleichzeitig) – GRÜN; in Sonderfällen, in denen Lichtsignalanlagen nur in größeren zeitlichen Abständen in Betrieb genommen werden, ist die Signalfolge DUNKEL – GELB – ROT – DUNKEL erlaubt. Für Linksabbieger kann ein grüner Pfeil links hinter der Kreuzung gezeigt werden, wenn der Gegenverkehr

*) Der verkehrsrechtliche Begriff ist „Farbfolge“.

durch ROT gesperrt ist. In besonderen Fällen kann es ausreichen, den Rechtsabbiegern eine Vorgabezeit nur mit einem einfeldigen Signalgeber mit Grünpfeil anzuzeigen. Kraftfahrzeugsignale gelten für alle übrigen fahrbahnpflichtigen Verkehrsteilnehmer, wenn diese nicht gesondert signalisiert werden.

Lichtsignale für Fußgänger haben die Signalfolge GRÜN – ROT – GRÜN.

Radfahrer können in der Regel ohne besondere Signale zusammen mit dem Kraftfahrzeugverkehr oder mit den Fußgängern geführt werden. Für Radfahrer, die eine gesonderte Signalisierung erhalten, wird dieselbe Signalfolge wie für Kraftfahrzeuge verwendet.

Öffentliche Verkehrsmittel (Stadtbahnen, Straßenbahnen, Linienbusse) erhalten spezielle Lichtsignale mit besonderer Signalfolge nach BOSTrab, wenn sie nicht gemeinsam mit den Lichtsignalen des Kraftfahrzeugverkehrs signalisiert werden.

Zur Warnung vor Gefahren kann gemäß § 38 StVO gelbes Blinklicht eingesetzt werden. Bei Verwendung von Symbolen sind nur die in der StVO genannten schwarzen Sinnbilder im gelben Leuchtfeld zugelassen.

Fahrstreifensignale sind besondere Lichtsignale über den Fahrstreifen einer Fahrbahn, für die verkehrsrechtlich der Begriff „Dauerlichtzeichen“ verwendet wird. Sie dienen der Freigabe (grüner, nach unten gerichteter Pfeil) oder der Sperrung (rote gekreuzte Schrägbalken) von Fahrstreifen einer Straße. Als Übergangssignal wird ein gelbblinkender, schräg nach unten gerichteter Pfeil verwendet. Das Halten vor dem Sperrsignal ist nicht erlaubt.

1.3 Kriterien für den Einsatz von Lichtsignalanlagen und erzielbare Wirkungen

1.3.1 Allgemeine Hinweise

Lichtsignalanlagen werden in der Regel zur Erhöhung der Verkehrssicherheit oder zur Verbesserung der Qualität des Verkehrsablaufs eingerichtet.

Wegen der teilweise zueinander im Widerspruch stehenden Forderungen der einzelnen Verkehrsteilnehmergruppen und wegen der teilweise auftretenden Zielkonflikte können in diesen Richtlinien keine quantitativen Einsatzkriterien für die Einrichtung von Lichtsignalanlagen angegeben werden. Es existieren jedoch Verfahrensvorschläge, die u. a. Kriterien wie

- die Unfallanzahl und die Unfallschwere,
- die Sichtverhältnisse in den Knotenpunktzufahrten,
- das Schutzbedürfnis der Fußgänger und Radfahrer,
- die Verkehrsstärken des Kraftfahrzeugverkehrs in Haupt- und Nebenrichtung,
- die Verkehrsabwicklung für öffentliche Verkehrsmittel,
- den Verkehrsablauf für Fußgänger und Radfahrer,
- die Führung des Kraftfahrzeugverkehrs im Straßennetz,

- den Schutz von Straßennetzteilen vor Überlastungen und
 - die Umweltbeeinträchtigung
- zur Bildung von Prioritätenreihenfolgen benutzen.

Auch die besonderen Bedürfnisse von Polizei- sowie von Rettungs- und Einsatzfahrzeugen können eine Lichtsignalanlage erforderlich machen.

Zu beachten ist, daß die Lichtsignalsteuerung auch Einfluß auf den Kraftstoffverbrauch, auf die Abgas- und Lärmemission des Kraftfahrzeugverkehrs und auf die innerörtlichen Geschwindigkeiten des Kraftfahrzeugverkehrs hat.

Bevor die Einrichtung einer Lichtsignalanlage erwogen wird, ist zu prüfen, ob Verkehrssicherheit oder Verkehrsablauf nicht durch verkehrslenkende Maßnahmen im Straßennetz verbessert werden können, z. B. durch

- die Schaffung von Einrichtungsstraßen,
- das Abhängen einmündender Straßen,
- das ständige oder zeitlich begrenzte Verbot von Abbiegefahrten,

oder durch verkehrsregelnde Maßnahmen oder durch den Umbau eines Knotenpunkts, z. B. durch Einrichtung eines Kreisverkehrsplatzes oder durch den Bau von Mittelinseln.

Im übrigen wird empfohlen abzuschätzen, ob die durch eine Lichtsignalanlage erwarteten Verbesserungen der Verkehrssicherheit nicht durch Unfälle, die infolge der Einrichtung der Lichtsignalanlage eintreten können, zu einer Verschlechterung der Situation führen.

1.3.2 Verkehrssicherheit

Die Einrichtung einer Lichtsignalanlage kommt in Frage, wenn sich wiederholt Unfälle ereignet haben, die durch eine Lichtsignalsteuerung hätten vermieden werden können, und wenn sich andere Maßnahmen (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen, Überholverbote oder bauliche Überquerungshilfen für Radfahrer und Fußgänger) als wirkungslos erwiesen haben oder keinen Erfolg versprechen. Das ist vor allem der Fall bei:

Häufung von Vorfahrtunfällen

- wegen zu großer Verkehrsstärke oder zu hoher Geschwindigkeiten auf der übergeordneten Straße,
- infolge unzureichender Sichtverhältnisse am Knotenpunkt oder mangelnder Begreifbarkeit der Vorfahrtregelung, wenn anders keine wirksame Erhöhung der Verkehrssicherheit erreichbar ist,
- infolge zu großer Verkehrsstärke in einer untergeordneten Knotenpunktzufahrt im Verhältnis zu derjenigen auf der übergeordneten Straße;

Häufung von Unfällen zwischen Linksabbiegern und Gegenverkehr oder

Häufung von Unfällen zwischen Kraftfahrzeugen und überquerenden Radfahrern oder Fußgängern.

Bei Gefährdung besonders schutzbedürftiger Personen (z. B. Radfahrer, Fußgänger, ältere Menschen, Behinderte und Kinder), die eine Straße regelmäßig an einer bestimmten Stelle überqueren, oder wenn in zumutbarer Entfernung keine gesicherte Überquerung möglich ist, soll unabhängig von der Anzahl der schutzbedürftigen Personen oder von der Unfallsituation eine Lichtsignalanlage eingerichtet werden, wenn anders ein Schutz nicht erreichbar ist.

Beim Neubau oder Umbau von Straßen sind Lichtsignalanla-

gen dann vorzusehen, wenn nach den genannten Umständen eine Gefährdung des Verkehrs zu erwarten ist.

Bei der Betrachtung der Sicherheit von Knotenpunkten an anbaufreien Straßen (innerorts und außerorts) ist der Einfluß der verhältnismäßig hohen Geschwindigkeiten zu beachten. Aus den hohen Geschwindigkeiten ergeben sich besondere Gefahren für die Fußgänger und Radfahrer beim Überqueren der Fahrbahn und für die wartepflichtigen Fahrzeuge. Der Einsatz von Lichtsignalanlagen kann auf solchen Straßen die Sicherheit des Verkehrsablaufs erhöhen.

Plangleiche Kreuzungen und Einmündungen im Zuge von Straßen mit vier oder mehr durchgehenden Fahrstreifen sollen außerorts Lichtsignalanlagen erhalten.

Die Auswirkungen der Lichtsignalsteuerung auf die Verkehrssicherheit sollten nach angemessener Zeit, z. B. nach einem Jahr, durch eine Unfallanalyse überprüft werden.

1.3.3 Qualität des Verkehrsablaufs

Wenn an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage Verkehrsströme nicht mehr ohne erhebliche Zeitverluste bewältigt werden können, kann eine Lichtsignalanlage in Verbindung mit einer entsprechenden baulichen Gestaltung des Knotenpunkts eine Verbesserung des Verkehrsablaufs bewirken. Die Einrichtung einer Lichtsignalanlage kann auch im Zusammenhang mit Überlegungen erforderlich werden, die im Interesse einer zweckmäßigen Verkehrsführung im Straßennetz über die Betrachtung des Verkehrsablaufs am einzelnen Knotenpunkt hinausgehen.

Der Verkehrsablauf ist am einzelnen Knotenpunkt als Verbesserungsbedürftig anzusehen, wenn

- sich in mindestens einer wartepflichtigen Zufahrt oder durch Linksabbieger in der Hauptrichtung während bestimmter Zeiten regelmäßig ein großer Stau bildet; ist der Stauraum durch die Länge von Abbiegestreifen oder durch benachbarte Knotenpunkte begrenzt, so ist Stau über den verfügbaren Stauraum hinaus zu vermeiden,
- einzelne wartepflichtige Kraftfahrzeuge regelmäßig unzumutbar lange (z. B. länger als zwei bis drei Minuten) warten müssen,
- einzelne Fußgänger und Radfahrer regelmäßig über eine bestimmte Geduldsschwelle (z. B. länger als 60 s) hinaus warten müssen.

