

Auswirkungen von Überlastungen an Einzelanlagen des Straßenverkehrs auf die Verbindungsqualität in Straßennetzen

FA 1.162

Forschungsstelle: Universität Hannover, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau (Prof. Dr.-Ing. B. Friedrich)

Bearbeiter: Priemer, C. / Friedrich, B.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: April 2007

1 Aufgabenstellung

Ein Verkehrsnetz setzt sich aus vielen verschiedenen Einzelanlagen zusammen. Eine Folge dieser Einzelanlagen zwischen einer Quelle und einem Ziel in einem Verkehrsnetz bildet eine Route. Die Qualität einer Route bzw. einer Verbindung wird primär mit der Kenngröße Reisezeit beurteilt. In Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren (z. B. Tageszeit, Witterung, etc.) variiert allerdings die Reisezeit zwischen Quelle und Ziel und damit die Qualität einer Verbindung.

Maßgeblich beeinflusst wird die Reisezeit von der Qualität der einzelnen verkehrlichen Anlagen, aus denen sich die Verbindung zusammensetzt. So können hohe Wartezeiten an lichtsignalgesteuerten Knotenpunkten im innerstädtischen Netz oder Überlastungen einzelner Streckenabschnitte infolge nicht ausreichender Dimensionierung maßgeblich die Qualität einer Verbindung beeinflussen.

Zur Bestimmung der Qualität einer vollständigen Quelle-Ziel-Verbindung (OD-Verbindung) stehen in den "Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN)" Bemessungsverfahren zur Verfügung, mit denen unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien (Zeitaufwand, Direktheit, zeitliche Verfügbarkeit) die Qualität einer Verbindung in sechs Stufen der Angebotsqualität (SAQ A–F) eingeordnet werden kann. Mit den Kenngrößen Luftlinienentfernung und Reisezeit kann die sogenannte Luftliniengeschwindigkeit bestimmt werden und somit der Zeitaufwand einer Verbindung quantitativ beurteilt werden. Neben der eigentlichen Fahrzeit berücksichtigt die Reisezeit den zusätzlichen Zeitaufwand der Zu- und Abgangsdauer sowie die Stellplatzsuche. Dieses Verfahren betrachtet ausschließlich vollständige Verbindungen.

Die Qualität einer Einzelanlage kann mithilfe standardisierter Bemessungsverfahren bestimmt werden, die im "Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)" bereitgestellt werden. So können nahezu alle Elemente des inner- und außerstädtischen Verkehrsnetzes mithilfe dieser Verfahren quantitativ beurteilt werden. Einzige Ausnahme bilden Stadtstraßenabschnitte, für die das HBS erst in Zukunft ein Bemessungsverfahren bereitstellen wird.

Plangleiche Knotenpunkte werden mithilfe des zeitlichen Aufwands beurteilt, die ein Verkehrsteilnehmer durchschnittlich für das Passieren der Einzelanlage benötigt. So wird die Qualität des Verkehrsablaufs nach der mittleren Wartezeit beurteilt. Die Bemessung von Autobahn- bzw. zweistreifigen Landstraßenabschnitten erfolgt anhand des Auslastungsgrads (Verkehrsstärke/Kapazität) bzw. anhand der Verkehrsdichte als Grad der Bewegungsfreiheit für Landstraßenabschnitte.

Mithilfe der dargestellten Verfahren können somit auf der einen Seite die Qualität einer einzelnen Anlage gemäß HBS beurteilt werden und auf der anderen Seite die Qualität einer vollständigen

Verbindung gemäß RIN bestimmt werden; inwiefern allerdings die Qualität einer Einzelanlage die Qualität einer Verbindung beeinflusst, kann mit den bereitgestellten Verfahren nicht beurteilt werden.

Das Ziel des Forschungsprojekts ist es daher, die bereits bestehenden Bemessungsverfahren für Einzelanlagen und Verbindungen hinsichtlich ihrer Konsistenz zu überprüfen und somit die Wechselwirkung zwischen der Qualität von Einzelanlagen und vollständigen Verbindungen zu untersuchen. Dazu wird ein Verfahren entwickelt, das die Rückkopplung von Qualitätsstufen (QSV) der Einzelanlage auf die Netzbewertung quantifizieren kann und somit eine Qualitätsbewertung für vollständige, weiträumige Verbindungen nach dem HBS möglich wird. Dabei ist zu berücksichtigen, wie sich individuelle Störungen an einzelnen Elementen einer Streckenfolge auf die Gesamtreisezeit auswirken.

