



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Verkehrssystemtechnik

Individueller Schlussbericht zum Forschungsprojekt

KOL:NE - KOOPERATIVE UND OPTIMIERTE LICHTSIGNALSTEUERUNG IN STÄDTISCHEN NETZEN

26.03.2013

Niebel, Wolfgang
Tel.: 030-67055-161
E-Mail: dlr-ts-vm@dlr.de

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Copyright nach DIN ISO 16016 beachten.

Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhaltes sind verboten, soweit nicht ausdrücklich gestattet. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patent-, Gebrauchsmuster- oder Geschmacksmustereintragung vorbehalten.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19P9002B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 3 |
| 1.1 | Motivation und Zielstellung des Projektes KOLINE..... | 3 |
| 1.2 | Inhalt des Berichtes..... | 3 |
| 2 | Stand der Wissenschaft und Technik | 4 |
| 2.1 | Bewertungsprozess | 4 |
| 2.2 | Bewertungsziele | 5 |
| 2.3 | Bewertungsmethoden und -verfahren | 7 |
| 2.4 | Übersicht untersuchter Bewertungsverfahren..... | 8 |
| 2.5 | Fazit..... | 9 |
| 3 | Definition von Anforderungen..... | 10 |
| 3.1 | Methodisches Vorgehen..... | 10 |
| 3.2 | Anforderungen an die Testfelder | 10 |
| 3.3 | Anforderungen an das Zielsystem der abschließenden Bewertung | 11 |
| 3.4 | Anforderungen an das Bewertungsverfahren | 12 |
| 3.5 | Rechtlich-regulatorische Rahmenbedingungen | 13 |
| 4 | Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen im virtuellen Testfeld | 14 |
| 4.1 | Ziele und Methodik | 14 |
| 4.2 | Aufbau des Modells..... | 14 |
| 4.3 | Betrachtete Szenarien | 15 |
| 4.4 | Ergebnisbearbeitung | 16 |
| 5 | Bewertung des KOLINE-Systems | 18 |
| 5.1 | Projektspezifika der Bewertungsverfahren..... | 18 |
| 5.1.1 | Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)..... | 18 |
| 5.1.2 | Performance Index (PI) | 19 |
| 5.1.3 | Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)..... | 19 |
| 5.2 | Ergebnisse der Bewertungsverfahren | 21 |
| 5.2.1 | Verfahren HBS..... | 21 |
| 5.2.2 | Verfahren PI | 22 |
| 5.2.3 | Verfahren KNA..... | 26 |
| 5.3 | Umsetzungsempfehlungen für das KOLINE-System | 29 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 31 |
| 6.1 | Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 31 |
| 6.2 | Ausblick und weiterer Forschungsbedarf..... | 32 |

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung des Projektes KOLINE

Notwendige Halte an Lichtsignalanlagen (LSA) und die damit verbundenen Brems- und Beschleunigungsvorgänge beeinflussen wesentlich die Emissionen des städtischen Kraftfahrzeugverkehrs. Weniger Halte bedeuten daher neben einem gleichmäßigeren Verkehrsfluss und weniger Wartezeitverlusten auch geringere Auswirkungen auf die Umwelt.

Technische Zielstellung des Forschungsprojektes KOLINE war die Entwicklung eines kooperativen Systems von Lichtsignalsteuerung und Assistenzsystem unter Nutzung einer drahtlosen Kommunikation zwischen beiden Komponenten (C2I-Kommunikation). Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen wurde hierbei sowohl eine Optimierung der Lichtsignalsteuerung auf Seiten der Infrastruktur als auch eine Anpassung des Fahrverlaufs der Fahrzeuge durch fahrzeugseitige Systeme angestrebt. Diese wechselseitige Optimierung ermöglicht die Verbesserungen von Leistungsfähigkeit, Emissionsverhalten und Komfort bei bestmöglicher Nutzung der Kapazitäten und geringen Kosten.

Das entwickelte System wurde im Rahmen von Felduntersuchungen im öffentlichen Straßenraum sowie in Simulationsstudien durch die weiteren Projektpartner untersucht, um relevante Wirkungen der Verfahren hinsichtlich Verkehrsablauf und Fahrkomfort zu ermitteln. Die Analyse und abschließende Bewertung im Hinblick auf diese Wirkungsdimensionen sowie die Leistungsfähigkeit des Systems oblag zum Großteil dem DLR – Institut für Verkehrssystemtechnik.

1.2 Inhalt des Berichtes

Der vorliegende individuelle Schlussbericht beschreibt ausschließlich die Arbeiten und Ergebnisse, an denen der Projektpartner DLR – Institut für Verkehrssystemtechnik Anteil hatte. Alle weiteren Arbeiten und Ergebnisse sind im Gesamtschlussbericht enthalten. Der Bericht orientiert sich in seiner Gliederung nicht an der funktional ausgerichteten Struktur der im Projektantrag definierten Arbeitspakete 0 bis 7, sondern primär an den durchgeführten Arbeitsschritten. Die Kapitelinhalte ergeben sich daher wie folgt:

- Kapitel 2: Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik
- Kapitel 3: Ergebnisse aus den Bereichen Anforderungsdefinition und Rahmenbedingungen.
- Kapitel 4: Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen im virtuellen Testfeld
- Kapitel 5: Bewertung des KOLINE-Systems
- Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Um die verkehrlichen Effekte des technischen KOLINE-Systems systematisch erfassen und bewerten zu können, wurden die dazu notwendigen Prozessschritte ermittelt sowie geeignete Ziele, Methoden und Verfahren dafür gesucht und dargestellt.

2.1 Bewertungsprozess

Die abschließende Bewertung des technischen KOLINE-Systems soll sowohl den direkt Projektbeteiligten (*shareholder*) als auch den weiteren Interesseninhabern (*stakeholder*: Benutzer, Betreiber, Betroffene) leicht verständlich und kompakt Informationen über den Projekterfolg bereitstellen. Dies können wertende Aussagen anhand absoluter Kennziffern oder des relativen Erfüllungsgrades ihrer Interessen sein, aber auch relative Vergleiche und Rangfolgen mehrerer Szenarien. Um diese Wertaussagen zu ermitteln sind in dem **Bewertungsprozess**, unabhängig von einem oder mehreren konkret auszuwählenden Bewertungsverfahren, mehrere Phasen und Schritte zu durchlaufen. Diese können der Literatur dazu wie [RITA 2010], [VuU 2008], [VDI 2000] oder [FGSV 2010] entnommen und folgendermaßen skizziert werden:

Schritt 1: Sachmodell und Wertemodell aufstellen

- Sachmodell, bspw. repräsentiert durch Formeln und Parameter
- Wertemodell, bspw. durch Zielsystem gemäß Abschnitt 2.2 abgebildet

Schritt 2: Bewertungsstrategie entwickeln

- Auswahl geeigneter Bewertungsmethoden und -verfahren (vgl. Abschnitt 2.3)
- Ggf. Festlegung notwendiger verfahrensspezifischer Regeln

Schritt 3: Effekte und notwendige Indikatorwerte ermitteln

- durch reale Messungen, Berechnungen, Schätzungen oder komplexe Simulation
- ggf. für mehrere Varianten/Szenarien

Schritt 4: Bewertungsregeln anwenden

- Normierung
- Transformation
- Gewichtung
- Bewertung
- Synthese

Schritt 5: Sensitivitäts- und Risikoanalyse durchführen

- Sensitivitätsanalyse: Untersuchung der Stabilität des Ergebnisses hinsichtlich geänderter Bewertungsregeln
- Risikoanalyse: Untersuchung der Stabilität des Ergebnisses hinsichtlich unterschiedlicher zukünftiger Entwicklungen innerhalb des Sachmodells, meist durch unterschiedliche Parametersätze der Szenarien abgedeckt

Schritt 6: Ergebnis darstellen und Wertaussage treffen

- Interpretation der Einzelergebnisse und Analysen
- Reihung und Präferenzierung der Handlungsalternativen

2.2 Bewertungsziele

Als Grundlage für die strukturierten Aussagen über den Projekterfolg muss schon zu Beginn des Bewertungsprozesses das maßgebende Wertemodell festgelegt werden. Dazu können aus den feststehenden, dem konkreten Bewertungsgegenstand übergeordneten **Zielen** spezifische **Zielfelder** (auch: Zielbereiche) mit Unterzielen in mehreren hierarchischen Ebenen bis hin zu einzelnen **Kriterien** *deduktiv* abgeleitet werden. Das resultierende **Zielsystem** muss dabei konsistent und widerspruchsfrei sein.

Im vorliegenden FuE-Projekt muss weiterhin zwischen den übergeordneten indirekten **Gesamtzielen** verkehrlicher und anderer Art sowie den direkten wissenschaftlichen und technischen **Arbeitszielen** unterschieden werden. *A priori* stellen solche Arbeitsziele mindestens eine *notwendige* Voraussetzung dar, um die Gesamtziele erreichen zu können. Ob sie auch *hinreichend* sind, ist erst *a posteriori* nach der Bewertung ermittelbar.

Mit dem Einsatz von Verkehrstelematiksystemen können recht unterschiedliche verkehrliche Gesamtziele adressiert werden. Orientierung dafür bieten zahlreiche deutsche und internationale Veröffentlichungen wie z.B. [TP 2007], [RITA 2010], [FESTA 2008a] und [BOLTZE 2006], in denen sich bis zu sechs Zielfelder finden lassen, die wie folgt angeordnet werden können:

1. betriebliche Verkehrssicherheit (Safety, Driving Performance),
2. Qualität, Güte des Verkehrsablaufs (Mobility, Productivity, System Performance),
3. Umfeldverträglichkeit (Environment),
4. Wirtschaftlichkeit (Energy, Efficiency),
5. Sicherheit vor dem Umfeld (Security),
6. Kundenzufriedenheit (Customer Satisfaction, Acceptance).

Diesen Zielfeldern werden auf der nächsten Ebene **Kriterien** zugeordnet. Beispielsweise gehören zum Zielfeld 4. *Wirtschaftlichkeit* üblicherweise der Energieverbrauch und die sonstigen Betriebskosten.

Diese Kriterien lassen sich in die zunächst abstrakten Kategorien **Nutzen** oder **Kosten** einteilen, wobei Nutzelemente zur Änderung der Bedürfnisbefriedigung der Gesellschaftsmitglieder beitragen. Kriterienabhängig wird eine Maximierung oder eine Minimierung zur positiven Nutzengenerierung angestrebt. Nutzen können im konkreten Fall jedoch sowohl positiv als auch negativ ausfallen (Bsp. Energieverbrauch – Minimierung angestrebt; bei Erhöhung jedoch negativer Nutzen). Kostenelemente beinhalten die eingebrachten Ressourcen, die damit keiner anderen Verwendung mehr zur Verfügung stehen und in jedem Fall minimiert werden sollen. Es handelt sich hierbei überwiegend um genuin monetäre Investitions- und Betriebskosten.

Die Kriterien müssen weiterhin durch **Indikatoren** operationalisiert werden. Das bedeutet, dass eine eindeutige größenmäßige Definition im Sinne einer für Vergleiche geeigneten Kennzahl vorgenommen wird. Meist ist dafür auch die Angabe einer oder mehrerer zusätzlicher zeitlicher und räumlicher Bezugsgrößen im Nenner notwendig (z.B. Energieverbrauch – verbrauchte Liter Benzin/Diesel pro Jahr und Streckenkilometer).

Aus diesen Indikatoren werden dann die zu messenden oder anderweitig zu erhebenden **physikalischen Größen** abgeleitet, (z.B. Energieverbrauch – verbrauchte Liter Diesel auf dem 439 m langen Abschnitt zwischen den Knoten K61 und K47 im Referenzjahr 2012) und in konkreten **Werten** aus dem Versuch oder Feldtest ausgedrückt (z.B. Energieverbrauch – 23,7 Liter Diesel in der Fahrzeuggruppe der leichten LKW bis 3,5 t auf dem 439 m langen Abschnitt zwischen den Knoten K61 und K47 an einem Normalwerktag des Referenzjahres 2012). Das Aggregationsniveau dieser Werte wird durch die notwendigen zeitlichen und räumlichen Bezugsgrößen vorgegeben.

Tabelle 2-1 gibt einen umfangreichen Überblick über die ersten 4 Zielfelder, deren üblicherweise verwendete Kriterien, die Art und mögliche Einheit der physikalischen Größe ihrer Indikatoren sowie die übliche Zielrichtung zur positiven Nutzengenerierung.

| Zielfeld | Kriterium | Zielrichtung für positiven Nutzen | Größe | Größeneinheit |
|------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------|----------------|
| Sicherheit | Anzahl Unfälle | ↓ | diskret | |
| | Unfallschwere | ↓ | stetig; diskret | €; andere |
| | Personensicherheit | ↑ | nominal | - |
| | Vandalismus | ↓ | nominal | - |
| | Rotlichtverstöße | ↓ | diskret | - |
| Qualität | Erreichbarkeit | ↑ | binär | - |
| | Zugänglichkeit | ↑ | binär | - |
| | Wegelänge | ↓ | stetig | m; km |
| | Reisezeit | ↓ | stetig | s; min; h |
| | Geschwindigkeit | ↑ | stetig | m/s; km/h |
| | Rückstau (Länge od. Zeit) | ↓ | stetig | m; s |
| | Anzahl od. Anteil Halte (bzw. Durchfahrten) | ↓ (↑) | diskret | n; % |
| | Umsteigehäufigkeit | ↓ | diskret | - |
| | Umwegfaktor | ↓ | stetig | % |
| | Benutzbarkeit | ↑ | nominal | - |
| | Informationsqualität | ↑ | nominal | - |
| | Datenqualität | ↑ | stetig | - |
| Umfeldverträglichkeit | Flächeninanspruchnahme | ↓ | stetig | m ² |
| | Lärmemissionen | ↓ | stetig | db(A) |
| | Schadstoffemissionen: (No _x , CO, HC, SO ₂ , PA) | ↓ | stetig | g; t |
| | Klimagas CO ₂ | ↓ | stetig | g; t |
| | Beeinträchtigung Stadt- und Landschaftsbild | ↓ | nominal | - |
| | Trennwirkung* | ↓ | nominal/diskret | s; andere |
| Wirtschaftlichkeit | Bau-, Beschaffungskosten | K | stetig | € |
| | Betriebskosten | K | stetig | € |
| | Instandhaltungskosten | K | stetig | € |
| | Energieverbrauch | ↓ | stetig | J;kWh; l |
| | Einnahmen | ↑ | stetig | € |
| | Fahrzeuganzahl | ↓ | diskret | - |
| | Fahrzeuggröße | ↓ | diskret | - |
| | Zuladung | ↑ | stetig | - |
| | Auslastung | ↑ | stetig | % |
| | Besetzungsgrad | ↑ | stetig | % |
| | Personalanzahl | ↓ | diskret | - |
| Legende: | * verfahrensabhängig teilweise als Wartezeit für querende Fußgänger u. Radfahrer interpretiert K Kostenelement → keine Nutzengenerierung | | | |

Tabelle 2-1: Zielfelder und Kriterien im Verkehr, übliche Zielrichtungen sowie Art der Indikatorengrößen nach [BOLTZE 2008] mit eigenen Ergänzungen

2.3 Bewertungsmethoden und -verfahren

Im zweiten Schritt des Bewertungsprozesses müssen geeignete Bewertungsmethoden und -verfahren gefunden werden. Als Teil des Wissenschaftsgebietes der Entscheidungstheorie bedienen sie sich zahlreicher Arbeiten aus diesem Gebiet.