Wenn öffentliche Verkehrsmittel beim Kreuzen von bevorrechtigten Straßenzügen oder beim Abbiegen bzw. Einbiegen an Knotenpunkten behindert werden, so kann eine Signalsteuerung zugunsten der öffentlichen Verkehrsmittel in Frage kommen.

Zum Schutz bestimmter Netzbereiche vor Überlastung können an geeigneten Stellen Lichtsignalanlagen als Pfortner- oder Dosieranlagen eingerichtet werden, um über die Beeinflussung der Zuflußbelastung und über eine Stauverlagerung zu erreichen, daß die nichtverkehrlichen Nutzungen und Funktionen dieser Netzbereiche nicht beeinträchtigt werden (Stauverlagerung als städtebauliches Kriterium). Dabei sind jedoch die Auswirkungen des Staus auf die Verkehrssicherheit zu prüfen.

Um verkehrstechnisch kritische Streckenabschnitte oder Netzbereiche vor Überstauungen zu schützen, kann es sinnvoll sein, die Zuflußbelastungen mit Hilfe von Lichtsignalanlagen zu beschränken (Stauverlagerung als verkehrstechnisches Kriterium).

Um eine Überlastung von Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen zu vermeiden, kann die Zufahrt durch Lichtsignalanlagen gesteuert werden (Zufahrtskontrolle). Um verkehrgefährdenden Stau zu vermeiden, kann die Ausfahrt durch eine Lichtsignalanlage gesteuert werden (Stauraumüberwachung).

Wenn auf Straßen mit mehr als zwei Fahrstreifen die Belastung der beiden Fahrrichtungen stark unterschiedlich und wechselnd ist, kann sich die Einrichtung eines Richtungswechselbetriebs durch Fahrstreifensignale empfehlen.

Der Verkehrsablauf an vorhandenen Knotenpunkten ist durch direkte Beobachtungen oder Messungen zu beurteilen. Zur Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten, die neu gebaut oder umgebaut werden oder an denen die Lichtsignalsteuerung verändert wird, sollten Berechnungsverfahren angewendet werden, die Gütekriterien wie z. B. Wartezeiten, Anzahl der Halte oder Reisezeiten berücksichtigen.

1.3.4 Kraftstoffverbrauch

Lichtsignalanlagen werden primär nicht aus Gründen der Kraftstoffeinsparung eingerichtet. Wenn allerdings Lichtsignalanlagen eingerichtet oder bestehende Anlagen umgerüstet werden, kann dabei auch der Gesichtspunkt der Verringerung des Kraftstoffverbrauchs berücksichtigt werden.

Grundsätzlich verringern alle Steuerungsverfahren den Kraftstoffverbrauch, die den Verkehrsfluß auf einem gleichmäßigen Geschwindigkeitsniveau im Bereich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit halten. Bei der Struktur der Signalprogramme ist die Zweiphasensteuerung zu bevorzugen, solange dadurch die Anzahl der Halte und die Wartezeiten minimiert werden. Es sollte eine größere als die von der Verkehrsbelastung her erforderliche Umlaufzeit gewählt werden. Schalt- und Gültigkeitszeiten der Signalprogramme, die an die Schwankungen des Verkehrsablaufs angepaßt sind, tragen ebenfalls zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bei.

Als flankierende Maßnahmen sind plausible Geschwindigkeitsempfehlungen innerhalb Grüner Wellen und die Einrichtung von Signaltrichtern zu nennen.

Durch zeitweises Abschalten einzelner Lichtsignalanlagen in verkehrsschwachen Zeiten kann nur geringfügig Kraftstoff eingespart werden.

1.3.5 Abgasemissionen

Generell führen alle Maßnahmen der Lichtsignalsteuerung, die den Kraftstoffverbrauch verringern, auch zu einer Reduzierung der meisten Abgaskomponenten. Insbesondere wirken sich eine geringe Anzahl der Halte und eine gleichmäßige Fahrt über mehrere Knotenpunkte positiv auf die Abgasemissionen aus. Dies ist insbesondere im Umfeld von Knotenpunkten mit starken Fußgänger- und Radverkehrsströmen und mit intensiver Randnutzung bedeutsam.

Das Abschalten der Motoren vor Lichtsignalanlagen führt nur bei langen Abschaltzeiten zu einer positiven Abgasbilanz zwischen der Reduzierung der Emissionen infolge des Abschaltens und eines vergrößerten Schadstoffausstoßes infolge des Wiederanlassens. Dabei verhalten sich die einzelnen Abgaskomponenten unterschiedlich. Erst bei Rotzeiten von mehr als 50 bis 60 s werden in einer Gesamtbetrachtung ausreichend lange Abschaltzeiten zur Reduzierung von

Abgasemissionen erreicht, wohingegen Kraftstoff schon bei deutlich kürzeren Abschaltzeiten eingespart werden kann.

1.3.6 Lärmemissionen

Für die Lärmemissionen ist bei gleichen Randbedingungen neben dem Fahrverhalten und dem Geschwindigkeitsniveau in der Annäherung an einen Knotenpunkt auch die Art der Lichtsignalsteuerung von Bedeutung. Die Reduzierung der Anzahl der Halte und die Verminderung starker Verzögerungen im Annäherungsbereich sowie die dadurch bedingte Verminderung anschließender Beschleunigungsvorgänge (vor allem der Lkw) können zu einer meßbaren Senkung des Mittelwerts führen, insbesondere bei geringen Verkehrsbelastungen (z. B. in der Nacht). Deutliche Unterschiede bei den Lärmemissionen aufgrund verschiedener Steuerungsverfahren konnten bisher jedoch nicht nachgewiesen werden.

1.3.7 Ausgleich von Zielkonflikten

Die Ziele der Lichtsignalsteuerung werden in erster Linie durch die Bedürfnisse, Interessen und Forderungen der einzelnen Verkehrsteilnehmergruppen und der betroffenen Anlieger bestimmt. Da sowohl die Fußgänger, die Radfahrer, die Betreiber und die Fahrgäste öffentlicher Verkehrsmittel als auch die Kraftfahrer jeweils für sich fordern, daß durch die Lichtsignalanlage ein sicherer, zügiger und angenehmer Verkehrsablauf gewährleistet wird, kommt es häufig zu Zielkonflikten, weil die für sich berechtigten Vorstellungen der einzelnen Gruppen in der Regel nicht gleichzeitig erfüllt werden können. Auch zwischen den angestrebten Wirkungen im Hinblick auf eine hohe Verkehrssicherheit, eine gute Qualität des Verkehrsablaufs, niedrigen Kraftstoffverbrauch und möglichst geringe Umweltbeeinträchtigung durch Abgas- und Lärmemissionen kann es zu Konflikten kommen.

Beim Entwurf der Lichtsignalsteuerung sind alle Verkehrsteilnehmergruppen und die betroffenen Anwohner zu berücksichtigen und konkurrierende Forderungen den Prioritäten entsprechend auszugleichen. Oft sind nur Kompromisse durch geeignete, den Zielkonflikten angemessene Maßnahmenkombinationen möglich.

1.4 Zeitweises Abschalten von Lichtsignalanlagen

Es ist vom Grundsatz auszugehen, daß Lichtsignalanlagen in der Regel ununterbrochen (Tag und Nacht) in Betrieb zu halten sind. Auch in verkehrsschwachen Zeiten sollte zur Verringerung der Emissionen und der Wartezeiten nur dann abgeschaltet werden, wenn der Grund, der zur Errichtung der Lichtsignalanlage führte, während bestimmter Zeiten entfällt und wenn vorher eingehend geprüft wurde, daß auch bei abgeschalteter Lichtsignalanlage ein sicherer Verkehrsablauf möglich ist bzw. durch das Abschalten keine anderen Gefahren entstehen.

Unfalluntersuchungen haben gezeigt, daß eine durch das Abschalten deutlich erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit besteht. Dies trifft besonders zu für Einbiegen/Kreuzen-Unfälle. Selbst für die Anlagen, die beim zeitweisen Abschalten für längere Zeit unfallfrei bleiben, ergibt sich bei Betrachtung über mehrere Jahre aus einer solchen erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit die Erwartung für Unfälle. Die entstehenden volkswirtschaftlichen Verluste können dadurch

deutlich höher liegen als die bewertbaren Einsparungen und eventuelle Nutzen im Hinblick auf die Nachtruhe von Anwohnern und die Flüssigkeit des Verkehrs.

Unter Abwägung vorliegender Erkenntnisse zur Verkehrssicherheit nachts abgeschalteter Lichtsignalanlagen und der sonstigen Aspekte beim Abschalten von Lichtsignalanlagen sollen nur solche Anlagen zum Abschalten in Betracht gezogen werden, bei denen in den Abschaltzeiten ein Sicherheitsbedürfnis eindeutig nicht mehr besteht. In allen übrigen Fällen sollte wegen der erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit mit der Abschaltung von Lichtsignalanlagen sehr restriktiv verfahren werden. Dabei ist eine sorgfältige Überprüfung eines

jeden Einzelfalles erforderlich. Demzufolge sollen, falls das zeitweise Abschalten einer Lichtsignalanlage beabsichtigt wird, gezielte Untersuchungen durchgeführt und dabei Unfalldaten mehrerer Jahre ausgewertet werden.