2 Untersuchungsmethodik

Die Basis der Untersuchungen bilden umfangreiche empirische Messungen, die durch Simulationsuntersuchungen ergänzt wurden. So wurden insgesamt 10 Untersuchungsstrecken (teilweise mit Haupt- und Nebenroute) in den Untersuchungsgebieten Rhein-Main-Neckar (polyzentrisch), Hannover (monozentrisch) und Nordfriesland (ländlicher Raum) betrachtet. Dabei handelt es sich um Verbindungen zwischen Oberzentren, Mittelzentren bzw. zwischen Ober- und Mittelzentren. Die Start- und Zielpunkte dieser Verbindungen befanden sich in den Kern- bzw. Randbereichen der betrachteten Zentralen Orte.

Die Bestimmung der Qualität der betrachteten Verbindungen und ihrer Einzelanlagen erforderte eine parallele Erhebung von lokalen verkehrlichen Kenngrößen (Verkehrsstärke, Schwerverkehrsanteil) und verbindungsbezogenen Reisezeiten. So wurden zum Zeitpunkt der Reisezeitmessungen die für die Bemessung gemäß HBS notwendigen verkehrlichen Kenngrößen zeitgleich lokal erhoben.

Die Bemessung von Autobahnabschnitten erfolgte vorrangig mithilfe von Daten stationärer Messquerschnitte, die dankenswerter Weise von der VZ Hessen und der VMZ Niedersachsen zur Verfügung gestellt wurden. Im Rahmen der Bestimmung der Qualität von Autobahnabschnitten wurden die Kapazitäten geschätzte Kapazitäten ersetzt, welche aus den q-v-Beziehungen von Daten stationärer Messquerschnitte abgeleitet wurden. Die Bemessung von plangleichen Knotenpunkten mit und ohne Lichtsignalanlage sowie die Bemessung von Verbindungen gemäß RIN erfolgte mithilfe von Floating Car Data (FCD) und automatischen Kennzeichenerfassungssystemen (ANPR-Systeme). So wurden bis zu zwei Floating Cars je betrachteter Verbindung eingesetzt, die sekundlich ihre Position und momentane Geschwindigkeit aufzeichneten. Die Fahrer der Floating Cars wurden dabei angewiesen, möglichst homogen im Verkehr mit zu schwimmen. Die erhobenen FCD wurden auf Autobahnabschnitten zudem durch Daten aus ANPR-Systemen statistisch abgesichert.

Die Qualität von Verbindungen wurde gemäß RIN mit der Kenngröße Luftliniengeschwindigkeit bewertet, die als Verhältnis von Luftlinienentfernung und Reisezeit definiert ist. Die für die Bestimmung der Reisezeit erforderlichen Kenngrößen Zugangs-, Abgangs- und Parksuchdauer wurden individuell abgeschätzt, während die Beförderungsdauer mithilfe der FCD bestimmt wurde.

Die empirisch erhobenen Daten wurden durch Simulationsuntersuchungen an zwei Untersuchungsstrecken ergänzt. Ziel dieser Modelluntersuchungen war es, die statistische Sicherheit der empirischen Daten zu erhöhen und zudem empirisch nicht erfasste Nachfrageszenarien zu generieren. Die Simulationsuntersuchungen wurden dabei mit dem mikroskopischen Simulationsstool AIMSUN NG durchgeführt.