Dabei stellen **Methoden** der Bewertung prinzipielle Konzepte zur Bewertung verschiedenster Fragestellungen zur Verfügung. Sie lassen sich den **Kategorien** *formalisiert*, *teil-formalisiert* und *nicht-formalisiert* zuordnen, wobei erstere quantitativ und letztere deskriptiv ausgeprägt sind und teil-formalisierte Methoden eine Mischform darstellen. Die quantitativen Methoden in Form von Nutzen-Kosten-Untersuchungen (*Cost-Benefit-Analysis*) lassen sich weiter in *monetäre* und *nicht-monetäre* Ansätze unterteilen. Dem monetären Ansatz eigen ist die Transformation der Nutzelemente in Geldwerte mittels Monetarisierung, wobei die *Kosten-Nutzen-Analyse* (KNA) – auch *Wirtschaftlichkeitsrechnung* genannt – die verbreitetste Methode ist. Die nicht-monetären Vertreter sind die *Nutzwertanalyse* (NWA) sowie die *Kosten-Wirksamkeits-Analyse* (KWA). Die Ergebnisse können durch verschiedene eindimensionale **Gütemaßstäbe** ausgedrückt werden. Bei der KNA werden dafür am häufigsten die *Nutzen-Kosten-Differenz* (NKD), das *Nutzen-Kosten-Verhältnis* (NKV), die *Rentabilität* (R) sowie die *Kostensumme* verwendet. Abbildung 2-1 veranschaulicht diese Zusammenhänge. Nähere Erläuterungen zu den einzelnen Methoden finden sich in der einschlägigen Literatur.

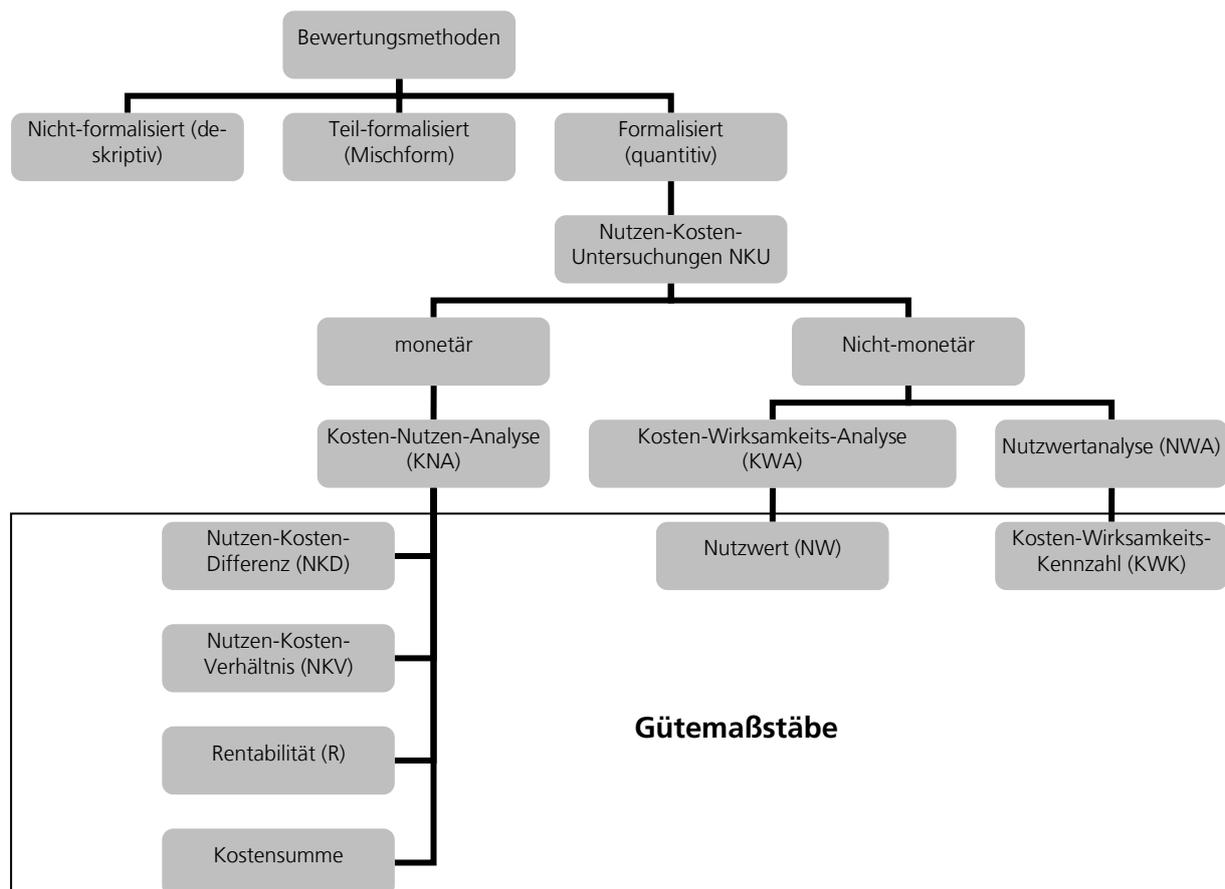


Abbildung 2-1: Ausgewählte Bewertungsmethoden und ihre Gütemaßstäbe

Die vorgenannten Methoden wiederum bedürfen konkreter Ausführungsanweisungen zu ihrer praktischen Anwendung. Vielfältige **Verfahren** im Verkehrsbereich setzen diese Konkretisierung unterschiedlich um und kombinieren teilweise mehrere Methoden miteinander.

Bisherige Forschungsprojekte im Bereich der Verkehrstelematik bzw. *Intelligent Transportation Systems (ITS)* weisen keine einheitliche Methode oder gar ein einheitliches Verfahren bei der

Bewertung auf. Teilweise beschränkt sich diese auf die deskriptive Form für einige wenige Kriterien wie z.B. in AKTIV oder ORINOKO [ORINOKO 2008], in anderen Projekten werden Nutzwertanalysen unter Einbeziehung mehrerer wesentlicher Kriterien durchgeführt [CITYMOBIL 2009] oder Empfehlungen für Kosten-Nutzen-Analysen ausgesprochen [FESTA 2008b] bzw. diese durchgeführt [FAIR 2006]. Einige für den vorliegenden Anwendungsfall relevante Bewertungsverfahren werden im nachfolgenden Abschnitt 2.4 kurz dargestellt.

2.4 Übersicht untersuchter Bewertungsverfahren

KNA nach EWS/RWS

Die *Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (EWS) [FGSV 1997] sind eine Verfahrensanweisung für Straßenbauvorhaben in Deutschland und bedienen sich der Methodik einer Nutzen-Kosten-Analyse. Für insgesamt 7 Nutzenkriterien sind die zur Monetarisierung notwendigen Kostensätze mit Stand 1995 angegeben. Der Entwurf einer Neufassung nunmehr als *Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (RWS) befindet sich seit 2012 in der Abstimmung mit dem BMVBS und den Bundesländern.

KNA nach BVWP

Der *Bundesverkehrswegeplan* (BVWP) [BMVBW 2003] als Investitionsrahmenplan für Infrastrukturprojekte in der Verantwortung des Bundes wird anhand des dazu entwickelten Bewertungsverfahrens aufgestellt. Den Kern bildet eine Nutzen-Kosten-Analyse mit 9 Nutzenkriterien, die um weitere nicht-monetarisierende Bewertungsmethoden ergänzt wird. Die Monetarisierungs- bzw. Bewertungsansätze wurden 2009 überarbeitet [BMVBS 2009]. Die Methodik für den neu aufzustellenden BVWP 2015 befindet sich seit 2012 in der Überarbeitung.

KNA nach FESTA

Im Handbuch FESTA wird darauf hingewiesen, dass eine vollständige Nutzen-Kosten-Analyse KNA (Cost-Benefit-Analysis, CBA) bei Verkehrstelematik-Projekten kaum möglich ist, da keine vollständigen Kostenermittlungen durchgeführt werden können. Wesentliche Kostenelemente sind aufgelistet, jedoch ohne Quantifizierung [FESTA 2008b].

QSV nach HBS

Die *Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs* (QSV) gemäß des *Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen* (HBS) [FGSV 2002] ist ein dimensionsloser Gütemaßstab im Wertebereich [A,F]. Er bestimmt sich anhand der Transformation eines einzelnen – jedoch nach Art des zu bewertenden Verkehrsnetzelementes unterschiedlichen – kardinalen Kriteriums aus dem Ziel-feld *Qualität des Verkehrsablaufs*. Im Fall von LSA-geregelten Knotenpunkten dient dazu die *mittlere Wartezeit*. Die Qualitätsstufen A..F sind auch verbal hinterlegt und drücken den Erreichungsgrad definierter Zielgüteanforderungen aus. Insofern weißt dieses Verfahren eine große Ähnlichkeit zur Nutzwertanalyse auf, verzichtet jedoch auf eine Wertsynthese mehrerer Kriterien. Dies wiederum kann sogar als bewusste Gewichtung anderer in Frage kommender Kriterien mit dem Wert „0“ interpretiert werden.

PI

Ein *Performance-Index* für verkehrstechnische Bewertungsaufgaben wurde u.a. Ende der 60er Jahre im Software-Programm TRANSYT des *Transport Research Laboratory* (TRL) im Vereinigten Königreich implementiert. In einem jüngeren Forschungsvorhaben [WIETHOLT 2009] wurde der PI so angewandt, dass er die Kriterien *Anzahl der Halte*, *Wartezeit* sowie *Verkehrsmittelauslastung* einbezieht, gewichtet und synthetisiert. Das Ergebnis ist ein dimensionsloser Gütemaßstab zum relativen Variantenvergleich, dessen Idealwert bei 0 liegt und der umso schlechter ausfällt, je größer er ist. Das Verfahren nutzt damit größtenteils die Methodik der Nutzwertanalyse, verzichtet jedoch auf die Festlegung von Zielwerten und somit darauf, die Zielerträge in Zielerreichungsgrade zu transformieren.

NWA im Projekt CityMobil

Im Projekt *CityMobil* des 6. EU-Forschungsrahmenprogramms [CITYMOBIL 2009] werden in einem konsensualen Prozess durch die Projektpartner aus anfänglich 64 Bewertungskriterien 9 Schlüsselkriterien in 3 Zielfeldern zur Anwendung ausgewählt. Die angewandte Methodik der Nutzwertanalyse erfordert eine anschließende Gewichtsbestimmung, welche ebenfalls durch die Projektpartner erfolgt. Nach der Wertsynthese und Ergebnisberechnung rundet eine Sensitivitätsanalyse das Verfahren ab.

Projekt Dmotion

Im BMWi-geförderten Projekt Dmotion werden im AP 600 Feldversuche und Evaluierung des Gesamtsystems in den APs 640 die verkehrlichen Wirkungen anhand der Kriterien *Geschwindigkeit* bzw. *Reisezeit*, *Verkehrsstärke*, *Staulänge* und *RDS-TMC-Meldungen* bewertet. Losgelöst davon findet im AP 650 eine Akzeptanzuntersuchung mittels Befragungen statt. Im AP 660 schließlich werden die Nutzelemente *Fahrzeit* und *Betriebskosten* u.a. auf der Basis der EWS in wirtschaftlicher Hinsicht bewertet.

Projekt AKTIV

Im BMWi-geförderten Projekt AKTIV werden neben der technischen Bewertung im Sinne der Sicherstellung der Systemverfügbarkeit auch das Nutzerverhalten und die Akzeptanz mittels Testfahrerbefragungen abgeschätzt sowie eine verkehrliche Bewertung vorgenommen. Dabei stehen die Ziele Erhöhung der Verkehrssicherheit, Verbesserung der Leistungsfähigkeit und der Effektivität sowie Verbesserung des Komforts im Fokus, die wiederum durch Kriterien repräsentiert werden wie z.B. *Reisezeiten* oder die *Harmonisierung von Geschwindigkeiten* (mit Auswirkung auf die Verkehrssicherheit). Eine Synthese dieser Kriterien findet jedoch nicht statt.

2.5 Fazit

Bisherige Forschungsprojekte im Bereich der Verkehrstelematik bzw. *Intelligent Transportation Systems ITS* weisen noch keine einheitliche Methode oder gar ein einheitliches Verfahren zur verkehrlichen Bewertung auf. Die Bandbreite erstreckt sich von der deskriptiven Form über Nutzwertanalysen unter Einbeziehung mehrerer wesentlicher Indikatoren bis hin zu Kosten-Nutzen-Analysen.

3 Definition von Anforderungen

3.1 Methodisches Vorgehen

Innerhalb des Projektes KOLINE wurden aus verschiedenen Perspektiven Anforderungen sowohl an die realen technischen Systeme als auch hinsichtlich der Bewertung sowie des ihr zugrunde liegenden virtuellen Testfelds (Simulation) erarbeitet. Die verschiedenen Sichtweisen werden durch die einzelnen Projektpartner und ihre Rolle im Projekt repräsentiert. Die formulierten Anforderungen wurden in einem Anforderungskatalog zusammengeführt und nach Pflichtanforderungen (muss = m) sowie weiteren optionalen Anforderungen (o) differenziert gekennzeichnet.

3.2 Anforderungen an die Testfelder

Übergeordnete Anforderung an das gesamte Testkonzept ist die Abstimmung der Untersuchungen mit den Zielen und Aktivitäten der „Anwendungsplattform Intelligente Mobilität“ (AIM). Mit AIM baut das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) gegenwärtig in Kooperation mit der Stadt Braunschweig die gesamte Region Braunschweig zu einer offenen Plattform für modernste Mobilitätsanwendungen in realem Umfeld auf. Durch die anzustrebende möglichst weitgehende inhaltliche und technische Einbindung von KOLINE in AIM ist von Synergieeffekten auszugehen und redundante Entwicklungspfade werden vermieden.

Da die verkehrliche Bewertung lediglich auf den Ergebnissen der Simulation als virtuellem Testfeld basiert, ergeben sich aus Sicht der Bewertung lediglich an dieses Testfeld konkrete Anforderungen gemäß Tabelle 3-1.

| Anforderung virtuelles Testfeld | m/o |
|---|-----|
| Umsetzung: Das virtuelle Testfeld als Sachmodell muss in Form einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation umgesetzt werden, um so die Interaktionen der einzelnen Verkehrsteilnehmer untereinander und mit der Infrastruktur abbilden zu können. | m |
| Abbildung des Demonstrationsfeldes: Das virtuelle Testfeld muss mindestens die räumlichen Gegebenheiten des Demonstrationsfeldes nachbilden und so eine Ergebnisübertragung zwischen den Testfeldern ermöglichen. | m |
| Ausstattungsdaten: Das virtuelle Testfeld muss verschiedene Ausstattungsdaten des Verkehrsassistenzsystems abbilden können. | m |
| Simulation der C2I-Kommunikation: Das virtuelle Testfeld muss die C2I-Kommunikation hinsichtlich Reichweite und möglicher Fehler (fehlende, falsche Daten) realitätsnah abbilden bzw. mitsimulieren. | m |
| Daten zur Bewertung: Um die im Abschnitt 3.3 definierten Bewertungskriterien auswerten zu können, muss die Simulation die notwendigen Indikatoren dazu ausgeben. Dies sind: <ul style="list-style-type: none"> - Anzahl Durchfahrten/Halte der Fahrzeuge - mittlere Wartezeiten (ÖV, Fußgänger, Radfahrer, MIV) - Rückstaulänge - Netz-Reisegeschwindigkeit (IV, Güterverkehr (Lkw/Zugmaschinen), Bus) - Verkehrsstärke - Luftschadstoffe (NO_x, CO, HC, PA) - Klimagas CO₂ - Lärm - Kraftstoffverbrauch - Trajektorien aller simulierten Fahrzeuge im Format .trj | m |
| Berücksichtigung von Richtlinien: Zum Zweck der Qualitätssicherung sollen die „Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung“ der FGSV bei Aufbau und späteren simulativen Betrachtungen beachtet werden. | m |

| Anforderung virtuelles Testfeld | m/o |
|--|-----|
| Datenversorgung des virtuellen Testfeldes: Hinsichtlich der Datenversorgung des virtuellen Testfeldes sollten Informationen zu den aktuellen Verkehrsbelastungen und Knotenströmen im Netz beim Betreiber bekannt sein und zur Verfügung gestellt werden | o |

Tabelle 3-1: Anforderungen an das virtuelle Testfeld

3.3 Anforderungen an das Zielsystem der abschließenden Bewertung

Das zu Beginn des Bewertungsprozesses aufgestellte Zielsystem muss konsistent zu den im Kapitel 1 des Projektantrags genannten **Gesamtzielen** verkehrlicher und anderer Art sowie den zugrunde liegenden wissenschaftlichen und technischen **Arbeitszielen** sein. Da davon ausgegangen wird, dass die verkehrlichen Gesamtziele nur dann erreicht werden können, wenn das Arbeitsziel eines funktionierend umgesetzten technischen Systems erreicht wurde, müssen die Arbeitsziele nicht explizit im Zielsystem enthalten sein.