Im übrigen wird besonders darauf hingewiesen, daß auch ohne das Abschalten von Lichtsignalanlagen Nachteile der Lichtsignalsteuerung bei schwachem Verkehr durch technische Maßnahmen vermieden werden können, ohne daß die Sicherheitsvorteile der Signalsteuerung aufgegeben werden müssen. Hierzu zählen vor allem Nachtprogramme mit kurzen Umlaufzeiten oder spezielle verkehrsabhängige Steuerungen.

2.3 Signalprogrammstruktur

2.3.1 Phaseneinteilung

2.3.1.1 Allgemeines

Unter einer Phase versteht man denjenigen Teil eines Signalprogramms, während dessen ein bestimmter Grundzustand der Signalisierung unverändert bleibt. Hierbei brauchen die Freigabezeiten für die freigegebenen Ströme nicht zu denselben Zeitpunkten zu beginnen oder zu enden.

Beispiele für Phaseneinteilungen sind im **Anhang A** wiedergegeben.

Bei der Phaseneinteilung sind verträgliche Verkehrsströme und nichtverträgliche Verkehrsströme zu unterscheiden. Verträgliche Verkehrsströme haben – im Gegensatz zu den nichtverträglichen Verkehrsströmen – keine gemeinsamen Konfliktflächen.

Verträgliche Verkehrsströme können in einer Phase zusammengefaßt werden, während nichtverträgliche Verkehrsströme getrennt signalisiert werden müssen, mit Ausnahme nicht gesondert signalisierter Abbiegeströme. Solche Verkehrsströme sind signaltechnisch nicht gesichert. Für sie gelten die Vorrangregeln nach § 9 Abs. 3 und 4 StVO, solange sie mit nichtverträglichen Strömen der entgegenkommenden oder der gleichen Richtung gleichzeitig geführt werden. Nicht gesondert signalisierte Abbiegeströme werden in diesen Richtlinien als bedingt verträgliche Ströme bezeichnet.

Aus der räumlichen Zusammenfassung von Fahrzeugströmen in Fahrstreifen ergeben sich Zwangsbedingungen hinsichtlich der Phaseneinteilung:

Gleichzeitig müssen Fahrzeugströme dann fließen, wenn sie räumlich nicht getrennt sind, z. B. bei einem kombiniert genutzten Fahrstreifen für geradeausfahrende und rechtsabbiegende Kraftfahrzeuge.

Zeitlich nacheinander, d. h. in verschiedenen Phasen, können Fahrzeugströme unterschiedlicher Fahrrichtungen nur dann fließen, wenn sie räumlich getrennt in verschiedenen Fahrstreifen geführt werden, z. B. geradeausfahrende und abbiegende Kraftfahrzeuge auf eigenem Fahrstreifen.

Nicht hinzugeschaltet werden darf ein bevorrechtigter Verkehrsstrom zu einem bereits freigegebenen bedingt verträglichen Abbiegestrom, z. B. Fußgänger in eine bereits laufende Phase mit bedingt verträglichen Abbiegern. Von dieser Forderung darf ausnahmsweise bei der Schaltung einer angezeigten Vorgabezeit für Linksabbieger abgewichen werden, wenn die Linksabbieger signaltechnisch, z. B. durch ein Hilffsignal (gelbes Blinklicht), auf die Freigabe bevorrechtigter Verkehrsströme hingewiesen und regelmäßig durch Fahrzeuge des Gegenverkehrs aufgehalten werden, so daß die Fußgänger oder Radfahrer ihren Vorrang wahrnehmen können (siehe **Bild A.2**).

Wird ein Verkehrsstrom durch einen Richtungspfeil (siehe **Bilder I.1** und **I.2**) freigegeben, so sind alle übrigen Verkehrsströme, die mit diesem gemeinsame Konfliktflächen haben, zu sperren. Dies gilt auch bei Freigabe mit Kombinationspfeil. Kombinationspfeile sollten jedoch vermieden werden.

Werden nicht alle Fahrstreifen einer Knotenpunktzufahrt zur gleichen Zeit freigegeben, so kann auf Richtungspfeile in den Leuchtfeldern der Signalgeber nur dann verzichtet werden,

wenn die in verschiedene Richtungen weiterführenden Fahrstreifen baulich so getrennt sind, daß zweifelsfrei erkennbar ist, welcher Fahrtrichtung die Signalgeber jeweils zugeordnet sind.

Eigene Signalgeber für Straßenbahnen und Linienbusse (siehe **Bilder I.6 bis I.8**) sind dann notwendig, wenn für diese Fahrzeuge eigene Signalzeiten geschaltet werden, die von denen des gleichgerichteten Kraftfahrzeugverkehrs abweichen.

Wird in einer Knotenpunktzufahrt mit Abbiegestreifen ein abbiegender Verkehrsstrom mit Richtungspfeilen gesondert signalisiert, dann genügt es in der Regel, Richtungspfeile nur für diesen abbiegenden Verkehrsstrom zu zeigen. Die übrigen Fahrtrichtungen der Knotenpunktzufahrt können dann ohne Richtungspfeile (volle Scheibe) signalisiert werden.

Bei abknickender Vorfahrt an einem Knotenpunkt mit Lichtsignalanlage muß die Freigabe der Verkehrsströme in den Signalprogrammen dieser Vorfahrtregelung entsprechen.

Wo der Verkehr einer ganzen Knotenpunktzufahrt in eine Richtung nach rechts oder nach links abbiegen muß (Zeichen 209 oder 210 StVO), dürfen Verkehrsströme in Parallellage, z. B. Fußgänger und Radfahrer, nicht gleichzeitig freigegeben werden.

Müssen Abbieger bei beengten Verhältnissen Flächen des Gegenverkehrs in der Straße in Anspruch nehmen, in die sie abbiegen, so darf dieser Gegenverkehr nicht gleichzeitig freigegeben werden (z. B. bei zurückverlegter Haltlinie; siehe **Bild 16**).

Beim Entwurf einer Grünen Welle ergeben sich aus den dort zu beachtenden Randbedingungen zwangsläufig gewisse Grundstrukturen der Phaseneinteilung am Knotenpunkt (siehe Abschnitt 5.2.3).

2.3.1.2 Linksabbieger

Linksabbieger verursachen für die Signalsteuerung besondere Schwierigkeiten, da sich für sie im allgemeinen die größte Anzahl von Konfliktmöglichkeiten mit anderen Verkehrsströmen ergibt.

Gesichert geführte Linksabbieger

Signaltechnisch gesichert sind Linksabbieger nur dann, wenn während ihrer Freigabe alle mit ihnen nichtverträglichen Ströme gesperrt sind (siehe **Bild A.3**). Die signaltechnisch gesicherte Führung von Linksabbiegern ist um so dringlicher,

- je schneller im Gegenverkehr gefahren wird,
- je zügiger der Linksabbiegestrom geführt wird,
- je stärker der linksabbiegende Verkehr oder ein zu kreuzender nichtverträglicher Strom ist,
- je schlechter die Sicht auf bedingt verträgliche Ströme ist und
- je mehr die Aufmerksamkeit der Linksabbieger durch eine Häufung möglicher Konfliktfälle beansprucht wird (z. B. Straßenbahn und mehrstreifiger Gegenverkehr oder mehrstreifiger Gegenverkehr, Rechtsabbieger und gleichzeitig freigegebener Fußgänger- und Radverkehr).

Werden den Linksabbiegern in einer Zufahrt zwei oder mehr Fahrstreifen zur Verfügung gestellt, so sind sie grundsätzlich gesichert zu führen.

Die gleichzeitige Freigabe gegenläufiger Linksabbieger ist nur dann möglich, wenn diese Ströme in ausreichendem

Abstand tangential aneinander vorbeigeführt werden können.

Bei einer geringen Anzahl von Linksabbiegern kann es sich empfehlen, nicht in jedem Umlauf die Linksabbieger freizugeben; das setzt jedoch Umlaufzeiten von höchstens 60 s voraus.

Zeitweilig gesichert geführte Linksabbieger

Bei zeitlich gegeneinander versetzten Freigabezeiten von Gegenverkehrsströmen entstehen Zugabezeiten oder Vorgabezeiten. Dadurch können die Linksabbieger nach Grünende oder vor Grünbeginn der jeweiligen Gegenrichtung unbehindert vom Gegenverkehr abfließen (siehe **Bilder A.2 und A.4**).

Zugabezeiten sind in jeder Dauer nutzbar und problemlos.

Bei Vorgabezeiten sind besondere Überlegungen hinsichtlich der Sicherung der Linksabbieger anzustellen; vorzugsweise ist zu prüfen, ob die Linksabbieger in einer eigenen Phase abfließen können. Vorgabezeiten sind nur dann wirkungsvoll, wenn Linksabbieger bereits bei ROT oder während der Vorgabezeit eintreffen (z. B. als Einbieger von einem zurückliegenden Knotenpunkt oder im Zuge einer über Eck geführten Grünen Welle).

Linksabbiegern, die gemäß §9 StVO den Gegenverkehr beachten müssen, können in besonderen Fällen im Knotenpunktbereich Signale gegeben werden, die Rückschlüsse auf den Signalisierungszustand bevorrechtigter Verkehrsströme zulassen (siehe **Bild 37**).

Wird den Linksabbiegern durch ein einfeldiges Richtungssignal (Grünpfeil) im Knotenpunkt eine Zugabezeit angezeigt, so ist deren Beginn über eine Zwischenzeitberechnung zum Gegenverkehr und zu parallel geführten Radfahrern und Fußgängern zu bestimmen (siehe **Bild A.4**).