3 Untersuchungsergebnisse

Um die Bemessungsverfahren gemäß RIN und HBS zu verknüpfen, war es zunächst notwendig, die QSV_i der Einzelanlagen zu einer Gesamtqualitätsstufe zusammenzufassen. Hierzu wurden mit dem gewichteten arithmetischen und gewichteten harmonischen Mittel zwei Aggregationsverfahren betrachtet. Als Gewicht wurde die Länge der Einzelanlage verwendet, welche sich aus den Einflussbereichen vor und hinter den Knotenpunkten zusammensetzt. Die Bestimmung der räumlichen Ausdehnung der Einflussbereiche erfolgte mithilfe der FCD. So konnten anhand von Geschwindigkeitsprofilen die Zeitpunkte des Verlassens der Wunschgeschwindigkeit vor und die des Erreichens der Wunschgeschwindigkeit hinter dem Knotenpunkt quantifiziert werden. Die Länge der freien Streckenabschnitte resultiert dann aus den räumlichen Ausdehnungen der angrenzenden Knotenpunkte.

Voraussetzung für die Anwendung der betrachteten Aggregationsverfahren ist neben der Kenntnis der QSV_i jeder Einzelanlage i der betrachteten Verbindung die Überführung der QSV_i in Zahlenwerte. Diesbezüglich wurden die Abstufungen der QSV bzw. SAQ im HBS bzw. in den RIN analysiert. Dabei zeigt sich, dass grundlegende Unterschiede zwischen den beiden Bemessungskonzepten existieren. Während die RIN Bemessungstabellen für den Zeitaufwand und den Umwegfaktor bereitstellen, in welchen die Abstufung der SAQ nahezu äquidistant erfolgt, wird im HBS eine nicht äquidistante Abstufung der QSV differenziert nach Einzelanlagentyp angenommen. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst zwei numerische Ersatzverfahren betrachtet. Sowohl für die äquidistante Abstufung gemäß RIN als auch für die nicht äquidistante Abstufung gemäß HBS werden der Qualitätsstufe A der Zahlenwert 6 und der Qualitätsstufe F der Zahlenwert 1 zugeordnet. Auf diese Weise können hohen Qualitätsstufen gedanklich hohe Reisegeschwindigkeiten zugeordnet werden. Im Rahmen der Zuordnung von QSV_i zu Zahlenwerten wird eine Qualitätsstufe genau einem Zahlenwert zugeordnet.

Eine Analyse der Aggregation von QSV_i mit interpolierten Zahlenwerten zeigte, dass die Unterschiede zu der Aggregation von QSV_i mit nicht-interpolierten Zahlenwerten gering sind. Vor diesem Hintergrund wurde auf eine Interpolation der Zahlenwerte zugunsten einer komfortableren Anwendung des Verfahrens verzichtet.

Im Zuge der Gegenüberstellung von SAQ und aggregierten QSV wurden die vier unterschiedlichen Kombinationen aus numerischen Ersatzverfahren (äquidistant, nicht äquidistant) und Aggregationsverfahren (arithmetisch, harmonisch) analysiert. Dabei zeigt sich, dass die Kombination aus äquidistant abgestuften SAQ und nicht äquidistant abgestuften QSV zu einer Überbewertung der Verbindungsqualität gemäß HBS führt.

Einen deutlich besseren Zusammenhang zeigt die Kombination aus äquidistant abgestuften SAQ und äquidistant abgestuften aggregierten QSV. Es zeigt sich ein strenger linearer Zusammenhang zwischen SAQ und aggregierten QSV ($R^2 = 0,76$). Bei der Berücksichtigung eines definierten Toleranzbereichs von $\pm 0,5$ zwischen dem bestmöglichen Zusammenhang zwischen SAQ und aggregierten QSV und tatsächlichem, zeigt sich, dass ca. 70 % innerhalb dieser Toleranz liegen. Das mittlere Fehler-

quadrat ($rmse = 0,53$) bestätigt diesen guten Zusammenhang.

Die abschließende Überprüfung zwischen den Aggregationsverfahren zeigte erwartungsgemäß, dass das arithmetische Mittel Einbrüche in der Reisegeschwindigkeit aufgrund von Überlastungen zu stark berücksichtigt, während das harmonische Mittel bessere Ausgleichseigenschaften für die betrachtete reziproke Kenngröße (Reisegeschwindigkeit) besitzt. Bei beiden betrachteten Aggregationsverfahren wurde die Länge der Einzelanlage als Gewicht in die Aggregation miteinbezogen.