Die dem Projekt übergeordneten und damit fest vorgegebenen Oberziele sind dem förderpolitischen Zielsystem des 3. Verkehrsforschungsprogramms „Mobilität und Verkehrstechnologien“ der Bundesregierung, namentlich aus den Handlungsfeldern 2.1.2 *Mobilität für Menschen im 21. Jahrhundert: Klima und Lärmschutz* sowie 2.1.3 *Intelligente Infrastruktur: Staufrei mit intelligenten Verkehrssystemen* (vgl. Abschnitt 1.2 Projektantrag) entnommen.

Die damit korrespondierenden Gesamtziele aus Abschnitt 1.1 des Projektantrags stellen jedoch nur eine Auswahl derjenigen Ziele dar, die durch den Einsatz von Verkehrstelematik erreicht werden können. Deshalb wurde das Zielsystem so ergänzt, dass von den im Abschnitt 2.2 genannten sechs Zielfeldern folgende vier bei der Bewertung Berücksichtigung finden sollen:

1. betriebliche Verkehrssicherheit
2. Qualität, Güte des Verkehrsablaufs
3. Umfeldverträglichkeit
4. Wirtschaftlichkeit

Beim Zielfeld 1. *Verkehrssicherheit* ist zu bedenken, dass die Indikatoren des Kriteriums *Anzahl der Unfälle* zwar wie alle anderen Indikatoren auch für die Ist-Analyse festgestellt werden können. In Simulationen zukünftiger Szenarien jedoch ist eine direkte Ermittlung des Unfallgeschehens u.a. aus Modellgründen derzeit nicht möglich. Entweder müssen hier Vorher-Nachher-Erfahrungen aus vergleichbaren Feldtests zur Abschätzung herangezogen werden, oder es erfolgt eine indirekte Ermittlung im Anschluss an die Simulation mittels des innovativen Verfahrens *Surrogate Safety Assessment Model (SSAM)* [FHWA 2008].

Die beiden Zielfelder 5. *Sicherheit vor dem Umfeld* und 6. *Kundenzufriedenheit* können durch das im Projekt anzuwendende Erhebungsverfahren einer rein verkehrlichen Simulation nicht oder nur schwer erfasst werden. Überdies muss eine abgesicherte Funktionsweise des Systems bereits vorausgesetzt werden, was in den Bereich der Arbeitsziele fällt. Zudem wurde unter den Projektpartnern Einigkeit darin erzielt, dass auf die Kundenzufriedenheit als sehr partnerspezifisches Zielfeld nicht weiter eingegangen werden soll. Gleichwohl bleibt festzuhalten, dass sich die Akzeptanzrate als Kriterium der Kundenzufriedenheit indirekt im Szenarienparameter *Ausstattungsrate* niederschlägt.

Weiterhin sind nicht alle in der Tabelle 2-1 enthaltenen Kriterien für das Projekt relevant oder ermittelbar. Deswegen erfolgte mit den Projektpartnern eine Eingrenzung sowie die Ergänzung um weitere Kriterien, welche in den in Betracht gezogenen Bewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 2.4) zum Einsatz kommen oder aus Bewerter-sicht berücksichtigt werden sollten. Beispielsweise hat sich der Schwefelanteil in Kraftstoffen in den letzten Jahren so drastisch verringert, dass quasi kein Schwefeldioxid mehr entsteht und dieser Indikator vernachlässigt werden kann. Auch

die Flächeninanspruchnahme durch Verkehrsinfrastruktur wird sich bei Verkehrstelematik-Projekten meist nicht verändern und kann damit als Kriterium entfallen.

Um diese so aufgestellten Bewertungskriterien auswerten zu können, müssen deren Indikatoren und die ihnen zugrunde liegenden physikalischen Größen durch die durchzuführende mikroskopische Verkehrssimulation und ergänzende Quellen verfügbar gemacht werden. Es werden folgende aus Tabelle 3-2 ersichtliche Zielbereiche und Kriterien in die Bewertung einbezogen. Die Werte für die entsprechend markierten Kriterien werden vom Bearbeiter der Verkehrssimulation geliefert:

| Zielfeld | Kriterium | Zielrichtung für positiven Nutzen | Größeneinheit |
|------------------------------|--|-----------------------------------|---------------|
| Sicherheit | Anzahl Unfälle | ↓ | n |
| | Unfallschwere | ↓ | €/n |
| Qualität | Reisezeit | ↓ | s; min; h |
| | Verlustzeit | ↓ | s |
| | Anteil Durchfahrten | ↑ | % |
| Umfeldverträglichkeit | Schadstoffemissionen: (NO _x , CO, HC, PA) | ↓ | g; t |
| | Klimagas CO ₂ | ↓ | g; t |
| | Trennwirkung i.F.v. Wartezeit | ↓ | s |
| Wirtschaftlichkeit | Bau-, Beschaffungskosten | K | € |
| | Betriebskosten | K | € |
| | Instandhaltungskosten | K | € |
| | Kraftstoffverbrauch | ↓ | l |
| | Besetzungsgrad | ↑ | % |
| Legende: | K Kostenelement → keine Nutzengenerierung  direkt von der Verkehrssimulation zu beziehen  indirekte Ermittlung aus den Daten der Verkehrssimulation  anderweitige Ermittlung | | |

Tabelle 3-2: für KOLINE ausgewählte Zielfelder und Kriterien, ihre übliche Zielrichtungen sowie Art der Indikatorengrößen

Die weiterhin notwendigen konkreten zeitlichen oder räumlichen Bezugsgrößen im Nenner der Indikatoren ergeben sich erst aus den anzuwendenden Bewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 3.4). Bei manchen Verfahren wird z.B. die Abgrenzung zu unterscheidender Bewertungszeiträume dem Bewertenden überlassen, während bei anderen Verfahren genaue Angaben darüber bestehen. Dementsprechend unterschiedlich zu wählen sind das zeitliche Aggregationsniveau der Messwerte und die daraus resultierenden zeitlichen Bezugsgrößen der Indikatoren. Abschließende Angaben sind daher erst bei Anwendung der konkreten Verfahren möglich.

3.4 Anforderungen an das Bewertungsverfahren

Im 2. Schritt des Bewertungsprozesses wurde aufgrund der Auswertung möglicher Bewertungsverfahren im Abschnitt 2.4 für die KOLINE-Bewertungsstrategie festgelegt, mehrere Ansätze parallel zu verwenden. Dadurch ist eine gute Vergleichbarkeit sowohl mit diversen derzeitigen und zukünftigen Verkehrstelematik-Projekten als auch verschiedener Bewertungsverfahren untereinander möglich, um deren Stärken und Schwächen zu identifizieren. Dabei soll mindestens ein formalisiertes Verfahren der Nutzen-Kosten-Untersuchungsmethodik zur Anwendung kommen.

Tabelle 3-3 zeigt, welche Bewertungskriterien in den einzelnen Bewertungsverfahren einbezogen sind, wenn möglich mit Angabe ihrer verfahrensspezifischen Benennung oder Fundstelle.

| Bewertungskriterium | Einheit | Bewertungsverfahren | | | |
|---|---------|---------------------|----------------|---|--|
| | | QSV nach HBS | PI (TU Bochum) | NKA nach EWS | NKA nach BVWP 2003 |
| 1. Verkehrssicherheit | | | | | |
| Unfälle mit Personensch. | n/a | | | x (6.3) | x (NS) |
| Unfälle mit Sachschaden | n/a | | | x (6.3) | x (NS) |
| 2. Güte d. V-Ablaufs | | | | | |
| Durchfahrten/Halte Fz | %, n | x | x | | |
| mittlere Wartezeit ÖV | s | x | x | | |
| mittlere Wartezeit Fg/ Trennwirkung | s | x | x | x (6.7) | x (NU3) |
| mittlere Wartezeit Rad | s | x | x | | |
| Fahrzeit IV | h/a | | | x (6.2) | x (NE) |
| Fahrzeit GV (L/Z) | h/a | | | x (6.2) | x (NE) |
| Fahrzeit Bus | h/a | | | x (6.2) | x (NE) |
| 3. Umfeldverträglichkeit | | | | | |
| Luftschadstoffe (NO _x , CO, HC, PA) | g/Kfzkm | | | x (6.5) | x (NU2a, b) |
| Klimagas CO ₂ | t/Kfzkm | | | x (6.6) | x (NU2d) |
| Lärm | | | | x (6.4) | x (NU1) |
| 4. Wirtschaftlichkeit | | | | | |
| Betriebskosten (nur Energieverbrauch) | g/Kfzkm | | | x (6.1) | x (NB2) |
| Besetzungsgrad Bus | PAX/Fz | | x | per Mittelwert im Kostensatz lt. Abschn. 3.2 enthalten | per Mittelwert lt. Teil III B, Abschn. 1.7 in anderen Kriterien enthalten |
| Besetzungsgrad PKW | PAX/Fz | | x | | |
| | | | | in Klammern: entsprechender Abschnitt der EWS | Bezeichnung der entsprechenden Nutzenelemente des BVWP |

Tabelle 3-3: Bewertungskriterien verschiedener Bewertungsverfahren

3.5 Rechtlich-regulatorische Rahmenbedingungen

Als grundlegende Anforderung wurde die Berücksichtigung aller relevanten Bestimmungen hinsichtlich Straßen(verkehrs)recht, Telekommunikationsrecht, Haftungsrecht, Datensicherheitsrecht und gewerblichem Rechtsschutz formuliert. Detaillierte Anforderungen diesbezüglich wurden gemäß dem KOLINE-Projektantrag aus dem Projekt sim^{TD} übernommen. Die entsprechenden Arbeiten führte die VW AG aus, das DLR – Institut für Verkehrssystemtechnik war hier lediglich als Leiter des Arbeitspaktes zuständig.

4 Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen im virtuellen Testfeld

4.1 Ziele und Methodik

Das virtuelle Testfeld dient dazu, die Auswirkungen des KOLINE-Systems auf Verkehrsfluss, verkehrsbedingte Emissionen sowie Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Ausstattungsraten und unter kontrollierbaren Randbedingungen zu untersuchen. Der Projektpartner IVS baut das Modell in der genutzten Software AIMSUN NG auf und führt die Simulationen der Szenarien durch, das DLR – Institut für Verkehrssystemtechnik steuert die aus den Bewertungsverfahren resultierenden Parameter bei und leistet Assistenz bei der Validierung der abgebildeten Funktionen.

4.2 Aufbau des Modells

Der im Modell abgebildete Verkehr setzt sich aus sieben Fahrzeugtypen zusammen, wobei die folgenden prozentualen Anteile gemäß [BMVBW 2003] verwendet wurden:

- | | |
|----------------------------------|-----------|
| ▪ Leichter LKW bis 3,5 t (LN): | 1,4160 % |
| ▪ LKW ohne Anhänger > 3,5t (LS): | 1,5216 % |
| ▪ LKW mit Anhänger (ZL): | 0,8448 % |
| ▪ Sattelschlepper (ZS): | 0,5424 % |
| ▪ Reisebus (BR): | 0,1392 % |
| ▪ Linienbus (BL): | 0,3360 % |
| ▪ PKW Dieselmotor (PD): | 16,3744 % |
| ▪ PKW Ottomotor (PO): | 78,8256 % |

Die Werte sind Mittelwerte für Innerortsstraßen im Bundesland Niedersachsen und beziehen sich auf die Fahrleistung, im vorliegenden Fall ohne weitere Anpassung für die Flottenzusammensetzung. Die DTV-Anteile für den Güterverkehr entsprechen dabei 2,9 %, für den Schwerverkehr 4,8 % und für PKW 95,2 %. Fußgänger- und Radfahrerströme wurden nur vereinfacht modelliert, da die für eine exakte Modellierung notwendigen Zusatzmodule für die Simulationssoftware nicht zur Verfügung standen. Für diese Verkehrsmodi werden später gemäß Abschnitt 4.4 die Kenngrößen nacherzeugt.

Die Parameter der Kraftstoffmodellierung mit *AIMSUN NG* basieren auf den Parametern der EWS mit dem Minderungsfaktor $k_f(J)$ für das Jahr 2010. Der nachträgliche Abgleich mit der Verbrauchskurve PO des BVWP2003 für das Prognosejahr 2015 weist einen Mehrverbrauch von konstant 1 l/100km über den gesamten Fahrgeschwindigkeitsbereich aus. Aus den modellierten Kraftstoffverbräuchen lassen sich später die CO₂-Emissionen direkt ableiten und müssen daher nicht gesondert modelliert werden. Der entsprechende Zusammenhang für Benzin lautet 3,28 kg CO₂/l, für Diesel 3,22 kg CO₂/l.

Die Emissionsmodellierung von CO, Kohlenwasserstoff (HC), NO_x und Partikeln basiert auf den 2009 für den BVWP aktualisierten HBEFA-Parametern, die für das Prognosejahr 2020 bestimmt wurden. Ausgehend von den dort definierten Verkehrssituationen wurden die Faktoren der vier definierten Fahrzustände der Simulation berechnet. Sie ersetzen damit die veralteten voreingestellten Werte der Simulationssoftware und die ebenso veralteten Werte der EWS. Auffällig ist hierbei, dass Schwefeldioxid (SO₂) u.a. wegen der strengen Grenzwerte zukünftig nur noch in vernachlässigbar kleinen Konzentrationen bzw. gar nicht anfällt.

4.3 Betrachtete Szenarien

Ziel der Untersuchungen im virtuellen Testfeld war es, die bei einer Markteinführung zu erwartenden verkehrlichen Wirkungen des KOLINE-Systems abzuschätzen. Als Werkzeug zur systematischen Abschätzung dieser Wirkungen sollte eine Mikrosimulation dienen, da diese es erlaubt, unterschiedliche Szenarien abzubilden. Durch die Betrachtung verschiedener Szenarien kann dann der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Wirksamkeit des Systems ermittelt werden. Da der Aufwand zur Simulation eines einzelnen Szenarios beträchtlich sein kann, ist es notwendig sich auf eine begrenzte Anzahl von verschiedenen Szenarien festzulegen. Weiterhin ist es wichtig bei der Definition verschiedener Szenarien stets nur einzelne Randbedingung zu variieren, um so den spezifischen Einfluss dieser Randbedingung isoliert betrachten zu können.