Wird in Ausnahmefällen eine Knotenpunktzufahrt früher freigegeben als die der Gegenrichtung und wird den Linksabbiegern diese Vorgabezeit durch einen Grünpfeil im Knotenpunkt angezeigt, dann muß die angezeigte Vorgabezeit (siehe Abschnitt 2.6.3) wenigstens der Mindestfreigabezeit entsprechen. Das Ende der Anzeigedauer ist durch eine Zwischenzeitberechnung zum Gegenverkehr zu bestimmen. Nach dem Verlöschen des Grünpfeils sollen die Linksabbieger durch ein gelbes Blinklicht, das über dem Richtungssignal angeordnet ist, vor dem einsetzenden Gegenverkehr gewarnt und auf gegebenenfalls freigegebene bevorrechtigte Fußgänger oder Radfahrer aufmerksam gemacht werden (siehe Abschnitt 9.3.5). Das gelbe Blinklicht soll so lange in Betrieb bleiben, wie mit Fahrzeugen des Gegenverkehrs und bevorrechtigten Fußgängern oder Radfahrern zu rechnen ist, d. h. für die Dauer der Freigabezeit bevorrechtigter Verkehrsströme und der rechnerischen Zwischenzeit (siehe **Bild A.2**). Bei starkem Linksabbiegeverkehr und gleichzeitig häufig schwachem Gegenverkehr sollten die Linksabbieger in einer eigenen Phase geführt werden. Auch die Signalisierung der bevorrechtigten Fußgänger oder Radfahrer in einer Bedarfsphase oder die Aufhebung dieser Furt sind zu erwägen. Wo diese Lösungen nicht möglich sind, eine Vorgabezeit aber nicht zu vermeiden ist, soll auf die Anzeige mit einem Grünpfeil im Knotenpunkt verzichtet werden; Fußgänger oder Radfahrer sind dann zusammen mit der Vorgabezeit freizugeben.

Nicht gesichert geführte Linksabbieger

Nicht gesichert sollten Linksabbieger nur bei geringer Stärke mindestens eines der beiden nichtverträglichen Fahrzeugströme geführt werden (siehe **Bild A.1**). Je stärker der Gegenverkehr ist, desto weniger ist es Linksabbiegern möglich, Lücken im bevorrechtigten Verkehr auszunutzen. Hierdurch werden die Fahrzeuge ebenso wie bei großer Stärke des Linksabbiegestroms selbst im Knotenpunkt gestaut. Den gestauten Linksabbiegern muß gegebenenfalls durch einen verzögerten Freigabezeitbeginn des anschließend freigegebenen Verkehrs das Räumen der Knotenpunktfäche möglich sein (siehe Abschnitt 2.6.7). Vorteilhaft für die Sicherheit und die Leistungsfähigkeit der Linksabbieger kann es sich auswirken, wenn die Freigabezeit der Gegenrichtung nach dem Pulkende mittels Zeitlückenmessung (siehe Abschnitt 4.4.3.2) abgebrochen wird, so daß die Linksabbieger ohne Gefährdung durch einzelne „Nachzügler“ abbiegen können.

Wenn die Linksabbieger nicht ausreichend klar erkennen können, daß sie gegenüber gleichzeitig freigegebenen Fußgängern oder Radfahrern wartepflichtig sind, kann unmittelbar an der Furt ein gelbes Blinklicht (siehe Abschnitt 9.4.5) angebracht werden. Das Blinklicht muß auch während der Räumzeit der Fußgänger oder Radfahrer eingeschaltet bleiben.

2.3.1.3 Rechtsabbieger

Gesichert geführte Rechtsabbieger

Normalerweise bedarf der Rechtsabbiegeverkehr keiner Signalsteuerung durch Richtungssignale. Bei starken Verkehrsströmen in Seitenlage (Fußgänger, Radfahrer, Linienbus oder Straßenbahn) und für schnell befahrene Straßen kann eine Steuerung mit Richtungssignalen in Betracht kommen.

Wird für Rechtsabbiegeströme auf Rechtsabbiegefahrbahnen neben Dreiecksinseln eine gesonderte Signalisierung erforderlich, weil z. B.

- zweistreifig gefahren wird,
- der Fußgänger- oder Radverkehr zu stark ist oder
- zu zügig abgebogen wird und Fußgänger oder Radfahrer ungenügend beachtet werden.

so sind hierfür grundsätzlich dreifeldige Signalgeber zu verwenden. Dabei muß durch die Phaseneinteilung gewährleistet sein, daß während der Freigabezeit der Rechtsabbieger keine linksabgebogenen Fahrzeuge der Gegenrichtung an der Ausfahrt der Rechtsabbiegefahrbahn auftreten können.

Der Einsatz zweifeldiger Signalgeber mit der Signalfolge DUNKEL – GELB – ROT – DUNKEL ist nur zulässig, wenn selten mit Radfahrer- oder Fußgängeranforderungen zu rechnen ist und der Abstand zwischen der Furt und der Ausfahrt der Rechtsabbiegefahrbahn groß genug ist, um die Wartepflicht der Rechtsabbieger gegenüber den Linksabbiegern mittels Zeichen 205 StVO zu verdeutlichen.

Zeitweilig gesichert geführte Rechtsabbieger

Bei Knotenpunkten mit Rechtsabbiegestreifen ergibt sich aus der Signalprogrammstruktur mitunter die Möglichkeit zur Schaltung einer zusätzlichen Freigabezeit für Rechtsabbieger (siehe **Bild A.4**).

Beginn und Ende der durch Richtungssignale (siehe **Bild 38**) angezeigten Freigabezeiten müssen durch eine Zwischenzeit-

berechnung zu den vorher und nachher freigegebenen nicht-verträglichen Verkehrsströmen ermittelt werden. Dabei ist auf die Einhaltung der Mindestfreigabezeiten zu achten (siehe Abschnitt 2.6.2).

Bei Zuschaltung zur Hauptphase im Sinne einer Vorgabe- oder Zugabezeit entstehen für die Rechtsabbieger kurze Unterbrechungen der Freigabezeit: Im ersten Fall („Vorgabezeit“) ergibt sich diese durch die Zwischenzeit zwischen räumenden Rechtsabbiegern und den Fußgängern, die mit einem Zeitvorsprung vor den mit der allgemeinen Freigabezeit wieder freigegebenen Rechtsabbiegern in die Konfliktfläche einlaufen, im zweiten Fall („Zugabezeit“) durch die Zwischenzeit zwischen räumenden Linksabbiegern des Gegenverkehrs (bei Kreuzungen) und den anschließend mit Richtungssignal einfahrenden Rechtsabbiegern (siehe Abschnitte 2.6.4 und 2.6.6).

In besonderen Fällen kann es ausreichen, den Rechtsabbiegern eine Vorgabezeit nur mit einem einfeldigen Signalgeber mit Grünpfeil anzuzeigen. Der Grünpfeil muß dann bei Beginn der Freigabezeit für die gesamte Knotenpunktzufahrt verlöschen. Die Folge Grünpfeil – volles GRÜN darf nur angewandt werden, wenn der Rechtsabbiegestrom in beiden Signalisierungszuständen nicht auf gleichzeitig freigegebene Fußgänger oder Radfahrer trifft.

Nicht gesichert geführte Rechtsabbieger

Werden die Rechtsabbieger mit einer Eckausrundung ohne Dreiecksinsel geführt und werden keine Richtungssignale verwendet, so kann durch ein gelbes Blinklicht (siehe Abschnitt 9.4.5) vor einem möglichen Konflikt mit bevorrechtigten Fußgängern und Radfahrern gewarnt werden. Der Hilfssignalgeber ist unmittelbar an der Fußgängerfurt oder Radfahrerfurt anzuordnen. Das Blinklicht muß auch während der Räumzeit der Fußgänger oder Radfahrer eingeschaltet bleiben. Dieses Hilfssignal sollte z. B. dann gegeben werden.

- wenn die zu kreuzende Furt so weit von der durchgehenden Fahrbahn abgesetzt ist, daß die Abbieger nicht mehr mit überquerenden Fußgängern und Radfahrern rechnen,
- wenn der Rechtsabbiegeverkehr ausnahmsweise zügig geführt wird.

Der Konflikt nicht gesichert geführter Rechtsabbieger mit bedingt verträglichen Linksabbiegern der Gegenrichtung ist an Stellen ohne Dreiecksinsel normalerweise nicht kritisch. Rechtsabbieger, die auf Rechtsabbiegefahrbahnen neben Dreiecksinseln geführt werden, dürfen dagegen nicht gleichzeitig mit bedingt verträglichen Linksabbiegern freigegeben werden.

Nur wenn der Abstand zwischen Fußgängerfurt und der Einmündung der Rechtsabbiegefahrbahn in die kreuzende Straße groß genug ist, um den Rechtsabbiegern trotz eines Freigabesignals vor der Fußgängerfurt erkennbar und begreifbar werden zu lassen, daß sie gegenüber Fahrzeugen in dieser Straße wartepflichtig sind, ist eine Beschilderung an der Einmündung der Rechtsabbiegefahrbahn mit Zeichen 205 StVO möglich, erforderlichenfalls in Verbindung mit einem gelben Blinklicht. In diesem Fall dürfen Rechtsabbieger und Linksabbieger der Gegenrichtung gleichzeitig in einer Phase freigegeben werden.