Die Güte der Übereinstimmung von SAQ und aggregierten QSV ist allerdings von zahlreichen Einflussgrößen abhängig. Wesentlichen Einfluss besitzt der Anteil an Streckenabschnitten mit hohen freien Geschwindigkeiten (> 120 km/h). So können bei identischem harmonisch gemittelten QSV auf einer Hauptroute mit einem hohen Anteil an Autobahnabschnitten wesentlich höhere Reisegeschwindigkeiten erzielt werden als auf einer Nebenroute im nachgeordneten Netz. Die aufgezeigte Güte der Übereinstimmung von harmonischem Mittel und SAQ kann für Verbindungen mit einem Anteil von mindestens 70 % an Autobahnabschnitten der VFS 0 und I angenommen werden. Für Verbindungen mit einem geringeren Anteil liegen keine belastbaren Erkenntnisse vor.

Zudem beeinflussen die Direktheit sowie die Genauigkeit der Abschätzung von Zugangs-, Abgangs- und Parksuchdauern die Güte.

Zusammenfassend werden folgende Randbedingungen definiert, die für die Güte der Übereinstimmung maßgebend sind. Wenn diese Randbedingungen eingehalten sind, kann angenommen werden, dass die Angebotsqualität nach RIN (SAQ) der aggregierten QSV nach HBS entspricht.

1. Es werden ausschließlich vollständige, weiträumige OD-Verbindungen betrachtet, die mindestens die VFS II aufweisen.
2. Es sollten nach Möglichkeit die Kapazitäten der Autobahnabschnitte überprüft und ggf. anstelle der im HBS definierten Kapazitäten verwendet werden.
3. Die aufgezeigten Zusammenhänge können für Verbindungen mit einem Anteil > 70 % an Abschnitten mit hohen realisierbaren mittleren Pkw-Fahrgeschwindigkeiten (AS 0/I) und
4. einem Umwegfaktor UF von SAQ A oder B angenommen werden; für Verbindungen mit abweichenden Charakteristika liegen keine Erkenntnisse vor.

Planungspolitisch fordert das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) für Einzelanlagen an Neu- und Umbaustrecken die Sicherstellung der QSV D. Der aufgezeigte lineare Zusammenhang zwischen aggregierten QSV und SAQ zeigt, dass eine QSV_iD an jeder Einzelanlage auch zu einer Qualitätsstufe D für die gesamte Verbindung (SAQ D) führt.

Können diese Forderungen nicht erreicht werden, ist zu erwarten, dass sich eine bessere bzw. schlechtere Qualitätsstufe an einer Einzelanlage auch auf die Verbindungsqualität auswirkt. Exemplarische Auswertungen für die Untersuchungsstrecke Seligenstadt – Frankfurt zeigen, dass ab einem Anteil von ca. 38 % an QSV_i E und F die SAQ D nicht mehr erreicht wird (SAQ E bzw. F). Aufgrund zahlreicher Einflussparameter (räumliche Ausdehnung der Einzelanlagen; Häufigkeitsverteilung QSV_i) lassen sich im Rahmen dieses Forschungsprojekts allerdings diesbezüglich keine allgemeingültigen Aussagen formulieren. Vor diesem Hintergrund wird auf den aufgezeigten linearen Zusammenhang zwischen aggregierten QSV und SAQ verwiesen, mit dem Einzelfälle individuell untersucht werden können.

Die Anwendung des dargestellten Aggregationsverfahrens impliziert allerdings einen erheblichen Erhebungs- und Analyseaufwand. So ist zunächst die zu untersuchende Verbindung in Einzelanlagen zu differenzieren und jede dieser Einzelanlagen gemäß HBS zu bemessen. Die hierzu benötigten verkehrlichen Kenngrößen liegen zudem insbesondere im innerstädtischen Netz nur in geringem Maße vor, sodass ergänzende Beobachtungen des Verkehrsablaufs notwendig werden würden.

Vor diesem Hintergrund wird ein praxisorientiertes, dreistufiges Verfahren dargestellt, welches den aufgezeigten Zusammenhang zwischen harmonisch gemittelten QSV und SAQ nutzt, um mit einem deutlich geringeren Aufwand die Auswirkungen von Überlastungen an Einzelanlagen auf die Verbindungsqualität abzuschätzen. Dabei nutzt das Verfahren die bestehenden Bemessungsverfahren gemäß HBS. Als Eingangsparameter verwendet das Verfahren die Luftliniengeschwindigkeit aus Reisezeitmessungen und die für die Bemessung der betrachteten Einzelanlagen relevanten verkehrlichen Kenngrößen.