Zunächst wurden zwei Gruppen von Randbedingungen identifiziert, mittels derer die verschiedenen Szenarien charakterisiert werden können. Dies sind äußere Randbedingungen, welche das Umfeld in welchem das System genutzt wird beschreiben, sowie innere Randbedingungen, mit welchen das System selbst und deren Anwendung beschrieben werden kann. Dabei handelt es sich um:

- Äußere Randbedingungen:
 - Aufbau der Infrastruktur (Aufbau des Straßennetzes, vorhandene LSA),
 - Verkehrliche Situation (Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung);
- Innere Randbedingungen (Systemparameter):
 - Art der LSA-Steuerung,
 - Ausstattungsgrad der Fahrzeuge,
 - Art der Fahrassistenz,
 - Art der Rückstauschätzung.

Da das vorhandene Modell bereits räumlich einen größeren Netzausschnitt mit sieben Knotenpunkten umfasst und auch zeitlich fast ein gesamter Tag simuliert wird (6:00 bis 22:00 Uhr), kann man davon ausgehen, dass innerhalb einer Simulation eine Vielzahl von verschiedenen Situationen auftritt. Die Wirksamkeit des Systems kann also schon innerhalb einer Simulation anhand sehr vieler verschiedener Situationen untersucht werden. Um die Anzahl der zu betrachtenden Szenarien klein zu halten, wurde deshalb festgelegt, dass die äußeren Rahmenbedingungen bei allen Szenarien konstant sein sollen. Bei der Definition der verschiedenen Szenarien wurden demnach nur die vier bereits benannten Systemparameter variiert. Im Folgenden wird beschrieben, welche Ausprägungen der einzelnen Parameter dabei konkret betrachtet wurden.

Eine Übersicht über alle betrachteten Szenarien mit den Ausprägungen der jeweiligen Parameter ist der Tabelle 4-1 zu entnehmen.

| Szenario | LSA-Steuerung | Fahrstrategie | Ausstattungsgrad | Rückstauschätzung |
|-------------|--|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Ist-Zustand | Bei Erhebung aktive Schaltung | keine | 0 % | ohne |
| Test 1 | Mittels Vergleichsverfahren (TRANSYT) optimierte Festzeitsteuerung | keine | 0 % | ohne |
| Test 2 | Modellbasierte KOLINE-Optimierung | keine | 0 % | ohne |
| Test 3 | Modellbasierte KOLINE-Optimierung | Fz mit Längssteuerung (GLOSA) | 5 % | mit TRANSFusion |
| Test 4 | Modellbasierte KOLINE-Optimierung | Fz mit Längssteuerung (GLOSA) | 15 % | mit TRANSFusion |
| Test 5 | Modellbasierte KOLINE-Optimierung | Fz mit Längssteuerung (GLOSA) | 25 % | mit TRANSFusion |
| Test 6 | Modellbasierte KOLINE-Optimierung | Fz mit Längssteuerung (GLOSA) | 35 % | mit TRANSFusion |
| Test 7 | Mittels Vergleichsverfahren (TRANSYT) optimierte Festzeitsteuerung | Fz mit Längssteuerung (GLOSA) | 35 % | mit TRANSFusion |
| Test 8 | Modellbasierte KOLINE-Optimierung | Fz mit Längssteuerung (GLOSA) | 35 % | ohne |

Tabelle 4-1: Übersicht über die Simulationsszenarien

4.4 Ergebnisbearbeitung

Da die Simulationssoftware *AIMSUN NG* lücken- und fehlerbehaftete Ergebnisdatenbanken liefert, müssen diese zunächst nachbearbeitet werden.

Zunächst sind aus den Einzelergebnissen der 16 Simulationsläufe pro Szenario Mittelwerte zu bilden, die – wo notwendig – gewichtet sind. Nur diese Werte bleiben in der Datenbank erhalten. Aus den Schaltplandateien werden die mittleren Wartezeiten für Fußgänger sowie Radfahrer ermittelt und in die Datenbanken eingefügt. Ebenfalls werden die aus Zählungen hochgerechneten bzw. geschätzten Verkehrsmengen dieser beiden Verkehrsarten in die Datenbanken nachgetragen.

Des Weiteren müssen die durch minimale Abweichungen der Verkehrsmengen (flow) zwischen den Szenarien bedingten Fehler behoben werden. Obwohl eine identische Verkehrsmenge über den simulierten Tageszeitraum von 6 Uhr bis 22 Uhr der Simulation vorgegeben wurde und für das Kosten-Nutzen-Bewertungsverfahren auch unbedingt notwendig ist, wich die Simulation davon geringfügig ab ($\pm 0,01\%$.. $5,8\%$ in Bezug auf den Ist-Zustand). Die Tagessummenwerte für alle 8 zuführenden Straßenarme lauten für die einzelnen Szenarien wie in Tabelle 4-2.

| Ist-Zustand | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | T8 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 54.436 | 54.437 | 54.446 | 54.413 | 54.489 | 54.449 | 54.133 | 54.440 | 54.133 |
| Δ | +1 | +10 | -23 | +53 | +13 | -303 | +4 | -303 |

Tabelle 4-2: Tagessummen der Verkehrsstärken

Die Differenzen der einzelnen 7 Fahrzeugtypen und 12 Straßenarme können dabei innerhalb eines Szenarios unterschiedlich und sogar entgegengesetzt sein. Daher müssen pro Szenario $7 \cdot 12 = 84$ Korrekturfaktoren berechnet werden. Diese werden auf die zur Bewertung herangezogenen Tagessummenwerte des Kraftstoffverbrauchs (fuelc) und der Reisezeit (traveltime) angewandt. Aufgrund der relativ geringen Höhe von Schadstoffemissionen bleiben diese unkorrigiert. Mit den so neu ermittelten Werten können die entsprechenden alten Datenbankeinträge überschrieben werden.

Die fahstreifenfeinen Simulationsergebnisse umfassen nicht alle notwendigen Messwerte wie Verkehrsmenge, Haltezeit und Anzahl der Halte. Ansätze, diese mit Hilfe der in dieser Hinsicht vollständig vorhandenen Messwerte der Abbiegebeziehungen zu ermitteln, brachten keine belastbaren Ergebnisse für diejenigen Fahstreifen, auf denen sich mehrere Abbiegebeziehungen überlagern bzw. die nur anteilig den Verkehrsstrom einer Abbiegebeziehung tragen (vgl. Abbildung 4-1). Die zugrunde gelegte Annahme, dass dieser Anteil umgekehrt proportional zur mittleren Rückstaulänge q_{mean} sei, erwies sich als nicht immer zutreffend, zumal auch in der Simulationssoftware implementierte falsche Algorithmen für unplausible Ergebnisse sorgten. Insofern konnte hier keine Ergänzung vorgenommen werden.

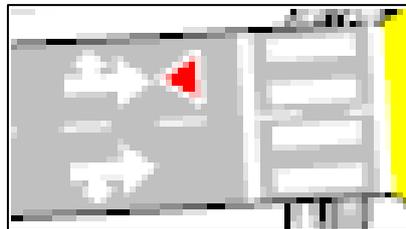


Abbildung 4-1: Zufahrtsspuren mit aufgeteilten und sich überlagernden Abbiegebeziehungen

5 Bewertung des KOLINE-Systems

Die im Schritt 2 des Bewertungsprozesses festgelegten Verfahren (vgl. Abschnitt 3.4) müssen auf die im Schritt 3 simulativ ermittelten Effekte und deren Indikatorwerte entsprechend Schritt 4 angewendet werden. Dies geschah im Projekt überwiegend mit eigens erstellter Java-Software, welche durch übersichtliche Konfigurationsdateien gesteuert wird. Somit konnten reproduzierbare Ergebnisse sichergestellt werden, welche den Datenbanken hinzugefügt sind. Auch die geforderte Sensitivitätsanalyse gemäß Schritt 5 wurde damit durchgeführt. Die formal im Schritt 2 ebenfalls festzulegenden verfahrensspezifischen Parameter und Regeln werden in Abschnitt 5.1 dargelegt. Die Ergebnisse, deren Interpretation sowie darauf aufbauende Empfehlungen gemäß Schritt 6 sind in den Abschnitten 5.2 und 5.3 festgehalten.

5.1 Projektspezifika der Bewertungsverfahren

5.1.1 Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)

Das allgemeine Verfahren wird in Abschnitt 2.4 beschrieben. Aufgrund der nicht verfügbaren fahrstreifenfeinen Werte für die Bewertungskriterien *mittlere Wartezeit* und *Anteil Halte* kann nur für die Verkehrsmittelgruppen Fußgänger und Radfahrer die QSV gemäß HBS ermittelt werden. Behelfsmäßig wird die QSV des MIV und des ÖV für die gesamte Zufahrt ermittelt. Die maßgebliche und somit darzustellende Spitzenstunde bei allen drei Knotenpunkten liegt zwischen 16 und 17 Uhr. Die anzuwendenden Schwellenwerte sind in Tabelle 5-1 aufgeführt und in Abbildung 5-1 dargestellt. Bei Fußgängern ist zu beachten, dass im Demonstrationsfeld nur die Nord-Süd-Ströme an den Nebenknoten keine Mittelinsel passieren müssen. Für alle anderen Ströme sind die Werte gemäß Fußnote um 5 s zu erhöhen.

Tabelle 5-1: HBS-Qualitätsstufen mit zugehörigen Schwellenwerten für LSA-Knotenpunkte (tabellarisch)

| QSV | mittlere Wartezeit w [s] | | | | Anteil ungehinderter Durchfahrten [%] |
|----------|---|---|---|---|---|
| |  |  |  * |  (nicht koordiniert) |  (koordiniert) |
| A | ≤ 5 | ≤ 15 | ≤ 15 | ≤ 20 | ≥ 95 |
| B | ≤ 15 | ≤ 25 | ≤ 20 | ≤ 35 | ≥ 85 |
| C | ≤ 25 | ≤ 35 | ≤ 25 | ≤ 50 | ≥ 75 |
| D | ≤ 40 | ≤ 45 | ≤ 30 | ≤ 70 | ≥ 65 |
| E | ≤ 60 | ≤ 60 | ≤ 35 | ≤ 100 | ≥ 50 |
| F | > 60 | > 60 | > 35 | > 100 | < 50 |

* zusätzlich 5 s beim Passieren einer Mittelinsel

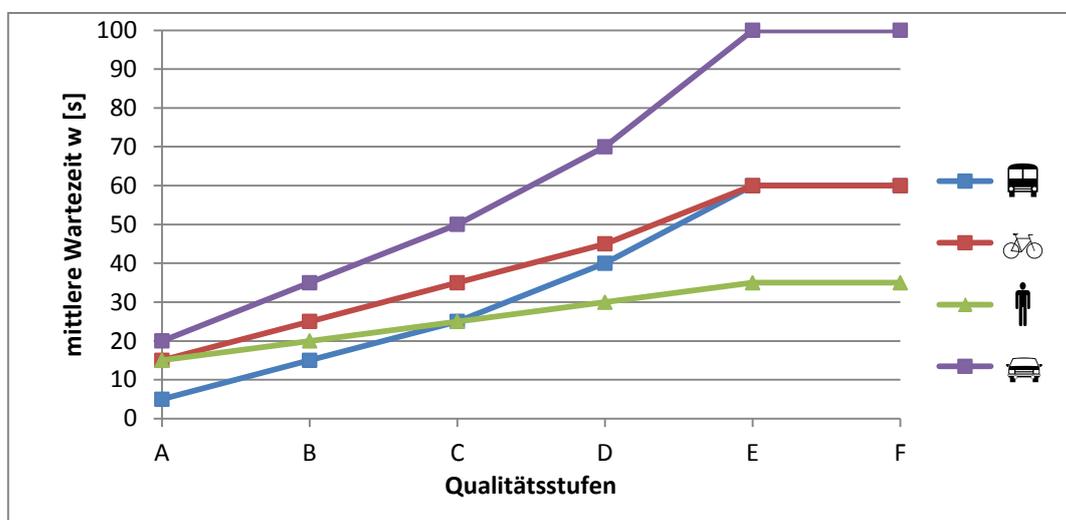


Abbildung 5-1: HBS-Qualitätsstufen mit zugehörigen Schwellenwerten für LSA-Knotenpunkte (Diagramm)

5.1.2 Performance Index (PI)

Das allgemeine Verfahren wird in Abschnitt 2.4 beschrieben, die allgemeine Berechnungsformel des PI lautet:

$$PI = \frac{\sum_i \sum_k (w_{i,k} + G_h h_{i,k}) P_{i,k}}{\sum_i \sum_k P_{i,k}} \text{ mit}$$

- i Index der Knotenpunktzufahrten,
- k Index der Verkehrsmittel,
- w mittlere Wartezeit,
- G_h Gewichtung der Anzahl der Halte,
- h mittlere Anzahl der Halte,
- P Anzahl betroffene Personen.

Definitionsgemäß liegt der Idealwert bei 0 und wird umso schlechter, je größer er ist. Auch hier wird das Kriterium mittlere Wartezeit w herangezogen, obwohl die – meist höhere Verlustzeit – ebenfalls in Frage käme. Über das Produkt aus Verkehrsmenge und verkehrsmittelspezifischem Besetzungsgrad ergibt sich die Anzahl betroffener Personen P . Der Besetzungsgrad des (M)IV wurde gemäß [WVI 1998] auf allen Zufahrten zu jedem Zeitpunkt mit 1,23 P/Fzg angesetzt, der von Fußgängern und Radfahrer mit 1. Der Besetzungsgrad des ÖV konnte stunden- und streckenfein aus linien- und haltestellenfeinen Daten der BSVAG-Zählung 2012 berechnet werden. Die Gewichtung der Anzahl der Halte mit $G_h = 60$ folgt dem Vorschlag in [WIETHOLT 2009], obwohl die dabei zugrunde liegende Annahme der Kraftstoffverbrauchs-Äquivalenz von einmal Anfahren nach dem Halt gleich 60 s Wartezeit-Leerlauf inzwischen in Richtung 70 s verschoben ist.

Die Haltanzahl der Fußgänger fließt nicht in die Berechnung ein. Die Ermittlung erfolgt für alle 15-Minuten-Intervalle sowie für das Tagesmittel.

5.1.3 Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)

Die allgemeinen Ausführungen zu den KNA-Verfahren sind in Abschnitt 2.4 enthalten. Als Rahmen für die Kosten-Nutzen-Berechnung dient zunächst die EWS. Abweichungen davon betreffen:

- die laufenden Kosten, welche sich durch die an bestehende Anlagen hinzugefügten Telematikkomponenten nicht wesentlich verändern und somit unberücksichtigt bleiben können,
- die Wertansätze zur Monetarisierung der Nutzenkomponenten, die den aktualisierten BVWP-Ansätzen von 2009 entsprechen,
- die Berücksichtigung der Schwankungen der Verkehrsstärke innerhalb eines Jahres mittels Dauerlinie mit 15 verschiedenen Zeitabschnitten t (Erläuterung vgl. Ziff. 1),
- die Fahrzeuggruppenanteile, welche gemäß Abb. 65 des BVWP 2003 für Innerortsstraßen (IGO) im Bundesland Niedersachsen (NS) ermittelt und im Abschnitt 4 dargestellt sind, das Unfallgeschehen und die Lärmbelastung, welche aufgrund fehlender Ermittlungsverfahren nicht berechnet werden konnten (Erläuterung vgl. Ziff. 2 und 3),
- die Belastung durch Luftschadstoffe, welcher die Emissionsfaktoren gemäß des BVWP 2009 für das Prognosejahr 2020 zugrunde liegen (vgl. Abschnitt 4.2),

- die Belastung von Menschen und Bauten durch Luftschadstoffe, deren Immissionsmodell auf dem *Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen ohne oder mit lockerer Randbebauung* Ausgabe 2005 (MLuS-02, geä. F. 2005) anstatt der Vorläuferausgabe von 1992 aufbaut,
- die Trennwirkung von Straßen, für welche ausschließlich die gemäß Abschnitt 4.4 ermittelten mittleren Wartezeiten sowohl für Fußgänger als auch Radfahrer herangezogen wurden,
- die Flächenverfügbarkeit in bebauten Gebieten, welche sich durch reine Telematikmaßnahmen nicht verändert und somit unberücksichtigt bleiben kann.