Nicht signalisierte Rechtsabbieger

Da an Rechtsabbiegefahrbahnen ohne Signalisierung Unsicherheiten bezüglich des Vorrangs der Fußgänger und Rad-

fahrer auftreten können, besonders wenn der Rechtsabbiegestrom stark ist oder wenn zügig abgebogen werden kann, darf das Rechtsabbiegen ohne Signalsteuerung im Schutz einer Dreiecksinsel unter Beachtung des Zeichens 205 StVO nur nach sorgfältiger Prüfung der Verkehrssicherheit zugelassen werden (weitere Hinweise siehe Abschnitt 3.4.3).

2.3.2 Phasenzahl

Die Anzahl der Phasen folgt aus der Phaseneinteilung, d. h. aus der Entscheidung über die signaltechnisch gesicherte Führung der einzelnen Verkehrsströme und bei Koordinierung der Signalprogramme benachbarter Knotenpunkte zusätzlich aus Randbedingungen der Zeit-Weg-Planung der Fahrzeugströme.

Für die Steuerung des Verkehrsablaufs mit Lichtsignalanlage sind an einem Knotenpunkt mindestens zwei Phasen erforderlich. Dabei sind abbiegende Verkehrsströme gegenüber entgegenkommenden und in gleicher Richtung seitlich oder in Mittellage geführten Verkehrsströmen signaltechnisch nicht gesichert (siehe **Bild A.1**).

Eine vollständig gesicherte Signalsteuerung aller Verkehrsströme kann nur erreicht werden, wenn keine bedingt verträglichen Abbiegevorgänge ermöglicht werden. Bei Einmündungen sind dann in der Regel mindestens drei, bei Kreuzungen mindestens vier Phasen erforderlich (siehe **Bild A.5**).

Vom Standpunkt der Leistungsfähigkeit ist eine Zweiphasensteuerung solange zu bevorzugen, wie der Verkehrsablauf nicht durch gestaute wartepflichtige Abbieger gestört wird, da die Summe der erforderlichen Zwischenzeiten hierbei in der Regel niedriger sein wird als bei einer Steuerung mit mehr als zwei Phasen. Bei Vorliegen starker Belastungen und aus Gründen der Verkehrssicherheit können Steuerungen mit mehr als zwei Phasen erforderlich werden, wenn nicht durch Abbiegeverbote oder Einschränkungen für die Verkehrsströme in Randlage die Anzahl der nichtverträglichen Verkehrsströme reduziert wird.

Im Hinblick auf die Dauer der Umlaufzeit ist anzustreben, die Summe der erforderlichen Zwischenzeiten gering zu halten und nach Möglichkeit verträgliche Ströme mit annähernd gleichem Freigabezeitbedarf in jeweils einer Phase zusammenzufassen.

2.3.3 Phasenfolge

Die Phasenfolge an einem Knotenpunkt kann sich nach verschiedenen Gesichtspunkten ergeben:

- Um starken Fußgängerströmen oder Radfahrern ein zügiges Überqueren hintereinanderliegender Furten zu ermöglichen, kann die Folge bestimmter Fußgänger- oder Radfahrerfreigabezeiten die gesamte Phasenfolge am Knotenpunkt beeinflussen.
- Bei komplexen Knotenpunkten kann die Phasenfolge durch die Bedingung festgelegt sein, daß bestimmte Verkehrsrichtungen nacheinander ablaufen müssen, damit im Knotenpunkt keine Behinderungen durch gestaute Fahrzeuge auftreten.
- Werden einzelne Ströme während aufeinanderfolgender Phasen durchgehend freigegeben, so entstehen Verkettungen, die die Wahl der Phasenfolge einschränken.

- Aus der Koordinierung der Signalprogramme benachbarter Knotenpunkte oder aus der Abwicklung des öffentlichen Verkehrs ergeben sich Freigabezeitversätze, die an einzelnen Knotenpunkten die Phasenfolge bestimmen können.
- Um die Qualität des Verkehrsablaufs zu verbessern, können bestimmte Verkehrsarten oder einzelne Verkehrsströme innerhalb eines Umlaufs mehrfach freigegeben werden, wodurch die Wahl der Phasenfolge eingeschränkt wird.
- Liegen nach vorstehend genannten Randbedingungen keine festgelegten oder nur teilweise festgelegte Phasenfolgen vor, so wird die im allgemeinen günstigste Phasenfolge aus der Summe der erforderlichen Zwischenzeiten und maßgebenden Freigabezeiten bestimmt, die zur kürzesten Umlaufzeit führen.

Bei Signalprogrammen mit festen Signalzeiten erübrigt es sich, die jeweilige Phasenfolge gesondert darzustellen; sie ist z. B. aus dem Signalzeitenplan direkt abzulesen.

Bei der verkehrsabhängigen Steuerung werden die zweckmäßigen Phasen und Phasenfolgen in einem Phasenfolgeplan dargestellt (siehe **Bild 4**). Über die Verknüpfung logischer und zeitlicher Bedingungen in der Steuerungslogik werden die Phasen nach dem vorgegebenen Plan ausgewählt.

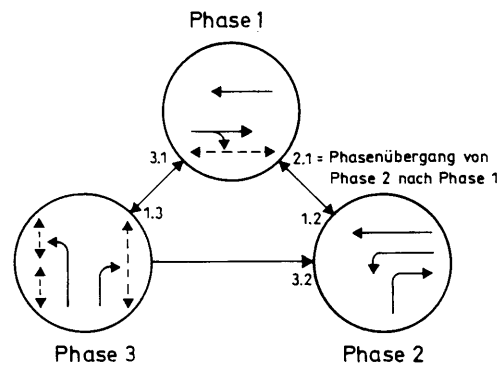


Bild 4: Beispiel für einen Phasenfolgeplan

2.3.4 Phasenübergänge

Der Wechsel zwischen den Phasen wird im Phasenübergang dargestellt (siehe **Bild 5**). Der Phasenübergang ist die Zeitdauer zwischen dem Signalbild der Signalgruppe der endenden Phase, deren Freigabezeit zuerst endet, und dem Signalbild der Signalgruppe der beginnenden Phase, deren Freigabezeit zuletzt beginnt.

Der Phasenübergang enthält mindestens die für den Phasenwechsel erforderlichen Zwischenzeiten. Es kann auch zweckmäßig sein, in den Phasenübergang Randbedingungen für Freigabe- und Sperrzeiten aufzunehmen (siehe Abschnitt 2.6).

Verkehrsabhängige Eingriffe in die Phasenübergänge sind nur zulässig unter Einhaltung der Zwischenzeiten und unter Beachtung der in der StVO vorgeschriebenen Signalfolge.

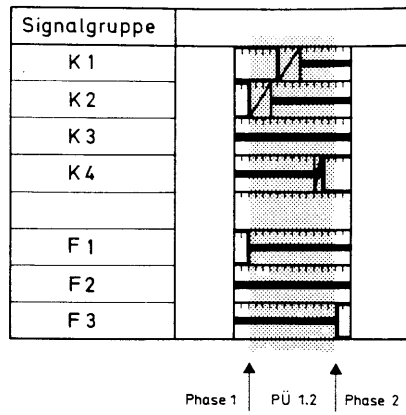


Bild 5: Beispiel für einen Phasenübergang

5. Grüne Welle

5.1 Allgemeines

Für die Steuerung des Verkehrsablaufs durch Lichtsignale ist die Grüne Welle von besonderer Bedeutung. Sie wird durch Koordinierung der Signalprogramme benachbarter Knotenpunkte erreicht, bei der die Mehrzahl der Fahrzeuge unter Einhaltung einer bestimmten Geschwindigkeit mehrere Knotenpunkte ohne Halt passieren kann. Dabei werden die Freigabezeiten in Fahrtrichtung hintereinanderliegender Knotenpunkte durch Freigabezeitversätze aufeinander abgestimmt.

Bei der Zeit-Weg-Planung müssen die Belange des individuellen Kraftfahrzeugverkehrs, der öffentlichen Verkehrsmittel, der Fußgänger und Radfahrer, unter Umständen auch die von Einsatzfahrzeugen der Feuerwehr, der Polizei und der Rettungsdienste, beachtet werden. Die angemessene Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsteilnehmergruppen bedeutet, daß zeitlich und örtlich differenzierte Kompromißlösungen gefunden werden müssen, damit keine Gruppe unzumutbar benachteiligt wird.

Die Grüne Welle im Netz oder im Straßenzug dient vorwiegend dazu, die Summe aller personenbezogenen Reisezeiten im System zu verringern, den Fahrkomfort zu verbessern, den Kraftstoffverbrauch zu senken und die Umwelt möglichst wenig durch Lärm und Schadstoffe zu beeinträchtigen. Dazu – wie auch zur Erhöhung der Verkehrssicherheit – wird angestrebt, die Streuung der Geschwindigkeiten der Individualfahrzeuge sowie die Anzahl der Halte aller Fahrzeuge möglichst klein zu halten. Im Netz ist eine Gesamtoptimierung anzustreben. Bei verkehrstechnisch gleichwertigen Lösungen ist diejenige mit Vorteilen für die Hauptrichtungen zu bevorzugen, da sie in der Regel weniger nachteilige Umweltwirkungen aufweist. Im Straßenzug können Belange des öffentlichen Verkehrs bevorzugt berücksichtigt werden.