Das aufgezeigte Verfahren ist allerdings ausschließlich für vollständige, weiträumige Verbindungen unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen anwendbar und somit für die Planungspraxis nur bedingt relevant. Für eine übergreifende Bemessung definierter Streckenzüge eines Straßentyps (Stadtstraße, Landstraße, Bundesautobahn) kann dieses Verfahren nicht verwendet werden.

In einem zweiten Verfahren wurden daher explizit Autobahnabschnitte betrachtet. Ziel dieses übergreifenden Bemessungsverfahrens für Autobahnabschnitte ist es, aus den harmonisch gemittelten QSV_i einer Folge von Einzelanlagen innerhalb eines zusammenhängenden Autobahnabschnitts auf die entstehende Verlustzeit zu schließen, die aus der Qualität der Einzelanlagen resultiert. Entgegen der bisherigen Untersuchungsmethodik werden bei diesem Verfahren daher nicht vollständige OD-Verbindungen, sondern definierte Autobahnabschnitte betrachtet. Auf Basis umfangreicher Reisezeitmessungen mit ANPR-Systemen konnte ein exponentieller Zusammenhang zwischen harmonischem Mittel der QSV_i und Verlustzeit bzw. Verlustgeschwindigkeit aufgezeigt werden.

Die Betrachtung der mittleren Pkw-Fahrgeschwindigkeiten zeigte zudem, dass die Zielvorgaben für Netzelemente in Form von angestrebten mittleren Pkw-Fahrgeschwindigkeiten gemäß RIN für die betrachteten Autobahnabschnitte bis zur QSV D erreicht wurden.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenbasis können die aufgezeigten Zusammenhänge gesichert für Autobahnabschnitte angenommen werden, die sich aus sechs bis neun Einzelanlagen zusammensetzen und deren minimal zulässige (statische) Höchstgeschwindigkeit 120 km/h beträgt.

Das Verfahren soll die bestehenden Bemessungsverfahren für freie Streckenabschnitte und planfreie Knotenpunkte im HBS verknüpfen und eine übergreifende Bemessung von planfreien Knotenpunkten und Autobahnabschnitten ermöglichen.

4 Folgerungen für die Praxis

Insgesamt konnte auf Basis umfangreicher empirischer Erhebungen sowie ergänzender modelltechnischer Untersuchungen nachgewiesen werden, dass die Bemessungskonzepte nach RIN und HBS für weiträumige Verbindungen mit einem hohen Anteil an Autobahnabschnitten und einem geringen Umwegfaktor konsistent sind. So stimmen harmonisch gemittelte QSV und SAQ in ca. 70 % der betrachteten Fälle überein. Es zeigte sich allerdings, dass die Wahl des numerischen Ersatzverfahrens, d. h. die Zuweisung von Zahlenwerten zu QSV_i bzw. SAQ maß-

geblichen Einfluss auf die Güte der Übereinstimmung hat. Es wird empfohlen, eine einheitliche, äquidistante Zuordnung von Zahlenwerten sowohl zu den SAQ als auch den QSV_i zu verwenden, um die aufgezeigten konzeptionellen Differenzen zu kompensieren. Die Aggregation sollte mithilfe des gewichteten harmonischen Mittels vorgenommen werden.

Der wesentliche Nutzen der aufgezeigten Verfahren liegt in der Abschätzung des Einflusses von Einzelanlagen auf eine gesamte Verbindung bzw. auf eine Folge von Autobahnabschnitten. So kann beispielsweise abgeschätzt werden, welche Einzelanlagen wesentlichen Einfluss auf die Güte der Verbindungsqualität besitzen und demzufolge den höchsten potenziellen Nutzen bei einer Qualitätsverbesserung durch betriebliche oder entwurfstechnische Maßnahmen implizieren. Auf diese Weise kann der Einsatz von Ressourcen unter der Prämisse möglichst hoher Reisezeitgewinne optimiert werden.