Erläuterungen:

1. Das in der EWS verwendete Verfahren zur Berücksichtigung der Schwankungen der Verkehrsstärke innerhalb eines Jahres mittels Dauerlinie mit lediglich 15 verschiedenen Zeitabschnitten t wird inzwischen als nicht geeignet eingestuft [PINKOFSKY 2005] und auch im BVWP 2003 durch feinere Berechnungen ersetzt. Diese Aufteilung in 360 gleichartige Stundenintervalle pro Jahr konnte jedoch nicht durch die mikroskopische Simulation abgedeckt werden. Daher wurde zunächst der Ansatz verfolgt, anhand äquivalenter Verkehrsmengen jeweils das passendste der 64 Simulationsintervalle für jeden der 15 Zeitabschnitte zu finden und über die Anzahl Stunden pro Jahr T hochzurechnen. Dies erzeugte jedoch in Summe Abweichungen der Tagesverkehrsstärke in Höhe von ca. 10% zwischen den Szenarien, so dass unzulässige Indikatorenwerte entstanden. Um dies zu umgehen, wurden zunächst die simulierten Tagesergebnisse auf 201 Normalwerktagelinear hochgerechnet. Zur Berücksichtigung der verbleibenden 164 Urlaubswerktagel sowie Sonntage (44,9 % des Jahres) dient ein gewichteter Hochrechnungsfaktor von 1,5, welcher außerdem die geringeren Verkehrsmengen ca. 66 % an Urlaubswerktagel sowie 50 % an Sonntagen mit einbezieht. Für die Zeitkosten beträgt er jedoch nur 1,4, da an diesen Tagen wesentlich weniger gewerbliche Wege durchgeführt werden. Detaillierte Analysen ergaben außerdem, dass die spezifischen Verlustzeiten und Kraftstoffverbräuche je Fahrzeug nahezu unabhängig von der Verkehrsmenge und damit dem Sättigungsgrad des Straßenabschnittes sind. Dies begünstigt den Ansatz der linearen Extrapolation.
2. Für die Vorhersage von Unfallzahlen wurde das neuartige Verfahren *Surrogate Safety Assessment Model* (SSAM) [FHWA 2008] getestet. Dazu liefert die Verkehrssimulation Fahrzeugtrajektorien mit einer Aufzeichnungsfrequenz von ≥ 1 Hz, wobei diese jedoch in Abhängigkeit der konkret eingesetzten Software enorme Unterschiede und Inplausibilitäten aufweisen. Anhand festgelegter Schwellwerte werden mögliche Konflikte in den drei Kategorien „Fahrstreifenwechsel“, „Auffahren“ und „Kreuzen“ bestimmt und für den Ist-Zustand in einen Formel-Zusammenhang mit den realen Unfallzahlen gesetzt. Die Unfalldatensätze des Jahres 2011 stellte die Polizei-Inspektion Braunschweig zur Verfügung. Mittels der Formelparameter soll aus den Trajektorien und Konfliktzahlen der Zukunftsszenarien ebenfalls die Unfallanzahl ermittelt werden können. Eine sichere und differenzierte Anwendung dieses Verfahrens samt vielfältiger Parameter, für welches in Deutschland bisher kaum Erfahrungen vorliegen, konnte im Rahmen des Projektes jedoch nicht erreicht werden.

3. Die EWS-Berechnungsformel für Lärmbelastungen enthält lediglich Abhängigkeiten von Größen, welche sich im vorliegenden Fall nicht verändern. Modelle mit Abhängigkeiten von den real gefahrenen Geschwindigkeiten [BUWAL 2004] oder Brems- und Anfahrvorgängen [LELONG 1999], [TRL 2005] existieren, konnten im Rahmen des Projektes jedoch nicht anwendbar modifiziert werden.

Für die Immissionsberechnung von Luftschadstoffen wurde der Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit in Braunschweig mit $u = 3,4 \text{ m/s}$ festgelegt gemäß [BRAUNSCHWEIG 2007]. Die außerdem benötigten Angaben zur Straßenraumgeometrie, Bebauung sowie Einwohneranzahl stammen aus den GIS-Daten der Stadt Braunschweig und eigenen Auswertungen von Luftbildern.

Die Sensitivitätsbetrachtung umfasste die Veränderung der Fahrzeiten gemäß Empfehlung in der BVWP-Überarbeitung [BMVBS 2009], bei denen für Einzelzeitgewinne zwischen 0 und 5 Minuten eine lineare Gewichtung zwischen 0 und 100 % stattfindet. Ein Einzelzeitgewinn von 3 s gegenüber dem Ist-Zustand wird demnach mit 1 % gewichtet, so dass der Nutzen aus diesem Kriterium vernachlässigbar wird.

Auf der Kostenseite erfolgten Schätzungen für die Investitionen in die KOLINE-LSA-Infrastruktur sowie die KOLINE-Fahrzeugausrüstung mittels On-Board-Unit (OBU). Die LSA-Road-Side-Unit (RSU) sowie explizit zusätzliche Installationsaufwände summieren sich auf ca. 10.000 € pro Knotenpunkt (KP), die Signalprogrammversorgung schlägt mit ca. 3.000 € pro KP zu Buche¹. Bei einem Nutzungszeitraum von 20 Jahren [BMVBW 2003] sind so $650 \text{ €}/(\text{KP} \cdot \text{a})$ anzusetzen. Eine Ausnahme bildet das Szenario T2, bei welchem keine RSU-Kosten anfallen und sich dieser Wert auf $150 \text{ €}/(\text{KP} \cdot \text{a})$ reduziert. Ausgehend von aktuellen FuE-Markt-Preisen für die OBU erfolgte analog zu bereits eingeführten technischen Geräten die Abschätzung für den Massenmarkt mit 500 €/Fahrzeug unabhängig vom Fahrzeugtyp. Bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren analog zur derzeitigen mittleren Fahrzeuglebensdauer sind dies $50 \text{ €}/(\text{Fz} \cdot \text{a})$. Diese Kosten dürfen jedoch nur für die ausgestatteten Fahrzeuge des jeweiligen Szenarios angesetzt werden. Außerdem muss unterstellt werden, dass sowohl RSU als auch OBU neben den KOLINE-Funktionalitäten weiteren Funktionen zur Verfügung stehen. Daher sind die Kosten nur mit dem Anteil anzusetzen, der auf KOLINE entfällt. Es ist zu erwarten, dass mit fortschreitenden Ausstattungsraten auch die Anzahl der Funktionalitäten steigt. Zur Vereinfachung dient die Annahme, dass das Produkt aus Ausstattungsrate und KOLINE-Anteil an allen genutzten Funktionalitäten konstant über alle Szenarien 5 % beträgt. Außerdem können die OBU an mehreren Knotenpunkten genutzt werden. Es wird außerdem unterstellt, dass im Mittel alle ausgestatteten Fahrzeuge zweimal täglich einen bestimmten Knotenpunkt passieren, so dass nur die Hälfte der querschnittsbezogenen Verkehrsmenge Q in die Berechnung mit eingeht.

5.2 Ergebnisse der Bewertungsverfahren

5.2.1 Verfahren HBS

Die ausgewerteten Szenarien (vgl. Abschnitt 4.3) können zunächst in zwei Gruppen G1 und G2 eingeteilt werden, da sie jeweils völlig identische Qualitätseinstufungen aufweisen; $G1 = \{\text{Ist}, T2, T3, T4\}$ umfasst das Basisszenario sowie die Szenarien mit geringen Ausstattungsraten, $G2 = \{T5, T6, T8\}$ beinhaltet die Szenarien mit den höheren Ausstattungsraten. Selbst diese beiden Gruppen G1 und G2 unterscheiden sich nur in zwei Einstufung minimal voneinander: der MIV auf der Westzufahrt an den Hauptknoten (289) weist in G2 mit der Stufe C eine Verschlechterung gegenüber G1 mit der Stufe B auf. Dahingegen ist die Qualität des ÖV auf der Ostzufahrt am östlichen Nebenknoten (4067) in G2 mit der Stufe A besser als in G1 mit der Stufe B. Die beiden TRANSYT-optimierten Szenarien T1 und T7 unterscheiden sich zunächst untereinander bei mehreren Zufahrten, wobei T7 jeweils die schlechteren Werte als T1 aufweist. Darüber hinaus weisen die beiden Szenarien gegenüber den Gruppen G1 und G2 an mehreren Stellen Verbesserungen

¹ abgeleitet von einem real vorliegenden Angebot aus dem Jahr 2011

oder Verschlechterungen auf. Einen Überblick mit den wesentlichen Einstufungen gewährt Tabelle 5-2. Die Stufen D, E und F sind dort zusammengefasst schwarz dargestellt.

Tabelle 5-2: HBS-Qualitätsstufen der 12 Knotenpunktzufahrten (Auswahl)

| Zufahrt-ID | IV | | | ÖV | | | Fuß | | Rad | | |
|------------|------|----|----|----|----|----|-------|----|-------|----|---|
| | G1 | G2 | T1 | G1 | G2 | T1 | G1+G2 | T1 | G1+G2 | T1 | |
| K61 | 271 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | 284 | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | ● |
| | 287 | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | ● |
| | 292 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| K47 | 289 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | 308 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | 313 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | 327 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| K46 | 325 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | 343 | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | ● |
| | 346 | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | ● |
| | 4067 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Legende:

- A
- B
- C
- D, E, F

Für den MIV ist festzustellen, dass ausschließlich stabile Verkehrszustände vorliegen und nur einmal die Stufe D erreicht wird. Die untergeordneten, querenden Zufahrten der beiden Nebenknoten weisen dabei erwartungsgemäß schlechtere Stufen als die Hauptzufahrten auf.

Im ÖV werden mehrmals die QSV D und E erreicht, im Szenario T1 sogar einmal die kritische Stufe F.

Im Fußgänger- und Radverkehr führen die beträchtlichen Wartezeiten am Hauptknoten zu Einstufungen in D und E. An den beiden Nebenknoten erfahren die den Hauptstrom Querenden Qualitätsstufen von C und B, während die den Nebenstrom Querenden die hervorragende Qualitätsstufe A mit sehr kurzen Wartezeiten erreichen.

Wegen fehlender Verfahrensweisungen zur Wertsynthese – weder über die Verkehrsmittel noch über die Knotenpunktzufahrten hinweg – sind Gesamtaussagen über präferierte Szenarien nicht möglich.

5.2.2 Verfahren PI

Auch beim PI zeigt sich, dass die ausgewerteten Szenarien zumindest an den beiden Nebenknoten in Gruppen ähnlichen Verhaltens eingeteilt werden können. Anders als bei der QSV-Bewertung fällt der Ist-Zustand jedoch nicht in die Gruppe $G1=\{T2, T3, T4\}$, sondern stellt einen Einzelfall dar. Die Gruppe $G2=\{T5, T6, T8\}$ ist wiederum nahezu identisch mit $G1$. Die beiden TRANSYT-optimierten Szenarien können diesmal als neue Gruppe $G3=\{T1, T7\}$ zusammengefasst werden.

Der Vergleich aller Szenariotypen für den westlichen Nebenknoten K61 in Abbildung 5-2 zeigt, dass der Ist-Zustand nur während der Morgenspitzenstunde zwischen 7 Uhr und 8 Uhr wesentlich besser ist als die anderen Szenarien, aber lediglich in der ersten Morgenstunde zwischen 6 Uhr und 7 Uhr schlechter ist als $G3$. Im Tagesmittel liegt der $PI=30$ des Ist-Zustand jedoch nur geringfügig über dem $PI=29$ der $G1/G2$. Dies liegt an der Gewichtung über die Verkehrsströme, wodurch die gute Morgenspitzenstunde des Ist-Zustands stark zur Geltung kommt. Im Tagesver-

lauf lässt sich gut sehen, dass sowohl der Ist-Zustand als auch G3 auf die Änderung der Signalpläne um 9 Uhr, 13 Uhr und in geringerem Maße um 19 Uhr reagieren. Ob die schlechten Werte zwischen 9 Uhr und 13 Uhr mit den Signalplänen von G1/G2 verbessert werden könnten, muss offen bleiben.

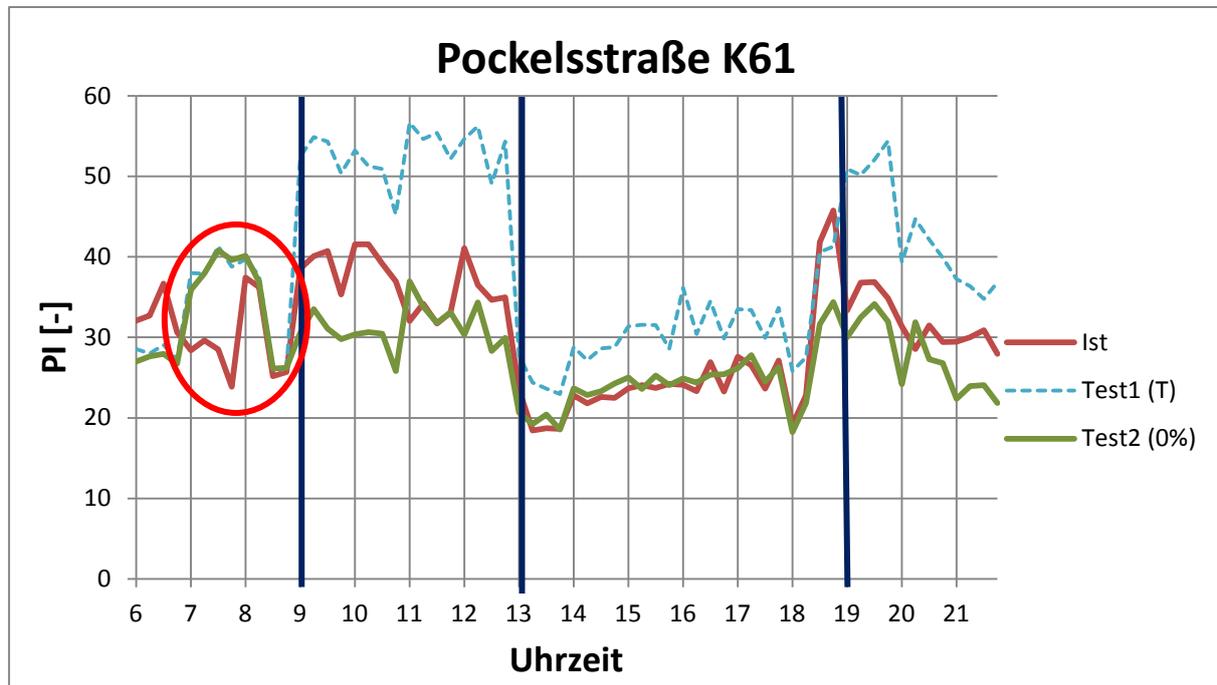


Abbildung 5-2: Performance Index (PI) im Tagesverlauf am K61 Pockelsstraße

Der Vergleich aller Szenariotypen für den östlichen Nebenknoten K46 in Abbildung 5-3 zeigt ein etwas anderes Bild. Der ab 9 Uhr konstant bessere PI von G1/G2 drückt sich auch im Tagesmittel-PI=28 gegenüber dem Ist-Zustand mit PI=34 aus. Dieser wiederum ist nur marginal besser als der Tagesmittel-PI=35 der G3. Diese TRANSYT-optimierten Szenarien sind bis zum ersten Signalplan-Umschaltzeitpunkt 9 Uhr die besten aller Szenarien und liegen nach dem dritten Signalplan-Umschaltzeitpunkt 19 Uhr zumindest noch unterhalb des Ist-Zustands.

Trotz ähnlicher PI-Tagesmittelwerte ist der Verlauf am östlichen Nebenknoten stetiger als am westlichen Nebenknoten mit mehreren Sprüngen.

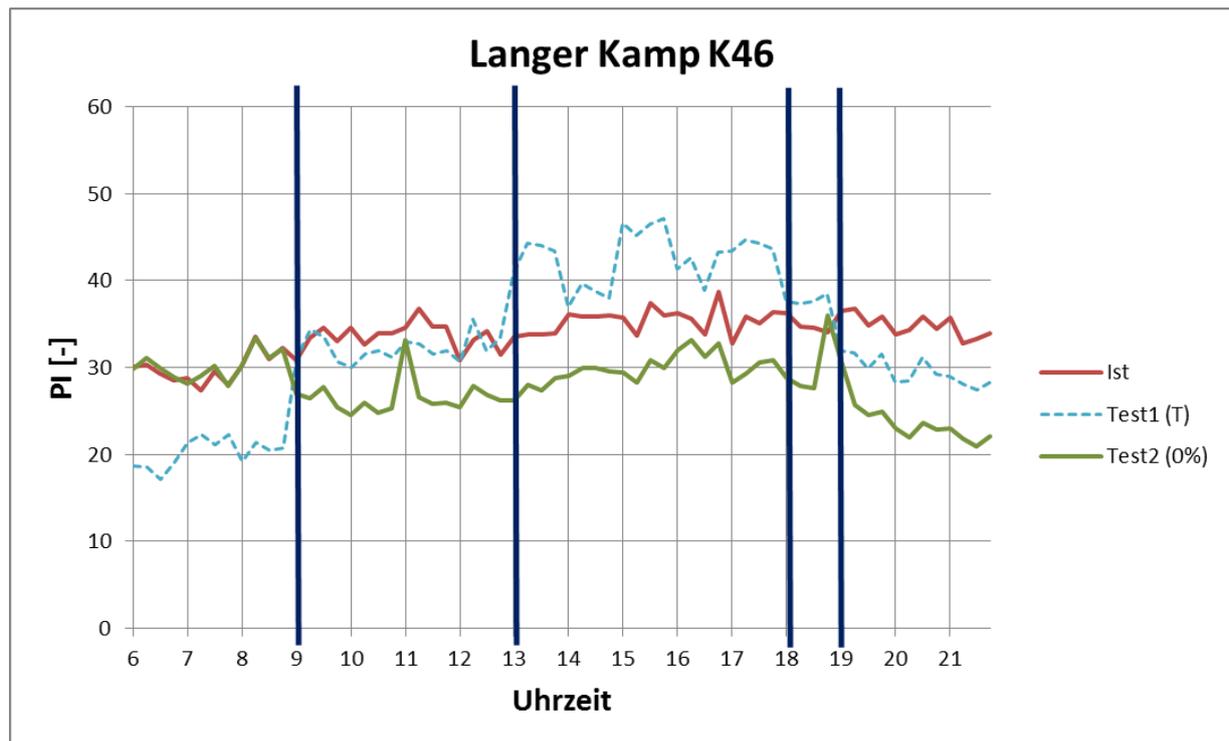


Abbildung 5-3: Performance Index (PI) im Tagesverlauf am K46 Langer Kamp

Am Hauptknoten K47 liegt der PI in allen Szenarien weit über dem PI der Nebenknoten (vgl. Abbildung 5-4). Im Tagesmittel beträgt er zwischen 71 und 73, ausgenommen G3. Bis zum zweiten Signalplan-Umschaltzeitpunkt 13 Uhr lassen sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Szenarien feststellen. Nach 13 Uhr liegt der PI von G3 signifikant über den PI der anderen Szenarien(gruppen).

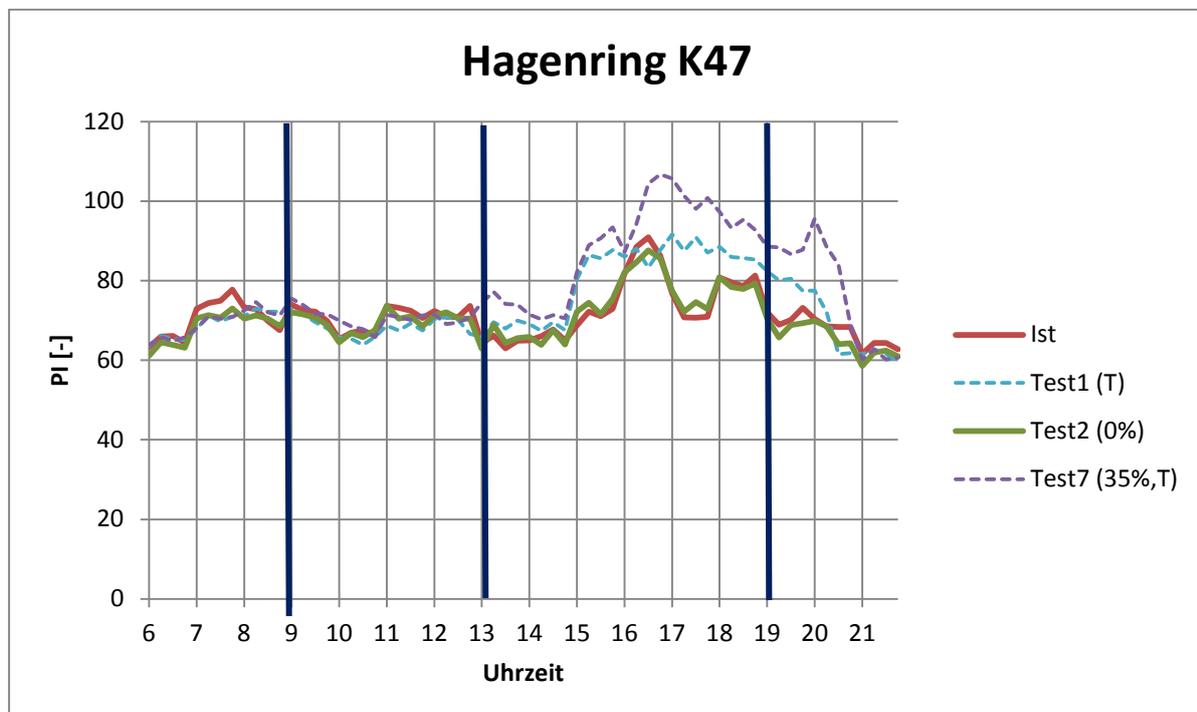


Abbildung 5-4: Performance Index (PI) im Tagesverlauf am K47 Hagenring

Bei näherer Betrachtung zeigen sich jedoch Auffälligkeiten in der Morgen- und Nachmittagsspitze. In der Zeit von 7:30 Uhr bis 8:30 Uhr weichen die Szenarien T6 und (teilweise) T8 mit der

Ausstattungsrate von 35 % wesentlich nach oben von den übrigen Szenarien der G1/G2 ab (vgl. Abbildung 5-5).

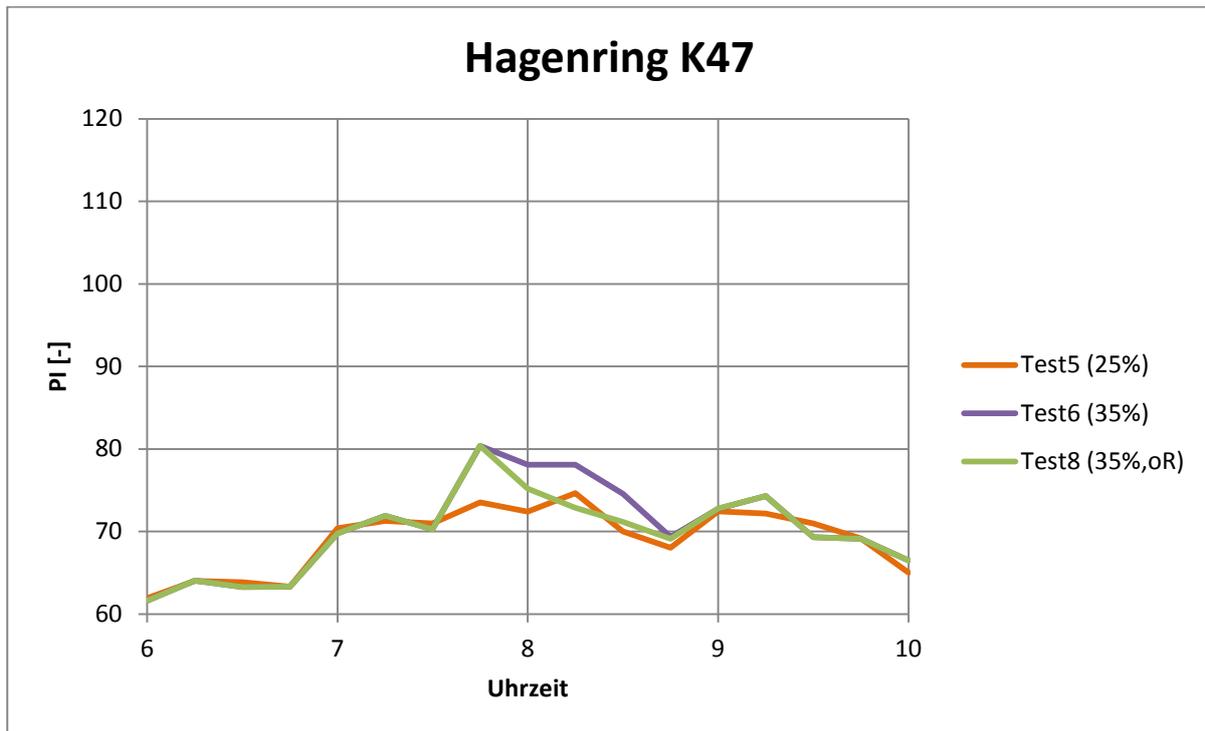


Abbildung 5-5: Performance Index (PI) der Morgenspitze am K47 Hagenring für Szenarien G2

In der Spitzenstunde zwischen 16 Uhr bis 17 Uhr unterschreitet nur der PI des Szenarios T2 den Ist-Zustand. Alle anderen Szenarien überschreiten diesen PI, und zwar zunehmend mit höherer Ausstattungsrate (vgl. Abbildung 5-6). Den schlechtesten PI hat das Szenario T5 mit 25 % Ausstattung, die Szenarien T6 und T8 mit der Ausstattungsrate von 35 % liegen dann wieder auf dem Niveau von T4 mit 15 % Ausstattung.

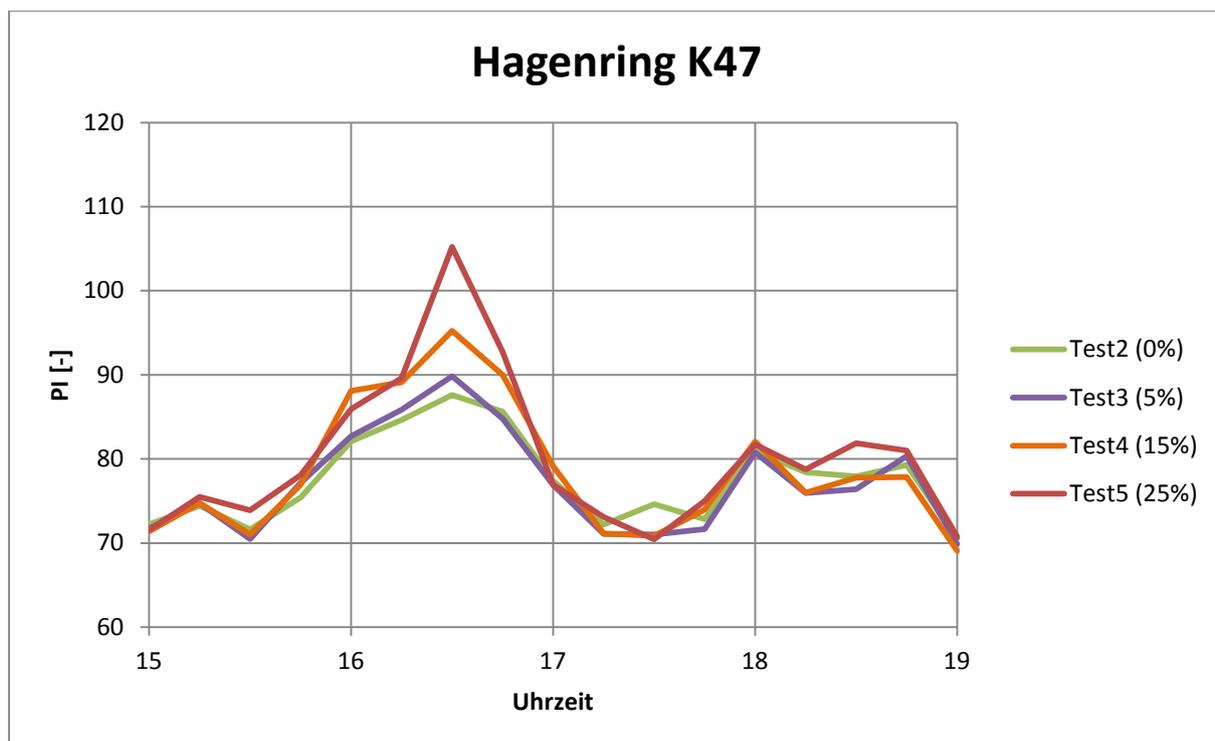


Abbildung 5-6 Performance Index (PI) der Nachmittagspitze am K47 Hagenring für Szenarien G1/G2

Es kann zunächst festgestellt werden, dass die TRANSYT-optimierten Szenarien T1 und T7 eine Verschlechterung gegenüber dem Ist-Zustand darstellen. Lediglich am östlichen Nebenknoten K46 könnte der TRANSYT-Morgensignalplan eine Verbesserung darstellen. Außerhalb der Spitzenbelastungen stellen die Szenarien der G1/G2 gegenüber dem Ist-Zustand eine Verbesserung dar, wobei diese meist schon durch das Szenario T2 mit 0 % Ausstattungsrate erreicht werden. Für die Morgenspitzenstunde könnte am westlichen Nebenknoten K61 der Einsatz des derzeitigen Signalplans vorteilhafter sein, eine derartige Überprüfung ist im Projektrahmen jedoch nicht möglich gewesen.

5.2.3 Verfahren KNA

Kosten

Die Ermittlung der gleichbleibend für jedes Jahr anzusetzenden Investitionskosten K erfolgt getrennt auf die Knotenpunkte nach der Formel:

$$K = K_{KP} \times nF_{RSU} + \frac{1}{n_{KP}} \left(K_{OBU} \times \frac{Q}{2} \times \frac{R_{OBU}}{nF_{OBU}} \right) \text{ mit}$$

K_{KP} Kosten zur Ausrüstung eines KP,

nF_{RSU} Anzahl Funktionalitäten der RSU=const=1 (Vereinfachung)²,

n_{KP} Anzahl insgesamt passierter Knotenpunkte mit KOLINE-Funktion.

K_{OBU} Kosten je Fahrzeug-OBU,

Q Verkehrsmenge aller Knotenpunktzufahrten

R_{OBU} Ausstattungsrate mit OBU,

nF_{OBU} Anzahl Funktionalitäten der OBU, wobei $\frac{R_{OBU}}{nF_{OBU}} = \text{const} = 0,05$ (Annahme),

Es ergeben sich folgende knotenpunktspezifische Investitionskosten in Abhängigkeit von der Anzahl insgesamt passierter Knotenpunkte mit KOLINE-Funktion (Tabelle 5-3):

Tabelle 5-3 Kosten je Knotenpunkt

| KP | $\frac{Q}{2}$ (6-22 Uhr) | Szenario T2 | Anzahl passierter Knotenpunkte n_{KP} Szenarien T3 bis T8 | | | | |
|-------|--------------------------|-------------|---|----------|----------|----------|----------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| K61 | 32.750 | 150€ | 41.600 € | 21.100 € | 14.300 € | 10.900 € | 8.800 € |
| K47 | 51.050 | 150€ | 64.500 € | 32.600 € | 21.900 € | 16.600 € | 13.400 € |
| K46 | 26.050 | 150€ | 33.200 € | 16.900 € | 11.500 € | 8.800 € | 7.200 € |
| Summe | | 450€ | n.a. | n.a. | 47.700 € | 36.300 € | 29.400 € |

Nutzen

Die monetarisierten Nutzeneffekte aller Szenarien sind in der Ergebnis-Tabelle 5-4 als auf volle Hundert gerundete Randsummen aller drei Einzelknoten sowohl je Bewertungskriterium als auch als Gesamtsummen für den Zeitraum von 201 Normalwerktagen je Jahr angegeben. Zusätzlich ist der hochgerechnete Wert für ein volles Jahr angegeben. Positive – grün gefärbte – Zahlen bedeuten dabei, dass das Szenario gegenüber dem Ist-Zustand eine Verbesserung hervorruft. Negative – rot gefärbte – Zahlen bedeuten dagegen eine Verschlechterung des Szenarios gegenüber dem Ist-Zustand.

² da RSU-Kostenanteil mit knapp 3 % an allen Kosten K marginal ist

Tabelle 5-4 aggregierte Nutzen je Kriterium für alle Szenarien

| Szenario | Betriebskosten | Fahrtzeit | Trennwirkung | Schadstoffe | CO ₂ | Σ 201 Tage | Σ p.a. |
|----------|----------------|------------|--------------|-------------|-----------------|------------|------------|
| Test 2 | 10.600 € | 47.800 € | 0 | 0 | 3.200 € | 61.500 € | 87.500 € |
| Test 3 | 6.700 € | 30.700 € | 0 | 0 | 2.000 € | 39.400 € | 56.000 € |
| Test 4 | 12.900 € | 44.000 € | 0 | 0 | 3.900 € | 60.700 € | 86.600 € |
| Test 5 | 11.400 € | 5.200 € | 0 | -100 € | 3.400 € | 20.000 € | 29.500 € |
| Test 6 | 16.000 € | 18.700 € | 0 | 0 | 4.800 € | 39.400 € | 57.200 € |
| Test 8 | 16.600 € | 27.300 € | 0 | 0 | 5.000 € | 48.800 € | 70.500 € |
| Test 1 | -28.600 € | -336.000 € | 2.100 € | -200 € | -8.500 € | -371.200 € | -523.200 € |
| Test 7 | -35.400 € | -533.000 € | 2.100 € | -200 € | -10.500 € | -577.100 € | -812.400 € |

Es fallen zunächst die gravierenden Verschlechterungen der TRANSYT-optimierten Szenarien T1 und T7 auf, welche lediglich bei der Trennwirkung (Wartezeiten Fußgänger und Radfahrer) Nutzen generieren. Diese Beobachtung deckt sich mit den QSV in Tabelle 5-2, welche für T1 und T7 teilweise besser ausfallen als für den Ist-Zustand in Gruppe G1.

Für die restlichen sechs Szenarien sind die Jahressummen sowohl je Knotenpunkt als auch als Gesamtsumme in nachstehender Abbildung 5-7 aufgetragen. Bei der Gesamtsumme fällt auf, dass das Szenario T2 trotz 0 % Ausstattungsrate gleichauf mit Szenario T4 mit 25 % liegt, und dass T3 und T5 jeweils Nutzenrückgänge gegenüber dem vorhergehenden geringeren Ausstattungsgrad aufweisen. Ebenfalls auffällig ist, dass das Szenario T8 ohne Rückstauschätzung besser abschneidet als T6 mit Rückstauschätzung bei derselben Ausstattungsrate von 35 %. Es ist ersichtlich, dass diese Effekte auf Schwankungen beim Hauptknoten K47 zurückzuführen sind. Darüber hinaus fällt auf, dass der Hauptknoten sogar negative Effekte hervorrufen kann. Der Vergleich mit den Betrachtungen zum Performance Index legt nahe, dass diese negativen Effekte bei T5 aus den schlechten Ergebnissen der Nachmittagspitze (vgl. Abbildung 5-6) und bei T6 aus den schlechten Ergebnissen für die Morgenspitze (vgl. Abbildung 5-5) resultieren. Sie kompensieren teilweise die Nutzenverbesserungen an den Nebenknoten, welche am K46 einen nahezu kontinuierlichen Anstieg mit fortschreitender Ausstattungsrate aufweisen, während sie am Nebenknoten K61 fast unverändert um die 28.000 €-Marke schwanken.

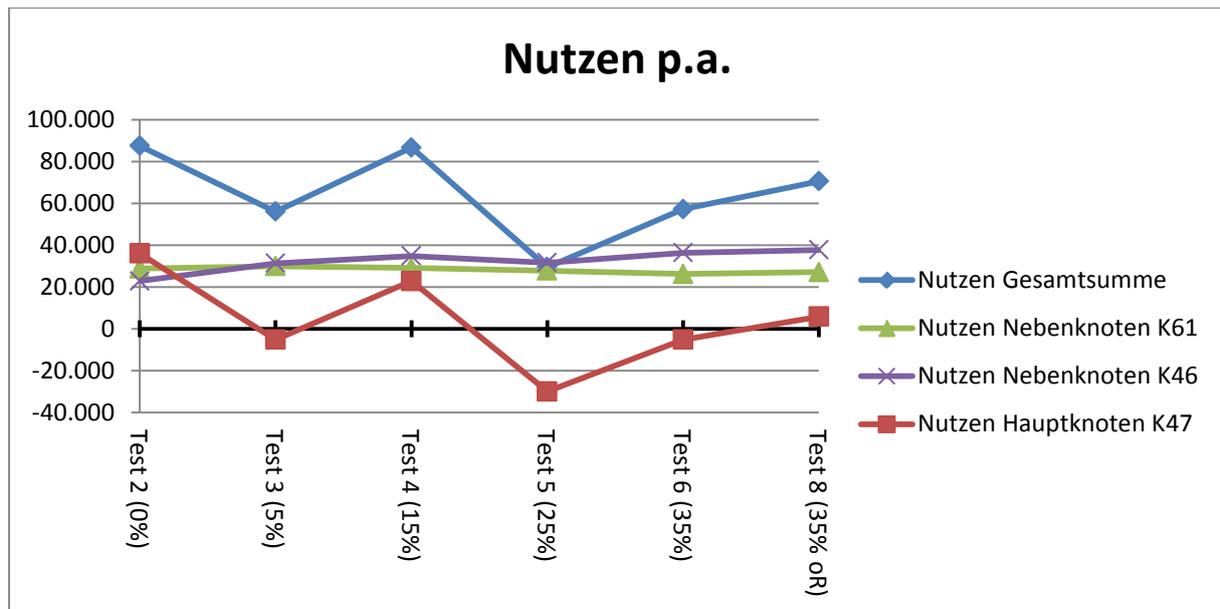


Abbildung 5-7 Nutzen je Knotenpunkt für alle relevanten Szenarien

In Vorwegnahme einer Interpretation der negativen Effekte am Hauptknoten K47 erscheint es sinnvoll, zunächst nur die unabhängig von der Ausstattungsrate Nutzen generierenden Nebennoten K61 und K46 in die weiteren Berechnungen einzubeziehen.

Hinsichtlich der Bedeutung einzelner Kriterien ist festzustellen, dass Schadstoffemissionen keine Rolle spielen. Die CO₂-Emissionen bewegen sich im einstelligen Prozentbereich, die Betriebskosten haben relativ dazu das dreifache Gewicht mit einer Variation zwischen 20 % und knapp 60 %. Die Fahrzeitveränderungen machen in allen Szenarien außer T5 über die Hälfte des Gesamteffektes aus. Werden sie bei der Sensitivitätsbetrachtung außer Acht gelassen, sinkt demzufolge der absolute Gesamtnutzen um mindestens die Hälfte.

Nutzen-Kosten-Verhältnis und -Differenz

Gemäß der vorhergehenden Festlegung, nur die Nebennoten K61 und K46 in die weitere Berechnung einzubeziehen, ergeben sich für die relevanten Szenarien T2 bis T8 (ohne T7) folgende Nutzen-Kosten-Verhältnisse (NKV) in Abhängigkeit von der Anzahl insgesamt passierter Knotenpunkte mit KOLINE-Funktion (Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5 gemeinsames Nutzen-Kosten-Verhältnis der Nebennoten K61 und K46

| Szenario | Anzahl passierter Knotenpunkte n_{KP} Szenarien T3 bis T8 | | | | |
|----------|---|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| T2 | 172,0 | | | | |
| T3 | 0,8 | 1,6 | 2,4 | 3,1 | 3,8 |
| T4 | 0,9 | 1,7 | 2,5 | 3,2 | 4,0 |
| T5 | 0,8 | 1,6 | 2,3 | 3,0 | 3,7 |
| T6 | 0,8 | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 3,9 |
| T8 | 0,9 | 1,7 | 2,5 | 3,3 | 4,1 |

Zunächst bedeutet dies, dass jedes der Szenarien T3 bis T8 bereits ab zwei passierten Knotenpunkten volkswirtschaftlich realisierungswürdig ist, beim Szenario T2 spielt diese Variable keine Rolle. Wird bei T2 auch der Hauptknoten mit einbezogen, beliefe sich das NKV sogar auf 194. Da die Szenarien T3 bis T8 zeitlich-technisch aufeinander aufbauen und somit nur sukzessive durchlaufen werden können, sollte vor allem die Transition zwischen Szenario T4 mit 15 % Aus-

stattungsrate und T6/T8 mit 35 % Ausstattungsrate schnell stattfinden, um den Zeitraum von T5 mit verschlechtertem NKV so kurz wie möglich zu halten.

Als weiteres Bewertungskriterium können die absoluten Nutzen-Kosten-Differenzen (NKD) dienen, welche in Tabelle 5-6 dargestellt sind. Demnach relativiert sich das außerordentlich hohe NKV von Szenario T2, da dessen NKD auch annähernd durch das Szenario T8 erreicht werden kann.

Tabelle 5-6 gemeinsame Nutzen-Kosten-Differenz der Nebenknoten K61 und K46

| Szenario | Anzahl passierter Knotenpunkte n_{KP} Szenarien T3 bis T8 | | | | |
|----------|---|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| T2 | 51.300 € | | | | |
| T3 | -13.600 € | 23.200 € | 35.400 € | 41.500 € | 45.200 € |
| T4 | -10.900 € | 25.900 € | 38.100 € | 44.200 € | 47.900 € |
| T5 | -15.400 € | 21.400 € | 33.600 € | 39.700 € | 43.400 € |
| T6 | -12.300 € | 24.500 € | 36.700 € | 42.800 € | 46.500 € |
| T8 | -10.000 € | 26.800 € | 39.000 € | 45.100 € | 48.800 € |

5.3 Umsetzungsempfehlungen für das KOLINE-System

Anhand der Bewertungsergebnisse lässt sich differenzieren, in welchen Situationen oder an welchen Netzabschnitten das KOLINE-System positive Effekte erzeugt und der Einsatz sowohl aus verkehrlicher als auch volkswirtschaftlicher Perspektive erfolgen sollte.

Zunächst ist die Komponente Modellbasierte LSA-Optimierung für alle drei Knotenpunkte unbedingt zu empfehlen, da eine deutliche Verbesserung des Ist-Zustandes erreicht wird. Diese Empfehlung ist unabhängig vom Einsatz der weiteren KOLINE-Komponenten.

Bei den Szenarien T3 bis T6 kommen zusätzlich die Komponenten KOLINE-Fahrassistenz (GLOSA) sowie KOLINE-Rückstauschätzung hinzu, bei welcher die einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit der zukünftigen Signalschaltzeitpunkte und des zu erwartenden Rückstaus am Knotenpunkt ihre Geschwindigkeit anpassen. Innerhalb der Szenarien variiert dabei der Anteil der Fahrzeuge, welcher über diese Funktionalität verfügt von 5 bis 35 %.

Die genauere Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die Komponente KOLINE-Fahrassistenz nicht ausschließlich positive Effekte auf den Verkehrsablauf hervorruft. So sind zwar am westlichen sowie am östlichen Nebenknotenpunkt positive Effekte zu erkennen, welche erwartungsgemäß umso höher ausfallen je höher der Anteil der ausgestatteten Fahrzeuge ist. Im Gegensatz dazu stehen jedoch teilweise negative Effekte am zentralen Knotenpunkt. Ein möglicher Erklärungsansatz für diese wesentlichen Unterschiede ist die unterschiedliche Komplexität der Knotenpunkte. So werden die verschiedenen Verkehrsströme im zentralen Knotenpunkt jeweils auf separate Richtungsfahrstreifen mit separater Signalisierung aufgeteilt. Dadurch haben die verschiedenen Fahrzeuge je nach Richtungswunsch unterschiedliche Freigabezeitpunkte und -dauern. Bei den beiden äußeren Knotenpunkten gibt es je Zufahrt jeweils nur eine Signalgruppe und es sind Mischfahrstreifen vorhanden. Somit haben alle am Knotenpunkt aus einer Richtung ankommenden Fahrzeuge die gleichen Freigabezeitpunkte (vgl. Abbildung 5-8). In der Folge tritt durch die KOLINE-Fahrassistenz an den Knotenpunkten mit Mischfahrstreifen eine Harmonisierung des Verkehrs ein, da die Anpassung der Geschwindigkeit bei den ausgestatteten Fahrzeugen einheitlich erfolgt. Bei Knotenpunkten mit separat signalisierten Richtungsfahrstreifen ist dies nicht möglich. Fahrzeuge mit unterschiedlichen Richtungswünschen wählen unterschiedliche Geschwindigkeiten für die Annäherung an den Knotenpunkt. Da sich aber zunächst alle Fahrzeuge gemeinsam auf den Fahrstreifen der durchgehenden Richtungsfahrbahn bewegen, ist es möglich, dass sich Fahrzeuge gegenseitig ausbremsen oder blockieren. In der Simulation

wurde versucht dieses negative Verhalten einzugrenzen. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass die Fahrassistenz an solch komplexen Zufahrten ausschließlich im Nahbereich des Knotenpunkts aktiv wird, sobald alle Fahrzeuge sich entsprechend ihres Richtungswunsches eingeordnet haben. Die gewünschte Wirkung des Systems wird so wiederum deutlich geschmälert oder gar ganz aufgehoben.

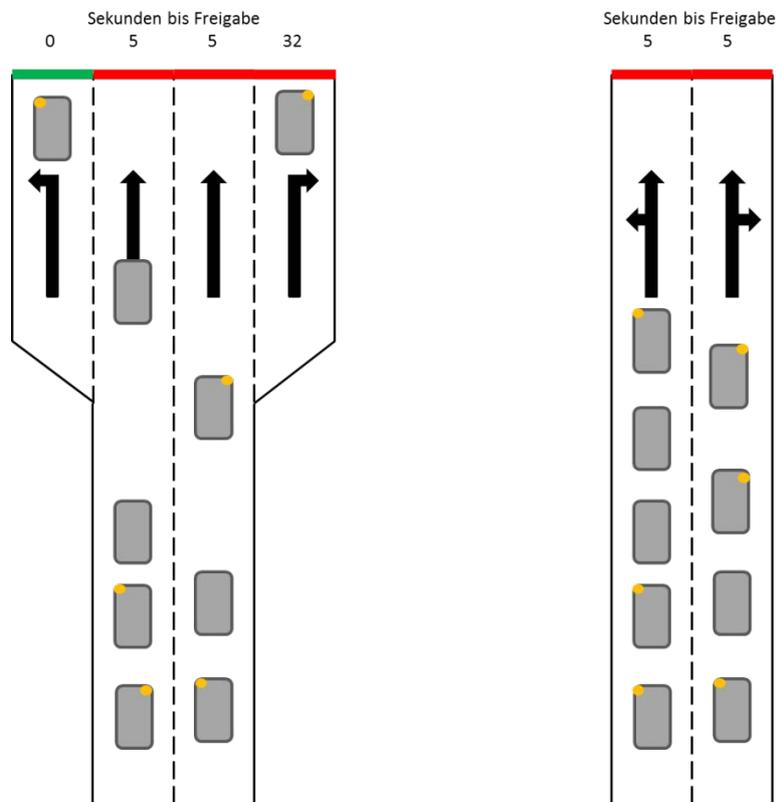


Abbildung 5-8: Visualisierung der unterschiedlichen Fahrsituationen an Knotenpunkten

Das Szenario T8 variiert das Szenario T6 durch die Nutzung einer vereinfachten Rückstauschätzung ohne die entsprechende KOLINE-Komponente. Für den Zeitversatz zwischen Freigabezeitbeginn und komplettem Abbau des Rückstaus, welcher zuvor auf Grundlage von Detektor- sowie FC-Daten geschätzt wurde, wird in diesem Szenario ein pauschaler Wert angenommen. Es zeigt sich, dass dies nicht zu einer Verschlechterung des Verkehrsablaufs führt. Wie die Tests im realen Straßenumfeld gezeigt haben, kann die Rückstauschätzung in ihrer bisherigen Konzeption die hohen Anforderungen hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Genauigkeit nicht erfüllen und so nicht zu einer Verbesserung der Effektivität des Systems beitragen. Inwiefern die Szenarien T3 bis T5 mit niedrigeren Ausstattungsraten der Fahrassistenz durch den Wegfall der Komponente Rückstauschätzung verbessert werden könnten, wurde nicht untersucht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Um die Wirksamkeit des KOLINE-Systems systematisch untersuchen zu können, wurden neun verschiedene Szenarien definiert, welche sich durch die Variation der folgenden Randbedingungen charakterisieren lassen:

- Art der LSA-Steuerung,
- Ausstattungsgrad der Fahrzeuge mit Fahrzeugassistentz,
- Art der Fahrassistentz,
- Art der Rückstauschätzung.

Ziel war es, die bei einer zukünftigen Markteinführung des Systems zu erwartenden Randbedingungen abzubilden, um so die Wirkungen des KOLINE-Systems abschätzen zu können. Die definierten und durch den Projektpartner IVS simulierten Szenarien wurden anschließend durch folgende Bewertungsverfahren beurteilt:

- HBS-Verfahren zur Bestimmung der Qualität des Verkehrsablaufs,
- Performance-Index (PI),
- Kosten-Nutzen-Analyse (KNA).

Anhand der Bewertungsergebnisse lässt sich deutlich erkennen, in welchen Situationen oder an welchen Netzabschnitten das KOLINE-System positive Effekte erzeugt und der Einsatz sowohl aus verkehrlicher als auch volkswirtschaftlicher Perspektive erfolgen sollte.

Zunächst ist die Komponente Modellbasierte LSA-Optimierung für alle drei Knotenpunkte unbedingt zu empfehlen, da eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand erreicht wird. Diese Empfehlung ist unabhängig vom Einsatz der weiteren KOLINE-Komponenten.

Die Komponente KOLINE-Fahrassistentz ruft dagegen nicht generell positive Effekte auf den Verkehrsablauf hervor. So sind an den beiden Knotenpunkten K46 und K61 positive Effekte zu erkennen, welche erwartungsgemäß umso höher ausfallen je höher der Anteil der ausgestatteten Fahrzeuge ist. Dies lässt sich am zentralen Knotenpunkt K47 nicht wiederfinden. Dort treten teilweise negative Effekte auf. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedliche Wirksamkeit des Systems an den verschiedenen Knotenpunkten kann in der unterschiedlichen Komplexität der Knotenpunkte gesehen werden. Der zentrale Knotenpunkt K46 weist in allen Zufahrten gesonderte Richtungsfahrstreifen und mehrere Signalgruppen auf, was dazu führt, dass sich die Fahrstrategien von direkt hintereinander fahrenden KOLINE-Fahrzeugen unterscheiden. Dies kann in der Folge zu einem weniger homogenen Verkehrsablauf führen. An den beiden anderen Knotenpunkten mit jeweils nur einer Signalgruppe je Zufahrt war dies nicht der Fall. Da die Ergebnisse bezüglich der Wirkungen am zentralen Knotenpunkt jedoch gewisse Inkonsistenzen aufweisen, sollte weitergehend untersucht werden, ob sich solche negativen Effekte auch an anderen ähnlich komplexen Knotenpunkten reproduzieren lassen.

Hinsichtlich der Bedeutung einzelner Bewertungskriterien ist festzustellen, dass Schadstoffemissionen keine Rolle spielen. Die CO₂-Emissionen bewegen sich im einstelligen Prozentbereich, die Betriebskosten haben relativ dazu das dreifache Gewicht mit einer Variation zwischen 20 % und knapp 60 %. Die Fahrzeitveränderungen machen in fast allen Szenarien über die Hälfte des Gesamteffektes aus.

Weiterhin bestätigten sich die Ergebnisse des Demonstrationsfeldes, dass die Rückstauschätzung in der implementierten Form nicht zu einer Verbesserung der Effektivität des Systems beitragen kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Rückstauschätzung durch das eingesetzte Verfahren nicht erfüllt werden konnten.

Insgesamt zeigt sich trotz der genannten Einschränkungen ein positives Bild. Für alle untersuchten Szenarien, in welchen die beiden wesentlichen KOLINE-Komponenten (LSA-Optimierung und Fahrassistenz) zum Einsatz kamen, war ein deutlicher Nutzen des Systems zu verzeichnen, der die Kosten des Systems überwiegt. Es ist zu erwarten, dass sich der Nutzen des Systems bei einer Weiterentwicklung der einzelnen zum Einsatz kommenden Verfahren weiter vergrößert.

6.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Trotz des erfolgreichen Abschlusses des Projekts existieren offene Fragen, welche vor einer zukünftigen Markteinführung eines solchen Systems der Klärung bedürfen. Ein Teil dieser Fragen resultiert aus notwendigen Anpassungen des Projektverlaufs. Im Folgenden seien einige Punkte genannt, welche zukünftig einer weiteren Bearbeitung bedürfen:

- Die Bewertung der Qualitätsstufen nach HBS muss eine zusätzliche Wertsynthese über die Knotenpunktzufahrten und Verkehrsmittel hinweg ermöglichen, da Änderungen der Signalisierung meist nicht nur unilaterale Auswirkungen haben. Ansätze dazu sind z.B. in [HUNTER 2010] beschrieben.
- Der Performance Index bezieht als einzige Kriterien die Anzahl der Halte sowie die Warte- bzw. Verlustzeit ein, welche eine starke Korrelation aufweisen und damit nicht – wie für Bewertungskriterien gefordert – unabhängig voneinander sind. Auch die Gewichtung der Halte und Nichteinbeziehung von Radfahrern bei diesem Kriterium ist kritisch zu hinterfragen.
- Für Kosten-Nutzen-Analysen müssen Fragen bezüglich der mikroskopischen Modellierung des Unfallgeschehens und der Lärmemission sowie der zeitlichen Extrapolation der Simulationsergebnisse geklärt werden.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2-1: Ausgewählte Bewertungsmethoden und ihre Gütemaßstäbe..... | 7 |
| Abbildung 4-1: Zufahrtsspuren mit aufgeteilten und sich überlagernden Abbiegebeziehungen | 17 |
| Abbildung 5-1: HBS-Qualitätsstufen mit zugehörigen Schwellwerten für LSA-Knotenpunkte (Diagramm) | 18 |
| Abbildung 5-2: Performance Index (PI) im Tagesverlauf am K61 Pockelsstraße | 23 |
| Abbildung 5-3: Performance Index (PI) im Tagesverlauf am K46 Langer Kamp | 24 |
| Abbildung 5-4: Performance Index (PI) im Tagesverlauf am K47 Hagenring..... | 24 |
| Abbildung 5-5: Performance Index (PI) der Morgenspitze am K47 Hagenring für Szenarien G2 | 25 |
| Abbildung 5-6 Performance Index (PI) der Nachmittagspitze am K47 Hagenring für Szenarien G1/G2..... | 25 |
| Abbildung 5-7 Nutzen je Knotenpunkt für alle relevanten Szenarien..... | 28 |
| Abbildung 5-8: Visualisierung der unterschiedlichen Fahrsituationen an Knotenpunkten | 30 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 2-1: Zielfelder und Kriterien im Verkehr, übliche Zielrichtungen sowie Art der Indikatorengrößen nach [BOLTZE 2008] mit eigenen Ergänzungen | 6 |
| Tabelle 3-1: Anforderungen an das virtuelle Testfeld | 11 |
| Tabelle 3-2: für KOLINE ausgewählte Zielfelder und Kriterien, ihre übliche Zielrichtungen sowie Art der Indikatorengrößen | 12 |
| Tabelle 3-3: Bewertungskriterien verschiedener Bewertungsverfahren | 13 |
| Tabelle 4-1: Übersicht über die Simulationsszenarien | 16 |
| Tabelle 4-2: Tagessummen der Verkehrsstärken..... | 17 |
| Tabelle 5-1: HBS-Qualitätsstufen mit zugehörigen Schwellwerten für LSA-Knotenpunkte (tabellarisch)..... | 18 |
| Tabelle 5-2: HBS-Qualitätsstufen der 12 Knotenpunktzufahrten (Auswahl) | 22 |
| Tabelle 5-3 Kosten je Knotenpunkt | 26 |
| Tabelle 5-4 aggregierte Nutzen je Kriterium für alle Szenarien | 27 |
| Tabelle 5-5 gemeinsames Nutzen-Kosten-Verhältnis der Nebenknoten K61 und K46 | 28 |
| Tabelle 5-6 gemeinsame Nutzen-Kosten-Differenz der Nebenknoten K61 und K46..... | 29 |

Quellen-/Literaturverzeichnis

- BMVBW 2003: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Bundesverkehrswegeplan 2003, Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland. Beschluss der Bundesregierung vom 2. Juli 2003, Berlin, 07/2003.
- BMVBS 2009: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Auftraggeber): Aktualisierung von Bewertungsansätzen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen in der Bundesverkehrswegeplanung, Schlussbericht. Essen, Freiburg, München, 11/2009.
- BOLTZE 2006: Boltze, M.; Jentsch, H.; Friedrich, B.; Bastian, M.: OptiV – Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr. TU Darmstadt, 08/2006. http://www.verkehr.tu-darmstadt.de/media/verkehr/fgvv/prof_boltze/BoVeroeff_100.pdf, <http://www.optiv.de>
- BRAUNSCHWEIG 2007: Stadt Braunschweig (Hrsg.): Luftreinhalte- und Aktionsplan für das Stadtgebiet Braunschweig, Amtsblatt, Nr. 11, 34. Jahrgang, Braunschweig, 29.05.2007.
- BUWAL 2004: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.): SonRoad - Berechnungsmodell für Strassenlärm, Schriftenreihe Umwelt Nr. 366, Code: SRU-366-D, Bern (CH), 2004.
- CITYMOBIL 2009: CityMobil Projektkonsortium (Hrsg.): Ex ante evaluation report. Deliverable D5.3.1a, 09/2009. über <http://www.citymobil-project.eu/downloadables/Deliverables>
- FAIR 2006: FAIR Projektkonsortium (Hrsg.): Fully Automatic Integrated Road Control Work-Package 4.1: Cost Benefit Analysis. Deliverable D04, Berlin, 17.07.2006. http://www.opitz-consult.de/fair/papers/D04_FAIR_CBA_%20V_45.pdf
- FESTA 2008a: FESTA Projektkonsortium (Hrsg.): Field opERational teSt supporT Action (FESTA) Handbook, Version 2, Kap. 5. Deliverable D6.4, 19.08.2008. <http://www.its.leeds.ac.uk/festa/downloads/FESTA%20Handbook%20v2.pdf>
- FESTA 2008b: ebd., Kap. 10
- FGSV 1997: FGSV (Hrsg.): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS). FGSV Verlag GmbH, Köln, 1997.
- FGSV 2001: FGSV (Hrsg.): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Fassung 2009. ISBN 978-3-941790-35-3, FGSV Verlag GmbH, Köln, 2001.
- FGSV 2010: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg): Hinweise zu Einsatzbereichen von Verfahren zur Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung. ISBN 978-3-941790-42-1, FGSV Verlag, Köln, 2010.
- FHWA 2008: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (Hrsg.): Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). Techbrief, FHWA-HRT-08-049, 05/2008. <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08049>
- HUNTER 2010: Hunter, B.: Assessment of the traffic quality at signalized intersections for all travelers, Master Thesis, TU Darmstadt, 19.05.2010.
- LELONG 1999: Lelong, J.; Michelet, R.: Effect of acceleration on vehicle noise emission, INRETS, Bron (FR), 1999.
- ORINOKO 2008: ORINOKO Projektkonsortium (Hrsg.): Anlage Ausführlicher Ergebnisbericht mit Konzept zum Weiterbetrieb. 11/2008. http://www.c-na.de/media/ORINOKO_AfV271108_Anlage_Ausführlicher-Ergebnisbericht.pdf
- PINKOFSKY 2005: Pinkofsky, L.: Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage, Dissertation, S. 43. ISBN 3-8322-4859-5, Shaker Aachen, 2005.
- RITA 2010: U.S. Department of Transportation, U.S. Research and Innovative Technology Administration (RITA) (Hrsg.): ITS Evaluation Guidelines. Washington D.C. (USA), O.J. http://www.its.dot.gov/evaluation/eguide_resource.htm

- TP 2007: Transport Canada (Hrsg.): Development of a Project Evaluation Methodology Framework for Canadian Intelligent Transportation Systems. TP 14755E, Ottawa (CAN), 03/2007.
<http://www.tc.gc.ca/innovation/tdc/summary/14700/14755e.htm>
- TRL 2005: Transport Research Laboratory (Hrsg.): Harmonise prediction model for road traffic noise, Project Report PPR 034, Wokingham (UK), Juli 2005.
- VDI 2000: VDI (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3780 „Technikbewertung: Begriffe und Grundlagen“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 09/2000.
- VuU 2008: Universität für Bodenkultur, Institut für Verkehrswesen (Hrsg.): Entscheidungsmodelle. Wien (AT), 10/2008.
http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/_/H85/H856/Downloads_Skripten/Verkehr_Umwelt_P_2008_10_09.pdf
- WIETHOLT 2009: Wietholt, T.: Einsatzbereiche Grüner Wellen und verkehrsabhängiger Steuerungen. Dissertation, ISSN 1437-8299, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen Ruhr-Universität Bochum, Heft 33, Bochum, 2009.
- WVI 1998: WVI GmbH: Verkehrsentwicklungsplan Braunschweig, Kap. 3. Stadt Braunschweig, 12/1998.
http://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/verkehrsplanung/VEP4_K3.pdf