Neben den genannten verkehrs- und umweltrelevanten Vorteilen wird durch Einrichtung von Grünen Wellen die stadtfunktionale Zielsetzung der Bündelung von Verkehrsströmen auf Hauptverkehrsstraßen und der flächenhaften Entlastung der nachgeordneten Straßen unterstützt. Bei komplizierten Knotenpunkten kann auch das Freihalten von Stauräumen Ziel einer Koordinierung sein.

Die Entwicklung geeigneter Signalprogramme für eine Grüne Welle setzt die Kenntnis der Richtung und der Stärke der Verkehrsströme voraus. Wenn sich Verkehrsströme regelmäßig und wesentlich ändern, sind mehrere darauf abgestimmte Signalprogramme erforderlich. In Sonderfällen auftretende Verkehrszustände (z. B. Messen oder Sportveranstaltungen) sollten ebenfalls durch spezielle Signalprogramme berücksichtigt werden.

Grüne Wellen für den Kraftfahrzeugverkehr sind bei Entfernungen zwischen Lichtsignalanlagen bis zu 750 m, in besonders günstigen Fällen auch bis zu 1000 m zu empfehlen. Bei größeren Abständen lösen sich Fahrzeugpuls so weit auf, daß eine Koordinierung der Lichtsignalanlagen nicht mehr sinnvoll ist.

Die Grüne Welle kann in einem Zeit-Weg-Diagramm anschaulich dargestellt werden. Dieses Diagramm zeigt die

Bewegung der Kraftfahrzeugströme in Form von sogenannten Grünbändern (Zeit-Weg-Bändern). Die Breite der Bänder soll der Verkehrsstärke angepaßt sein; sie kann in ihrem Verlauf variieren. Vorläufe und Nachläufe zum durchgehenden Grünband sollen im Zeit-Weg-Diagramm deutlich hervorgehoben werden. Der Fahrtverlauf von Straßenbahnen oder des Linienbusverkehrs sollte im Zeit-Weg-Diagramm ebenfalls dargestellt werden, wobei Beschleunigungen und Verzögerungen von 0,7 bis 1,2 m/s² für die Straßenbahn und von 1,0 bis 1,5 m/s² für Linienbusse angenommen werden können. Die genauen Fahrbedingungen und die Aufenthaltszeiten an Haltestellen sollten vom Verkehrsbetrieb vorgegeben werden. Als Bezugslinien für die Berechnung der Fahrzeiten im Netz oder im Straßenzug dienen die Haltlinien, deren Abstände im Zeit-Weg-Diagramm anzugeben sind.

Hinweise zu Verfahren der Zeit-Weg-Planung und zur grafischen Darstellung sind im **Anhang E** zusammengestellt; ein Beispiel für die Darstellung von Fahrtverlaufslinien öffentlicher Verkehrsmittel im Anhang D.2.2.

5.2 Entwurfsgrundsätze

5.2.1 Progressionsgeschwindigkeit

Die Progressionsgeschwindigkeit V_p ist eine Konstruktionsgröße. Sie stellt sich dar als die Neigung der Mittellinie eines Grünbands zur Zeitachse im Zeit-Weg-Diagramm. Bei Teilauslastung kann es auch sinnvoll sein, die Progressionsgeschwindigkeit aus der Bewegung der Pulkspitze abzuleiten. Eine erfolgreiche Koordinierung kann nur erwartet werden bei

$$0,85 \cdot \text{zul } V \leq V_p \leq \text{zul } V$$

Die Progressionsgeschwindigkeiten in aufeinanderfolgenden Streckenabschnitten können bei gleichbleibendem Ausbaustandard bis zu 5 km/h voneinander abweichen. Bei einem Wechsel der Streckencharakteristik sind auch größere Geschwindigkeitsänderungen möglich.

Einflüsse, die zur Verminderung der Fahrgeschwindigkeit führen (z. B. hoher Schwerverkehrsanteil, große Steigung, enge Kurven, schlechte Fahrbahnbeschaffenheit) sind beim Entwurf zu beachten.

Benutzen Straßenbahn und Individualverkehr dieselbe Fahrbahn, so sollte zur Einhaltung der Progressionsgeschwindigkeit an den Knotenpunkten, die zwischen Haltestellen liegen, ein Verbot des Linksabbiegens erwogen werden.

Bei einem Auslastungsgrad $\alpha > 0,8$ (siehe **Anhang B**), im großstädtischen Berufsverkehr $\alpha > 0,9$, kann die gewünschte Progressionsgeschwindigkeit nicht mehr eingehalten werden. Eine bewußt niedrig angesetzte Progressionsgeschwindigkeit (z. B. $V_p = 30$ km/h) ist kein Mittel zur Verkehrsberuhigung, weil sie sich im tatsächlichen Verkehrsablauf nicht einstellt.

Bei der Koordinierung von Verkehrsströmen innerhalb eines Knotenpunkts geben die Geschwindigkeitsannahmen der Zwischenzeitenberechnung einen Anhalt zur Wahl der Progressionsgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 2.5).

5.2.2 Umlaufzeit und Teilpunktabstand

Voraussetzung für eine Grüne Welle im Netz oder im Straßenzug ist eine gleichgroße Umlaufzeit an allen Knotenpunkten. Kurzfristige Abweichungen von dieser System-Umlaufzeit, die als Folge von Freigabezeitenanpassungen und Freigabezeitenanforderungen (siehe Abschnitt 5.2.5.1) auftreten können, müssen sich ausgleichen.

Kurzumläufe innerhalb der System-Umlaufzeit können zur Steuerung des Verkehrsablaufs vorgesehen werden

- in schwach belasteten Straßenzügen, die an Hauptverkehrsstraßenzüge angeschlossen werden,
- bei einzelnen knapp bemessenen Stauräumen,
- bei Fußgänger-Lichtsignalanlagen im Zuge von Grünen Wellen oder
- bei Knotenpunkten mit schwachem Querverkehr zur Grünen Welle.

Die Summe der Umlaufzeiten der Kurzumläufe muß gleich der System-Umlaufzeit sein.

Bei Grünen Wellen in Zweirichtungsstraßen gibt es im Zeit-Weg-Diagramm einen charakteristischen Punkt, den man als Teilpunkt (TP) bezeichnet. Er ergibt sich als Schnittpunkt der Mittellinien zweier gegenläufiger Grünbänder. Der Abstand zwischen benachbarten Teilpunkten wird als Teilpunktabstand l_{TP} bezeichnet. Bei vorgegebener Umlaufzeit erreicht die verfügbare Zeitdauer für die erforderlichen Zwischenzeiten und die Freigabezeiten querender Richtungen im Teilpunkt ihr Maximum und in den Bereichen, in denen sich die Grünbänder nicht überlappen, ihr Minimum (siehe Bild 23).

Zwischen der Umlaufzeit, den Progressionsgeschwindigkeiten in Richtung und Gegenrichtung sowie dem Teilpunktabstand besteht folgende Beziehung:

$$t_U = \frac{3,6 \cdot l_{TP}}{V_{p,Ri1}} + \frac{3,6 \cdot l_{TP}}{V_{p,Ri2}} \quad [s]$$

5.2.3 Voraussetzungen und Randbedingungen

Vor dem Entwurf der Grünen Welle sind einige Voraussetzungen zu erfüllen und Randbedingungen zu beachten, die einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität des Verkehrs haben können:

- Durchgehende Fahrstreifen
Der für eine Grüne Welle vorgesehene Straßenzug sollte mehr als einen durchgehenden Fahrstreifen je Koordinierungsrichtung haben. Hierdurch ergeben sich Überholmöglichkeiten, so daß der Einfluß langsamer Fahrzeuge auf die Funktionsfähigkeit der Grünen Welle klein bleibt. Die Qualität des Verkehrsablaufs leidet auch infolge haltender und parkender Fahrzeuge. Durch Haltverbote, gegebenenfalls mit tageszeitlichen Beschränkungen, lassen sich derartige Störungen einschränken. Bushaltestellen ohne Haltebucht in durchgehenden Fahrstreifen können die Grüne Welle beeinträchtigen.
- Abbiegestreifen
Für Abbieger sollten im Knotenpunktbereich Abbiegestreifen vorgesehen werden, damit der geradeausfahrende Verkehr nicht behindert wird und Auffahrunfälle vermieden werden. Linksabbiegestreifen sollen zumindest dann vorhanden sein, wenn keine Aufstellmöglichkeit im engeren Knotenpunktbereich und kein freier Abfluß gegeben

sind. Ist die Anordnung von Abbiegestreifen nicht möglich, sollte das ständige oder zeitlich begrenzte Verbot der Abbiegefahrten erwogen und Ersatzwege angeboten werden.

- Fußgängerüberwege
Fußgängerüberwege (Zeichen 293 StVO) über Straßen mit Grüner Welle sind nicht zulässig (siehe VwV-StVO zu § 26).
- Phaseinteilung und Phasenzahl
Je nach Entfernung eines Knotenpunkts vom Teilpunkt ergeben sich zwangsläufig gewisse Grundstrukturen der Phaseinteilung (siehe Bild 23).
Die Phasenzahl ergibt sich aus vorab zu treffenden Entscheidungen, welche Ströme gesichert zu führen sind.
- Phasenfolge
Aus der Koordinierung der Signalprogramme mehrerer Knotenpunkte können sich Zwangsbedingungen bezüglich der Phasenfolge ergeben.

5.2.4 Formen der Grünzeitführung

5.2.4.1 Stetige Grünzeitführung

Wenn die Freigabezeit an jedem Knotenpunkt entsprechend dem durchgehenden Grünband zugeteilt wird, entsteht eine stetige Grünzeitführung. Sie fördert den Zusammenhalt von Fahrzeugpuls, die Gleichförmigkeit der Geschwindigkeiten und damit Sicherheit und Fahrkomfort. Insbesondere werden durch eine stetige Grünzeitführung für Fahrzeuge am Pulkende plötzliche Bremsvorgänge durch unvermuteten Signalwechsel weitgehend ausgeschlossen.

5.2.4.2 Nichtstetige Grünzeitführung

Eine nichtstetige Grünzeitführung liegt dann vor, wenn Freigabezeiten außerhalb des stetigen Grünbands in Form von Vorlaufzeiten oder Nachlaufzeiten gegeben werden.

Vorläufe oder Nachläufe gegenüber dem Grünband können sich zwangsläufig ergeben, wenn die Abstände der Knotenpunkte keine andere Lösung zulassen. Sie können aber auch erforderlich werden,

- wenn starker Einbiegeverkehr auftritt, durch den der Pulk behindert werden könnte,
- wenn für Linksabbieger Zugabezeiten erzielt werden sollen,
- um gefährliche Vorgabezeiten für Linksabbieger zu vermeiden,
- um Anforderungen für öffentliche Verkehrsmittel sowie für Fußgänger und Radfahrer kurzfristig wirksam werden zu lassen oder
- aus Gründen der Leistungsfähigkeit.

5.2.5 Arten der Grünen Welle

5.2.5.1 Progressivsystem

Ein Progressivsystem entsteht, wenn die Freigabezeiten an aufeinanderfolgenden Knotenpunkten immer so viel später gegeben werden, wie es der rechnerischen Fahrzeit von Haltlinie zu Haltlinie entspricht.

In Zweirichtungsstraßen entsteht die ideale Form der Grünen Welle dann, wenn sich die Teilpunktabstände mit den Abständen der Knotenpunkte mit starkem Querverkehr zur Deckung bringen lassen.

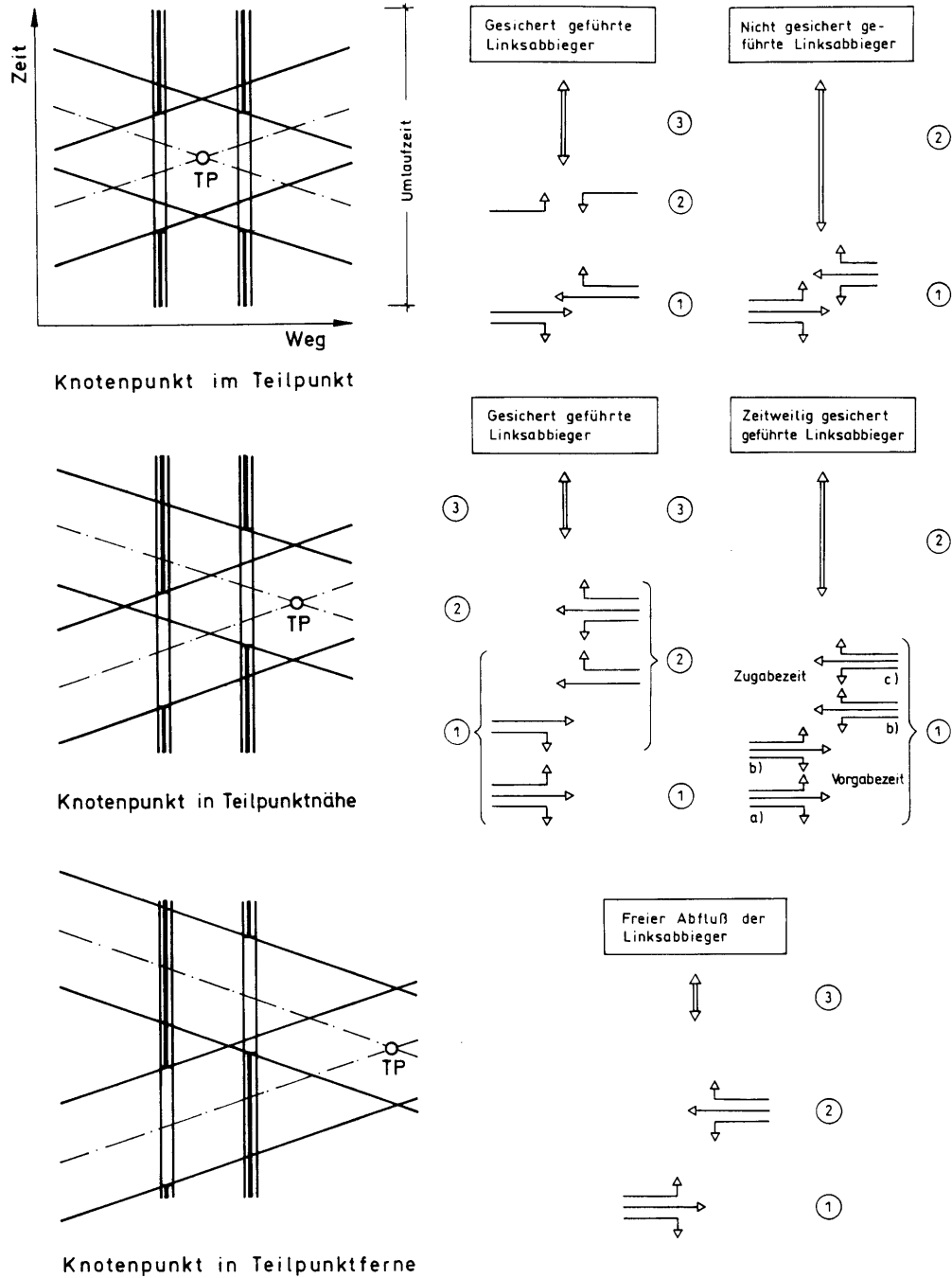


Bild 23: Grundstrukturen der Phaseneinteilung bei der Koordinierung von Lichtsignalanlagen

Die Übereinstimmung von Teilpunktlagen und Knotenpunktlagen ist jedoch nicht immer gegeben. Zwangsläufig liegen in diesem Fall Knotenpunkte in Bereichen, in denen ein Querverkehr nur bei Verringerung der sonst vorhandenen Grünbandbreite möglich ist. Für die Abbieger kann dort, wo sich die Grünbänder nicht überlappen, der Vorteil des freien Abflusses genutzt werden. Wenn sich die Grünbänder teilweise überlappen, besteht die Möglichkeit der zeitweilig gesicherten Führung der Linksabbieger in Vorgabe- und Zugabezeiten (siehe **Bild 23**). Fußgänger können in diesem Bereich die Hauptrichtung entweder über einen Fahrbahnteiler in zwei getrennten Phasen gesichert überqueren oder bedingt verträglich mit den Abbiegern des Querverkehrs.

In Einrichtungsstraßen (z. B. in Einbahnstraßenringen) lassen sich Grüne Wellen sehr einfach entwerfen, da hier auf die einschränkenden Bedingungen des Teilpunktabstands keine Rücksicht genommen werden muß.

Im **Anhang E** sind zwei Beispiele zur Darstellung von Progressivsystemen wiedergegeben (siehe **Bilder E.1** und **E.2**).

Progressivsysteme können durch Verfahren der verkehrsunabhängigen Signalsteuerung erweitert werden (siehe Abschnitte 4.3 und 4.4). Folgende Einsatzbedingungen sind dabei zu berücksichtigen:

- Anpassungen durch späteres Freigabezeitende sind so zu begrenzen, daß Störungen am folgenden Knotenpunkt weitgehend vermieden werden,
- Anpassungen durch späteren Freigabezeitbeginn bei ungefähr gleichbleibender Freigabezeit sind bei kurzem Abstand zum folgenden Knotenpunkt so zu begrenzen, daß dort der Anteil nicht nutzbarer Freigabezeiten möglichst klein bleibt,
- Anpassungen durch früheren Freigabezeitbeginn sind so zu begrenzen, daß beim Kraftfahrzeugverkehr die Pulkauflösung nicht begünstigt wird,
- Anpassungen durch früheres Freigabezeitende sind wegen der Gefahren, die von dem unvermuteten Signalwechsel ausgehen, vor Durchfahrt des Pulkendes zu vermeiden.

5.2.5.2 Simultansystem

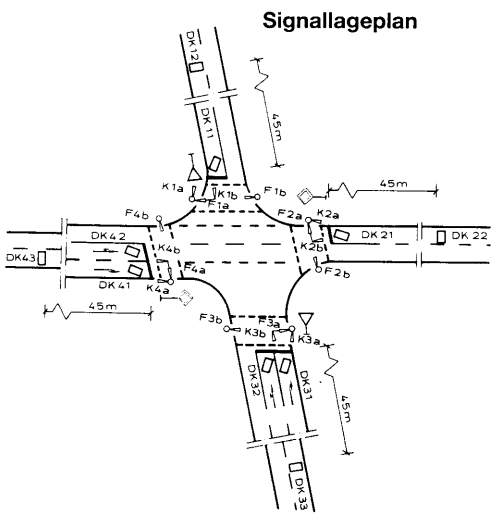
Bei diesem System wird an allen Knotenpunkten im Zuge der Grünen Welle zur selben Zeit das gleiche Signal gezeigt. Das Simultansystem eignet sich bei kurzen Knotenpunktabständen bis etwa 100 m. In **Bild E.1** ist auf die Anwendung des Simultansystems bei kurzen Knotenpunktabständen hingewiesen. Eine dichte Folge von wenigen Knotenpunkten kann als Simultansystem innerhalb eines anderen Systems einer Grünen Welle eingefügt werden. Das Simultansystem macht die Hauptstraße sehr aufnahmefähig für Einbiegeverkehr, weil der gestaute Einbiegeverkehr vor Eintreffen des Hauptpulses starten kann.

D.2.3 Beispiel 3 – Alles-Rot-/Sofort-Grün-Schaltung an einer Kreuzung

Aufgabenstellung

An einer Kreuzung soll auch in Schwachverkehrszeiten aus Sicherheitsgründen die Lichtsignalanlage nicht abgeschaltet werden. Es handelt sich um eine Einzelanlage ohne Koordination. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt in allen Zufahrten 50 km/h. Da sich in der Nähe der Kreuzung ein Seniorenwohnheim befindet, wird für Fußgänger die Räumgeschwindigkeit 1 m/s gewählt.

Um die Wartezeiten und die Anzahl der Halte zu minimieren, soll die Anlage bei schwachem Verkehr so betrieben werden, daß einzelne Fahrzeuge oder Fußgänger auf Anforderung „sofort“ GRÜN erhalten können.



Steuerungskonzept

Die Steuerung erfolgt nach dem Prinzip der Signalprogrammierung (siehe Abschnitt 4.3.1, Tabelle 2, Ordnungszahl B5). Die Grundstellung der Signale ist „Alles-ROT“ (Phase 1); aus diesem Zustand kann bei einer Anforderung unmittelbar in die Phase 2 oder 3 geschaltet werden.

Da aufgrund der Zwischenzeiten direkte Übergänge zwischen den Phasen 2 und 3 hier nicht schneller ablaufen würden als der „Umweg“ über den Zustand „Alles-ROT“, wird auf die Phasenübergänge PÜ 2.3 und PÜ 3.2 verzichtet. Dadurch ergibt sich eine wesentliche Vereinfachung der Steuerungslogik.

Die Phasenübergänge PÜ 1.2 und PÜ 1.3 sind so definiert, daß sie die Freigabezeiten für die Fußgänger und die Mindestfreigabezeiten für die Kraftfahrzeuge (gewählt: $\min t_{Gr} = 10s$) enthalten; wegen der langen Zwischenzeiten zwischen räumenden Fußgängern und beginnendem Kraftfahrzeugverkehr ergeben sich kurze Fußgängerfreigabezeiten. Dies wird akzeptiert, um die Steuerung flexibel zu halten.

Unmittelbar aufeinanderfolgende Fußgängeranforderungen derselben Richtung können nur über die Phase 1 (Alles-

ROT) wirksam werden, da die Fußgängerfreigabezeiten nicht zu einem bereits freigegebenen, bedingt verträglichen Verkehrsstrom hinzugeschaltet werden dürfen. Die Phasenübergänge PÜ 2.1 und PÜ 3.1 sind so definiert, daß alle Zwischenzeiten abgelaufen sind, bevor über eine erneute Anforderung die Phase 2 oder 3 wieder aktiviert werden kann. Dadurch ist auch sichergestellt, daß bei einem Rücksprung in die gleiche Phase die Fußgänger und die Linksabbieger geräumt haben, bevor die Richtung erneut freigegeben wird. Hierdurch entsteht eine Alles-ROT-Zeit von 4s Dauer beim Phasenwechsel von Phase 2 oder 3 über „Alles-ROT“ zurück in die gleiche Phase.

Für den Kraftfahrzeugverkehr ergeben sich bei einem Detektorabstand von $l_D = 45m$ und einem angenommenen mittleren Zeitbedarfswert von $t_b = 2s$ minimale Freigabezeiten von 15s. Es werden maximale Freigabezeiten festgelegt, die wirksam werden, wenn Fußgänger und nichtverträgliche Fahrzeugströme eine Freigabezeit anfordern. Ohne Anforderungen von Fußgängern und nichtverträglichen Fahrzeugströmen wird die aktuelle Phase nur bei Erreichen der Zeitlückenwerte beendet.

Logische Bedingungen

- L1 = A (F1 ∨ F3) : Anforderung F1/F3
- L2 = A (F2 ∨ F4) : Anforderung F2/F4
- L3 = A (DK11 ∨ DK12 ∨ DK31 ∨ DK32 ∨ DK33) : Anforderung K1/K3
- L4 = A (DK21 ∨ DK22 ∨ DK41 ∨ DK42 ∨ DK43) : Anforderung K2/K4
- L5 = ZL (DK12 ∧ DK33) ≥ 3.5s : Abbruch K1/K3
- L6 = ZL (DK22 ∧ DK43) ≥ 3.5s : Abbruch K2/K4

Die logischen Bedingungen L1 bis L4 kennzeichnen die Anforderungen von Fußgängern und Kraftfahrzeugen, die Bedingungen L5 und L6 die Abbruchkriterien nach vorgegebenen Zeitlückenwerten (siehe Ablaufdiagramm).

Um bei gleichzeitig wirksamen Anforderungen der Phasen 2 und 3 einen regelmäßigen Wechsel zu erreichen, wird der zusätzliche „Merker“ M2 benötigt, der angibt, welche Phase zuletzt geschaltet war:

- M2 = 1 : Phase 2 wurde aktuell bedient, d. h. als letzte Phase vor Phase 1
- M2 = 0 : Phase 2 wurde nicht aktuell bedient

Zeitliche Bedingungen

- Minimale Freigabezeiten: K1, K2, K3, K4 = 15s
- Maximale Freigabezeiten: K1, K2, K3, K4 = 25s

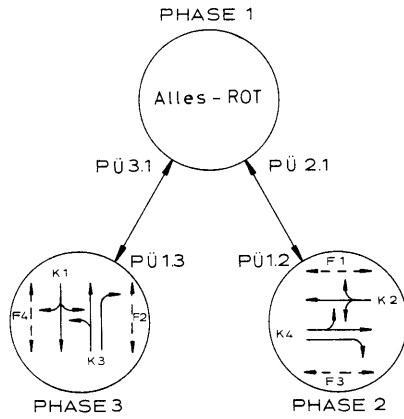
Sonstige Bedingungen

Die Induktivschleifen für die Voranmeldung werden so verlegt, daß ein Kraftfahrzeug, das bei „Alles-ROT“ anfordert, so zeitig GRÜN bekommt, daß es die Haltlinie passieren kann, ohne anzuhalten. Die Induktivschleifen DK12, DK22, DK33 und DK43 werden gleichzeitig zur Zeitlückenmessung verwendet.

Direkt an den Haltlinien sind zusätzliche Induktivschleifen (DK11, DK21, DK31, DK32, DK41 und DK42) zur Freigabezeitanforderung erforderlich.

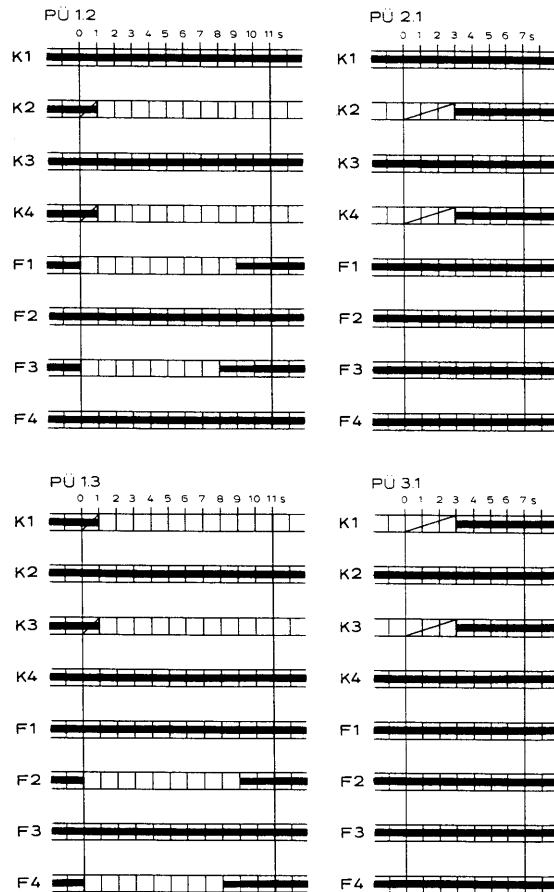
Die Fußgänger fordern über Taster an den Signalgebermasten ihre Freigabezeit an.

Phasenfolgeplan



Zwischenzeiten-Matrix

		beginnende Signalgruppen							
		K1	K2	K3	K4	F1	F2	F3	F4
endende Signalgruppen	K1		4		4	4		7	
	K2	5		3			4		7
	K3		5		3	7		4	
	K4	3		4			7		4
	F1	10		7					
	F2		9		5				
	F3	9		11					
	F4		8		11				



Phasenübergänge

100

4 Literatur

- [BRJ99] G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson. *The Unified Modeling Language User Guide*. Reading, Mass.; Harlow, England; Menlo Park, Calif.: Addison-Wesley Longman, Inc. 1999
- [FSV92] *Richtlinien für Lichtsignalanlagen: RiLSA – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr*. Ausgabe 1992. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit.