ulm university universität
uulm

# Zentrales Verkehrsnavigationsmanagement zur energie- und zeitoptimalen Verkehrsflusslenkung stochastischer Fahrzeugpopulationen

# DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines

# DOKTOR-INGENIEURS
(DR.-ING.)

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
und Informatik der Universität Ulm

von

**MICHAEL RICHTER**
**AUS ULM**

| | |
|---|---|
| Betreuer: | Prof. Dr. rer. nat. Herbert Kabza |
| | Prof. Dr. Dr.-Ing. Wolfgang Minker |
| Amtierender Dekan: | Prof. Dr. Tina Seufert |

Ulm, 15. Oktober 2013

**Zusammenfassung**

Dynamisches Verkehrsrouting in Städten wird in den kommenden Jahren einen immer höheren und wichtigeren Stellenwert einnehmen. Um dem steigenden Verkehrsaufkommen mit der gegebenen Infrastruktur gerecht zu werden, bedarf es einer zentralen Navigation aller Verkehrsteilnehmer und einer Optimierung der Verkehrsrouten. Dies ermöglicht es, Verkehrsstaus zu reduzieren bzw. im Idealfall zu vermeiden und den dadurch verbundenen Anstieg der Fahrzeit und des Kraftstoffverbrauchs zu reduzieren. Hierbei ist es das Ziel, möglichst alle Fahrzeuge zeit- und energieeffizient zu routen und somit durch eine gezielte Verteilung der Verkehrsnachfrage auf verschiedene alternative Routen, eine globale Optimierung des Verkehrsraumes zu erreichen.

Hierzu wurde im Rahmen dieser Dissertation eine Verkehrssimulationssoftware entwickelt, welche eine detaillierte Analyse und Simulation unterschiedlichster Verkehrsszenarien ermöglicht und gleichzeitig durch eine submikroskopische Modellierung sämtlicher Fahrzeuge einen Zugriff auf alle Fahrzeugparameter erlaubt. Zentraler Punkt der hier vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Routingkonzeptes, welches die Optimierung des Verkehrsflusses unter Beachtung unterschiedlichster Fahrzeugtopologien ermöglicht. Der Fokus der Dissertation liegt darin, eine Aussage darüber treffen zu können, wie hoch das maximale Einsparpotenzial an Fahrzeit und Energieverbrauch bei einem völlig kontrollierten optimal geregelten Verkehrsfluss ist. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde untersucht, wie viel Prozent der Verkehrsteilnehmer gezielt in ihrer Routenwahl beeinflusst werden müssen, um vergleichbare Ergebnisse des optimalen Zustandes zu erreichen. Abgerundet wird die Arbeit durch die Entwicklung einer Benutzerschnittstelle, welche demonstriert, wie die Kommunikation des zentralen Verkehrsnavigationskonzeptes für einen global optimierten Verkehrsfluss zwischen der Verkehrsleitzentrale und dem Endverbraucher realisiert werden könnte.

# Inhaltsverzeichnis


Abbildungsverzeichnis . . . . . IX
Tabellenverzeichnis . . . . . XV
Abkürzungen und Formelzeichen . . . . . XVII

**1 Einleitung** **1**
1.1 Motivation . . . . . 1
1.2 Problemstellung / Forschungsansatz . . . . . 2
1.3 Zielsetzung . . . . . 3
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . . 4

**2 Grundlagen der Verkehrssimulation** **7**
2.1 Einleitung . . . . . 7
2.2 Detaillierungsgrad . . . . . 8
2.3 Kommerziell verfügbare Produkte . . . . . 10
2.3.1 Einschränkungen kommerzieller Produkte . . . . . 11
2.4 Zielsetzungen / Verbesserungsansätze einer Eigenentwicklung . . . . . 11
2.5 Verkehrssimulator ULTraSim . . . . . 12
2.5.1 Simulationsschritte/ -ablauf . . . . . 13
2.6 Streckennetzgenerierung / Implementierung . . . . . 14
2.6.1 Implementierung von ULTraSim . . . . . 16
2.7 Fahrermodell . . . . . 18
2.7.1 Psycho-physikalisches Modell nach Wiedemann . . . . . 19
2.7.2 Intelligent-Driver-Model (IDM) . . . . . 19
2.7.3 Generierung der Wunschgeschwindigkeitstrajektorie . . . . . 22
2.7.4 Spurwechselmodell . . . . . 23
2.8 Knotentypen / Ampelsteuerungen . . . . . 26
2.8.1 Festzeitgesteuerte Lichtsignalanlagen . . . . . 27
2.8.2 Geregelte Lichtsignalanlagen . . . . . 27
2.9 Visualisierung . . . . . 30
2.9.1 Zweidimensionale Visualisierung . . . . . 30
2.9.2 Dreidimensionale Visualisierung / Virtuelle Welt . . . . . 31
2.10 Thread Management . . . . . 32
2.11 Begriffsdefinitionen der Verkehrsdatenerfassung . . . . . 33
2.12 Verkehrsdatenerfassung . . . . . 34
2.13 Zusammenfassung . . . . . 35

**3 Fahrzeugmodellierung** **37**
3.1 Einleitung . . . . . 37
3.2 Fahrzeuglängsdynamikmodellierungsarten . . . . . 38
3.2.1 Quasistatische Modellierung . . . . . 38
3.2.2 Dynamische Modellierung . . . . . 39

3.2.3 Fahrzyklen . . . 40
3.3 Modellbildung . . . 41
3.3.1 Verbrennungsmotor- / Elektromotor- / Generatorkennfeld . . . 42
3.3.2 Geschwindigkeitsregler . . . 42
3.4 Elektrofahrzeug (BEV) / Range Extender (EREV) . . . 44
3.4.1 Verbrauchsauswertung . . . 45
3.5 Parallel-Hybridfahrzeug (PHEV) . . . 47
3.5.1 Betriebsstrategie . . . 47
3.5.2 Verbrauchsauswertung . . . 48
3.6 Konventionelle Fahrzeuge (ICEV) . . . 49
3.7 Zusammenfassung . . . 50

**4 Kraftstoff- / Energieverbrauchsanalyse bei hohen Verkehrsdichten 51**
4.1 Bordnetzlast . . . 51
4.1.1 Kraftstoff- und Energieverbrauchsanalyse bei Berücksichtigung der Bordnetzlast . . . 53
4.2 Auswertung des Flottenenergieverbrauchs/ Vergleich BEV, ICEV, PHEV . . . 55
4.3 Kraftstoffverbrauch als Funktion der Verkehrsdichte / des Verkehrsflusses . . . 57
4.4 Zusammenfassung . . . 58

**5 Dynamisches Verkehrsrouting 59**
5.1 Stand der Forschung auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Verkehrsnavigation . . . 59
5.2 Graphentheorie . . . 60
5.3 Dynamische Programmierung nach Bellman / Dijkstra . . . 61
5.3.1 Bellman-Ford-Algorithmus . . . 61
5.3.2 Dijkstra-Algorithmus . . . 62
5.3.3 Dijkstra-Algorithmus mit negative Kantengewichten . . . 63
5.3.4 Berücksichtigung von Abbiegekosten durch kantenorientierte Graphen / Arc-Label-Shortest-Path-Algorithmus . . . 64
5.4 Völlig kontrollierter Verkehrsfluss $VKV_{Z,E}$ . . . 67
5.4.1 Nutzeroptimum und Systemoptimum . . . 67
5.4.2 Routingkonzept des völlig kontrollierten Verkehrsflusses . . . 68
5.4.3 Zentrales Verkehrsmanagement / Routingablauf im Überblick . . . 70
5.4.4 Routenreservierung mittels Streckenpotenzialfunktion . . . 70
5.4.5 Zeitfensterprädiktion mit eventueller Knotensperrung . . . 73
5.4.6 Streckenreservierung zur Verkehrsdichteprädiktion . . . 74
5.4.7 Routengenerierung und Routenupdate . . . 75
5.4.8 Auswertung für eine Start-Ziel-Beziehung . . . 77
5.5 Kantengewichtsbestimmung für unterschiedliche Verkehrsdichten . . . 79
5.5.1 Abbiegekosten . . . 81
5.6 Unbeeinflusster Verkehrsfluss $UBV$ . . . 83
5.6.1 C-Logitmodell . . . 83
5.7 Zusammenfassung . . . 86

**6 Analyse des Verkehrsroutingkonzeptes 87**
6.1 Routenwahl bei unterschiedlichen Optimierungszielen in Abhängigkeit der Fahrzeugtopologie . . . 87
6.1.1 Vergleich der kürzesten , zeiteffizientesten und energieeffizienten Route . . . 88

6.1.2 Fahrzeugtopologiebedingte Unterschiede bei der energieeffizienten Routenwahl für ICEV, BEV und PHEV . . . 91
6.2 Definition von Auswerteszenarien . . . 92
6.3 Analyse des völlig kontrollierten Verkehrsflusses $VKV_{Z,E}$ bei komplexen Routingszenarien . . . 95
6.3.1 Zeitoptimiertes Routing . . . 95
6.3.2 Energieoptimiertes Routing . . . 99
6.3.3 Streckenpotenzialanalyse . . . 102
6.4 Vergleich des völlig kontrollierten Verkehrsflusses $VKV_{Z,E}$ / unbeeinflussten Verkehrsflusses $UBV$ . . . 104
6.4.1 Einfluss der Verkehrsteilnehmeranzahl auf die Lösungsqualität des $UBV$- und $VKV_{Z,E}$-Routings . . . 109
6.4.2 Reaktion des Routingalgorithmus auf unvorhergesehene Ergebnisse / Systemstabilität . . . 111
6.5 Prozentuale Einflussnahme einer Zentralnavigation auf das Verkehrsflussverhalten . 114
6.5.1 Zeiteffizientes Routing . . . 114
6.5.2 Energieeffizientes Routing . . . 116
6.5.3 Einfluss der Fahrzeuganzahl . . . 117
6.6 Stochastische Fahrzeugpopulationen . . . 120
6.7 Zusammenfassung . . . 121

**7 Generische Routingalgorithmen zur Rechenzeitreduzierung 123**
7.1 Ameisenalgorithmen . . . 123
7.1.1 Ameisenalgorithmen Anwendung auf Verkehrsrouting . . . 124
7.2 Analyse der Lösungsqualität / Rechenzeitbedarf zur Routengenerierung mit Ameisenalgorithmen . . . 127
7.3 Anwendbarkeit von Ameisenalgorithmen auf die zeit- und energieeffiziente Routengenerierung . . . 129
7.4 Zusammenfassung . . . 129

**8 Analyse der V2X Kommunikation bei einer Zentralnavigationslösung 131**
8.1 Datenerhebung verkehrstechnischer Kenngrößen . . . 131
8.1.1 Einfluss der Aktualisierungsrate der Verkehrsdatenerfassung auf die Lösungsqualität . . . 133
8.2 Fahrzeugkommunikation . . . 134
8.2.1 Fahrzeug-Ad-hoc-Netzwerke . . . 135
8.3 Kommunikationsprotokoll / Kommunikationsschema . . . 135
8.4 Analyse des Datenvolumens und der Datenübertragungsrate bei einer Kommunikation über das Mobilfunknetz . . . 138
8.5 Smartphone-App als Endverbraucherschnittstelle . . . 140
8.6 Kostenübersicht . . . 142
8.7 Zusammenfassung . . . 143

**9 Zusammenfassung und Ausblick 145**

**Literaturverzeichnis 159**

**10 Anhang I**
10.1 Fahrzeugdaten . . . I

10.2 Übersicht Szenarien . . . . . III
10.3 Geschwindigkeitstrajektorie Fahrermodell / Messfahrt . . . . . V
10.4 Streckennetzgenerator . . . . . V
10.5 ULTraSim . . . . . VI
10.6 Fahrzyklus . . . . . VIII
10.7 Bordnetzlastszenario . . . . . XI
10.8 Range-Extender leistungsangepasste MGU-Unterstützung . . . . . XII
10.9 Vergleich des völlig kontrollierten Verkehrsflusses $VKV_Z$ mit den Ergebnissen des Gleichgewichtsverfahrens für Umlegungsprobleme . . . . . XIV
10.10 Energieeffizientes Routing, Durchdringung . . . . . XV
10.11 Kommunikationsprotokoll . . . . . XV
10.12 Kostenübersicht . . . . . XVII
10.13 Lebenslauf . . . . . XIX

# Abbildungsverzeichnis

2.5.1 Übersicht über die Komponenten eines Verkehrssimulators . . . . . 13
2.6.1 (a) Straßen- und Knotennetz, (b) gerichteter Graph . . . . . 15
2.6.2 (a) GPS-Streckenverlauf, (b) generierte Streckenspuren, (c) Streckenpositionsarray . 17
2.6.3 (a) Dreidimensionale Darstellung des Streckennetzes, (b) zweidimensionale Darstellung . . . . . 18
2.7.1 Schematische Darstellung wichtiger Indizes des IDM . . . . . 19
2.7.2 Vergleich Anfahrverhalten IDM, Zeitbedarfswert an einer LSA, Standard IDM, IIDM ((a) Abstand zur Ampel, (c) Fahrzeugbeschleunigung), Modifiziertes IDM im Ampelbereich ((b) Abstand zur Ampel, (d) Fahrzeugbeschleunigung) . . . . . 21
2.7.3 Vergleich einer Annäherungstrajektorie eines Fahrzeuges an ein vorausfahrendes Fahrzeug, (a) Fahrermodell nach Wiedemann, (b) IDM . . . . . 22
2.7.4 (a) Vergleich der Geschwindigkeit, Beschleunigung und des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug beim Fahrermodell nach Wiedemann, (b) IDM (b) . . . . . 22
2.7.5 Auswirkungen der vorausschauenden Krümmungsberechnung mit unterschiedlichen Abtastzeitlücken, (a) Geschwindigkeitsverlauf, (b) Beschleunigung . . . . . 24
2.7.6 Spurwechsel mit MOBIL, mit Stern $*$ (rot) gekennzeichnete Größen entsprechen Größen nach dem Spurwechsel . . . . . 24
2.7.7 Anpassung des Freundlichkeitsfaktors $f$ (a) sowie der Wunschgeschwindigkeit (b) im Kreuzungsbereich bei einem Spurwechselwunsch . . . . . 26
2.8.1 Übersicht über die verschiedenen Knoten- / Kreuzungstypen in ULTraSim, Kreisverkehr (a), geregelte, festzeitgesteuerte LSA (b), Kontaktschleifen (c), Einmündungen (d) . . . . . 26
2.8.2 (a) Vergleich Wartezeit, (b) Kraftstoffverbrauch an einer geregelten LSA (rot) und einer optimal eingestellten festzeitgesteuerten LSA (blau) . . . . . 28
2.9.1 Zweidimensionale Visualisierung mit Zusatzframes . . . . . 30
2.10.1 Thread Management von ULTraSim . . . . . 32
2.10.2 (a) Verhältnis Rechenzeit zum Simulationszeitraum über der Fahrzeuganzahl, (b) prozentualer Threadanteil an der Rechenzeit für Fahrzeugmodelle mit Verbrennungsmotor . . . . . 33
2.12.1 Messdaten dargestellt im Fundamentaldiagramm einer einspurigen Strecke . . . . . 35

3.1.1 Gesamtübersicht, Eingliederung der submikroskopischen Fahrzeugmodelle in den Verkehrssimulator . . . . . 37
3.2.1 Exemplarischer Aufbau des Simulationsmodells bei der quasistatischen Modellierung eines Parallelhybrids . . . . . 38
3.2.2 Exemplarischer Aufbau des Simulationsmodells bei der dynamischen Modellierung eines Parallelhybrids . . . . . 39
3.2.3 Übersicht über Fahrzyklen zur Verifizierung der Fahrzeugmodelle, (a) NEFZ-Zyklus, (c) realer Zyklus, (b, d) relative Häufigkeit der Beschleunigung . . . . . 41

3.3.1 Motor- und Generatorkennfelder für die Fahrzeugmodellierung, (a) 66 kW Verbrennungsmotor , (b) Motorkennfeld einer 50 kW Synchronmaschine . . . . . 42
3.4.1 (a) Prinzipieller Aufbau eines Elektrofahrzeuges, (b) Range Extenders . . . . . 44
3.4.2 (a) Reichweitenverlängerung des Elektrofahrzeuges durch Supercapunterstützung, (b) Stressfaktorverringerung durch Supercapunterstützung bei verschiedenen Batterietypen . . . . . 45
3.4.3 Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsverlauf (rot) sowie Regelabweichung (grün) des Elektrofahrzeuges beim NEFZ-Zyklus . . . . . 45
3.4.4 Batterieladezustandsverlauf (SOC), (a) Batteriestrom, (b) generatorische und mechanische Bremskraft beim NEFZ-Zyklus . . . . . 46
3.5.1 Prinzipieller Aufbau eines Parallel-Hybridfahrzeuges . . . . . 47
3.5.2 Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsvergleich (rot) sowie Regelabweichung des PHEV beim NEFZ-Zyklus . . . . . 48
3.5.3 (a) Batterieladezustandsverlauf (SOC), Batteriestrom, (b) Aufteilung des angeforderten Drehmoments zwischen V-Motor und E-Motor . . . . . 48
3.6.1 Prinzipieller Aufbau eines konventionellen Fahrzeuges . . . . . 49
3.6.2 Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsverlauf (rot) sowie Regelabweichung des Elektrofahrzeuges beim NEFZ-Zyklus . . . . . 49
3.6.3 (a)Kraftstoffverbrauch konventionelles Fahrzeug, (b) Motor-, Bremskraft für den NEFZ-Zyklus . . . . . 50

4.1.1 Simulationsmodell elektrisches Bordnetz, (a) konventionelles Fahrzeug, (b) Elektrofahrzeug . . . . . 52
4.1.2 Kraftstoffverbrauchsteigerung mit verschiedenen Last- sowie Verkehrsszenarien normiert auf eine freie Fahrt ohne Last, (a) konventionelles Fahrzeug, (b) Ladezustand der Batterie eines Elektrofahrzeuges . . . . . 53
4.1.3 Steigerung des Energieverbrauchs bezogen auf die Verbrauchswerte ohne Bordnetzlast bei niedrigem bzw. hohem Verkehrsaufkommen. (a) Konventionelles Fahrzeug, (b) Elektrofahrzeug . . . . . 54
4.2.1 Energieverbrauch [kWh] einer Fahrzeugflotte bei Annäherung an eine Ampel, dargestellt ist der Energieverbrauch aller 430 Fahrzeuge in der Flotte über der Streckenposition, (a) Geschwindigkeitsverlauf, (b) Elektrofahrzeuge, (c) konventionelle Fahrzeuge . . . . . 56
4.2.2 Vergleich des Anstiegs des Energieverbrauchs der Fahrzeugflotte für PHEV, BEV und ICEV in Bezug zum ersten Fahrzeug . . . . . 56
4.3.1 (a) Energieverbrauch für konventionelle Fahrzeuge (mit Start-Stopp-Automatik), Elektrofahrzeuge und Hybridfahrzeuge als Funktion der Verkehrsdichte, (b) Fahrzeit 57

5.3.1 (a) Ursprünglicher Graph mit negativen Kantengewichten und Hilfsknoten (S), (b) angepasster Graph mit positiven Kantengewichten . . . . . 63
5.3.2 Arc-Label-Shortest-Path-Algorithmus Beispiel [151] . . . . . 65
5.4.1 (a) Routingkonzept mit dynamischer Routenumlegung mittels Echtzeitinformationen, (b) dynamische Routenumlegung auf Basis von Echtzeitinformationen und Streckenpotenzialfunktion sowie prädiziertem Zeitfenster und Verkehrsdichteprädiktion . . . . . 69
5.4.2 Überblick zentrales Verkehrsnavigationssystem . . . . . 71
5.4.3 Potenzialverlauf als Funktion der Fahrzeugposition . . . . . 72

5.4.4 Streckenpotenzialverlauf, Anzahl angemeldeter Fahrzeuge einer Beispielroute, (a) alle Fahrzeuge befahren die gleiche Route, (b) Routing mit Streckenpotenzialfunktion 73
5.4.5 (a) Zeitfensterprädiktion mit Knotensperrung um Überbelastungen zu vermeiden, (b) ohne Knotensperrung . . . . . 75
5.4.6 Entwicklung der Fahrzeit für eine Start-Ziel-Beziehung . . . . . 77
5.4.7 Entwicklung der Durchschnittsgeschwindigkeit bei verschiedenen Routingkonzepten . . . . . 78
5.5.1 Abweichung zwischen Ist-Energieverbrauch und Fahrzeit von den adaptiv angelernten Datensätzen sowie von Echtzeitinformationen. Fahrzeit: (a) ICEV, (b) BEV, (c) PHEV Energieverbrauch: (d) ICEV, (e) BEV, (f) PHEV . . . . . 80
5.5.2 (a) Vergleich Energieverbrauch / rekuperierte Energie für verschiedene Beschleunigungsvorgänge, (b) Bremsvorgänge bei verschiedenen Fahrzeugtopologien . . . . 81
5.6.1 Alternativrouten 27-1 des unbeeinflussten Verkehrsflusses $UBV$ . . . . . 85
5.6.2 Alternativrouten 88-39 des unbeeinflussten Verkehrsflusses $UBV$ . . . . . 85

6.1.1 (a) Vergleich Energieeinsparung und (b) Fahrzeitzunahme der energieeffizienten Route gegenüber der kürzesten Route für ICEV, BEV, PHEV . . . . . 88
6.1.2 (a) Energieeinsparung und (b) Fahrzeitzunahme der energieeffizienten Route bzgl. der zeiteffizientesten Route . . . . . 89
6.1.3 Höhenprofil der kürzesten, schnellsten und energieeffizienten Route (80-39) von (a) ICEV, (b) BEV, (c) PHEV . . . . . 90
6.1.4 Vergleich des unterschiedlichen Höhenprofils der energieeffizienten Route (a) 1-27 Bergabfahrt, (b) 80-39 Bergauffahrt, für ICEV, BEV und PHEV . . . . . 91
6.2.1 Streckennetz mit eingezeichneten kürzesten Routen von Szenario drei sowie mögliche Engpässe durch Routenkreuzungen (Sterne) . . . . . 94
6.3.1 Szenario 3: Zeiteffizientes Routen: Aufsteigend sortierte (a) Fahrzeit, (b) Kraftstoffverbrauch, (c) Routenlänge, (d) Durchschnittsgeschwindigkeit, $ZE$: alle Fahrzeuge fahren ihre zeiteffizienteste Route $ZE + EZI$: Routenupdate auf Basis von Echtzeitinformationen (EZI) $VKV_Z$: Vollkommen kontrollierter Verkehrsraum, zeiteffizientes Routing . . . . . 96
6.3.2 (a) Zeiteinsparung $VKV_Z$- und $ZE + EZI$-Routing gegenüber, wenn alle Fahrzeuge ihre zeiteffizienteste Route befahren, (b) absolute Kraftstoffeinsparung (ICEV mit Start-Stopp-Automatik), (c) Kraftstoffeinsparung pro 100 km bezogen auf zeiteffizientes Routing, Szenario drei aufgesplittet nach Start-Ziel-Beziehung . . . . . 98
6.3.3 Szenario 3: Energieeffizientes Routen: Aufsteigend sortierter (a) Kraftstoffverbrauch, (b) Fahrzeit, $EE$: alle Fahrzeuge fahren ihre energieeffizienteste Route $EE + EZI$: Routenupdate auf Basis von Echtzeitinformationen (EZI) $VKV_E$: Vollkommen kontrollierter Verkehrsraum, zeiteffizientes Routing . . . . . 99
6.3.4 (a) Zeiteinsparung $VKV_E$ und $EE + EZI$ bzgl. wenn alle Fahrzeuge ihre energieeffizienteste Route befahren, (b) Kraftstoffeinsparung (konventionelle Fahrzeuge), Szenario drei aufgesplittet nach Start-Ziel-Beziehung . . . . . 100
6.3.5 Szenario 3: Vergleich Streckenpotenzialverlauf sowie angemeldete Fahrzeuge je Streckensegment für zeiteffizienteste Route (blau), zweitbeste Route (rot) (a,b): zeiteffizientes Routing; alle Fahrzeuge befahren ihre zeiteffizienteste Route (c,d): zeiteffizientes Routing; mit Update der Route auf Basis von EZI (e,f): zeiteffizientes Routing; bei völlig kontrolliertem Verkehr . . . . . 103

6.4.1 Szenario 3: Vergleich der Fahrzeit des Kraftstoffverbrauchs bei völlig kontrolliertem Verkehr $VKV$ und unbeeinflusstem Verkehr $UBV$ bei verschiedenen Optimierungszielen, (a, b) konventionelle Fahrzeuge, (c, d) Elektrofahrzeuge . . . . . 104
6.4.2 Szenario 3: Zeit- bzw. Kraftstoffeinsparung des völlig kontrollierten Verkehrs (VKV) bzgl. des unbeeinflussten Verkehrs (UBV). Aufgesplittet nach Start-Ziel-Beziehung, (a, b) konventionelle Fahrzeuge, (c, d) Elektrofahrzeuge . . . . . 105
6.4.3 Szenario 3: Ankunftszeit über der Abfahrtszeit bei $UBV$-, $VKV_Z$- und $VKV_E$-Routing 106
6.4.4 Szenario 3: Übereinandergeplottete historische Positionsdarstellung jedes Fahrzeuges, die Farbe entspricht der Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit jedes Fahrzeuges, (a) unbeeinflusster Verkehr, (b) völlig beeinflusster Verkehr . . . . . 109
6.4.5 Szenario 3: (a) Entwicklung der durchschnittlichen Fahrzeit, (b) des durchschnittlichen Energieverbrauchs als Funktion der in die Simulation involvierten Fahrzeuge . . . . . 110
6.4.6 Szenario 3: Entwicklung der durchschnittlichen Standzeit als Funktion der in die Simulation involvierten Fahrzeuge . . . . . 110
6.4.7 Szenario 3: (a) Auswirkungen einer Streckensperrung auf die Fahrzeit, (b) Routenlänge bei $UBV$- sowie $VKV_Z$-Routing . . . . . 111
6.4.8 Szenario 3 mit Streckensperrung: Übereinander geplottete historische Positionsdarstellung jedes Fahrzeuges, die Farbe entspricht der Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit jedes Fahrzeuges, (a) unbeeinflusster Verkehr, (b) völlig beeinflusster Verkehr . . . . . 113
6.5.1 (a) Fahrzeiteinsparung als Funktion der prozentual beeinflussbaren Fahrzeuge durch eine Zentralnavigation, (b) normiert auf 100 % Durchdringung, (c) Kraftstoffeinsparung bei konventionellen Fahrzeugen ohne Start-Stopp-Automatik . . . . . 115
6.5.2 Szenario 6: Fahrzeitentwicklung nach Strecke, aufsteigend sortiert, bei prozentualer Erreichbarkeit der Fahrzeuge durch eine Zentralnavigation . . . . . 115
6.5.3 (a) Kraftstoffeinsparung von konventionellen Fahrzeugen mit Start-Stopp-Automatik als Funktion der prozentual beeinflussbaren Fahrzeuge durch eine Zentralnavigation, (b) Kraftstoffeinsparung normiert auf 100 % Durchdringung, (c) Reisezeiteinsparung . . . . . 116
6.5.4 Zeiteffizientes Routing, (a) Fahrzeiteinsparung, (b) Kraftstoffeinsparung ICEV über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation 117
6.5.5 Zeiteffizientes Routing, Reduzierung der Standzeit über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation . . . . . 118
6.5.6 Energieeffizientes Routing, (a) Fahrzeiteinsparung, (b) Kraftstoffeinsparung ICEV über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation . . . . . 118
6.5.7 Energieeffizientes Routing, Reduzierung der Standzeit über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation (ICEV) . . . . . 119
6.6.1 Verteilung der verschiedenen Fahrzeugtopologien auf dem Simulationsnetz für die Szenarien (a) eins, (b) zwei und (c) fünf, ICEV (rot), BEV (grün), PHEV (blau) . . . . 120
6.6.2 Szenario 6: Vergleich (a) Energieverbrauch, (b) Fahrzeit bei monotonen, stochastischen Fahrzeugpopulationen bei energieeffizientem Routing . . . . . 120

7.1.1 Heuristikbestimmung mittels Fahrtrichtung [44] . . . . . 125
7.2.1 (a) Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Ameisenstraße auf der optimalen Route bildet, (b) benötigte Rechenzeit . . . . . 127

7.2.2 Einfluss der Richtungsabhängigkeit auf die Lösungsqualität, (a) Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Ameisenstraße auf der optimalen Route ausbildet, (b) Rechenzeitbedarf . . . 128
7.2.3 (a) Einfluss der Routenlänge und Iterationsanzahl auf die Lösungsqualität und (b) den Rechenzeitbedarf . . . 128
7.3.1 Zeit- und energieeffizientes Routing, (a) Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Ameise die optimale Route findet, (b) Abweichung der schlechtesten Lösung von der optimalen Lösung . . . 129

8.1.1 Radargestütztes Verkehrsmesssystem, (a) Gesamtaufbau mit autarker Energieversorgung, (b) Hardware, (c) Empfängermodul . . . 132
8.1.2 Verkehrsmessung an der Albert-Einstein-Allee Ulm . . . 133
8.1.3 (a) Entwicklung der Fahrzeiteinsparung, (b) Kraftstoffeinsparung als Funktion der Updaterate des Zentralnavigationssystems mit Echtzeitdaten . . . 133
8.1.4 Vergleich des Rückgangs der Fahrzeiteinsparung bei Vergrößerung des Updateintervalls von Echtzeitinformationen, Routing ausschließlich mit Echtzeitinformationen ($ZZ + EZI$), völlig kontrollierter Verkehrsraum ($VKV_Z$) . . . 134
8.3.1 (a) Kommunikationsablauf bei Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, (b) Kommunikationsablauf über das Mobilfunknetz . . . 136
8.3.2 Detaillierte Darstellung der Fahrzeug-Verkehrsleitzentrale-Kommunikation . . . 138
8.4.1 Szenario drei: (a) Datenvolumen der Fahrzeuge-VLZ-Kommunikation, (b) Datenübertragungsrate der gesamten Kommunikation . . . 139
8.4.2 (a) Gesamtdatenvolumen, (b) Datenübertragungsrate der Verkehrsleitzentrale als Funktion der Fahrzeuganzahl sowie der prozentual erreichbaren Fahrzeuge des völlig kontrollierten Verkehrsflusses . . . 139
8.5.1 Smartphone-App, (a) Hauptmenü, (b) Adresseingabe (Routeninitialisierung), (c) Routingupdate mit Zusatzinformationen über die alte / neue Route, (d) Echtzeitinformationen über den Verkehrszustand des Streckennetzes (Kartenmaterial Quelle: Google Maps) . . . 141
8.5.2 Smartphone-App Zusatzinformationen, (a) Geschwindigkeitsverlauf, (b) Kraftstoffverbrauch, Echtzeitinformationen über ULTraSim (c), (d) . . . 141

# Tabellenverzeichnis


2.6.1 Eckdaten des Verkehrsnetzes (Ulm, Neu-Ulm) . . . 17
2.7.1 Normalverteilter Parameterbereich der charakteristischen Fahrzeugparameter . . . 20

3.4.1 Verbrauchsangaben der modellierten / betrachteten Elektrofahrzeuge . . . 46
3.4.2 Verbrauchsangaben vergleichbar motorisierter Elektrofahrzeuge laut Hersteller . . . 46
3.5.1 Ermittelte Verbrauchswerte von Parallel-Hybridfahrzeugen mit unterschiedlicher Motorisierung . . . 48
3.6.1 Vergleich Kraftstoffverbrauch Fahrzeugmodelle mit den Herstellerangaben ähnlich motorisierter Fahrzeuge . . . 50

5.4.1 Übersicht Optimierungsziele, Abkürzungen . . . 76
5.5.1 Abbiegekosten für verschiedene Fahrzeugtypen, Klassifiziert nach der Abbiegerichtung . . . 81
5.6.1 Übersicht über die Parameter der Alternativrouten 27-1 . . . 85
5.6.2 Übersicht über die Parameter der Alternativrouten 88-39 . . . 85

6.1.1 Detailübersicht Route 80-39, Vergleich energieeffiziente, kürzeste und zeiteffizienteste Route (BEV, ICEV, PHEV) . . . 89
6.1.2 Vergleich Kraftstoffeinsparung energieeffiziente Route gegenüber der kürzesten Route von ICEV, BEV und PHEV (Route 80-39) . . . 90
6.2.1 Übersicht der analysierten Simulationsszenarien für ULTraSim . . . 93
6.3.1 Durchschnittliche Fahrzeiteinsparung beim Routing mit Echtzeitinformationen (EZI) bzw. beim Routing mit Echtzeitinformationen und Streckenpotenzial (Vollkommen kontrollierter Verkehr, $VKV_Z$), im Vergleich, wenn alle Fahrzeuge die zeiteffizienteste Route $ZE$ befahren . . . 97
6.3.2 Durchschnittliche Standzeit je Fahrzeug . . . 98
6.3.3 Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch je Fahrzeug (ICEV) mit Start-Stopp-Automatik 98
6.3.4 Durchschnittliche Fahrzeit- und Kraftstoffersparnis von $EZI_E$-, $VKV_E$-Routing im Vergleich zum energieeffizienten Routing ($EE$) für konventionelle Fahrzeuge mit / ohne Start-Stopp-Automatik . . . 100
6.3.5 Durchschnittliche Fahrzeit- und Energieeinsparung $VKV_E$-Routing im Vergleich zur energieeffizienten Route für Elektrofahrzeuge . . . 100
6.3.6 Durchschnittliche Fahrzeit- und Energieeinsparung $VKV_E$-Routing im Vergleich zur energieeffizienten Route für Hybridfahrzeuge . . . 101
6.4.1 $VKV_Z$ zu $UBV$ für konventionelle Fahrzeuge mit / ohne Start-Stopp-Automatik . . . 107
6.4.2 $VKV_Z$ zu $UBV$ für Elektrofahrzeuge . . . 107
6.4.3 $VKV_E$ zu $UBV$ für konventionelle Fahrzeuge mit / ohne Start-Stopp-Automatik . . . 107
6.4.4 $VKV_E$ zu $UBV$ für Elektrofahrzeuge . . . 107
6.4.5 $VKV_E$ zu $UBV$ für Hybridfahrzeuge . . . 108
6.6.1 Zusätzliche Fahrzeit- und Energieeinsparung bei einer stochastischen Fahrzeugpopulation im Vergleich zum $VKV_E$-Routing mit monotonen Fahrzeugpopulationen . 121

7.1.1 Geschätzte Kosten zur Botenstoffnormierung . . . . . 126

8.3.1 Header des Kommunikationsprotokolls . . . . . 137
8.3.2 Nachrichtentyp / Bezeichnung . . . . . 137
8.3.3 Inhalt Nachrichtentyp 2: Routenupdate positiv . . . . . 137
8.3.4 Inhalt Nachrichtentyp 5: Beacon . . . . . 138

# Abkürzungen und Formelzeichen

**Abkürzungen**

| | |
|---|---|
| ABC | Ant Based Control |
| AKTIV | Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr |
| AU | Application-Units |
| BEV | Battery Electric Vehicle, Elektrofahrzeug |
| BPR | Funktion des U.S. Bureau of Public Roads |
| CVIS | Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems |
| ECE | Europäischer Stadtzyklus |
| EUDC | Extra Urban Driving Cycle |
| EZI | Routing mit Echtzeitinformationen |
| FTP75 | Federal Test Procedure |
| GPS | Global Positioning System |
| ICE | Internal Combustion Engine, Verbrennungsmotor |
| ICEV | Internal Combustion Engine Vehicle, Fahrzeug mit klassischem Verbrennungsmotor |
| IDM | Intelligent-Driver-Model |
| ika | Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University |
| INVENT | Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik |
| KML | Keyhole Markup Language |
| LSA | Lichtsignalanlage |
| MANET | Mobile-Ad-hoc-Networks |

MOBIL ..... Minimizing Overall Braking deceleration Induced by Lane changes

MVEG ..... Motor Vehicle Emissions Group

NEDC ..... New European Driving Cycle

NEFZ ..... Neuer Europäischer Fahrzyklus

OBU ..... On-Board-Units

PELOPS ..... Programmsystem zur Entwicklung längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanter Umgebung

PHEV ..... Parallel Hybrid Electric Vehicle, Parallel-Hybridfahrzeug

RSU ..... Road-Side-Units

SOC ..... State of Charge, Ladezustand der Batterie

SRTM ..... Shuttle Radar Topography Mission

STS-99 ..... Space Transportation System

TMC ..... Traffic Message Channel

TSP ..... Traveling-Salesman-Problem

UBV ..... Unbeeinflusster Verkehrsfluss

ULTraSim ..... Ulm Traffic Simulator

V2I ..... Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation

V2V ..... Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation

V2X ..... Vehicle-to-X-Kommunikation

VANET ..... Vehicle-Ad-hoc-Networks

VISSIM ..... Verkehr in Städten - Simulations Modell

$VKV_E$ ..... Völlig kontrollierter Verkehrsfluss, energieoptimiert

$VKV_Z$ ..... Völlig kontrollierter Verkehrsfluss, zeitoptimiert

VLZ ..... Verkehrsleitzentrale

XFCD ..... Extended-Floating-Car-Daten

**Formelzeichen**

| | | |
|---|---|---|
| $\alpha$ | Modellparameter der BPR-Funktion | [1] |
| $\beta$ | Modellparameter der BPR-Funktion | [1] |
| $\beta$ | Richtungsgewichtung | [1] |
| $\beta$ | Schätzparameter | [1] |
| $\Delta t$ | Zeitabschnitt | [s] |
| $\Delta v$ | Geschwindigkeitsdifferenz | $[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}]$ |
| $\Delta x$ | Streckenabschnitt | [m] |
| $\delta$ | Beschleunigungskoeffizient | [1] |
| $\delta$ | Schaltfolge | [1] |
| $\eta$ | Heuristik | [1] |
| $\gamma$ | Winkel, Modellparameter | [°] |
| $\hat{t}$ | Ankunftszeit | [s] |
| $\hat{w}$ | normierter Widerstand | [1] |
| $\lambda$ | Abbiegekosten | [1] |
| $\lambda$ | maximal akzeptierte Abweichung | [%] |
| $\mu$ | Modellparameter | [1] |
| $\Phi$ | Knotenpotenzial | [1] |
| $\Phi$ | Streckenpotenzialwert | [1] |
| $\rho$ | Verdunstungsrate | [%] |
| $\tau$ | Botenstoff | [1] |
| $a, a_{max}$ | Beschleunigung, maximale Beschleunigung | $[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}]$ |
| $a^*$ | Beschleunigung nach dem Spurwechsel | $[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}]$ |
| $a_h, a_{hw}$ | Beschleunigung hinteres Fahrzeug, aktuell, nach dem Spurwechsel | $[\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}]$ |

| | | |
|---|---|---|
| $a_s$ | Wechselschwelle | $[\frac{m}{s^2}]$ |
| $a_{quer}$ | Querbeschleunigung | $[\frac{m}{s^2}]$ |
| $b$ | Wunschverzögerung | $[\frac{m}{s^2}]$ |
| $b_{krit}$ | kritische Verzögerung | $[\frac{m}{s^2}]$ |
| $C$ | Kapazität | $[\frac{Fzg}{h}]$ |
| $c$ | Energieverbrauch pro Kilometer | $[\frac{Wh}{km}]$ |
| $c$ | Kantenkosten | [1] |
| $C_1$ | Kraftstoffverbrauch bei voller Batterie | [g] |
| $C_2$ | Kraftstoffverbrauch bei entladener Batterie | [g] |
| $CF_i$ | Überschneidungsfaktor | [1] |
| $d$ | Distanz | [1] |
| $D_e$ | elektrische Reichweite | [km] |
| $D_{av}$ | durchschnittliche Strecke zwischen zwei Ladungen | [km] |
| $D_{test}$ | Prüfstrecke | [km] |
| $E$ | Energieverbrauch | [Wh] |
| $f$ | Freundlichkeitsfaktor | [1] |
| $F_B$ | Bremskraft | [N] |
| $g$ | Gang | [1] |
| $g$ | Kosten aktuelle Kante | [1] |
| $g$ | geschätzte Kosten | [1] |
| $h$ | Höhe | [m] |
| $I(g)$ | I-Reglerparameter | [1] |
| $k$ | Ameise | [1] |
| $k$ | Fahrzeugdichte | $[\frac{Fzg}{km}]$ |

| | | |
|---|---|---|
| $k$ | Kurvenkrümmung | $[\frac{1}{\mathrm{m}}]$ |
| $k$ | reale Kosten | [1] |
| $k_E$ | Kosten Elektromotor | [1] |
| $k_v$ | Kosten Verbrennungsmotor | [1] |
| $K_{ges}$ | Gesamtkosten | [1] |
| $L$ | Streckenlänge | [m] |
| $l$ | Strecke zwischen zwei GPS-Koordinaten | [m] |
| $Lat$ | Latitude (geographische Breite) | [°] |
| $Lon$ | Longitude (geographische Länge) | [°] |
| $M$ | Drehmoment | [Nm] |
| $m$ | Anzahl Kanten | [1] |
| $n$ | Anzahl Knoten | [1] |
| $n$ | Drehzahl | $[\frac{1}{\mathrm{min}}]$ |
| $n$ | Fahrzeuganzahl | [1] |
| $P$ | Auswahlwahrscheinlichkeit | [%] |
| $P(g)$ | P-Reglerparameter | [1] |
| $P_E$ | Leistung Verbrennungsmotor | [W] |
| $P_V$ | Leistung Elektromotor | [W] |
| $Q$ | Sättigungsverkehrsfluss | $[\frac{\mathrm{Fzg}}{\mathrm{h}}]$ |
| $q, q_{max}$ | Verkehrsstärke, maximale Verkehrsstärke | $[\frac{\mathrm{Fzg}}{\mathrm{h}}]$ |
| $r$ | Kurvenradius | [m] |
| $r_{Erde}$ | Erdradius | [m] |
| $s^*$ | effektiver Wunschabstand | [m] |
| $s_0$ | Mindestabstand | [m] |

| | | |
|---|---|---|
| $T$ | Vorschauzeit | [s] |
| $T$ | zeitlicher Mindestabstand | [s] |
| $t$ | Zeit | [s] |
| $t_0$ | Fahrzeit bei geringem Verkehrsfluss | [s] |
| $t_B$ | Zeitbedarfswert | [s] |
| $t_u$ | Umlaufzeit | [s] |
| $v_0$ | Wunschgeschwindigkeit | $[\frac{m}{s}]$ |
| $V_i$ | Nutzen | [1] |
| $v_i$ | Geschwindigkeit des Fahrzeuges i | $[\frac{m}{s}]$ |
| $v_k$ | komfortable Kurvengeschwindigkeit | $[\frac{m}{s}]$ |
| $v_u$ | umweltbedingte Höchstgeschwindigkeit | $[\frac{m}{s}]$ |
| $v_v$ | verkehrsbedingte Höchstgeschwindigkeit | $[\frac{m}{s}]$ |
| $v_{Kurve}$ | maximale Kurvengeschwindigkeit | $[\frac{m}{s}]$ |
| $v_§$ | gesetzliche Höchstgeschwindigkeit | $[\frac{m}{s}]$ |
| $w$ | Widerstand | [1] |
| $s$ | Abstand | [m] |

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Menschen hatten schon immer das Bedürfnis, sich möglichst schnell und bequem fortzubewegen. Mit der Erfindung und Weiterentwicklung der modernen Fortbewegungsmittel konnte dieses Ziel stets besser realisiert werden. Besonders das Automobil trägt einen großen Anteil bei, um dieses zu erreichen. Da sich das Automobil in den letzten Jahrzehnten immer mehr zu einem Massenverkehrsmittel entwickelt hat, kommt es allerdings bei allem Fortschritt auch zu erheblichen Problemen. Besonders in Großstädten ist der Raum und somit die verfügbare Fläche für die Verkehrsinfrastruktur stark begrenzt. Dies führt vor allem durch eine zunehmende Anzahl an Verkehrsteilnehmern zu Hauptverkehrszeiten zu beträchtlichen Problemen. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, bedarf es neuer innovativer Verkehrsmanagementstrategien.

Um das Wirtschaftswachstum und die Innovationskraft der Wirtschaft zu stärken, ist es u. a. notwendig, Güter schnell von A nach B zu transportieren. Aber auch für die große Masse der Bevölkerung hat eine flexible Mobilität heutzutage einen sehr hohen Stellenwert. Durch die zunehmende Beschleunigung unserer Gesellschaft, nimmt der Wunsch eines jeden Einzelnen, schnell, kostengünstig, umweltfreundlich, individuell und unfallfrei an sein Ziel zu gelangen, immer mehr an Bedeutung zu. Allein im Jahr 2011 benutzten 47,5 % der Bevölkerung fast täglich ein Kraftfahrzeug. Dies spiegelt sich auch in den Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen in Deutschland wieder, welche in den Jahren 2000-2011 auf einem konstant hohen Niveau von durchschnittlich 3,3 Millionen Fahrzeugen pro Jahr lagen [139]. Diese Entwicklung führt früher oder später zwangsläufig zu essenziellen Problemen und Herausforderungen.

Bei den 42,9 Millionen zugelassenen Personenkraftfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2011 [138] handelt es sich zum größten Teil um Kraftfahrzeuge mit einem klassischen Verbrennungsmotor. Im Jahr 2011 waren 52 183 der zugelassenen Fahrzeuge Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge [78]. Für die kommenden Jahre gehen die Prognosen bei alternativen Antrieben von einer erheblichen Steigerung aus. So soll sich der Anteil bei Neuzulassungen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in Europa, worunter Mild-, Vollhybrid sowie Plug-in-Hybrid und Elektrofahrzeuge fallen [71], auf 59 % erhöhen. Da die Erdölreserven unserer Erde begrenzt sind, was wiederum zu einer stetigen Verteuerung der Treibstoffpreise und dadurch unserer Mobilität führen wird, ist es notwendig, immer energiesparendere und umweltschonendere Fahrzeuge zu entwickeln. Gleichzeitig führt die überproportionale Anzahl an Fahrzeugen in Verbindung mit der stagnierenden Verkehrsinfrastruktur zu der Problematik, dass die Höhe des Verkehrsaufkommens und dadurch die Verkehrsstaus stetig zunehmen.

Nach aktuellen Studien zufolge gehören Stuttgart und Hamburg zu den stauanfälligsten Großstädten in Deutschland. Bedingt durch das hohe Verkehrsaufkommen kommt es hier durchschnittlich zu einer Fahrzeitzunahme von 33 % [131]. Neben den erheblichen Staus in Großstädten gab es auch auf den deutschen Autobahnen im Jahr 2011 Verkehrsstaus mit einer Gesamtlänge von

450 000 Kilometern [3]. Dies ist nicht nur für die einzelnen Verkehrsteilnehmer ein großes Ärgernis und Problem, sondern Verkehrsstaus verursachen auch für die gesamte Volkswirtschaft einen erheblichen wirtschaftlichen Schaden. So führt dies bei konventionellen Kraftfahrzeugen zu einer deutlichen Steigerung des Kraftstoffverbrauchs pro Kilometer. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, der bedingt durch eine steigende Anzahl an Kraftfahrzeugen verstärkt wird, die zunehmende Umweltbelastung durch einen vermehrten Ausstoß von Schadstoffemissionen, infolge langer Standzeiten von Fahrzeugen im Stau. Zu einer Lösung des hohen Verkehrsaufkommens in Städten und daraus resultierender Verkehrsstaus, können aktuelle Forschungen und Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der alternativen und effizienteren Fahrzeuge nur einen sehr begrenzten Beitrag leisten. Zur Lösung dieser Problematik bedarf es gesamtheitlicher Verkehrsbeeinflussungsstrategien zur globalen Optimierung der Verkehrsströme.

Der steigende Absatz von Navigationsgeräten in den letzten Jahren von 670 Tausend im Jahre 2005 auf 4,326 Millionen im Jahr 2008 [22] zeigt, dass die Mehrzahl der Autofahrer eine Orientierungshilfe und Unterstützung zur effizienten Routenwahl benötigen und wünschen. Eine hohe Nutzerakzeptanz von Navigationsgeräten spiegelt sich auch darin wieder, dass bereits heute 73 % der Autofahrer/innen ein Navigationsgerät zur Orientierungshilfe benützen [23]. Bei den konservativen Navigationsgeräten, die für jedes Fahrzeug die kürzeste Route berechnen ohne das Verkehrsaufkommen zu beachten, führt dies dazu, dass Verkehrsstaus auf den ausgewählten Routen erheblich zunehmen. Selbst moderne Navigationsgeräte, welche über eine aktive Stauumfahrung verfügen, sind nicht in der Lage die Verkehrsteilnehmer intelligent auf verschiedene Alternativrouten, welche den Verkehrsengpass umfahren, zu verteilen. Stattdessen erfolgt eine zeitgleiche Verlagerung aller Verkehrsteilnehmer auf die gleiche Alternativroute.

Da Verkehrsräume in den Innenstädten sehr begrenzt sind und um die bestehende Verkehrsinfrastruktur effizienter und besser nutzen zu können, bedarf es einer globalen Betrachtung und Optimierung der Routen aller Verkehrsteilnehmer. Welcher Autofahrer hat nicht die Absicht, sein Ziel möglichst schnell und energiesparend ohne große verkehrsbedingte Verzögerungen zu erreichen. Oft hat ein Autofahrer die Möglichkeit zwischen mehreren verschiedenen Alternativrouten wählen zu können. Mittels eines zentralen Verkehrsnavigationssystems, welches die Routenwahl und das Verkehrsgeschehen global betrachtet, wäre es möglich, den Verkehrsfluss als Ganzes zu optimieren und jedem einzelnen Autofahrer somit eine individuell optimale Route, unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrssituation und anderer Verkehrsteilnehmer, bereitzustellen. Dies bietet die Chance den Verkehr auf Alternativrouten zu verteilen, damit die Fahrzeit und der Energieverbrauch aller Verkehrsteilnehmer minimiert wird und dass Strecken entlastet werden, bevor ein Verkehrsstau entsteht.

## 1.2 Problemstellung / Forschungsansatz

Um den Energieverbrauch und den Kohlendioxidausstoß von Fahrzeugen weiter zu senken, werden immer modernere und hochtechnologisiertere Fahrzeuge entwickelt. Gerade in der Elektromobilität ist es eine große Herausforderung, hohe Reichweiten mit den Fahrzeugen zu erzielen. Um den Energieverbrauch von Fahrzeugen zu reduzieren, gibt es viele Anstrengungen diesem Ziel gerecht zu werden. Hierzu tragen u. a. Fahrerassistenzsysteme bei, welche Gangempfehlungen geben oder eine optimale Geschwindigkeitswahl für eine energieeffiziente Fahrweise vorschlagen. Unter diesem Aspekt ist die Entwicklung neuer, intelligenter und energiesparender Betriebsstrategien in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus getreten.

Diese Betriebsstrategien haben das Ziel, den optimalen Energieeinsatz für ein Fahrzeug, für das Zurücklegen einer Strecke, zu erreichen. Hierbei können sie ihre Stärken nur dann ausspielen, wenn der Verkehrsfluss genügend Freiheitsgrade wie z. B. eine freie Geschwindigkeits- oder Routenwahl zulässt, so dass ein Maximum an Energie eingespart werden kann. Befindet sich hingegen ein Fahrzeug die meiste Zeit in einem gebundenen Verkehrsfluss bis hin zu einem Verkehrsstau, so kann eine Betriebsstrategie ihre Stärken nur begrenzt ausspielen und zur Verbrauchsreduzierung beitragen. Die Optimierung eines jeden einzelnen Fahrzeuges ist dementsprechend nur der erste Schritt. Ziel muss es sein, alle Fahrzeuge einer Flotte bzw. in einem Verkehrsraum so zu steuern, dass jede individuelle Betriebsstrategie ihre Vorteile ausspielen kann. Auch müssen sämtliche Fahrzeuge als auch die Verkehrsinfrastruktur in den Optimierungsprozess integriert werden.

Die Lösung dieses sehr komplexen Problems mit sehr vielen beteiligten Einflussfaktoren kann ein Zentralnavigationssystem sein, welches die Koordinierung, Überwachung und Lenkung von Teilen bzw. im optimalen Fall der gesamten Verkehrspopulation übernimmt. Dieses zentrale Verkehrsmanagement hat somit die Aufgabe, den gesamten betrachteten Verkehrsraum zu überwachen und mit der Kenntnis aller verfügbaren Informationen über das Verkehrsnetz, die globale Optimierung des gesamten Verkehrsraumes zu erreichen. Dies kann je nach Anforderung eine Optimierung zum Erreichen der minimalen Fahrzeit oder des minimalen Energieverbrauchs aller Verkehrsteilnehmer sein. Hierzu muss das Zentralnavigationsgerät über Algorithmen verfügen, welche es ermöglichen, die Wechselwirkungen von geplanten unterschiedlichen Routen mit der aktuellen Ist-Situation sowie die Planung neuer Routen abzuschätzen. Um eine Aussage darüber treffen zu können, wie sich die Verteilung der Fahrzeuge auf verschiedene Alternativrouten auf den Verkehrsfluss, Kreuzungen, Lichtsignalanlagen, die Fahrzeit und den Energieverbrauch des einzelnen Fahrzeuges, aber auch aller betrachteten Fahrzeuge, auswirkt.
Da in naher Zukunft neben den zurzeit hauptsächlich konventionellen Fahrzeugen immer mehr Hybridfahrzeuge als auch Elektrofahrzeuge auf den Markt kommen werden, stellt sich außerdem die Frage, wie sich diese neue Fahrzeugpopulation auf die Energieeinsparung durch eine energieeffiziente Routenwahl auswirkt. Auch ist zu klären, wie sich je nach betrachteter Fahrzeugtopologie energieeffiziente Routen unterscheiden.

Da der Idealfall einer hundertprozentigen Abdeckung aller Verkehrsteilnehmer mit gezielt steuerbaren Fahrzeugen durch das Zentralnavigationsgerät nicht erreicht werden kann, ist eine wichtige Fragestellung, wie hoch die Durchdringung, sprich der prozentuale Anteil erreichbarer Fahrzeuge sein muss, um positive Verbesserungen bei der Fahrzeiteinsparung und beim Energieverbrauch zu erreichen.
Für die Entwicklung und die Erprobung neuer Routingstrategien sind geeignete Simulationssoftwares unumgänglich. Diese Verkehrssimulatoren ermöglichen es, die Interaktion von verschiedenen Fahrzeugtopologien und deren Betriebsstrategien mit der Verkehrsinfrastruktur genau zu analysieren und zu optimieren.

## 1.3 Zielsetzung

Ziel der Dissertation ist es, nicht nur den Energieverbrauch und die Schadstoffemissionen eines einzelnen Fahrzeuges zu minimieren, sondern alle Fahrzeuge sowie deren Wechselwirkungen untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur zu betrachten und zu optimieren. Ziel ist es, die Fahrzeit sowie den Energieverbrauch der Gesamtheit aller in einem Verkehrsraum befindlichen Fahrzeuge zu minimieren. Wobei untersucht werden soll, wie hoch die notwendige Einflussnah-

me auf den Verkehr sein muss, um Verbesserungen hinsichtlich Fahrzeit und Energieverbrauch zu erzielen.

Im ersten Teil der Dissertation soll hierzu ein mikroskopischer Verkehrssimulator entwickelt werden, der es erlaubt, realistisch den Stadtverkehr einer beliebigen Großstadt zu simulieren. Außerdem soll er die Möglichkeit bieten, beliebig detaillierte submikroskopische Fahrzeugmodelle zu integrieren, um genaue energetische Aussagen hinsichtlich der Auswirkungen von neuen Routingkonzepten sowie der Wechselwirkung von vielen Fahrzeugen und deren Betriebsstrategien in großen Verkehrsflotten treffen zu können.

Im zweiten Teil der Dissertation soll für eine zufällige Fahrzeugpopulation bestehend aus Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb, Elektrofahrzeuge oder Hybridfahrzeugen ein zentrales Verkehrsmanagementsystem implementiert werden, das ermöglicht, den gesamten Verkehrsfluss hinsichtlich energetischer und zeitlicher Kriterien zu optimieren. Abhängig vom aktuellen Zustand des Verkehrsnetzes sowie der Routenauslastung und des jeweiligen Fahrzeugtyps soll hierzu jedes Fahrzeug eine individuelle Route erhalten. Das Zentralnavigationsgerät soll hierbei in der Lage sein, neue Routen mit der Kenntnis sämtlicher geplanter Routen sowie dem aktuellen Verkehrszustand unter verschiedenen Optimierungszielen zu ermitteln und in regelmäßigen Intervallen zu aktualisieren.

Um die Ergebnisse einzelner Eingriffsmaßnahmen beurteilen zu können, wird sowohl der Fall eines unbeeinflussten Verkehrsflusses, welcher die Ist-Situation beschreibt, als auch der Idealfall eines völlig kontrollierten Verkehrsflusses untersucht. Abhängig von den möglichen Einsparungen des Idealfalls soll untersucht werden, welche Einsparungen erreichbar sind, wenn nicht alle Fahrzeuge in die Zentralnavigation involviert sind. Ziel ist es, eine prozentuale Aussage treffen zu können, wie viele Fahrzeuge direkt mittels eines Zentralnavigationsgerätes geroutet werden sollten, um vergleichbare Ergebnisse, der Energie- und Fahrzeiteinsparung sowie Erhöhung des Verkehrsflusses, hinsichtlich des idealen Zustandes, zu erreichen.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in neun Kapitel. In Kapitel 2 wird zunächst die Entwicklung einer Verkehrssimulationsumgebung namens ULTraSim erläutert, welche exakt auf die Anforderungen für die Entwicklung und Analyse neuer Routingkonzepte zugeschnitten ist. Um detaillierte Analysen zukünftiger Fahrzeugpopulationen anstellen zu können und um exakte Aussagen hinsichtlich Energie- und Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge zu erhalten, werden in Kapitel 3 verschiedene Längsdynamikfahrzeugmodelle unterschiedlicher Fahrzeugtopologien und deren Betriebsstrategien erläutert und diskutiert.
In Kapitel 4 wird anhand einiger Simulationsszenarien dargelegt, welche Energieverbrauchssteigerungen aufgrund von hohen Verkehrsdichten sowie schlecht geregelten Lichtsignalanlagen entstehen. Hierbei wird außerdem auf die Verbrauchssteigerung anhand verschiedener Bordnetzszenarien sowie unterschiedlicher Fahrzeugtopologien eingegangen.
Für die Generierung der unterschiedlichen Ereignisräume ist eine Analyse bestehender Routingalgorithmen sowie die Neuentwicklung eines Algorithmus, der einen völlig kontrollierten Verkehrsfluss ermöglicht, notwendig. In Kapitel 5 werden diese Algorithmen und Überlegungen dargestellt und erläutert. Weiter wird ein Routingkonzept mit einem zentralen Verkehrsmanagement vorgestellt, welches einen völlig kontrollierten Verkehrsfluss ermöglicht.

Ausgehend von den in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnissen und den darin erläuterten Algorithmen zur Generierung der unterschiedlichen Ereignisräume werden in Kapitel 6 für verschiedene Simulationsszenarien Vergleiche unterschiedlicher Optimierungsziele in den jeweiligen Ereignisräumen angestellt. Außerdem wird analysiert, wie hoch die Durchdringung mit optimal erreichbarer Fahrzeuge sein muss, um den Energieverbrauch bzw. den Fahrzeitbedarf positiv zu beeinflussen.
In Kapitel 7 wird untersucht, ob der Teil des Routingalgorithmus, der für das Auffinden der kostengünstigen Route verantwortlich ist, durch einen deutlich schnelleren Algorithmus als einen analytischen Algorithmus ersetzt werden kann. Hierzu wird untersucht, ob generische Algorithmen, wie der Ameisenalgorithmus ebenfalls auf Optimierungsziele wie Energieoptimalität und Zeitoptimalität anwendbar sind. Da das zentral gesteuerte Routing vieler Fahrzeuge einen erhöhten Datenverkehr zur Folge hat, wird durch die Entwicklung eines geeigneten Kommunikationsprotokolls in Kapitel 8 analysiert, welche Datenvolumen entstehen und welche Datenübertragungsraten für ein Zentralnavigationsgerät notwendig sind. Abschließend erfolgt in Kapitel 9 eine Zusammenfassung der Ergebnisse der gesamten Dissertation, auch wird ein kurzer Ausblick über zukünftige Anwendungs- und Einsatzgebiete der Verkehrssimulationssoftware sowie des entwickelten Verkehrsroutingkonzeptes gegeben.

# 2 Grundlagen der Verkehrssimulation

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines Verkehrssimulators namens ULTraSim (Ulm Traffic Simulator), welcher exakt für die Anforderungen zur Entwicklung von Routingstrategien unter zeit- und energieeffizienter Sichtweise von Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugtopologien entwickelt wurde, vorgestellt. Teile der Verkehrssimulation ULTraSim wurden im Rahmen einer Diplomarbeit von Herrn Dipl.-Ing. Daniel Thierauf implementiert [129]. Hierzu werden zunächst in Abschnitt 2.3 einige kommerziell verfügbare Simulatoren vorgestellt und deren Vor- und Nachteile, hinsichtlich des Detaillierungsgrads Abschnitt 2.2 und der Flexibilität, diskutiert. In den Abschnitten 2.4 und 2.5 werden die Anforderungen sowie die Zielsetzung für die Eigenentwicklung einer Verkehrssimulationssoftware definiert. Die Abschnitte 2.6 bis 2.10 erläutern schließlich die Entwicklungsschritte und die einzelnen Modelle von ULTraSim im Detail.

## 2.1 Einleitung

Für die Entwicklung neuer Routingstrategien sowie zur Verbesserung und Optimierung der Ist-Situation ist eine Simulationsumgebung notwendig. Beim Straßenverkehr handelt es sich um ein äußerst stochastisches System, welches von vielen Faktoren beeinflusst wird. So spielen Faktoren, wie die bauliche Ausführung und Beschaffenheit der Verkehrsinfrastruktur sowie Beschilderungen, Lichtsignalanlagen, Wettergegebenheiten und vieles mehr eine entscheidende Rolle. Weiterer großer Einflussfaktor sind Verkehrsteilnehmer. Hier lassen sich verschiedene Gruppen von Verkehrsteilnehmern definieren und feststellen wie Fahrzeuge, der öffentliche Nahverkehr, Fußgänger oder Fahrradfahrer. Die Komplexität besteht darin, dass jeder Verkehrsteilnehmer individuell agiert und verschiedene Ziele verfolgt. In der Regel ist das übergeordnete Ziel, möglichst schnell, kostengünstig und energieeffizient von A nach B zu gelangen.

Die Notwendigkeit einer computergestützten Simulationsumgebung ist aus vielerlei Hinsicht erforderlich. Zum einen handelt es sich beim städtischen Straßenverkehr um ein sehr komplexes System mit sehr vielen freien Parametern, welches als Ganzes nur sehr schwer beherrschbar ist. Für die Entwicklung von Routingstrategien ist es zum anderen notwendig ein Modell zu besitzen, welches reproduzierbare Ergebnisse liefert, weshalb eine Simulationsumgebung ein sehr wichtiger Faktor für die Bewertung von Verkehrsleitstrategien anhand von Verkehrsszenarien ist. Allein diese Anforderungen machen es unmöglich, Verkehrsleitstrategien mit dem realen Verkehr zu entwickeln. Auch aus sicherheitstechnischen und finanziellen Gründen ist dies nicht möglich. Aus diesem Grund bedient man sich einer computergestützten Simulationsumgebung. Ziel einer Simulationsumgebung muss es hierbei sein, die reale Welt möglichst exakt abzubilden. Die Abbildung des Verkehrs als Ganzes mit all seinen Einflussfaktoren und Facetten würde die Komplexität und den Rechenaufwand jeder Simulation bzw. jedes Computers übersteigen. Deshalb muss es das Ziel sein, aufgrund der Komplexität des Straßenverkehrs und seiner hohen Anzahl an Teilnehmern auf Basis einer genauen Analyse, die Komponenten des Verkehrs zu ermitteln,

welche für das jeweilige Forschungsprojekt von Wichtigkeit sind.

Eine Simulation ist grundsätzlich die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell [137]. Die Generierung eines Simulationsmodells ist notwendig, da der Verkehr als solches nicht analytisch beschreibbar bzw. greifbar ist. Ziel einer Verkehrssimulation ist es, eine möglichst detaillierte Nachbildung aller motorisierten Verkehrsteilnehmer in einem Straßen- und Streckennetz. Auch besteht der große Vorteil einer Simulationsumgebung darin, dass Randbedingungen schnell und mit überschaubarem Aufwand verändert werden können und so schnell und kostengünstig verschiedene Szenarien generiert und bewertet werden können. Im Folgenden wird der Begriff Simulator als Synonym für Verkehrssimulator benutzt und beschreibt eine möglichst reale Nachbildung des Straßenverkehrs mit seinen Verkehrsteilnehmern und allen Einrichtungen, welche für eine möglichst detailgetreue und realitätsnahe Nachbildung des Verkehrsflusses notwendig sind.

## 2.2 Detaillierungsgrad

Für die Abschätzung des Entwicklungsaufwandes eines Verkehrssimulators ist die angestrebte Detailtreue von entscheidender Bedeutung. Je detaillierter die Infrastruktur mit ihren Verkehrsteilnehmern abgebildet wird, desto höher ist der Entwicklungsaufwand und die darauf resultierende Entwicklungszeit. Gleichzeitig steigt mit höherer Detailtreue der Simulation die Rechenzeit deutlich an. Hierbei muss es das Ziel sein, ein ausgewogenes Gleichgewicht zwischen Rechenaufwand und Detailtiefe für die Simulationen zu finden. Entscheidendes Kriterium für die Genauigkeit und den Betrachtungshorizont ist das Entwicklungsziel bzw. das Anwendungsgebiet des Simulators. Ist das Anwendungsgebiet z. B. das Erstellen von Stauprognosen oder die Analyse des täglichen Verkehrsverhaltens, bei dem ein sehr großer Betrachtungshorizont analysiert wird, so Bedarf dies einer anders aufgebauten Simulation, als wenn man die Dynamik einzelner Fahrzeugkomponenten in einem Verkehrsfluss analysieren möchte. In [133] erfolgt eine unterschiedliche Klassifizierung des Detaillierungsgrades je nach Tiefe der Analyse verkehrstechnischer Aspekte. Für die Verkehrsplanung, sprich für die Auslegung von Infrastruktur und die Erstellung von Prognosen und Verkehrsstatistiken, werden meist Zeitabschnitte von einem Tag bis zu 50 Jahren betrachtet. Für die Analyse von verkehrsdynamischen Aspekten, wie das Fahrerverhalten von Verkehrsteilnehmern, die Optimierung von Lichtsignalalgorithmen oder die Analyse von Stau- und Stop-and-Go-Wellen, sind Betrachtungszeiträume von 1 Sekunde bis hin zu 10 Minuten von Interesse. Interessiert man sich für Parameter der Fahrzeugdynamik ist eine noch genauere Simulation von weniger als 0,1 Sekunden notwendig. Hier kommt es ganz darauf an, welche fahrzeugdynamischen Aspekte genauer beleuchtet werden sollen. Für Größen des Antriebsstranges sowie zur Abbildung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeugdynamik und zur möglichst genauen Berechnung von Energie- und Kraftstoffverbrauch sind Diskretisierungen von 0,1 Sekunden ausreichend. Diskretisierungen unter 0,1 Sekunden führen im Allgemeinen zu keiner Erhöhung der Genauigkeit. Für die Betrachtung von Aspekten wie die Auslösung von Airbags oder das Reaktionsverhalten von Stoßdämpfern oder ABS und ESP sind noch feinere Diskretisierungen notwendig.
Je nach Detailtreue und Diskretisierungslevel wird bei Verkehrssimulationen zwischen verschiedenen Klassifizierungen und Modellierungsansätzen unterschieden [83], [61]. Eine Klassifizierung erfolgt in makroskopisch, mikroskopisch und submikroskopisch.

**makroskopisch** Unter makroskopischer Verkehrssimulation versteht man, wenn die Fahrzeuge in einem Streckennetz nicht als Individuum, sondern in Form eines Fahrzeugstroms oder -flusses dargestellt werden. Berechnungsbasis sind kontinuumsmechanische Ansätze zur Beschreibung der Verkehrsströme sowie die Formulierung über partielle Differenzialgleichungen, in denen sowohl der Ort als auch die Zeit kontinuierlich ist [133]. Verkehrskenngrößen wie Verkehrsdichte, mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss werden durch strömungsmechanische Größen wie Dichte, Strömungsgeschwindigkeit und Volumenstrom beschrieben. Erste Vertreter von makroskopischen Verkehrsmodellierungen gehen auf Arbeiten von Whitham und Lighthill [85] zurück. Neben dem Vorteil der vergleichsweise geringen Rechenzeit bei sehr großen Verkehrsnetzen, hat die makroskopische Betrachtungsweise den Nachteil, dass keine Rückschlüsse auf die einzelnen Fahrzeuge gezogen werden können. Anwendung finden makroskopische Verkehrssimulationen vor allem für Stauprognosen von Bundesautobahnen oder für Verkehrslärmberechnungen und für sehr grobe Abschätzungen des Kraftstoffverbrauchs.

**mikroskopisch** Zur detaillierteren Betrachtung von Verkehrsabläufen ist es notwendig, die einzelnen Verkehrsteilnehmer näher zu beschreiben. Eine mikroskopische Betrachtungsweise entspricht im Prinzip der atomaren Ebene von Gasen. Hierbei werden die einzelnen Fahrzeuge und deren Beschleunigungs-, Brems- und Spurwechselverhalten in Bezug zu ihren unmittelbaren Nachbarn durch mathematische Funktionen beschrieben. Dadurch ist es möglich, das individuelle Fahrerverhalten, wie es in der Realität auftritt, wirklichkeitsnahe abzubilden. Für die Modellierung der Fahrer-Fahrzeug-Einheit und deren Interaktion gibt es verschiedene Realisierungsansätze. Oft wird das Fahrzeugfolgemodell zeitkontinuierlich durch gekoppelte gewöhnliche Differenzialgleichungen beschrieben. Hierbei liegt lediglich eine zeitliche Abhängigkeit verschiedener Zustandsgrößen vor. Bekannte Vertreter sind das IDM „Intelligent Driver Modell“ [132] oder das psycho-physische Fahrzeugfolge-Modell nach Wiedemann [147]. Vertreter der diskretisierten Betrachtungsweise sind Zellularautomaten (CA), bei denen die Modellgrößen als diskrete Werte vorliegen. Bekanntester Vertreter ist das Nagelschreckenberg Modell [119], [118]. Nähere Erläuterungen zu Fahrermodellen finden sich in Abschnitt 2.7.

**submikroskopsich** Die detailreichste Klassifizierungsstufe ist die submikroskopische Verkehrssimulation. Hierbei wird nicht nur die Fahrer-Fahrzeug-Einheit über Beschleunigung- und Verzögerungsfunktionen simuliert, sondern die gesamte bzw. Teile der Fahrzeugdynamik abgebildet. Hierbei wird je nach Tiefe der Detaillierung ausschließlich die Längsdynamik des Antriebsstranges oder zusätzlich die Querdynamik betrachtet [89]. Interessant ist diese Art der Verkehrssimulation, um z. B. eine detaillierte, realitätsgetreue Auskunft über Verbrauchs- und Emissionsberechnungen von Fahrzeugflotten im Straßenverkehr zu erhalten. Um eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen ist es bei submikroskopischen Simulationen notwendig, die zeitliche Auflösung stark zu erhöhen, so dass ein quasi-kontinuierlicher Verlauf der betrachteten Größen entsteht. Dies erfordert einen hohen Rechenaufwand und ist in der Regel nur bedingt für sehr große Simulationsnetze sinnvoll. Aus diesem Grund ist die submikroskopische Simulation in der Regel nur begrenzt für sehr große Simulationsnetze mit sehr vielen Verkehrsteilnehmern einsetzbar.

## 2.3 Kommerziell verfügbare Produkte

Da eine Verkehrssimulationssoftware vor allem für die Verkehrsinfrastrukturplanung sehr wichtig ist, gibt es einige kommerziell verfügbare Programme. Aber auch im Rahmen der zunehmenden Bedeutung der Vernetzung zwischen Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeug gewinnen Verkehrssimulatoren auch bei der Automobilindustrie zunehmend an Bedeutung. Die bekanntesten Vertreter von mikroskopischen Verkehrssimulatoren, welche auch weltweit vertrieben werden, sind VISSIM, PARAMICS, OLSIM und PELOPS. Diese sind meist aus universitären Projekten bis zur Marktreife weiter entwickelt worden.

**VISSIM** Bei VISSIM [102] „Verkehr In Städten-SImulationsModell“ handelt es sich um einen mikroskopischen Verkehrssimulator, welcher auf den Überlegungen nach Wiedemann [147] und Sparmann [123] beruht. VISSIM gehört zu den multi-modalen Simulatoren und ist unter anderem in der Lage, unterschiedliche Arten von Verkehrsteilnehmern wie PKW, Fußgänger, Fahrradfahrer und den öffentlichen Nahverkehr zu simulieren. Entwickelt und vertrieben wird VISSIM von der PTV Planung Transport Verkehr AG in Karlsruhe und gehört heute zu den Marktführern in punkto Verkehrssimulationen.

**PARAMICS** Die Simulationssoftware PARAMICS [98] wird von der Firma Quadstone vertrieben. Ursprünglich entstand PARAMICS aus einem Projekt des Edinburgh Parallel Computing Centre der Universität Edinburgh. Im Fokus der Entwicklung stand zunächst die Verteilung großer Netze auf mehrere Parallelrechner. Der mikroskopische Verkehrssimulator basiert auf den Arbeiten von Frizsche [58] sowie Weiterentwicklungen [103].

**OLSIM** Ein öffentlich zugänglicher Simulator ist OLSIM [94] „Online-Simulation“, welcher im Rahmen eines Stau-Informationssystems für Autofahrer an der Universität Duisburg-Essen entwickelt wurde. Mithilfe von aktuellen Echtzeit- und historischen Daten ist der mikroskopische Simulator in der Lage, die aktuelle Verkehrssituation auf ca. 2 200 Autobahnkilometern in Nordrhein-Westfalen darzustellen. Gleichzeitig ist der Simulator in der Lage, eine 30- bis 60-minütige Prognose über den Verkehrszustand zu berechnen. Berechnungsbasis für OLSIM sind Zellulärautomaten nach Nagel-Schreckenberg [119]. Die Berechnung der hohen Anzahl von Fahrzeugen und Autobahnkilometern in Echtzeit kann durch eine starke Vereinfachung der Zellulärautomaten auf Kosten der Genauigkeit erzielt werden. Trotzdem erreichen die Prognosen eine Genauigkeit zwischen 85 % und 96 % [134].

**PELOPS** Bei PELOPS „Programmsystem zur Entwicklung längsdynamischer mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanten Umgebungen“ handelt es sich um einen der sehr wenigen Vertreter eines submikroskopischen Verkehrssimulators. Entwickelt wurde PELOPS 1989 in einer Kooperation zwischen RWTH Aachen und der BMW AG. Vertrieben wird es durch die Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH mit Sitz in Aachen (fka) [48]. In der Simulation finden submikroskopische Fahrzeugmodelle in einer mikroskopischen Simulationsumgebung Anwendung. Dies bedeutet, dass der komplette Antriebsstrang vom Gaspedal bis hin zur Kraftübertragung auf die Räder nachgebildet und simuliert wird. Aufgrund der hohen Detailtiefe und des damit verbundenen Entwicklungsaufwandes kommt es zu hohen Lizenzgebühren für PELOPS.

Weitere Vertreter von bekannten Verkehrssimulationssoftwares sind AIMSUN „Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks“ [1], welcher auf Gipps-Modellen [52] beruht sowie CORSIM „Corridor Traffic Simulation Model“ [35], welche vor allem in den USA weit verbreitet sind.

### 2.3.1 Einschränkungen kommerzieller Produkte

Verkehrssimulatoren finden vor allem in Verkehrsplanungsbüros, Forschungseinrichtungen in universitären oder industriellen Bereichen Anwendung. Da es sich bei kommerziell verfügbaren Simulationssoftwares um einen zweiseitigen oligopolistischen Markt mit wenig Anbietern und wenig Nachfrager handelt, herrscht ein großer Wettbewerb über potenzielle Kunden. Aufgrund des sehr hohen Entwicklungsaufwandes und der immer fortschreitenden Weiterentwicklung und Ergänzung um neue Funktionen, haben die Produkte sehr hohe Lizenzkosten. Um ihren Wissensvorsprung vor der Konkurrenz zu schützen, betreiben alle Firmen eine strikte Closed-Source-Politik. Dadurch hat der Benutzer nur bedingten bzw. an von den Entwicklern zugelassenen Stellen Zugriff auf Algorithmen und interne Abläufe des Simulators. Der Zugriff ist meist nur über definierte externe Schnittstellen des Herstellers möglich. Der Anwender muss dementsprechend ein Vertrauen in die Richtigkeit der darin enthaltenen Modelle und Algorithmen haben und den Verkehrssimulator als eine Art Black Box akzeptieren. Als Entwickler wünscht man sich eine Open-Source-Politik, um Quelltexte an Bedürfnisse anpassen zu können.
Weitere Einschränkungen für die in dieser Arbeit untersuchten Fragestellungen sind, dass es nur sehr wenige Vertreter von submikroskopischen Simulatoren gibt. Einer der wenigen submikroskopischen Verkehrssimulatoren ist PELOPS. Da dieser Simulator vermehrt in der Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie eingesetzt wird, sind Lizenzen sehr kostspielig. Außerdem bietet PELOPS zum aktuellen Zeitpunkt nicht die Möglichkeit, beliebige eigene erstellte Fahrzeugmodelle unterschiedlichster Fahrzeugtopologien in den Simulator zu integrieren. So ist man bei PELOPS auf submikroskopische Fahrzeugmodelle mit Verbrennungsmotor beschränkt und kann nicht Fahrzeuge mit anderen Antriebsarten bzw. Betriebsstrategien hinzufügen. Somit hat man nur begrenzten Spielraum, was die Untersuchung unterschiedlicher Fahrzeugtopologien angeht. Diese Nachteile machten es notwendig, die Eigenentwicklung (Kapitel 2.5) eines submikroskopischen Verkehrssimulators anzustreben.

## 2.4 Zielsetzungen / Verbesserungsansätze einer Eigenentwicklung

Ziel von ULTraSim ist es, sehr detaillierte Fahrzeugmodelle unterschiedlichster Fahrzeugtopologien, sprich konventionelle Fahrzeuge, Elektrofahrzeuge und Parallel-Hybridfahrzeuge, in einem mikroskopischen Verkehrssimulator zu integrieren. Ein wichtiger Punkt für die Entwicklung ist dabei die leichte Erweiterbarkeit um verschiedene Fahrzeugtopologien, Betriebsstrategien und verschiedene Fahrermodelle. Des Weiteren ist eine Anforderung die Möglichkeit zu schaffen, jedes beliebige Simulationsnetz einer deutschen Großstadt in den Simulator laden zu können. Diese Kombination bietet die Möglichkeit, detailliert die Längsdynamik verschiedener Fahrzeuge in einer realistischen Verkehrsumgebung betrachten zu können. Durch die Interaktion zwischen Fahrermodell und dem hohen Detaillierungsgrad des Antriebsstranges, können verschiedenste Verkehrssituationen und Szenarien analysiert werden. Für die Untersuchung von Routingstrategien sind die Anforderungen, geeignete Schnittstellen zwischen Routingalgorithmen, Fahrermodellen

und der Verkehrsinfrastruktur zu implementieren. Um ein realistisches Verkehrsgeschehen abzubilden ist die Voraussetzung, dass mindestens 5 000-10 000 submikroskopische Fahrzeuge zeitgleich in vertretbarer Rechenzeit simuliert werden können.

Zur Umsetzung dieser Ziele wurde eine objektorientierte Struktur gewählt und die Implementierung in Java vorgenommen. Durch die Klassenstrukturen und Vererbungshierarchien soll sichergestellt werden, dass einzelne Teile / Module leicht ergänzt bzw. ersetzt werden können. Da es sich um eine Eigenentwicklung handelt, hat man Zugriff auf alle Quellcodes und Algorithmen. Um eine akzeptable Rechenzeit zu erreichen, sieht das Simulationskonzept vor, dass eine Aufteilung verschiedener Prozesse auf unterschiedliche Threads möglich ist.

Zur Auswertung und Analyse der erzeugten Daten sind Schnittstellen zu anderen Programmen, durch die ein Datenaustausch möglich ist, notwendig. Dadurch können Datenquellen in den Simulator geladen bzw. ausgelesen werden. Um auch weniger erfahrenen Benutzern eine intuitive Bedienung zu ermöglichen, ist eine grafische Benutzeroberfläche notwendig, welche das Verkehrsgeschehen und wichtige Analysen während der Simulation zur Verfügung stellt.

## 2.5 Verkehrssimulator ULTraSim

Die eigenentwickelte Simulationsumgebung ULTraSim „Ulm Traffic Simulator“ bildet den zentralen Verkehrssimulator in den alle Teilmodelle integriert wurden [109]. Für die Simulation realistischer Verbrauchsszenarien ist eine möglichst im Idealfall kontinuierliche Simulation notwendig. Da eine rein kontinuierliche Simulation sehr rechenintensiv ist, wurde eine Mischform von kontinuierlicher und diskreter Simulation gewählt. Das Fahrermodell Abschnitt 2.7.2 arbeitet hierbei quasi kontinuierlich. Dies bedeutet, sämtliche Abstände, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Fahrzeug- und Fahrermodelle werden als absolute Werte berechnet und zur weiteren Simulation verwendet. Um jedoch bei sehr großen Netzen mit vielen Fahrzeugen die Rechenzeit zu begrenzen, wurden die Strecken, welche zur Positionsbestimmung benachbarter Fahrzeuge herangezogen werden, in ein Meterschritten diskretisiert. Durch eine objektorientierte Programmierung in Java, ist eine leichte und schnelle Erweiterung bzw. Ergänzung von einzelnen Klassen möglich. Gleichzeitig kann man sich durch die objektorientierte Struktur, Funktionen der Vererbung bedienen. Die sehr modular aufgebaute Struktur bildet somit die Grundlage für ein flexibles Framework an verschiedenen Simulationsblöcken. Um eine schnelle Simulation zu ermöglichen, wurden die verschiedenen dynamischen Fahrzeugmodelle, wie konventionelle Fahrzeuge, Elektrofahrzeuge oder Hybridfahrzeuge direkt in Java implementiert. Dies ermöglicht es, zu jedem Fahrzeugobjekt des Verkehrssimulators ein submikroskopisches Fahrzeugobjekt zu generieren, aus dem sämtliche Größen wie Drehmomente, Leistungsanforderungen, Energieverbrauch, uvm. ausgelesen werden können. Diese Javamodelle wurden anhand von Simulinkmodellen verifiziert. Eine detaillierte Erläuterung der Modellbildung sowie Analyse der verschiedenen Fahrzeugmodelle findet sich in Kapitel 3. Für die Simulation eines komplexen Verkehrsgeschehens sind viele verschiedene Simulationsblöcke zu betrachten, die im Folgenden näher erläutert werden.

- Simulation der Interaktion zwischen der individuellen Fahrer-Fahrzeug-Einheit und anderen Verkehrsteilnehmern durch ein Fahrermodell
- Simulation der Verkehrsinfrastruktur, wie Lichtsignalanlagen und die Verkehrsdatenerfassung

- Simulation der Fahrzeuglängsdynamik
- Routing / Navigation der Fahrzeuge
- Erzeugung von Verkehrsnachfrageszenarien

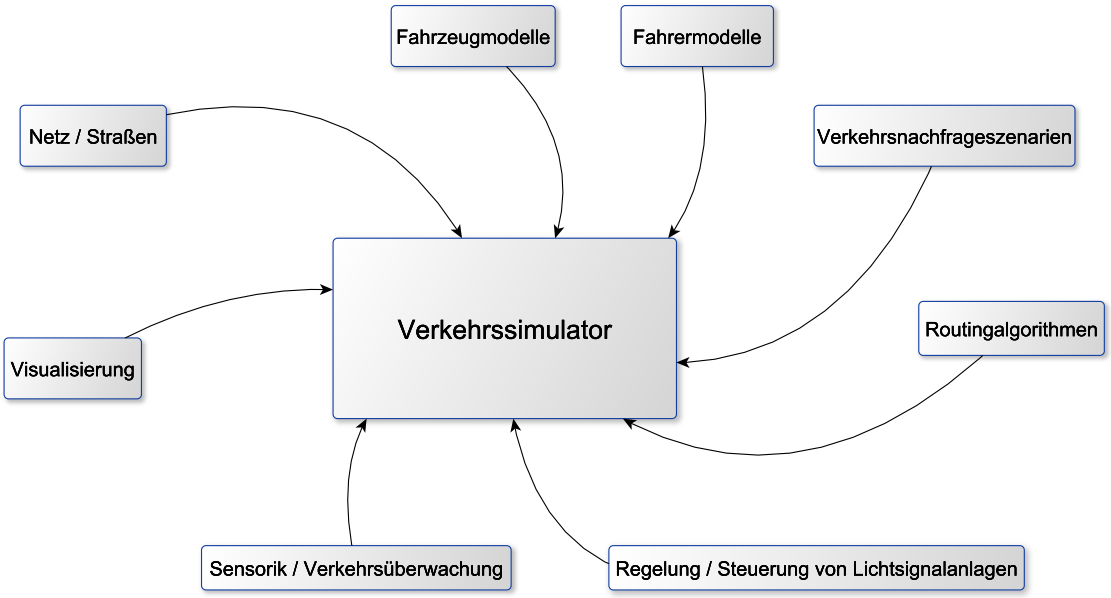



**Abbildung 2.5.1:** *Übersicht über die Komponenten eines Verkehrssimulators*

### 2.5.1 Simulationsschritte/ -ablauf

Beim Simulationsablauf bzw. beim Zeitverhalten von Verkehrssimulationen unterscheidet man grundsätzlich zwischen zwei Arten, der ereignisorientierten und der zeitschrittbasierten Simulation. Diese beiden Ansätze unterscheiden sich in der Dauer eines Zeitschrittes. Bei der ereignisorientierten Simulation werden bestimmte Ereignisse, wie Lichtsignalanlagen, Kreuzungen, ... als Zustandsübergänge zwischen verschiedenen Bewegungszuständen betrachtet. Zwischen den Ereignissen wird die Position der Fahrzeuge durch Bewegungsgleichungen extrapoliert [42]. Viel häufiger findet das Verfahren der zeitschrittbasierten Simulation Anwendung. Zu Beginn wird eine feste Diskretisierung festgelegt und zu jedem Zeitschritt werden für alle Fahrzeuge die Bewegungsgleichungen neu berechnet. Die Größe der Schrittweite hat direkten Einfluss auf die Genauigkeit und die Rechenzeit der Simulation.

Die Anzahl der Fahrzeuge, welche sich im Simulator vollkommen autonom bewegen, wird lediglich durch die Speicher- und Streckennetzgröße sowie die akzeptierte Rechendauer beschränkt. Hierbei muss die Längsdynamik durch ein wegkontinuierliches Fahrzeugfolgemodell abgebildet werden und in jedem Zeitschritt die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeugmodell sowie zu anderen Verkehrsteilnehmern sichergestellt werden. Die Querdynamik der Fahrzeuge hat Einfluss auf das Spurwechselverhalten sowie die akzeptierte Querbeschleunigung beim Durchfahren von Kurvenradien. Für jedes einzelne Fahrzeug sind für die korrekte Simulation folgende fünf Prozesse in jedem Zeitschritt zu bestimmen:

1. Auswahl / festlegen aller Spuren, die zum gewünschten Zielknoten führen
2. Optimale bzw. Wunschspur wählen
3. Spurwechsel versuchen
4. Wunschbeschleunigung in Abhängigkeit von anderen Verkehrsteilnehmern berechnen
5. Neue Position einnehmen

Erfolgt eine submikroskopische Betrachtung der Längsdynamik des Antriebsstranges jedes Fahrzeuges, so ist es notwendig, zwischen Punkt vier und Punkt fünf folgende ergänzende Simulationsschritte einzufügen:

**4a.** Übergabe der Wunschbeschleunigung an das Fahrzeugmodell

**4b.** Berechnung der Ist-Beschleunigung in Abhängigkeit von Fahrzeug- und Streckenparametern

**4c.** Rückgabe der tatsächlichen Ist-Beschleunigung an das Fahrermodell

Um sicher zu stellen, dass während eines Simulationsschrittes keine Inkonsistenzen bei der Berechnung von Fahrzeugabständen auftreten, ist es notwendig, dass diese Schritte für alle Fahrzeuge berechnet werden bevor eine Aktualisierung der Fahrzeugpositionen erfolgt. Dies ist wichtig, damit die Berechnungsreihenfolge der Fahrzeugobjekte keinen Einfluss auf das Verkehrsverhalten nimmt.

## 2.6 Streckennetzgenerierung / Implementierung

Für die Entstehung und Ermöglichung von Straßenverkehr sind infrastrukturelle Maßnahmen notwendig. Unter *Verkehrsinfrastruktur / Verkehrsnetz* versteht man die materiellen Voraussetzungen, wie Verkehrswege, Regel- und Steuerungssysteme des Straßenverkehrs (Lichtsignalanlagen (LSA), Straßenverkehrs-Ordnung...) aber auch Beschilderungen und Verkehrsleitsysteme [96].

Wie in der Realität ist es notwendig, ein reales Verkehrsnetz möglichst genau und detailgetreu einem Verkehrssimulator zur Verfügung zu stellen. Grundlage der verkehrstheoretischen Betrachtungen sind Verkehrswege und Kreuzungen, die den Verkehrsstrom aufnehmen und auf Kanten und Knoten eines gerichteten Graphen abgebildet werden Abb. 2.6.1 . Ein gerichteter im Gegensatz zu einem ungerichteten Graphen hat den Vorteil, dass je nach Fahrbahnrichtung unterschiedliche Kosten zugeordnet werden können sowie Unterscheidungen wie Einbahnstraßen möglich sind.

Da der Forschungszweck von ULTraSim ist, die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von Verkehrs- und Fahrsituationen sowie von der Routenwahl unterschiedlicher Fahrzeugtopologien zu untersuchen, sind besondere Anforderungen an das Streckennetz zu stellen. Für eine genaue Bestimmung des Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchs ist eine genaue Kenntnis über den Höhenverlauf einer Strecke notwendig. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund, da Hybrid- und Elektrofahrzeuge während des Bergabfahrens Energie rekuperieren können, wichtig.

Weitere wichtige Merkmale zur Charakterisierung von

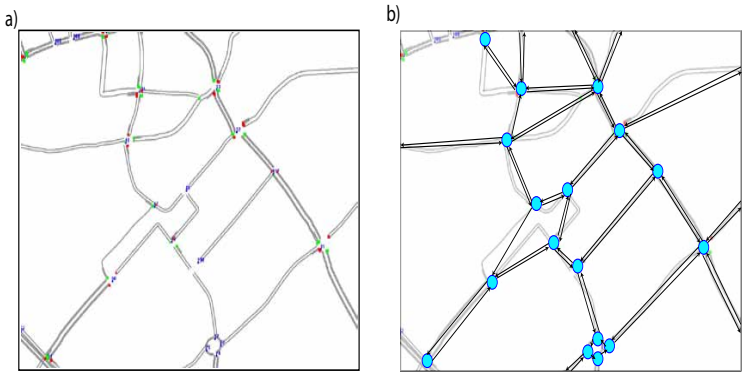



**Abbildung 2.6.1:** *(a) Straßen- und Knotennetz, (b) gerichteter Graph*

Kanten / Strecken sind:

- Steigung (Topografie)
- Krümmung, Kurvenradien
- Beschilderung, gesetzliche Höchstgeschwindigkeit
- Anzahl der Fahrspuren, Abbiegemöglichkeiten

Knoten / Kreuzungen sind:

- Ankommende / Abgehende Fahrspuren
- Lichtsignalanlagen, Schaltperioden
- Vorfahrtsregelung
- Fahrzeugquelle oder -senke

Zur Streckennetzgenerierung wurde ein Netzgenerator (siehe Anhang 10.3) entwickelt, der in der Lage ist, aus Routen, welche in Google Maps bzw. Google Earth geplant wurden, sämtliche Informationen für das jeweilige Streckensegment wie Höhen-, Kurvenverlauf, GSP-Verlauf, Geschwindigkeitsprofil, Start-, Endknoten sowie Spurenanzahlen zu generieren. Als Output erhält man einen Datensatz, der das jeweilige Streckensegment beschreibt und mithilfe des Verkehrssimulators weiterverarbeitet werden kann. Das Streckennetz enthält außerdem Informationen über Abbiegemöglichkeiten an den jeweiligen Kreuzungen und die dazugehörigen Lichtsignalanlagen.

Grundlage für die Datensatzgenerierung bilden Geodatendienste wie Google Maps, diese speichern alle Längen- und Breitengrade markanter Punkte einer geplanten Route im *KML-Format* „Keyhole Markup Language“ [148] ab. Mithilfe sphärischer trigonometrischer Funktionen ist es möglich, den relevanten Teil einer Kugeloberfläche auf eine Ebene abzubilden. Die Entfernung zwischen zwei Punkten $P_i$ und $P_{i+1}$ lässt sich hierzu näherungsweise über Gl. 2.6.1 bestimmen. Hierbei ist es zulässig einen konstanten Erdradius von 6.378 km [1] anzunehmen, da die ortsbedingte Änderung des Erdradius bei sehr kleinen Strecken zwischen zwei Punkten vernachlässig-

[1] Geodetic Reference System 1980 (GRS 80)

bar gering ist.

$$l_{i,i+1} = arccos(sin(Lat_i) \cdot sin(Lat_{i+1}) + cos(Lat_i) \cdot cos(Lat_{i+1}) \cdot cos(Lon_{i+1} - Lon_i)) \cdot r_{Erde} \quad (2.6.1)$$

Da die Geodatendienste wie Google Maps lediglich Längen- und Breitengrade bereitstellen, ist ein Abgleich der Daten zur Ermittlung des Höhenprofils mit SRTM-3-Daten notwendig. Bei SRTM-3-Daten [135] handelt es sich um Höheninformationen der Erdoberfläche, welche während der Spaceshuttlemission STS-99 mithilfe von Radarsystemen aufgezeichnet wurden. Für Europa liegen die SRTM-3-Daten hierzu in einer Auflösung von drei Bogensekunden vor, was ungefähr einer Auflösung von 90 m x 90 m entspricht. In [107] konnte durch den Vergleich mit Messfahrten gezeigt werden, dass eine gute Übereinstimmung der generierten Daten mit der Realität gegeben ist.

Für die Generierung einer realistischen Wunschgeschwindigkeitstrajektorie des Fahrermodells ist eine genaue Kenntnis über den charakteristischen Streckenverlauf notwendig. Dies wird durch den Parameter der Kurvenkrümmung $k$ widergespiegelt und ist umgekehrt proportional zum Kurvenradius $r$ Gl. 2.6.2.

$$k \left[\frac{1}{\mathrm{m}}\right] = \frac{1}{r} \quad (2.6.2)$$

Anhand der akzeptieren komfortablen Querbeschleuniung $a_{quer,\,komf}$ des Fahrers ist es somit möglich, nach Gl. 2.6.3 eine komfortable Kurvengeschwindigkeit $v_{Kurve,\,komf}$ zu berechnen. Die komfortable Querbeschleunigung variiert hier je nach Fahrertyp zwischen 2 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ und 5 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ [57].

$$v_{Kurve,\,komf} = \sqrt{\frac{a_{quer}}{k}} \quad (2.6.3)$$

Da sich Straßen oft aus mehreren Geradeaus- sowie Links- und Rechtsabbiegespuren zusammensetzen, ist es notwendig, aus dem bisher beschriebenen GPS-Datensatz jeweils Datensätze für jede Spur zu erzeugen. Dies geschieht durch einen Algorithmus, der ausgehend von der Ausgangsstrecke in Fahrtrichtung das Lot rechts bzw. links fällt und in einem definierten Abstand Datensätze für zusätzliche Spuren erzeugt Abb. 2.6.2 (a-b). Untersuchungen in [129] ergaben, dass spurabhängige Krümmungsunterschiede vernachlässigbar gering ausfallen, so dass eine Anpassung der Kurvenkrümmung für ergänzende Spuren nicht notwendig ist.

### 2.6.1 Implementierung von ULTraSim

Die Implementierung der Strecken ist vor allem aus Sicht der Rechenzeit ein entscheidender Faktor. Für die Hindernissuche bei der Berechnung der neuen Fahrzeuggeschwindigkeit und bei Spurwechseln muss das Fahrermodell über alle benachbarten Fahrzeuge informiert sein. Dies kann auf verschiedene Weise geschehen wie z. B. durch Listen oder Vektoren von Fahrzeugen [80], die ständig durchsucht werden, was vor allem bei einer hohen Anzahl von Fahrzeugen sehr rechenintensiv ist. Eine weitere Möglichkeit ist es, dass für jede Strecke eine Liste mit ein- und ausfahrenden Fahrzeugen geführt wird, dies ist jedoch bei häufigen Spurwechseln problematisch, da

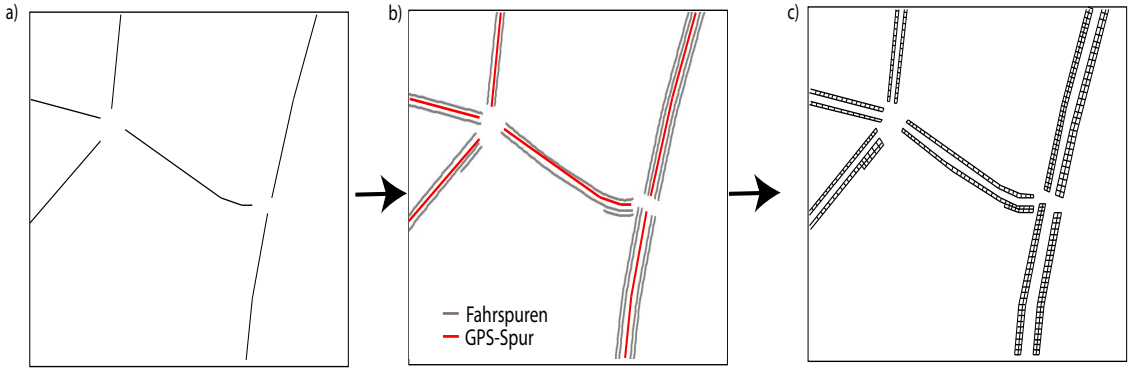



**Abbildung 2.6.2:** *(a) GPS-Streckenverlauf, (b) generierte Streckenspuren, (c) Streckenpositionsarray*

die Liste ständig aktualisiert und neu sortiert werden muss. Aus diesem Grund wurde in ULTraSim eine Implementierung gewählt, bei der jedes Fahrzeug auf die einzelnen Spuren des Streckennetzes zugreift und diese je nach Position relativ zur Strecke für eine kurze Zeit belegt. Hierzu wurde jede Spur in ein Meterschritten diskretisiert und durch mehrdimensionale Array implementiert Abb. 2.6.2 (c). Je nach Fahrzeugposition schreibt sich das Fahrzeug in das jeweilige Array mit seiner individuellen Fahrzeugnummer ein. Dadurch kann vor allem bei der Hindernissuche die Rechenzeit deutlich verkürzt werden, da das Fahrzeug lediglich in Abhängigkeit seiner eigenen Geschwindigkeit das Belegungsarray abtasten muss und bei Rückmeldung einer Fahrzeugnummer sofort die Fahrzeugnummer seines unmittelbaren Nachbarn erhält. Dies ist vor allem bei hohen Verkehrsbelastungen von Vorteil, da hierbei bedingt durch kleine Fahrzeugabstände wenig Arraypositionen abgetastet werden müssen. ULTraSim arbeitet somit bei der Hindernissuche als Zellulärautomat, wobei alle anderen Simulationsgrößen wegkontinuierlich geführt werden. Dieses Vorgehen vereint die Vorzüge des Nagel-Schreckenberg-Modells (NSM), das auf dem Prinzip der Zellulärautomaten beruht, umgeht aber den Nachteil, dass beim NSM lediglich diskretisierte Verkehrskenngrößen wie Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, ... vorliegen.

Abbildung 2.6.3 zeigt die Topografie des untersuchten Verkehrsnetzes. Insgesamt wird ein Gebiet von 120 Quadratkilometern abgedeckt und beschreibt das Stadtgebiet sowie die umliegenden Stadtteile von Ulm und Neu-Ulm. Für die Untersuchungen wurden wichtige Verkehrswege der beiden Städte sowie Kreuzungen mithilfe des Netzgenerators in für ULTraSim kompatible Datensätze umgewandelt. Tabelle 2.6.1 zeigt die wichtigsten Eckdaten des Netzes auf.

**Tabelle 2.6.1:** *Eckdaten des Verkehrsnetzes (Ulm, Neu-Ulm)*

| | |
|---|---|
| Streckenkilometer | 385 km |
| Kreuzungen | 126 |
| Strecken | 387 |
| Spuren | 695 |
| Geregelte LSA | 39 |
| Kreisverkehre | 3 |

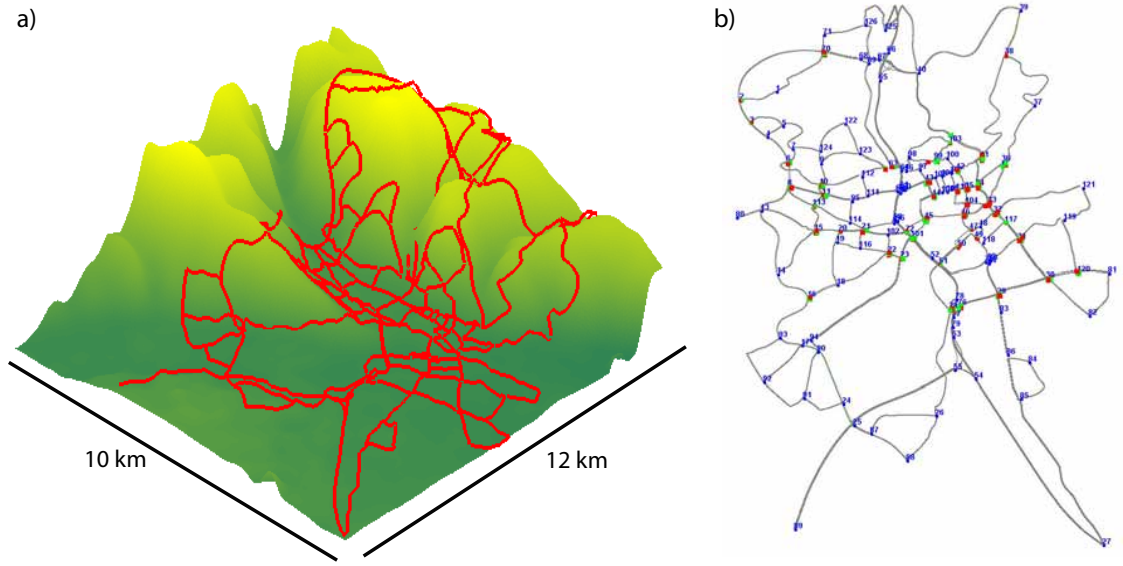



**Abbildung 2.6.3:** *(a) Dreidimensionale Darstellung des Streckennetzes, (b) zweidimensionale Darstellung*

## 2.7 Fahrermodell

Die Aufgabe eines Fahrermodells ist die autonome Führung eines Fahrzeuges im Verkehrsnetz. Ziel ist es hierbei, das menschliche Fahrverhalten und die Tatsache, dass jeder Mensch auf Verkehrssituationen geringfügig anders reagiert abzubilden. Das Fahrverhalten eines Fahrzeuges wird durch Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Folgeprozesse sowie Überholmanöver und Fahrbahnwechsel bestimmt. Hierzu ist es notwenig, dass der Fahrer eine Vielzahl von Kenngrößen, wie den Abstand und die Geschwindigkeit vorausfahrender und benachbarter Fahrzeuge beachtet und seine eigene Geschwindigkeit und Verzögerungswege richtig einschätzt. Auf Basis dieser Kenngrößen kann somit eine Wunschgeschwindigkeit durch den Fahrer definiert werden. Erste Modelle sogenannte „Fahrzeugfolgemodelle“ gehen auf das Jahr 1950 und 1953 mit Arbeiten von Reuschel [106] und Pipes [100] sowie Erweiterungen [31] zurück. Diese beruhen auf der Überlegung, dass ein Fahrer seine Geschwindigkeit aufgrund des Abstandes sowie der Geschwindigkeitsdifferenz zum Vordermann wählt. Ein weiterer Vertreter ist das „Gipps-Modell“ [52]. Bando et. al. entwickelte das „Optimal-Velocity-Modell“, das unterstellt, dass ein Fahrer seine eigene Geschwindigkeit so wählt, um möglichst schnell seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen [16], [17].

Für die Simulation eines möglichst realistischen Verkehrsaufkommens wurde jedes Fahrzeug mit einer eigenen „Intelligenz“ ausgestattet. Grundlage hierzu bildet das IDM „Intelligent-Driver-Model“ sowie dessen Erweiterungen das IIDM „Improved-Intelligent-Driver-Model“ [133]. Für weitere Analysen wurde außerdem das psychophysische Fahrermodell nach Wiedemann [147] implementiert. Dieses Fahrermodell ermöglicht durch einen zuvor festgelegten Parametersatz, eigenständig die Längsdynamikbewegung eines Fahrzeuges unter Beachtung anderer Verkehrsteilnehmer zu berechnen.

Das autonome Fahrermodell wurde zum anderen, um das MOBIL „Minimizing Overall Braking deceleration Induced by Lane change“ [132] erweitert, welches verantwortlich für die Spurwech-

selvorgänge ist. Eingebettet wurden diese beiden Modelle in eine Logik, die eigenständig aufgrund von Informationen, wie optimale Zielspur, Abstand zur Kreuzung, Lichtsignalanlagen, Beschleunigungen anderer Verkehrsteilnehmer sowie die Wunschroute, eine Entscheidung über die nächste Fahraktion trifft. Im Folgenden werden die Fahrermodelle im Detail dargestellt sowie deren notwendige Erweiterungen und Anpassungen, damit sie für den Stadtverkehr angewendet werden können.

### 2.7.1 Psycho-physikalisches Modell nach Wiedemann

Beim psycho-physikalischen Fahrermodell nach Wiedemann [147] werden unterschiedliche Fahrzustände durch unterschiedliche Beschleunigungsfunktionen beschrieben. In Abb. 2.7.3 (a) (siehe Seite 22) sind die Bereiche als Funktion der Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v$ zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie des Abstandes dargestellt. Werden diese definierten Schwellwerte der diskreten Fahrzustände überschritten, so treten verschiedene Beschleunigungs- und Verzögerungsfunktionen in Kraft. Wiedemann unterscheidet hierbei zwischen den Fahrzuständen „Freie Fahrt“, „Kollisionsbereich (BremsenAX)“, „Bremsbereich (BremsenBX)“, „Folgebereich“ und dem „Annäherungsbereich“. Die Schwellwerte des Fahrermodells sowie die maximale Beschleunigung und Verzögerung wurden von Wiedemann als geschwindigkeitsabhängige Normalverteilung beschrieben. Durch die unterschiedlichen Fahrzustände ist das Modell in der Lage, stochastische Oszillationen der Geschwindigkeits- und Abstandsanpassung an das vorausfahrende Fahrzeug abzubilden. Der komplette Quellcode liegt in Algo [147] vor und konnte deshalb relativ schnell in Java implementiert werden. Das Fahrermodell nach Wiedemann sowie seine Weiterentwicklungen können aufgrund ihrer hohen Komplexität als sehr realitätsnah eingestuft werden. Anwendung findet es z. B. in den Simulationssoftwares VISSIM und PELOPS.

### 2.7.2 Intelligent-Driver-Model (IDM)

Das „Intelligent-Driver-Model“ [133] wird durch die Beschleunigungsfunktion Gl. 2.7.1 beschrieben. Dieses setzt sich aus zwei Teilen zusammen, dem Beschleunigungsanteil sowie einem Verzögerungsanteil. Der Beschleunigungsanteil setzt sich aus der Wunschgeschwindigkeit $v_0$, der aktuellen Geschwindigkeit $v_i$ sowie der maximalen Beschleunigung $a_{max}$ zusammen. Der Beschleunigungskoeffizient $\delta$ gewährleistet, dass je größer $\delta$ ist, desto später wird die Beschleunigung bei Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit reduziert. Der Verzögerungsanteil beschreibt die Wechselwirkung mit anderen Verkehrsteilnehmern. Dieser Anteil gleicht den aktuellen Abstand $s$ mit dem effektiven Wunschabstand $s^*$ ab.

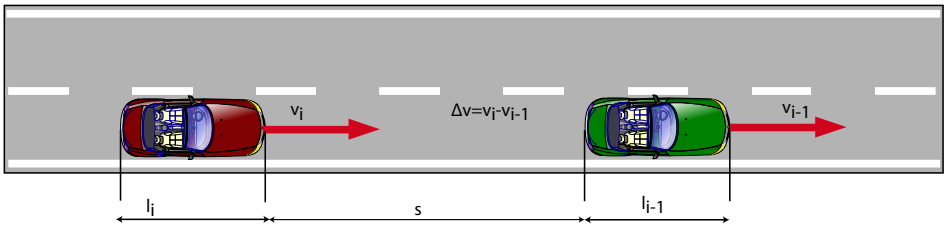



**Abbildung 2.7.1:** *Schematische Darstellung wichtiger Indizes des IDM*

$$\dot{v} = a_{max} \left[ \underbrace{1 - \left(\frac{v_i}{v_0}\right)^{\delta}}_{Beschleunigungsanteil} \quad \underbrace{- \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s}\right)^2}_{Verzögerungsanteil} \right] \tag{2.7.1}$$

Der effektive Wunschabstand $s^*$ nach Gl. 2.7.2 setzt sich aus drei Anteilen zusammen. Dem Mindestabstand $s_0$, ein geschwindigkeitsabhängiger Sicherheitsabstand $v \cdot T$ und einem dynamischen „intelligenten Anteil“, welcher aufgrund der Annäherungsrate das Bremsverhalten über den Parameter der komfortablen Wunschverzögerung $b$ beschreibt. Wobei $\Delta v$ die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem betrachteten Fahrzeug $i$ und dem vorausfahrenden Fahrzeug $i-1$ ist.

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{a_{max} b}} \tag{2.7.2}$$

Insgesamt wird das IDM durch fünf frei wählbare Parameter beschrieben. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Fahrertypen zu charakterisieren bzw. das Fahrverhalten von verschiedenen Fahrzeugtypen abzubilden. Tabelle 2.7.1 zeigt eine Übersicht der freien Parameter sowie ihre Normalverteilung. Eine Normalverteilung der Parameter wurde gewählt, da sich nach [15] das Fahrverhalten vieler Verkehrsteilnehmer näherungsweise als eine Normalverteilung beschreiben lässt. So wird z. B. ein aggressiver Fahrer durch eine hohe Wunschbeschleunigung und einer geringen Folgezeit charakterisiert. Ein vorausschauender Fahrer hingegen durch eine geringe maximale Verzögerung. Durch die Wahl einer hohen Zeitlücke und einer geringeren Wunschgeschwindigkeit ist es möglich, einen rücksichtsvollen Fahrer zu modellieren.

**Tabelle 2.7.1:** *Normalverteilter Parameterbereich der charakteristischen Fahrzeugparameter*

| Parameterbezeichnung | Parameterverteilung |
|---|---|
| maximale Beschleunigung $a_{max}$ | $\mu = 1\ m/s^2, \sigma = 0,2\ m/s^2$ |
| komfortable Verzögerung $b$ | $\mu = -2\ m/s^2, \sigma = 0,3\ m/s^2$ |
| Folgezeit $T$ | $\mu = 1\ s, \sigma = 0,2\ s$ |
| Mindestabstand $s_0$ | $\mu = 3\ m, \sigma = 1\ m$ |
| Fahrzeuglänge $l$ | $\mu = 4\ m, \sigma = 2\ m$ |

Die Beschleunigungsfunktion wie sie in Gl. 2.7.1 dargestellt ist, entspricht eher den Eigenschaften eines adaptiven Beschleunigungsreglers. In [133] wurde das IDM jedoch um menschliche Aspekte wie Schätzfehler und Reaktionszeit erweitert. Außerdem konnte in [133] durch Autobahn- sowie Stadtszenarien nachgewiesen werden, dass die dynamischen Eigenschaften des IDMs die Realität widerspiegeln. Durch den Vergleich mit realen Daten konnte eine gute Übereinstimmung im Fundamentaldiagramm (Abschnitt 2.12) sowie im Geschwindigkeits-Dichte-Diagramm nachgewiesen werden. Durch die Weiterentwicklung zum IIDM „Improved-Intelligent-Driver-Model“ ist außerdem sichergestellt, dass sich im Stadtverkehr bei Kolonnenfahrten alle Fahrzeuge, in der Nähe des Gleichgewichtsabstandes ($s = s^*$) und einer Geschwindigkeit nahe der Wunschgeschwindigkeit mit der Wunschgeschwindigkeit, bewegen. Im Rahmen der Implementierung des IIDMs in ULTraSim traten hohe Abweichungen hinsichtlich des Beschleunigungsverhaltens der Fahrzeuge an Lichtsignalanlagen auf. Nach [46] liegt der Zeitbedarfswert $t_B$, die Zeit, die rückgestaute Fahrzeuge benötigen, um an einer Lichtsignalanlage abzufließen, zwischen 1,8 und 2,0 s/Fzg. Je höher dieser Zeitbedarfswert ist, desto weniger Fahrzeuge können bei einer gegebenen Freigabezeit die Lichtsignalanlage überqueren, wodurch sich schneller Verkehrsinstabilitäten in Form

von Verkehrsstaus bilden. Ursache hierfür ist im IDM die maximale Wunschbeschleunigung $a_{max}$, welche geschwindigkeitunabhängig konstant ist. Abbildung 2.7.2 (a) zeigt das Anfahrverhalten einer Kolonne von zehn Fahrzeugen an einer Ampel ohne Anpassung des Beschleunigungswertes. Wie zu erkennen ist, liegt der Zeitbedarfswert bei 3,8 s/Fzg. In (b) erfolgte eine Verdopplung der maximalen Wunschbeschleunigung bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h vor LSA, was ein zügigeres Anfahren der Fahrzeuge bedingt. Wie zu erkennen ist, liegt der Zeitbedarfswert nun bei 2,5 s/Fzg, was der Realität deutlich näher kommt. Dies hat jedoch zur Auswirkung, dass die stetige Differenzierbarkeit der Beschleunigungsfunktion in diesen Bereichen verloren geht, was sich jedoch hier nicht negativ auf die Simulation auswirkt.

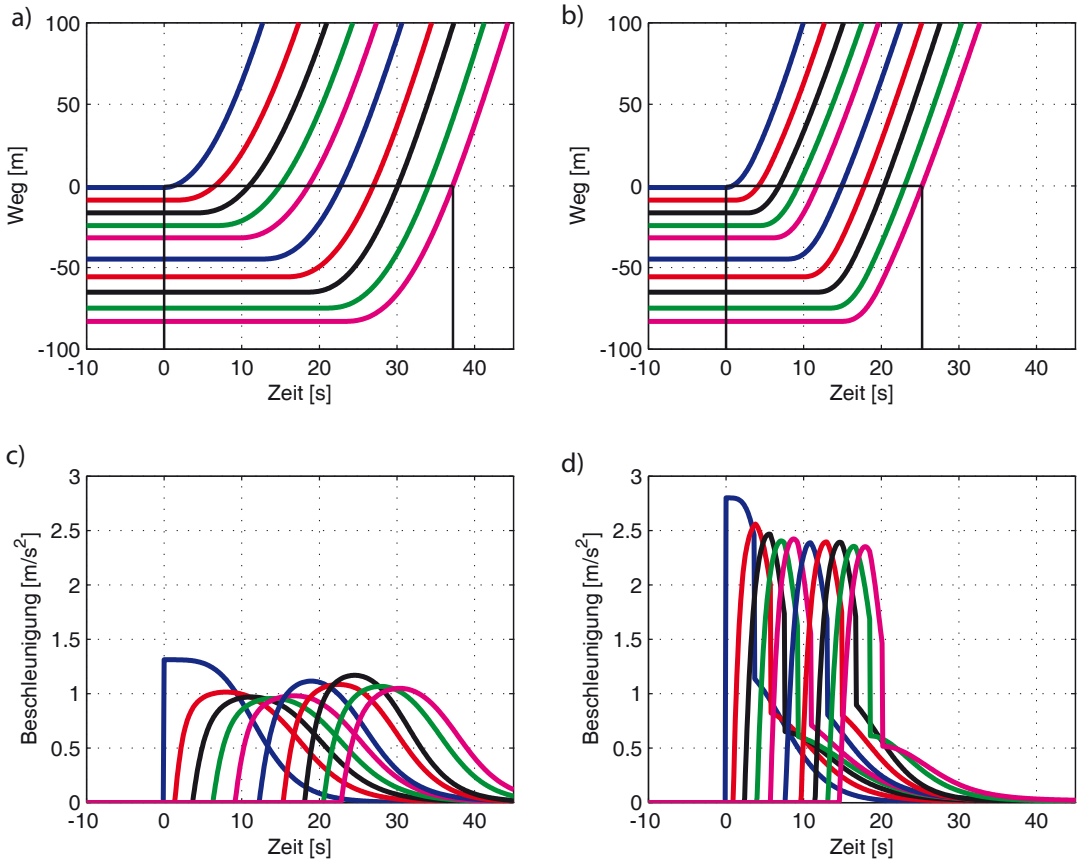



**Abbildung 2.7.2:** *Vergleich Anfahrverhalten IDM, Zeitbedarfswert an einer LSA, Standard IDM, IIDM ((a) Abstand zur Ampel, (c) Fahrzeugbeschleunigung), Modifiziertes IDM im Ampelbereich ((b) Abstand zur Ampel, (d) Fahrzeugbeschleunigung)*

Abbildung 2.7.3 zeigt eine typische Annäherungstrajektorie an ein vorausfahrendes Fahrzeug, welches an einer auf rot geschalteten Lichtsignalanlage zum stehen kommt. Im Vergleich hierbei das Wiedemannfahrermodell (a) sowie das IDM (b). Abbildung 2.7.4 zeigt die entsprechenden Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsverläufe während dieses Annäherungsvorgangs sowie den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Wie zu erkennen ist, kann eine kontinuierliche Beschleunigungsfunktion beim IDM-Fahrermodell (b) beobachtet werden. Das Wiedemannfahrermodell hingegen reagiert mit vielen einzelnen Beschleunigungs- bzw. Verzögerungspeaks. Gut zu erkennen ist außerdem, wie beide Fahrermodelle der Reduzierung maximaler Wunschgeschwindigkeit, bedingt durch eine Kurvenfolge (200-450 m), folgen.

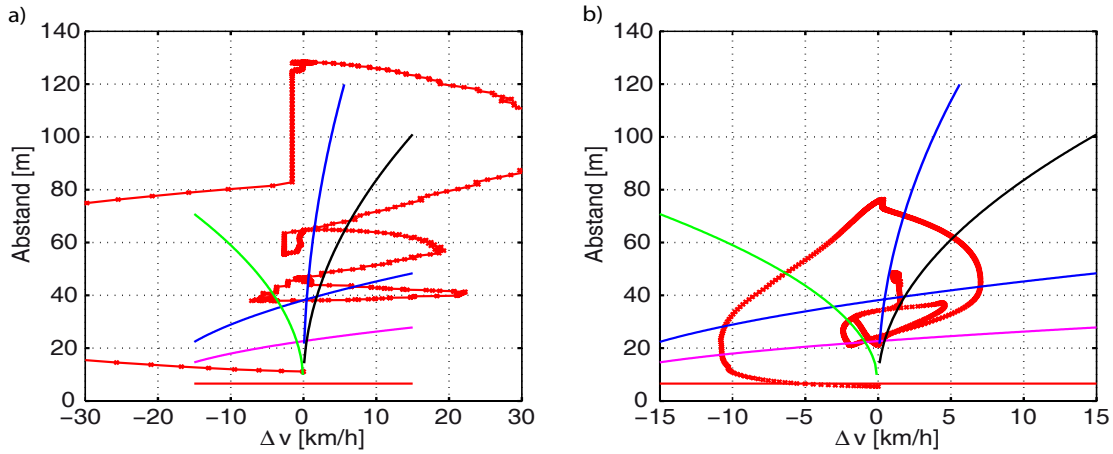



**Abbildung 2.7.3:** *Vergleich einer Annäherungstrajektorie eines Fahrzeuges an ein vorausfahrendes Fahrzeug, (a) Fahrermodell nach Wiedemann, (b) IDM*

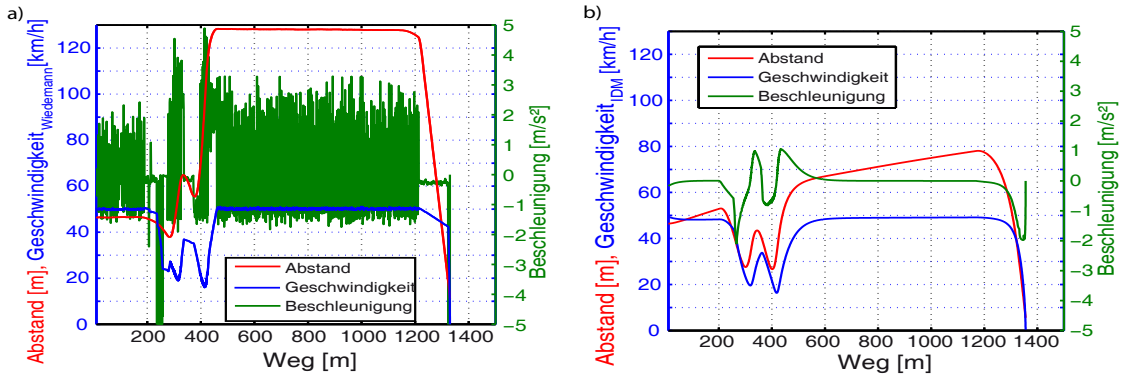



**Abbildung 2.7.4:** *(a) Vergleich der Geschwindigkeit, Beschleunigung und des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug beim Fahrermodell nach Wiedemann, (b) IDM (b)*

### 2.7.3 Generierung der Wunschgeschwindigkeitstrajektorie

Die Wahl der Wunschgeschwindigkeit hängt von vielen Einflussfaktoren ab:

- Gesetzlich vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeit $v_{\S}$
- Komfortablen Kurvengeschwindigkeit, die sich nach Gl. 2.6.3 aus der maximalen Querbeschleunigung und der Kurvenkrümmung des Streckenverlaufs berechnet $v_k$
- Verkehrsbedingten Höchstgeschwindigkeit $v_v$
- Höchstgeschwindigkeit bedingt durch Umwelteinflüsse $v_u$

Die maximal zulässige Wunschgeschwindigkeit ergibt sich nach Gl. 2.7.3 aus dem Minimum der Höchstgeschwindigkeiten. Da in ULTraSim die Umwelt, wie Wetter und Lichtverhältnisse keine Berücksichtigung finden, fließt die umweltbedingte Höchstgeschwindigkeit nicht in die Berech-

nung mit ein.

$$v_{wunsch} = min\{v_{§}, v_k, v_v, v_u\} \tag{2.7.3}$$

Da das IDM in erster Linie für Fahrzeugfolgemodelle auf Autobahnen entwickelt wurde, wurde dieses um einen zweistufigen Algorithmus erweitert, der eine Wunschgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der komfortablen Querbeschleunigung sowie der Kurvenkrümmung vorausschauend berechnet. Dies ist notwendig, um zu verhindern, dass unnötige Beschleunigungsvorgänge zwischen engen Kurven stattfinden und die Wunschgeschwindigkeit langsam an die minimale Kurvengeschwindigkeit angepasst wird.

Hierzu wird der Krümmungsverlauf ausgehend von der aktuellen Position abgetastet und die maximale Krümmung $k_{max}$ ermittelt. Ausgehend von der eigenen Position bis zum aufgetretenen Krümmungsmaximum wird daraufhin die mittlere Kurvenkrümmung bestimmt. Dies führt dazu, dass am Kurvenscheitel die maximale Wunschgeschwindigkeit genau an die maximale Kurvengeschwindigkeit angepasst ist.

In Abb. 2.7.5 (a) ist die Wunschgeschwindigkeit für zwei Kurvenfahrten mit verschieden langen Abtastzeitlücken aufgetragen. Ohne den Anpassungsalgorithmus (blau) wird die maximale Querbeschleunigung des Fahrzeuges überschritten, da die Kurve zu spät detektiert wird und das Fahrermodell wie in der Realität, bedingt durch die Trägheit und Reaktionszeit, die maximale Kurvengeschwindigkeit überschreitet. Die Abtastzeitlücke sollte so groß gewählt werden, dass die Kurve früh genug erkannt wird, dennoch sollte sie klein genug sein, um keine negativen Einflüsse auf die Fahrdynamik zu erhalten. Wie in der Beschleunigung (b) zu sehen ist, wird mit einer Zeitlücke von zwei Sekunden, die maximale Kurvengeschwindigkeit eingehalten, jedoch nur auf Kosten einer sehr hohen Verzögerung. Gleichzeitig findet zwischen den Kurven ein deutlicher Beschleunigungsvorgang statt. Dies geschieht, da aufgrund der geringen Vorschau die zweite Kurve zu spät erkannt wird. Das optimale Ergebnis ist durch eine Abtastzeitlücke zwischen 5 und 10 Sekunden zu erreichen, was im Stadtverkehr ungefähr einer Vorschau von 50 bis 150 Metern entspricht. Höhere Werte bringen keine weitere Verbesserung, im Gegenteil, zu hohe Werte führen dazu, dass viel zu früh vor Kurven abgebremst wird. Durch die Berücksichtigung der zukünftigen Streckeninformation reagiert das IDM vorausschauender und unnötige Beschleunigungsvorgänge, z. B. zwischen zwei engen Kurven, werden unterbunden (blau, rot, 1 040 s). Dies hat auch Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch. In diesem Fall ist mit einer Vorschau von 5 Sekunden eine Kraftstoffeinsparung von 3,8 % im Vergleich zu keiner Vorschau erreichbar.

### 2.7.4 Spurwechselmodell

Von entscheidender Bedeutung für den Verkehrsfluss sowie für die Routenwahl sind Spurwechsel, welche die laterale Bewegung von Fahrzeugen beschreiben. Definitionsgemäß ist ein Spurwechsel nur dann möglich, wenn mehr als eine Spur zur Verfügung steht. Abhängig vom Fahrerwunsch sowie vom Zustand des Verkehrsnetzes kann es bei Situationen, wie dem Überholen langsamer Fahrzeuge, bei Ein- und Ausfahren oder aufgrund von taktischen Gründen, zur Verfolgung der gewünschten Zielroute zu Fahrstreifenwechsel kommen. Da die Fahrzeugmodelle (vgl. Kap. 3) lediglich für die submikroskopische Simulation der Längsdynamik erstellt wurden, wurde das Spurwechselverhalten als diskreter Zustand implementiert. Beim Fahrstreifenwechsel

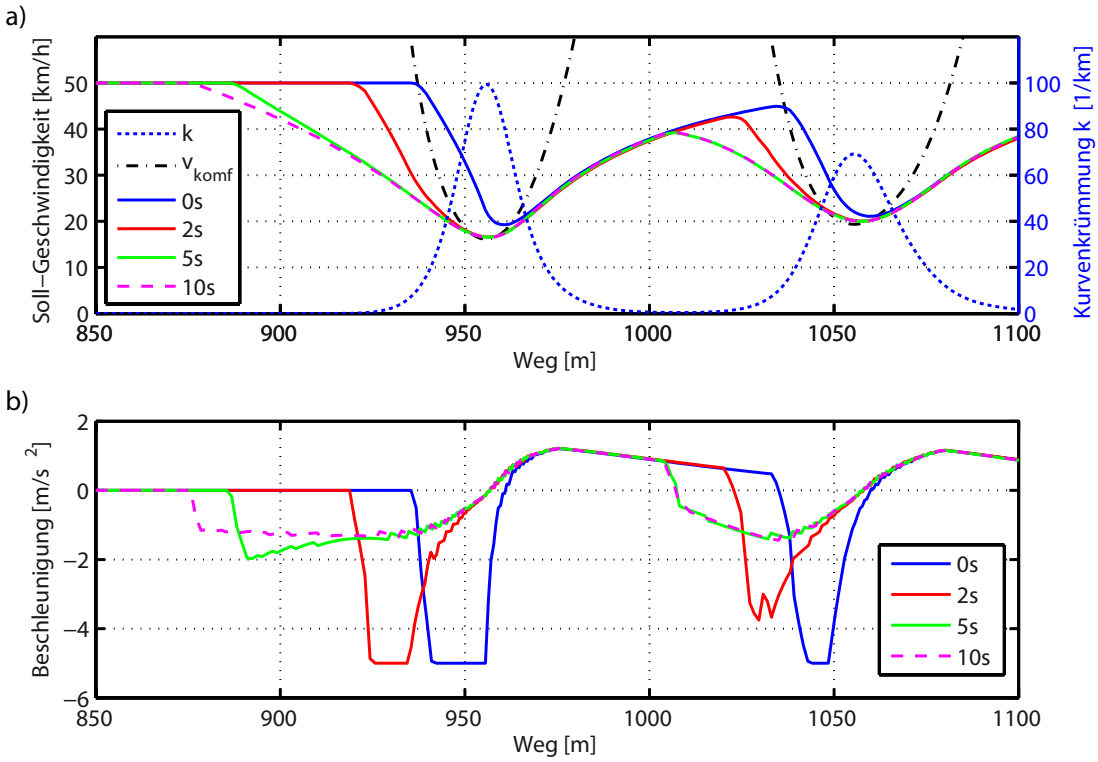



**Abbildung 2.7.5:** *Auswirkungen der vorausschauenden Krümmungsberechnung mit unterschiedlichen Abtastzeitlücken, (a) Geschwindigkeitsverlauf, (b) Beschleunigung*

handelt es sich um einen sehr komplexen Vorgang, der durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst wird.

Bekannte Spurwechselmodelle wurden von Sparmann für zweispurige Straßenabschnitte [123] sowie in Weiterentwicklungen für dreispurige Straßen [84] entwickelt. Diese beruhen auf diskreten Entscheidungsmodellen, welche aufgrund von Abständen und Vergleichsgeschwindigkeiten über den Spurwechsel entscheiden. In [42] wurden sogenannte absichtsbasierte Verhaltensmodelle für den Spurwechsel entwickelt.

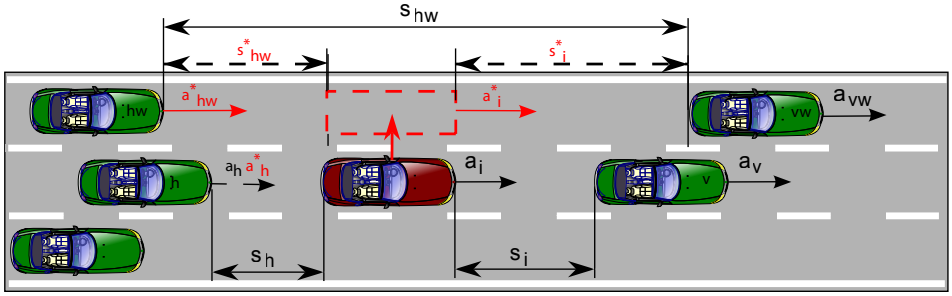



**Abbildung 2.7.6:** *Spurwechsel mit MOBIL, mit Stern ∗ (rot) gekennzeichnete Größen entsprechen Größen nach dem Spurwechsel*

Abbildung 2.7.6 zeigt schematisch die Situation beim Spurwechsel. Größen, die mit Stern ∗ gekennzeichnet sind, beschreiben hypothetische Werte nach dem Spurwechsel. Grundbedingung ist

das sogenannte Sicherheitskriterium für einen Spurwechsel nach Gl. 2.7.4, welches besagt, dass keines der durch den Spurwechsel beeinflussten Fahrzeuge zu einer kritischen Verzögerung $b_{krit}$ genötigt werden muss.

$$a^{\star} \geq -b_{krit} \tag{2.7.4}$$

Für einen egoistischen Fahrer ist die Grundlage für den Spurwechsel, die eigene Beschleunigung zu vergrößern Gl. 2.7.5. Durch die Wechselschwelle $a_s$ kann verhindert werden, dass aufgrund von geringfügigen Verbesserungen ein Spurwechsel erfolgt.

$$a^{\star} - a > a_s \tag{2.7.5}$$

Das MOBIL nach [133] ist durch die Nutzenfunktion Gl. 2.7.6 definiert. Durch den Freundlichkeitsfaktor $f$ kann die Rücksichtnahme auf andere Verkehrsteilnehmer dargestellt werden. Ein Spurwechsel erfolgt somit nur dann, wenn das Sicherheitskriterium erfüllt ist und die Behinderung aller beteiligten Fahrzeuge durch den eigenen Spurwechsel geringer als der Nutzen des Fahrstreifenwechsels ist.

$$\underbrace{a_i^{\star} - a_i}_{\textit{eigene Beschleunigung}} + \underbrace{f(a_{hw}^{\star} - a_{hw} + a_h^{\star} - a_h)}_{\textit{Beschleunigungen der anderenFahrzeuge}} \geq a_s \tag{2.7.6}$$

Für einen Freundlichkeitsfaktor von $f = 0$ fällt die Betrachtung anderer Verkehrsteilnehmer weg und das Spurwechselmodell agiert egoistisch. Für $f = 1$ wird der Nutzen der anderen Verkehrsteilnehmer genauso gewichtet wie der eigene Nutzen. Nach [133] liegen sinnvolle Werte im Bereich um $f = 0,2$.

Gerade im Stadtverkehr kommt es oft zu Situationen, bei denen auf einem kurzen Streckenabschnitt schnell ein Spurwechsel aufgrund von navigatorischen Gründen erfolgen muss. Hierbei kann sich ein zu hoher Freundlichkeitsfaktor negativ auf die Verkehrssituation auswirken, da aufgrund der Beachtung des Beschleunigungsvorteils aller unmittelbar beteiligten Verkehrsteilnehmer auf eine zu große Lücke für den Spurwechsel gewartet wird. Dies kann im schlechtesten Fall dazu führen, dass sich ein Fahrzeug im Kreuzungsbereich auf der falschen Zielspur befindet und eine Spur aufgrund eines Wechselwunsches blockiert. Abhilfe hierfür ist eine Erweiterung bei der der Freundlichkeitsfaktor bei einem anstehenden Wechselwunsch im Kreuzungsbereich linear hin zu einem egoistischen Fahrer abgesenkt wird, um die „Aggressivität“ für einen Spurwechsel zu erhöhen. Bei zwei oder mehreren Spuren kann dies jedoch auch dazu führen, dass sich Fahrzeuge durch einen gleichzeitig auftretenden Wechselwunsch gegenseitig blockieren. Dies wird verhindert, in dem der Freundlichkeitsfaktor auf der linken Spur stärker verringert wird. Dadurch wird auch das in Deutschland vorgeschriebene Rechtsüberholverbot abgebildet. Abbildung 2.7.7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Freundlichkeitsfaktor sowie der Wunschgeschwindigkeit beim Annähern an einen Kreuzungsbereich unter der Randbedingung, dass ein Spurwechselwunsch vorliegt.

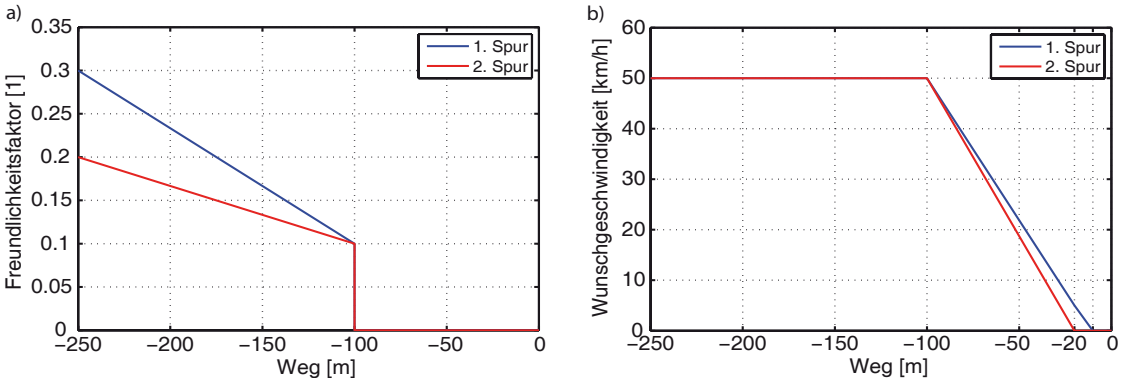



**Abbildung 2.7.7:** *Anpassung des Freundlichkeitsfaktors f (a) sowie der Wunschgeschwindigkeit (b) im Kreuzungsbereich bei einem Spurwechselwunsch*

## 2.8 Knotentypen / Ampelsteuerungen

ULTraSim unterscheidet zwischen fünf verschiedenen Knoten- / Kreuzungstypen Abb. 2.8.1 .

- Kreisverkehre
- Kreuzungen mit festzeitgeregelten Lichtsignalanlagen (LSA)
- Kreuzungen mit geregelten Lichtsignalanlagen
- Kreuzungen mit Kontaktschleifen
- Kreuzungen / Einmündungen mit Rechts vor Links

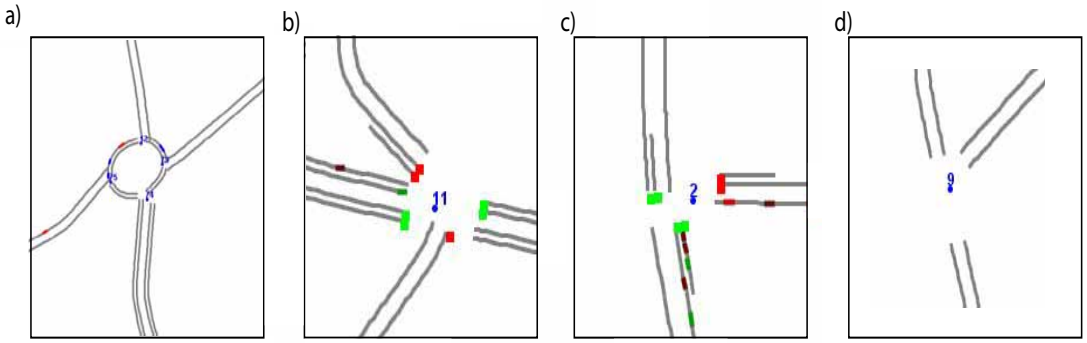



**Abbildung 2.8.1:** *Übersicht über die verschiedenen Knoten- / Kreuzungstypen in ULTraSim, Kreisverkehr (a), geregelte, festzeitgesteuerte LSA (b), Kontaktschleifen (c), Einmündungen (d)*

Neben einfachen Kreuzungen auf denen die Rechts-vor-Links-Regelung gilt, gibt es Lichtsignalanlagen mit Kontaktschleifen. Hierbei ist die Hauptstraße, auf welcher der größte zu erwartende Verkehrsfluss vorliegt, auf grün geschaltet. Nebenstraßen werden auf grün geschaltet, wenn dort Fahrzeuganfragen vorliegen. Der wichtigere Typ sind Kreuzungen mit geregelten bzw. festzeitgesteuerten LSA. Jede LSA agiert hierbei als eigenständiges Objekt, mit individuellen Schaltzeiten und Schaltzyklen. Da die Umlaufzeiten sowie Schaltzyklen von festzeitgesteuerten LSA immer

nur für einen definierten Verkehrsfluss optimal ausgelegt werden können, sind bei großen Verkehrsflussschwankungen keine optimalen Schaltzeiten gewährleistet, damit der Verkehr so gering wie möglich beeinflusst wird. Die Umlaufzeit definiert hierbei die Zeit, die für eine komplette Abfolge aller Ampelphasen sowie Phasenübergänge notwendig ist [67]. Bei der Regelung und Steuerung von Lichtsignalanlagen wird im städtischen Verkehr in erster Linie zwischen punktgesteuerten und liniengesteuerten Lichtsignalanlagen unterschieden [67]. Aktuell handelt es sich bei der großen Mehrheit um punktgesteuerte Lichtsignalanlagen mit einer umlaufbasierten Steuerung. Dies bedeutet, dass sich die Schaltzustände der LSA in periodischen Abständen wiederholt. Mithilfe verschiedener Umlaufzeiten und Schaltprogrammen, welche sich dem Verkehrsgeschehen anpassen, kann erreicht werden, dass sich das Schaltprogramm dem Verkehrsaufkommen anpasst. Bei der sogenannten Liniensteuerung (grüne Welle) werden die Steuerprogramme benachbarter LSA-Anlagen aufeinander abgestimmt, so dass der Verkehrsfluss möglichst wenig beeinflusst wird.

### 2.8.1 Festzeitgesteuerte Lichtsignalanlagen

Festzeitgesteuerte Lichtsignalanlagen sind dadurch charakterisiert, dass sie feste Sperr- und Freigabezeiten besitzen, die durch Gelbzeiten bzw. Gelb-Rot-Zeiten mit ca. 3 s unterbrochen werden. Grundlage für die optimale Auslegung der Umlaufzeit der LSA sowie der Sperr- und Freigabezeiten der jeweiligen Spuren ist der Zeitbedarfswert $t_B$, also die Zeit, die ein Fahrzeug benötigt, um die LSA zu passieren. Hieraus lässt sich der theoretische Sättigungsverkehrsfluss bei einer Grünstunde $Q_s$ berechnen. Über die Wahl einer Umlaufzeit $t_u$ sowie dem ankommenden Verkehrsfluss auf den einzelnen Spuren lässt sich dadurch die minimale Freigabezeit berechnen, die notwendig ist, dass die Anzahl zufließender Fahrzeuge gleich der Anzahl abfließender Fahrzeuge entspricht. Die Summe aller minimalen Freigabezeiten aller Zufahrten sollte dann näherungsweise der Umlaufzeit entsprechen, ansonsten muss durch sukzessive Iteration das richtige Verhältnis von Umlaufzeit sowie Freigabezeiten ermittelt werden. Damit festzeitgesteuerte LSA dennoch auf tagesbedingte Verkehrsflussschwankungen reagieren können, sind sie in der Regel mit tageszeitabhängigen Schaltprogrammen mit individuellen Umlaufzeiten ausgestattet. Dadurch ist es möglich, auf Ereignisse, wie den morgendlichen Berufsverkehr stadteinwärts zu reagieren und anhand von Tagesganglinien die Umlaufzeiten für bestimmte Tagesphasen zu optimieren. Ein Nachteil ist, dass kurzzeitige unvorhergesehene Verkehrsflussschwankungen nicht erfasst werden können und demzufolge nicht gegengesteuert werden kann.

### 2.8.2 Geregelte Lichtsignalanlagen

Da ULTraSim für die Erforschung von neuen Routingkonzepten entwickelt wurde und um den Einfluss durch schlecht eingestellte LSA so gering wie möglich zu halten, wurde ein Großteil der ampelgesteuerten Kreuzungen mit geregelten Ampeln ausgestattet. Hierzu wird auf jeder ankommenden Spur der Verkehrsfluss mittels virtuellen Kontaktschleifen erfasst und nach einem Algorithmus die optimale Sperr- und Freigabezeit der einzelnen Zufahrten berechnet. In [87],[54], [122] werden hier verschiedene Verfahren aufgeführt. In ULTraSim wurde ein Algorithmus nach [87] implementiert, der die Wartezeit aller Fahrzeuge an den Kreuzungszufahrten aufkumuliert und nach einem Minimumkriterium die Schaltfolge und Umlaufzeit so auswählt, dass es zu einer minimalen Wartezeit aller beteiligten Fahrzeuge führt. Hierzu wird zunächst unter der Kenntnis der jeweiligen Anzahl der Fahrzeuge im Zufahrtsbereich der LSA von 200 Metern die kumulierte

Wartezeit aller Fahrzeuge berechnet. Anschließend wird nach Gl. 2.8.1 die Wartezeit aller Fahrzeuge $n_i$ berechnet, wenn zuerst die erste Zufahrtsrichtung komplett geleert wird und im Anschluss die zweite Zufahrtsrichtung. Im Anschluss wird die Wartezeit aller Fahrzeuge nach Gl. 2.8.2 berechnet, wenn als Erstes die komplette zweite Zufahrtsrichtung geleert wird und im Anschluss die erste Zufahrtsrichtung.

$$T_{ges}^{1} = \underbrace{\frac{1}{2}n_1 \cdot \underbrace{n_1 \frac{t_B}{n_{Spur,1}}}_{t_{ab,1}}}_{\text{Wartezeit Zufahrtsrichtung 1}} + \underbrace{n_2 t_{ab,1} + n_2 t_{gelb} + \frac{1}{2}n_2 \cdot \underbrace{n_2 \frac{t_B}{n_{Spur,2}}}_{t_{ab,2}}}_{\text{Wartezeit Zufahrtsrichtung 2}} \tag{2.8.1}$$

$$T_{ges}^{2} = \underbrace{\frac{1}{2}n_2 \cdot \underbrace{n_2 \frac{t_B}{n_{Spur,2}}}_{t_{ab,2}}}_{\text{Wartezeit Zufahrtsrichtung 2}} + \underbrace{n_1 t_{ab,2} + n_1 t_{gelb} + \frac{1}{2}n_1 \cdot \underbrace{n_1 \frac{t_B}{n_{Spur,1}}}_{t_{ab,1}}}_{\text{Wartezeit Zufahrtsrichtung 1}} \tag{2.8.2}$$

Auf Basis dieser kumulierten Wartezeiten der beiden verschiedenen Schaltfolgen, wird diejenige Schaltfolge $\delta$ gewählt, die in der Summe die minimale Wartezeit aller Fahrzeuge verursacht. Dadurch, dass nach jedem Schaltzyklus das lokale Minimum der LSA in Form neuer Freigabe- und Umlaufzeiten berechnet wird, ist sichergestellt, dass sich die LSA der jeweiligen Verkehrssituation anpasst und somit die Verkehrsteilnehmer auf beiden Zufahrtsrichtungen so gering wie möglich behindert werden.

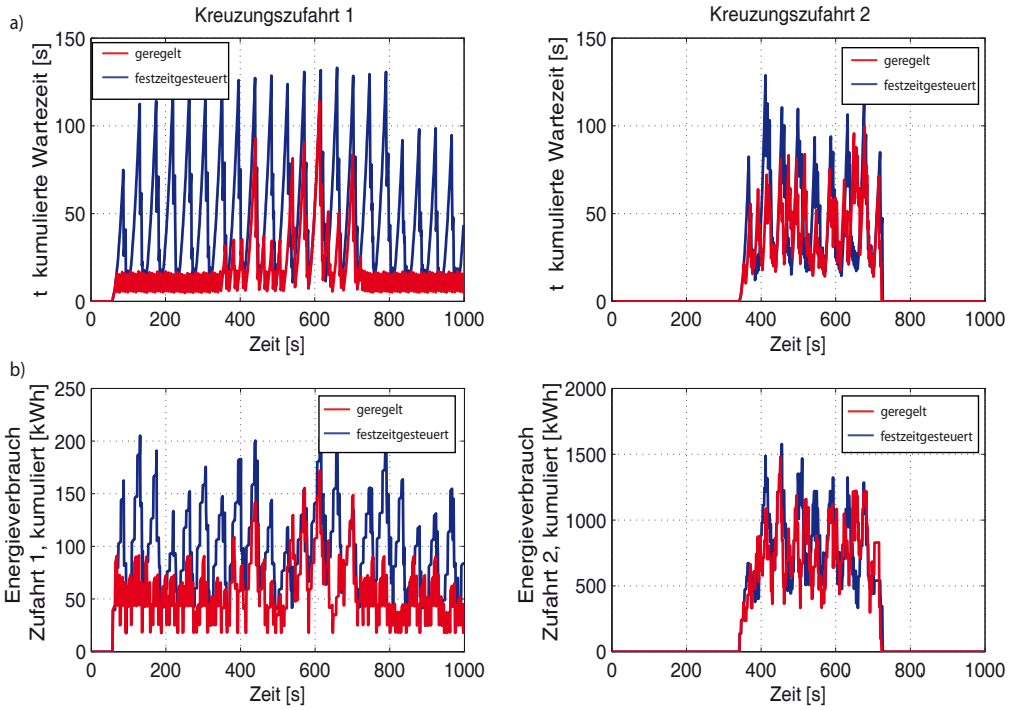



**Abbildung 2.8.2:** *(a) Vergleich Wartezeit, (b) Kraftstoffverbrauch an einer geregelten LSA (rot) und einer optimal eingestellten festzeitgesteuerten LSA (blau)*

Abbildung 2.8.2 zeigt anhand eines Szenarios, wie sich eine optimal eingestellte festzeitgesteuerte sowie eine geregelte LSA auf die Wartezeit bzw. den Kraftstoffverbrauch auswirkt. Hierzu wurde auf der Kreuzungszufahrt 1 ein konstanter Verkehrsfluss von 500 Fzg/h eingestellt, an Kreuzungszufahrt 2 trifft nach 340 s ein Pulk von 100 Fahrzeugen mit einem konstanten Verkehrsfluss von 1 000 Fzg/h ein. In Abb. 2.8.2 ist der Vergleich einer festzeitgesteuerten LSA (blau) mit einer optimal ausgelegten Freigabezeit von 13 s auf Zufahrt 1 und 29 s auf Zufahrt 2, sowie einer geregelten LSA (rot) bei der nach jedem Umlauf die Freigabezeiten neu berechnet werden, dargestellt. Aufgetragen ist jeweils die kumulierte Wartezeit aller Fahrzeuge auf der jeweiligen Zufahrt sowie der kumulierte Kraftstoffverbrauch. Vergleicht man die kumulierte Wartezeit (a), so ist diese im geregelten Fall deutlich geringer. Gerade zu Beginn, wo in Zufahrt 2 keine Fahrzeuge ankommen, tritt nur eine sehr geringe Wartezeit auf, wohingegen bei der gesteuerten LSA durch das feste Signalprogramm hohe Wartezeiten auftreten. Auch beim Eintreffen des Fahrzeugpulks kann durch eine Optimierung der Schaltfolge und Umlaufzeit die Wartezeit der geregelten Ampeln minimiert werden. So ergibt sich im geregelten Fall eine Wartezeitreduzierung im Vergleich zur festzeitgesteuerten LSA um 63,7 % auf Zufahrt 1 und 15,8 % auf Zufahrt 2. Dadurch ist eine deutlich höhere Durchschnittsgeschwindigkeit im geregelten Fall von Zufahrt 1 von 48,8 km/h sowie von Zufahrt 2 von 16,6 km/h zu erreichen. Die gesteuerte LSA erreicht lediglich eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 30,6 km/h auf Zufahrt 1 sowie 15,8 km/h auf Zufahrt 2. Vergleicht man den Energieverbrauch (b) so ist erkennbar, dass der Energieverbrauch der geregelten LSA sinkt. Dies liegt zum einen an der geringeren Wartezeit und zum anderen daran, dass weniger Stop-and-Go-Wellen zum Passieren der Kreuzung notwendig sind. Auch bei Zufahrt 2 ist ein niedriger kumulierter Energieverbrauch der geregelten LSA zu erkennen. Dies entspricht einer Energieverbrauchsreduzierung bei Kreuzungszufahrt 1 im geregelten Fall von 39,8 % und Kreuzungszufahrt 2 von 7,0 %.

## 2.9 Visualisierung

Das Ziel der Visualisierung von ULTraSim ist es, die Information für den Benutzer in einer geeigneten Form aufzubereiten und zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren ist es das Ziel, durch eine geeignete Visualisierung der Algorithmen eine einfache, schnelle und intuitive Bedienung von ULTraSim zu ermöglichen. Für die Überprüfung der Funktionalität sowie der Ergebnisse des Verkehrssimulators ist neben den verschiedenen Messungen, die angestellt werden können, eine visuelle Überprüfung und Darstellung von hoher Wichtigkeit. Hierzu wurden mithilfe von Gl. 2.6.1 die GPS-Koordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem umgewandelt. Da sämtliche Grafiktransformationen in Java Pixeleinheiten zugrunde liegen, erfolgte eine Umrechnung der Meterangaben in Pixeleinheiten, so dass in der höchsten Auflösungsstufe eine Auflösung von einem Meter pro Pixel entsteht. Um sicherzustellen, dass die grafische Darstellung die Rechenzeit des Verkehrssimulators nicht unnötig beeinträchtigt, wurden sämtliche Visualisierungsfunktionen in einen extra Thread ausgelagert. Bei einem Thread in Java handelt es sich um einen Ausführungsstrang, der parallel zu anderen Threads ablaufen kann (Kap. 2.10). Um weiterhin Ressourcen zu sparen, werden lediglich diejenigen Grafiken neu gezeichnet, bei denen nach der letzten Aktualisierung eine Änderung auftrat. Insgesamt kann zwischen zwei Arten der Visualisierung unterschieden werden, der zweidimensionalen und der virtuellen dreidimensionalen Welt.

### 2.9.1 Zweidimensionale Visualisierung

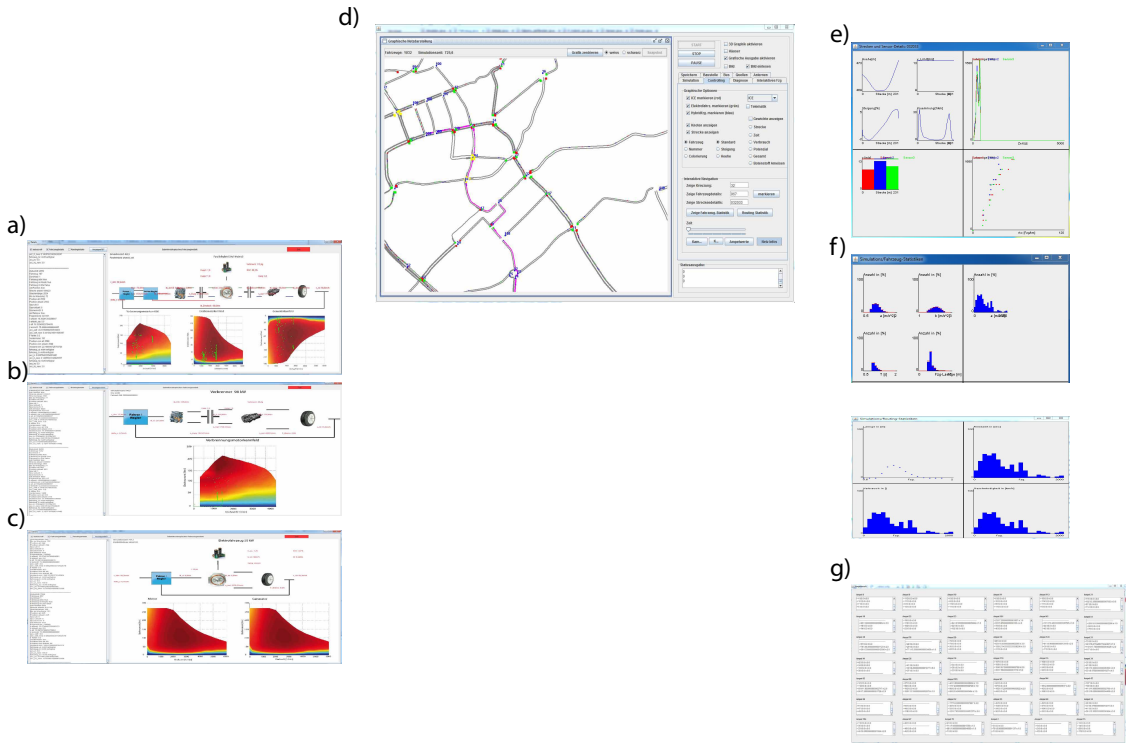



**Abbildung 2.9.1:** *Zweidimensionale Visualisierung mit Zusatzframes*

Die zweidimensionale Visualisierung wurde mithilfe von Java JPanels realisiert. Damit sowohl eine Gesamtübersicht über das Streckennetz sowie eine detaillierte Ansicht einzelner Kreuzungen

sowie Streckensegmente erfolgen kann, wurde eine Zoomstufe implementiert, bei der eine Auflösung von bis zu einem Meter pro Pixel möglich ist. Im Hauptfenster Abb. 2.9.1 (d), kann das Streckennetz, die LSA, die Fahrzeuge sowie Informationen über die Routenwahl einzelner Fahrzeuge angezeigt werden. Durch farbiges Markieren der Fahrzeuge kann dargestellt werden, ob es sich um konventionelle Fahrzeuge, Elektrofahrzeuge oder Hybridfahrzeuge handelt. Außerdem kann ihre Geschwindigkeit visuell ausgewertet werden. Des Weiteren verfügt der Simulator über eine Vielzahl von Informationframes. Sämtliche submikroskopische Fahrzeugdaten werden in Fahrzeug-Frames dargestellt, die von jedem Fahrzeug individuell aufgerufen werden können (a-c). Hierbei ist der komplette Antriebsstrang des Fahrzeuges, mit den aktuellen Daten wie Drehzahl und Drehmoment, das an den einzelnen Komponenten anliegt, visualisiert. Außerdem bieten die Frames für die Analyse die Möglichkeit, in den Motorkennfeldern sämtliche Betriebspunkte während der Fahrt aufzuzeichnen. Durch die detaillierte Darstellung der Betriebspunkte der Fahrt, im Motor- bzw. Generatorkennfeld, ist eine genaue Analyse der Betriebsstrategie möglich. Zur genauen Analyse des Verkehrsnetzes sowie der Verkehrszusammensetzung verfügt ULTra-Sim außerdem über Frames zur statistischen Auswertung der Fahrzeuge im Simulator (f) sowie Informationen über die Schaltzustände einzelner Lichtsignalanlagen (g). Ein wichtiges Analysetool für das spätere Routing ist eine genaue Kenntnis über den Verkehrszustand einzelner Streckensegmente. Hierzu können über das Sensorframe (e) sämtliche Informationen, wie aktuelle Durchschnittsgeschwindigkeit, Verkehrsdichte, -fluss aber auch die aktuelle Fahrzeit und der Energieverbrauch, ausgelesen werden.

### 2.9.2 Dreidimensionale Visualisierung / Virtuelle Welt

Für die Mehrzahl der Anwendungen ist die zweidimensionale Visualisierung ausreichend. Da aber gerade Höheninformationen für die energetische Routenwahl bei unterschiedlichen Fahrzeugtopologien ein wichtiges Entscheidungskriterium sind, erfolgte zusätzlich eine Visualisierung des Streckennetzes in Java3D. Hierzu erfolgte die Implementierung in der Open Source Software Java3D [127], das von Sun Microsystems entwickelt wurde und zur Erzeugung und Manipulation dreidimensionaler Grafiken in einem Java Programm genutzt werden kann. Als Grundlage für die Darstellung des Terrains wurden SRTM3 Daten des Stadtgebietes von Ulm hinterlegt. Neben dem Streckennetz, Fahrzeugen und Lichtsignalanlagen wurden des Weiteren „Google Earth“ Objekte eingefügt, um eine leichtere Orientierung in der 3D-Welt zu ermöglichen.

Bei der Programmierung der 3D-Umgebung wurde darauf geachtet, dass eine nachträgliche Erweiterung zu einem virtuellen Fahrsimulator gegeben ist. Dies wird durch zwei Faktoren erreicht. Erstens durch verschiedene Kamerapositionen aus denen die Fahrzeuge beobachtet werden können und zweitens durch Fahrzeuge, welche in den Simulator integriert und manuell gesteuert werden können.

## 2.10 Thread Management

Ein sehr wichtiger Faktor für die Effektivität des Verkehrssimulators ist, neben einem hohen Detaillierungsgrad, eine vertretbar kurze Rechenzeit. Hierbei steigt, wie in Abschnitt 2.2 erläutert, mit zunehmendem Detaillierungsgrad die Rechenzeit deutlich an. Unter Rechenzeit wird im Folgenden die Realzeit verstanden, die benötigt wird, um einen gegebenen Simulationszeitraum zu simulieren. Die Zeitspanne für die Analyse eines Systems wird mit dem Begriff des Simulationszeitraumes beschrieben [55]. Ziel jeder Simulation ist es, dass das Verhältnis von Rechenzeit und Simulationszeitraum möglichst gering ist.

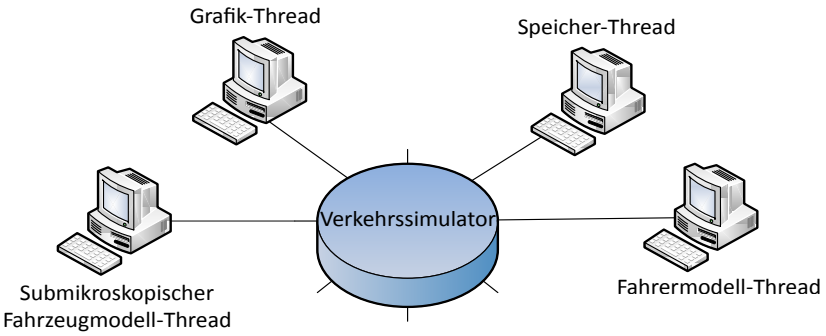



**Abbildung 2.10.1:** *Thread Management von ULTraSim*

Analysiert man kommerziell verfügbare Verkehrssimulatoren so ist festzustellen, dass bei allen Anbietern bei sehr großen Fahrzeugzahlen (n>3 000) ein hoher Anstieg in der Rechenzeit zu verzeichnen ist. Auch ist ein wesentlicher Effekt, wie groß das zu simulierende Netz ist. Aus diesem Grund wurde bei der Implementierung durch das Auslagern von verschiedenen Aufgaben auf verschiedene Threads die Rechenzeit deutlich reduziert. Dadurch kann durch die heutigen modernen Mehrprozessorsysteme eine deutliche Steigerung der Geschwindigkeit durch ein paralleles Abarbeiten von Aufgaben erreicht werden. Die Abb. 2.10.1 zeigt wie der Prozess des Verkehrssimulators auf insgesamt vier Threads aufgeteilt wird. Zentraler Thread ist der Fahrermodell-Thread, der die Aufgabe hat, die Fahrzeuge im Streckennetz zu bewegen. Je nach Anforderung ist eine Ergänzung um das submikroskopische Fahrzeugmodell-Thread möglich, der sämtliche submikroskopische Fahrzeugmodelle berechnet. Damit die Visualisierung und Speicherung von Datensätzen den Simulator nicht unnötig verlangsamen, wurden diese beiden Aufgaben ebenfalls in eigenständige Threads ausgelagert. Dieses Thread Management bringt den Vorteil, dass trotz sehr aufwendiger submikroskopischer Fahrzeugmodelle, vertretbar geringe Rechenzeiten bei dennoch hohen Verkehrsdichten erreicht werden können.

Um die Rechenzeit von der Netzgröße zu entkoppeln, wurde nicht wie bei vielen anderen Verkehrssimulationskonzepten (Cellulärautomaten) die Strecke als Simulationsbasis gewählt, sondern die Fahrzeuge. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Netzgröße nicht in die Rechenzeit eingeht, sondern nur die Anzahl der Fahrzeuge. Abbildung 2.10.2 (a) zeigt die Rechenzeit im Verhältnis zum Simulationszeitraum über der Fahrzeuganzahl. Hierbei wurde die Auswertung für drei Ausbaustufen des Simulators durchgeführt. Wird lediglich der Simulator mit festen Fahrzeugrouten sowie ohne submikroskopische Fahrzeugmodelle betrieben (grün), so ist eine Simulation mit 5 000 Fahrzeugen 2,8 mal schneller als in Echtzeit möglich. Werden außerdem submikroskopische Fahrzeugmodelle integriert, so steigt die Rechenzeit bei 5 000 Fahrzeugen um 6,7 %,

was eine Simulation von 2,35 mal schneller als in Echtzeit bedeutet. Hier muss je nach Komplexität des Fahrzeugmodells unterschieden werden. Für die Berechnung eines konventionellen Fahrzeuges entfällt im Durchschnitt, bei einer Simulationsdauer von einer Stunde und 5 000 beteiligten Fahrzeugen, eine Rechenzeit von 52 ms pro Fahrzeug bzw. 49 ms pro simuliertem Elektrofahrzeug. Aufgrund der höheren Komplexität von Parallelhybrid-Fahrzeugen und ihrer Betriebsstrategie, werden für die Simulation durchschnittlich 980 ms pro Fahrzeug benötigt. Wie zu erkennen ist, entfällt der größte Rechenzeitanteil auf das Verkehrsrouting. In Kap. 7 werden Möglichkeiten aufgezeigt wie dieser Rechenzeitanteil effektiv reduziert werden kann. Sämtliche Auswertungen wurden mit einem AMD Phenom$^{TM}$ II X4 965 Prozessor 3,39 GHz und 16 Gb Arbeitsspeicher durchgeführt. Der lineare Zusammenhang wird dadurch erzielt, da sich mit steigender Fahrzeugdichte durch die Rasterung der Strecken die Hindernissuche der einzelnen Fahrzeuge verkürzt. In Abb. 2.10.2 (b) ist der prozentuale Threadanteil an der Rechenzeit über der Fahrzeuganzahl aufgetragen. Wie zu erkennen ist, steigt vor allem der Anteil für das Routing der Fahrzeuge mit zunehmender Fahrzeuganzahl deutlich an.

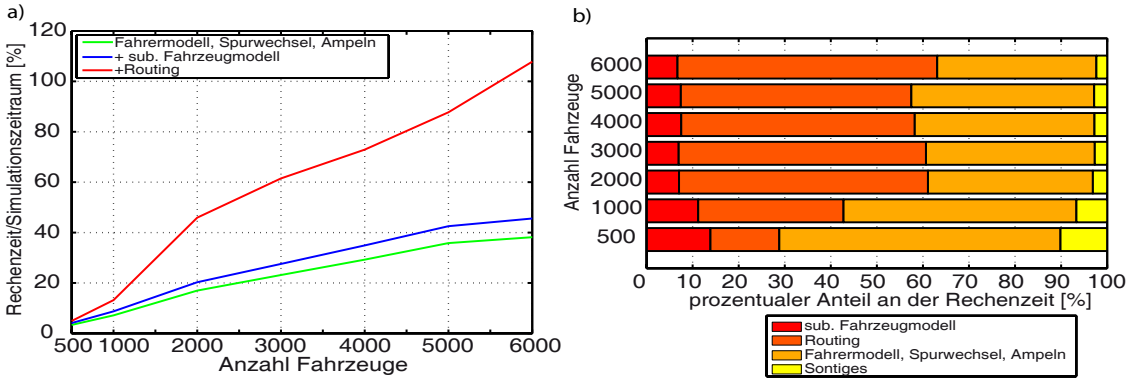



**Abbildung 2.10.2:** *(a) Verhältnis Rechenzeit zum Simulationszeitraum über der Fahrzeuganzahl, (b) prozentualer Threadanteil an der Rechenzeit für Fahrzeugmodelle mit Verbrennungsmotor*

## 2.11 Begriffsdefinitionen der Verkehrsdatenerfassung

Da für das Verkehrsrouting unter anderem verschiedene Verkehrskenngrößen ausschlaggebend sind, soll an dieser Stelle eine kurze Erläuterung und Definition der wichtigsten Verkehrskenngrößen erfolgen.

**Verkehrsdichte** Unter der Verkehrsdichte bzw. Fahrzeugdichte $k$ versteht man die Anzahl an Fahrzeugen $n$ in einem Streckenabschnitt der Länge $\Delta x$ zu einem Zeitpunkt $t_0$. Meist erfolgt eine Normierung der Verkehrsdichte auf einen Kilometer [6].

$$k = \frac{n}{\Delta x} \left[\frac{\text{Fzg}}{\text{km}}\right] \tag{2.11.1}$$

**Verkehrsstärke / Verkehrsfluss** Unter Verkehrsfluss bzw. Verkehrsstärke $q$ versteht man die Fahrzeuge $n$, die pro Zeiteinheit $\Delta t$ einen Messquerschnitt $x_0$ passieren [62]. Angegeben wird der

Verkehrsfluss meist in Fahrzeuge pro Stunde oder pro Minute.

$$q = \frac{n}{\Delta t} [\frac{\text{Fzg}}{\text{h}}] \tag{2.11.2}$$

**Kapazität** Die Kapazität $C$ einer Straße beschreibt den maximalen Verkehrsfluss den eine Straße an einem bestimmten Punkt aufnehmen kann.

$$C = q_{max} [\frac{\text{Fzg}}{\text{h}}] \tag{2.11.3}$$

## 2.12 Verkehrsdatenerfassung

Zur Ermittlung der oben genannten Verkehrskenngrößen ist eine Verkehrserfassung unumgänglich. Hierbei werden zwei Arten der Datenerfassung unterschieden, die räumliche und die zeitliche.

**Räumliche, momentane Datenerfassung** Unter der räumlichen bzw. momentanen Datenerfassung versteht man, zu einem festen Zeitpunkt $t_0$ in einem endlich definierten Streckenabschnitt $\Delta x$ die Anzahl der Fahrzeuge $n$ und deren Geschwindigkeit $v_i$ zu erfassen. Dadurch erhält man das räumliche arithmetische Mittel der erfassten Größen.

$$\bar{v}_{Raum,\, momentant} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_i(\Delta x, t_0) \tag{2.12.1}$$

**Zeitliche, lokale Datenerfassung** Bei der zeitlich, lokalen Datenerfassung werden die relevanten Größen an einem festen Messpunkt $x_{mess}$ über einen Messzeitraum $\Delta t$ erfasst und das arithmetische Mittel gebildet.

$$\bar{v}_{Zeit,\, lokal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_i(x_{mess}, \Delta t) \tag{2.12.2}$$

**Fundamentaldiagramm** Beim Fundamentaldiagramm handelt es sich um eine dreidimensionale Punktwolke, welche mittels Projektion in drei Diagrammen die Abhängigkeit der Verkehrskenngrößen, Verkehrsfluss $q$, Verkehrsdichte $k$ und die mittlere Geschwindigkeit $\bar{v}$ darstellen kann. Hierüber können Aussagen über den Verkehrsfluss an einem Streckenquerschnitt gemacht werden. Die Kurven lassen sich in den freien Verkehrsfluss, den teilgebundenen bzw. gebundenen Verkehrsfluss sowie in den Verkehrsstau aufteilen [73].

Abbildung 2.12.1 zeigt ein Fundamentaldiagramm wie es mithilfe von ULTraSim auf einem Streckensegment aufgezeichnet wurde. Hierzu verfügt jede Strecke des Simulators über drei Sensoren, die je ein Drittel der Strecke überwachen und wichtige Verkehrskenngrößen, aber auch die

mittlere Fahrzeit oder den Energieverbrauch der Fahrzeuge, in diesem Streckensegment aufzeichnen. Wie zu erkennen ist, bricht ab einer Verkehrsdichte von 25 Fahrzeugen pro Kilometer der Verkehrsfluss zusammen, wobei sich ein Verkehrsstau bildet. Der maximale Verkehrsfluss der Strecke beträgt hier 1 500 Fahrzeuge pro Stunde.

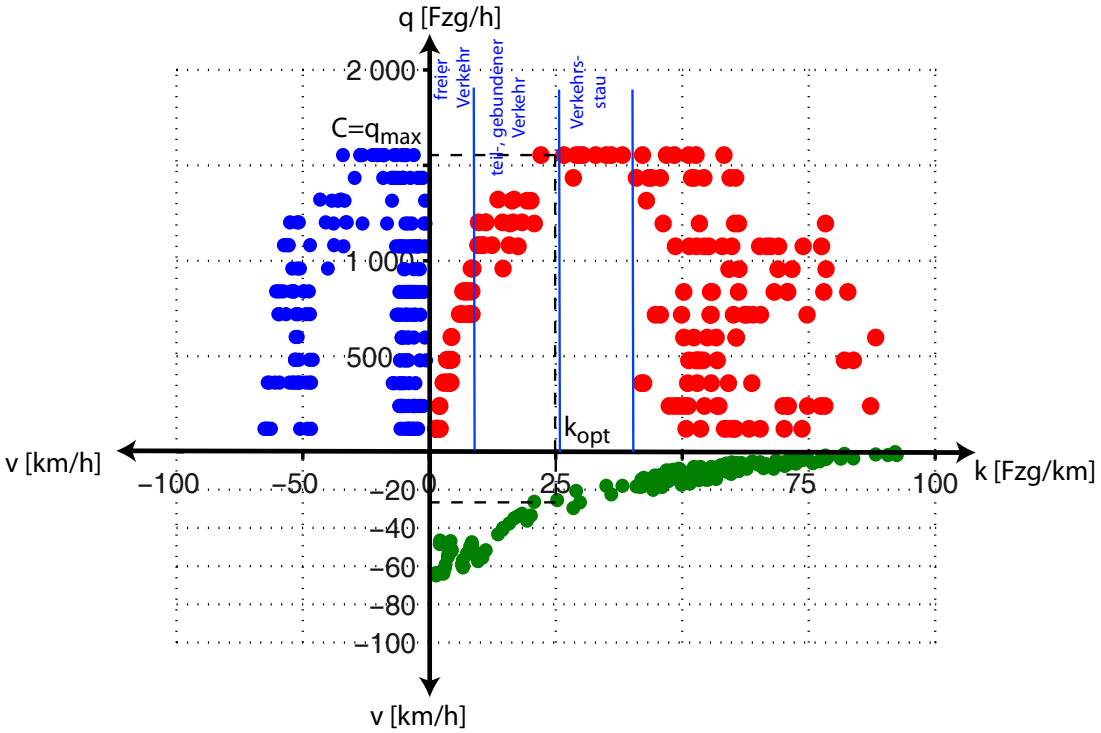



**Abbildung 2.12.1:** *Messdaten dargestellt im Fundamentaldiagramm einer einspurigen Strecke*

## 2.13 Zusammenfassung

Ziel dieses Kapitels war die Entwicklung und Implementierung einer Verkehrssimulationssoftware, welche exakt auf die Anforderungen dieser Arbeit zugeschnitten ist. Es wurde zunächst ein Überblick über kommerziell verfügbare Produkte und deren Einschränkungen gegeben. Im Anschluss wurde die Eigenentwicklung namens ULTraSim vorgestellt, bei der es sich um einen mikroskopischen Verkehrssimulator handelt, der die Möglichkeit bietet, verschiedenste submikroskopische Fahrzeugmodelle zu integrieren. Durch den Streckengenerator ist die Erstellung jedes beliebigen Verkehrsnetzes möglich, welches in ULTraSim Anwendung finden soll. Außerdem wurde auf die Fahrermodelle und Spurwechselmodelle sowie Algorithmen für eine intelligente Regelung von Lichtsignalanlagen eingegangen. Zuletzt erfolgte eine Untersuchung der Rechenzeit von ULTraSim. Hierbei konnten trotz des hohen Detaillierungsgrads eine Laufzeit von bis zu 2,35 mal schneller als Echtzeit, bei 5 000 simulierten submikroskopischen Fahrzeugen, erreicht werden.

# 3 Fahrzeugmodellierung

In diesem Kapitel erfolgt eine detaillierte Erläuterung der Modellbildung der im Verkehrssimulator integrierten Fahrzeugmodelle. Hierzu wird zunächst in Abschnitt 3.2 auf die verschiedenen Modellansätze eingegangen. In Abschnitt 3.3 erfolgt eine Erläuterung der beinhaltenden Teilkomponenten sowie der verschiedenen Regler. In Abschnitt 3.4-3.6 werden schließlich die resultierenden Fahrzeugmodelle vorgestellt und erläutert sowie die Verbrauchsberechnungen mit Herstellerangaben vergleichbarer Fahrzeuge verglichen. Weiter erfolgt die Verifizierung der Modelle anhand von standardisierten Fahrzyklen.

## 3.1 Einleitung

Unter dem Begriff Fahrzeugtopologie werden im Folgenden Elektroautos, Hybridfahrzeuge sowie Fahrzeuge mit klassischem Verbrennungsmotor zusammengefasst. Je nach Komplexität und Anwendungsgebiet unterscheidet man bei der Simulation der Fahrdynamik zwischen Längs- und Querdynamik. Da das Ziel der Fahrzeugmodelle eine sehr genaue Bestimmung des Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchs ist und die Querdynamik eines Fahrzeuges hierauf nur marginalen Einfluss hat, ist es ausreichend für die Fahrzeugmodelle lediglich die Fahrzeuglängsdynamik zu betrachten [74]. Sämtliche Fahrzeugmodelle wurden für die Entwicklung und Verifizierung zunächst in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink aufgebaut und dann in eine je nach Fahrzeugtopologie eigenständige Fahrzeugklasse überführt.

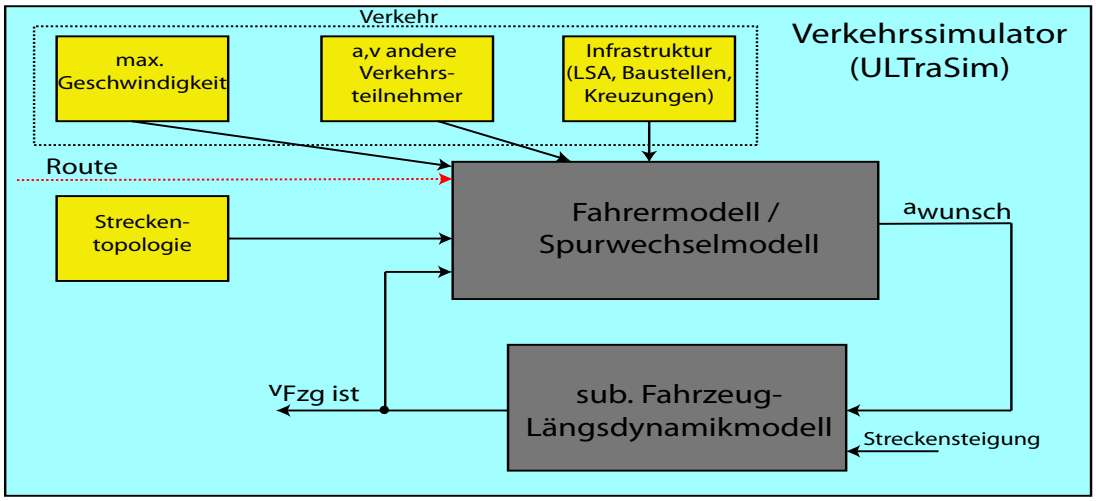



**Abbildung 3.1.1:** *Gesamtübersicht, Eingliederung der submikroskopischen Fahrzeugmodelle in den Verkehrssimulator*

Wie in Abb. 3.1.1 zu sehen ist, sind die Längsdynamikmodelle in einen geschlossenen Regelkreis in die Simulationsumgebung eingebettet. Das Fahrermodell berechnet auf Basis von Verkehrsteilnehmern, Streckentopologie, Routenwahl sowie Geschwindigkeitsvorgaben eine Soll--Geschwindigkeitstrajektorie. Diese wird an das jeweilige Fahrzeugmodell übergeben, woraus das Fahrermodell eine Wunschbeschleunigung bzw. -verzögerung bestimmt. Nach der Simulation der Längsdynamik des Fahrzeuges mit allen beteiligten Komponenten, sowie der Bestimmung des Energieverbrauchs für den jeweiligen Zeitschritt, erhält das Fahrermodell die Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeuges als Rückgabewert. Durch Integration dieses Rückgabewertes erfolgt schließlich auch die neue Positionsbestimmung sowie die Neuberechnung der Geschwindigkeitstrajektorie.

## 3.2 Fahrzeuglängsdynamikmodellierungsarten

Für die Modellierung der Fahrzeuglängsdynamik werden in der Literatur verschiedene Ansätze aufgeführt [49], [149], [79]. Prinzipiell lässt sich eine Unterteilung in eine „Quasistatische Modellierung“, eine rückwärtsgerichtete Modellierungsart sowie eine „dynamische Modellierung“, eine vorwärtsgerichtete Modellierungsart, vornehmen.

### 3.2.1 Quasistatische Modellierung

Bei der quasistatischen Modellierung handelt es sich um eine rückwärtsgerichtete Modellierungsart Abb. 3.2.1 . Ausgehend von einem Fahrprofil wird auf die Berechnungsgrößen der einzelnen Komponenten wie Rad-, Getriebe- und Motordrehzahl sowie das notwendige Antriebsmoment zurückgerechnet. Nachteil ist, dass die Modellierung der einzelnen Fahrzeugkomponenten nicht sehr realitätsnah ist, da in den einzelnen Blöcken keine Differenzialgleichungen gelöst werden und die Beschreibung lediglich auf algebraische Gleichungen beruht.

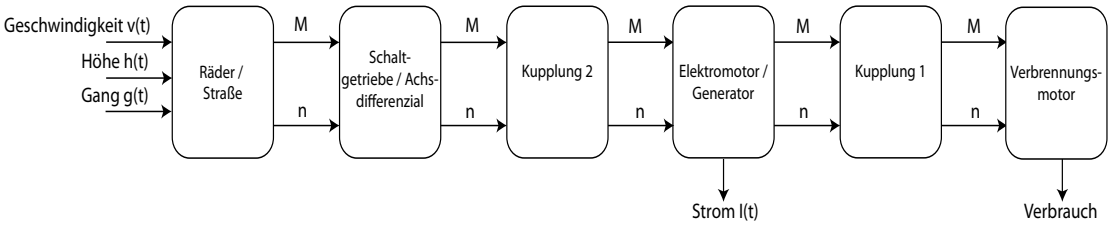



**Abbildung 3.2.1:** *Exemplarischer Aufbau des Simulationsmodells bei der quasistatischen Modellierung eines Parallelhybrids*

Dies führt zu dem Vorteil, dass eine geringe Berechnungszeit notwendig ist, wobei geringe Anforderungen an die Abtastzeit gestellt werden müssen. Nachteil dieser Modellierungsart ist, dass Auswirkungen von Fahrermodellen nicht widergespiegelt werden, dadurch sind die Wechselwirkungen zwischen Fahrermodell und Fahrzeuglängsdynamik nicht analysierbar. Aus diesem Grund eignet sich die quasistatische Modellierung in erster Linie für den Entwurf von Betriebsstrategien, wie sie in [125], [14] angewendet wird.

Für den Entwurf einer realitätsnahen Fahrzeug-Fahrerinteraktion im Straßenverkehr ist diese

Wechselwirkung hingegen ein sehr ausschlaggebender Punkt, weshalb sich der „quasistatische Modellierungsansatz“ nur bedingt für die Anforderungen in dieser Arbeit eignet.

### 3.2.2 Dynamische Modellierung

Bei der dynamischen Modellierung bilden die einzelnen Teilmodelle eine Wirkungskette Abbildung 3.2.2, deren Eingangsgrößen zur Lösung der Gesamtdifferenzialgleichung im letzten Glied beitragen, weshalb man auch von einer vorwärtsgerichteten Berechnung sprechen kann. Abhängig von einer Stellgröße gibt der Motor ein Motormoment ab, welches über die einzelnen Komponenten an die Räder weitergeleitet wird. Über die Lösung der Gesamtbewegungsdifferenzialgleichung im Rad-Block resultiert hieraus eine Raddrehzahl $v_{ist}$. Diese Drehzahl wird schließlich als Lösung der Differenzialgleichung durch alle Blöcke zurück an den Ursprung, sprich dem Verbrennungsmotor, gegeben. Vorteil dieser Modellierung ist, dass alle Komponenten als Eingangsgrößen genau die physikalischen Größen wie in einem realen Fahrzeug benutzen und ihre Berechnungsergebnisse an die im Antriebsstrang benachbarten Aggregate weiterleiten.

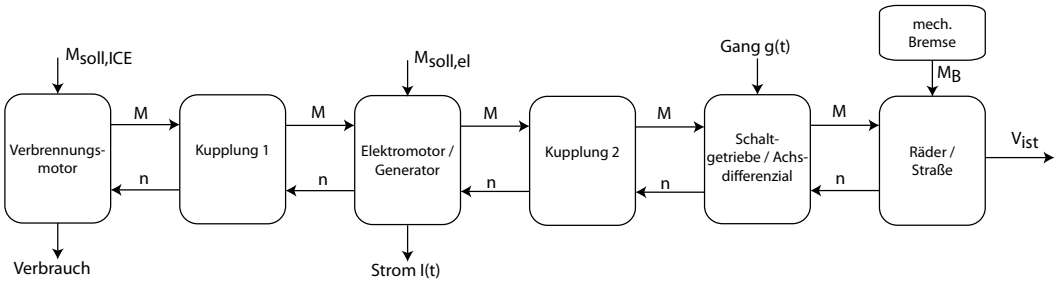



**Abbildung 3.2.2:** *Exemplarischer Aufbau des Simulationsmodells bei der dynamischen Modellierung eines Parallelhybrids*

Für den Betrieb solcher Fahrzeugmodelle ist in der Regel ein Fahrermodell notwendig. Dieses generiert auf Basis einer Fülle von Informationen eine Wunschgeschwindigkeitstrajektorie und stellt diese dem Fahrzeugmodell zur Verfügung. Abweichungen der Wunschgeschwindigkeit zur Ist-Geschwindigkeit des dynamischen Fahrzeugmodells können mittels Geschwindigkeits- und Bremsregler ausgeregelt werden. Dadurch kann sich der Berechnungsaufwand je nach Detaillierungsgrad deutlich erhöhen, im Vergleich zu quasistatischen Modellen. Im Gegensatz zu statischen Modellen, die aus der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit auf das notwendige anliegende Drehmoment und den Kraftstoffverbrauch Rückschlüsse ziehen, berechnen dynamische Modelle die Gesamtdifferenzialgleichung erst im letzten Teilmodell und reichen die Ergebnisse im nächsten Teilschritt durch sämtliche Modelle zurück. Dadurch kann das dynamische Verhalten sowie das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten gut simuliert werden und unfahrbare Fahrsituationen können schnell detektiert werden. Da die Wechselwirkung zwischen Fahrer- und Fahrzeugmodell in ULTraSim möglichst genau abgebildet werden soll, um eine realitätsnahe Reaktion des Fahrzeuges auf verschiedene Fahrertypen sowie die Auswirkungen auf den Kraftstoff- und Energieverbrauch zu untersuchen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine dynamische Modellierung aller Fahrzeuge gewählt.

### 3.2.3 Fahrzyklen

Für die Überprüfung der Funktionalität der Modelle sowie zum Vergleich der Energieverbrauchswerte der einzelnen Fahrzeugtopologien mit vergleichbaren Fahrzeugen der Industrie, wird zum einen ein synthetischer Normzyklus verwendet. Zum anderen wird ein realer Fahrzyklus verwendet, der mit einem Testfahrzeug aufgenommen wurde. Energieverbrauchswerte sowie Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen werden in der Europäischen Union anhand gesetzlich vorgeschriebener Prüfzyklen ermittelt. Seit 1996 ist dies in Europa der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) bzw. NEDC, MVEG (englisch). Der NEFZ hat eine zeitliche Länge von 1 180 Sekunden, wobei eine Strecke von 11,007 km zurückgelegt wird. Wie das Geschwindigkeitsprofil Abb. 3.2.3 (a) zeigt, setzt sich der NEFZ-Zyklus aus der viermaligen Wiederholung des ECE-Zyklus, bei dem es sich um eine Stadtfahrt handelt sowie dem EUDC-Zyklus, der eine Überlandfahrt simuliert, zusammen. Für die Durchführung der Analysen sind nach [7] die genauen Übersetzungen sowie Schaltzeitpunkte und Gangvektoren vorgeschrieben.

Für die Ermittlung des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen wird der Energieverbrauch der Batterie nach Gl. 3.2.1 bestimmt. Hierzu ist der Energieverbrauch c [Wh/km] über den gemessenen Energieverbrauch E in Wh für das Zurücklegen der Prüfstrecke mit der Länge $D_{test}$ definiert. Bei Elektrohybrid-Fahrzeugen gestaltet sich die Verbrauchsbestimmung komplizierter. Nach der ECE-Norm R 101 [8] wird der NEFZ-Zyklus zweimal, einmal mit voller und einmal mit leerer Batterie, durchfahren.

$$c = \frac{E}{D_{test}} \tag{3.2.1}$$

Über Gl. 3.2.2 erfolgt schließlich die Kraftstoffverbrauchsbestimmung in l/100 km. Diese setzt sich aus den Faktoren $C_1$ Kraftstoffverbrauch bei voller Batterie sowie $C_2$ Kraftstoffverbrauch bei maximal entladener Batterie pro 100 Kilometer zusammen. $D_e$ beschreibt außerdem die elektrische Reichweite. $D_{av}$ ist zusätzlich die angenommene durchschnittliche Strecke zwischen zwei Batterieladungen. Der Gesamtstromverbrauch berechnet sich analog jedoch mit Stromverbrauchswerten in Wh/100 km.

$$C = \frac{D_e \cdot C_1 + D_{av} \cdot C_2}{D_e + D_{av}} \tag{3.2.2}$$

Typische Normzyklen für die USA sind der FTP75- oder der US06-Zyklus. In Japan finden vor allem der 10-15 Mode Anwendung. Kritisch muss man die Normzyklen in dem Punkt sehen, dass die Geschwindigkeitsprofile wenig realen Nutzungsprofilen entsprechen. Wie im Vergleich des Beschleunigungshistogramms (b, d) von realen Zyklen und Normzyklen zu sehen ist. Hierzu gibt es in der EU Anstrengungen, zur Verbrauchs- und Schadstoffbestimmung, einen realistischeren Fahrzyklus zu entwickeln und verbindlich zu machen. Erste Vereinbarungen für einen neuen Normzyklus mit realistischen Beschleunigungen gibt es im ARTEMIS-Projekt (Assessment and Reliability of Transport Emission Model and Inventory Systems) [9].

Abbildung 3.2.3 (c) zeigt einen realen Stadtzyklus, der mit einem 66 kW motorisierten Skoda Fabia aufgezeichnet wurde. Der Zyklus hat eine Gesamtlänge von 7,47 Kilometer sowie eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 40,5 km/h. Wie zu erwarten war, zeigt das Beschleunigungshistogramm (d) eine deutlich breitere Verteilung, bedingt durch viele Beschleunigungs- und Bremsvorgänge im Stadtverkehr.

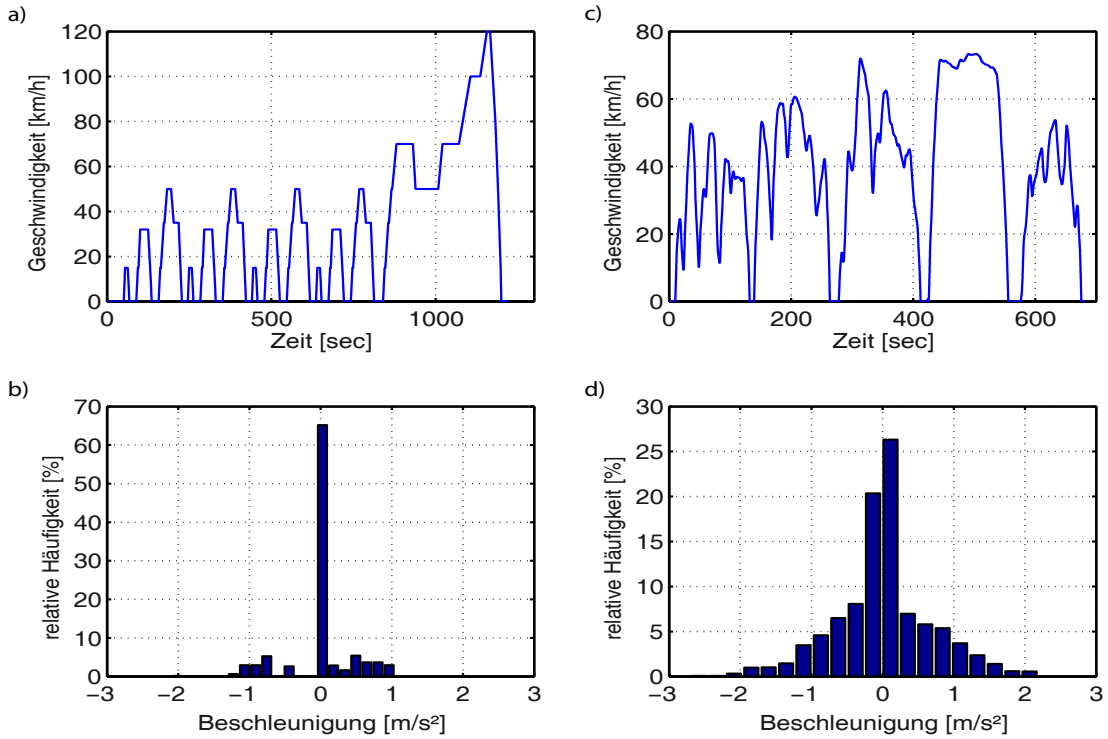



**Abbildung 3.2.3:** *Übersicht über Fahrzyklen zur Verifizierung der Fahrzeugmodelle, (a) NEFZ-Zyklus, (c) realer Zyklus, (b, d) relative Häufigkeit der Beschleunigung*

## 3.3 Modellbildung

Für die Generierung und Modellierung der Fahrzeugmodelle wurde jede einzelne Komponente eines Fahrzeuges, wie Verbrennungsmotor, Elektromotor, Kupplung, Getriebe, Räder, Bremse und die Batterie, einzeln modelliert. Ergänzt wurden diese Fahrzeugkomponenten um Betriebsstrategien der einzelnen Fahrzeuge sowie um Geschwindigkeits- und Bremsregler. Wichtiges Ziel bei der Implementierung war eine schnelle Fahrzeuggenerierung sicherzustellen sowie eine möglichst heterogene Fahrzeugflotte zu erzeugen. Dies wurde durch ein Modellbuilderkonzept sichergestellt. Der Modellbuilder enthält alle wichtigen Fahrzeugkomponenten, welche jeweils für die gewünschte Fahrzeugleistung skaliert werden können und dann in ein standardisiertes dynamisches Fahrzeugmodell eingefügt werden. Die Kommunikation der einzelnen Fahrzeugkomponenten übernimmt ein Bussystem, welches wichtige Informationen, wie die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Einzelmodelle, übermittelt. Ergänzt werden diese Fahrzeugmodelle um die für jede Fahrzeugtopologie individuellen Betriebsstrategien. Im Folgenden soll nur auf die Modellierung sehr bedeutender Komponenten, wie die Kennfelder, die der Verbrauchsberechnung zugrunde liegen sowie die Regelung und Betriebsstrategie der dynamischen Fahrzeugmodelle, eingegangen werden. Auf die Modellierung der anderen Komponenten sei auf die Vielzahl von Fachliteratur [95], [90] verwiesen.

### 3.3.1 Verbrennungsmotor- / Elektromotor- / Generatorkennfeld

Den Kraftstoffverbrauchsberechnungen der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor liegt das Kraftstoffverbrauchskennfeld eines 66 kW Dieselmotors, wie es in Abb. 3.3.1 (a) zu sehen ist, zugrunde. Durch die Skalierung der Drehmomentachse ist es möglich, unterschiedliche leistungsstarke Fahrzeuge zu generieren, was in engen Grenzen zulässig ist. Abb. 3.3.1 (b) zeigt das verwendete Wirkungsgradkennfeld der permanenterregten Synchronmaschine für den Motorbetrieb welches in Elektrofahrzeugen als auch in Parallel-Hybridfahrzeugen Anwendung findet. Je nach Betriebsmodus wird über die angeforderte Leistung und die Motordrehzahl das Drehmoment bestimmt und mithilfe der Wirkungsgradkennfelder der Batterielaststrom bzw. der Rekuperationsstrom, welcher die Batterie entlädt bzw. lädt, berechnet.

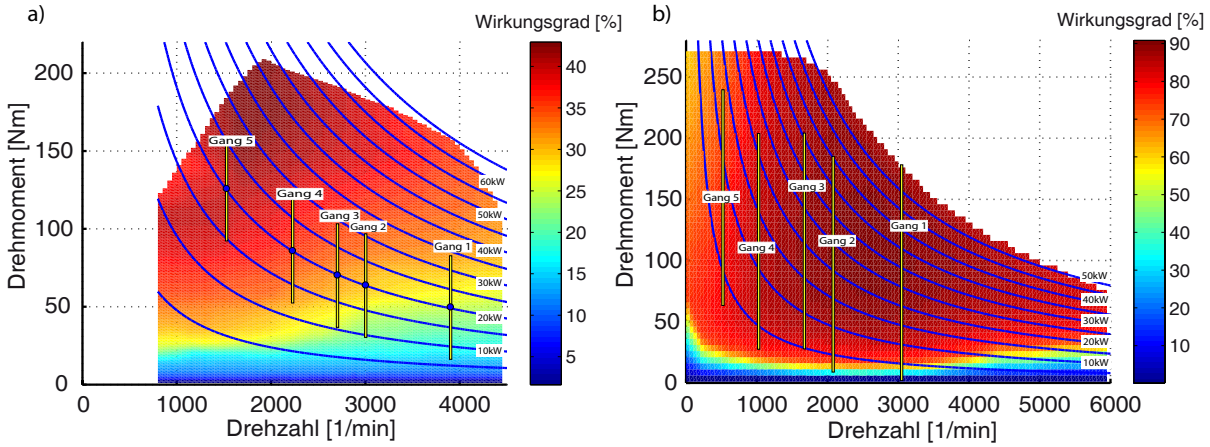



**Abbildung 3.3.1:** *Motor- und Generatorkennfelder für die Fahrzeugmodellierung, (a) 66 kW Verbrennungsmotor , (b) Motorkennfeld einer 50 kW Synchronmaschine*

### 3.3.2 Geschwindigkeitsregler

Die Regelung des dynamischen Fahrzeugmodells entspricht einem Kaskadenregler, bei dem in der äußeren Schleife durch das Fahrermodell die Wunschgeschwindigkeitstrajektorie auf Basis einer Abstandsregelung generiert wird und in der inneren Schleife die Geschwindigkeitsregelung des Antriebsstranges stattfindet. Für die Geschwindigkeitsregelung wurde ein PI-Regler implementiert, der die Nichtlinearität der Längsdynamik in den einzelnen Modellen ausregelt. Des Weiteren ist die Modellierung eines Bremsreglers notwendig, der die Ist-Geschwindigkeit an die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers bei Verzögerungsvorgängen anpasst.

Hierzu wurde ein Gain-Scheduling-Regler entworfen, der unter Beachtung der Geschwindigkeitsdifferenz Gl. 3.3.1 im nächsten Zeitschritt ein Kompensationsantriebsmoment berechnet Gl. 3.3.2 [45], [90].

$$\Delta v(t) = v_{soll}(t+T) - v_{ist}(t) - T \cdot a(t) \tag{3.3.1}$$

$$M_R(s) = \left( P(g) + \frac{I(g)}{s} \right) \Delta v(s) \tag{3.3.2}$$

Zur Ermittlung der PI-Reglerparameter $I(g)$ und $P(g)$ für den jeweiligen Gang wurde das nichtlineare Fahrzeugmodell um den jeweiligen Arbeitspunkt der Gänge mit Kleinsignalsprüngen beaufschlagt, wobei ein PT1-Streckenverhalten beobachtbar war. Zur Bestimmung der Arbeitspunkte der Gänge wurden die Häufigkeitsverteilungen der Gänge bei verschiedenen Fahrzyklen ermittelt. Auf Basis dieser Daten konnte somit für jede der fünf Getriebeübersetzungen die Parameter der zu regelnden Strecke aufgestellt und die PI-Reglerparameter bestimmt werden. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Reglerdifferenz des Geschwindigkeitsreglers und auf die Tatsache, dass Überschwinger möglichst verhindert werden, gelegt.

Beim zweiten Regler des Fahrzeugmodells handelt es sich um den Bremsregler, welcher die mechanische Bremse eines Fahrzeuges widerspiegelt. Der Bremsregler hat die Aufgabe, das Fahrzeug bei einer zu hohen Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit auf die Soll-Geschwindigkeit abzubremsen. Wichtig hierbei ist, dass es zu keiner gleichzeitigen Betätigung des „virtuellen Gaspedals“ des Fahrzeugmodells und der Bremse kommt, da dies eine unnötige Verbrauchssteigerung zur Folge hätte. Realisiert ist der Bremsregler als PI-Regler nach Gl. 3.3.3.

$$\Delta F_B(s) = \Delta v(s) \cdot \left( P + \frac{I}{s} \right) \tag{3.3.3}$$

## 3.4 Elektrofahrzeug (BEV) / Range Extender (EREV)

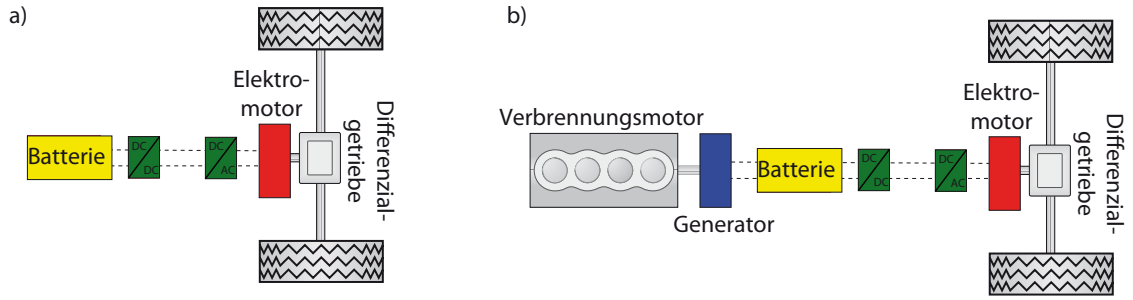



**Abbildung 3.4.1:** *(a) Prinzipieller Aufbau eines Elektrofahrzeuges, (b) Range Extenders*

Abbildung 3.4.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Antriebstranges eines Elektrofahrzeuges (a) sowie eines Range Extenders (b). Beim Range Extender wird die Batterie während der Fahrt mittels einer MGU (Motor-Generator-Einheit) geladen, wodurch die Reichweite des Fahrzeuges vergrößert werden kann. In Untersuchungen [112] konnte gezeigt werden, dass durch einen an die Leistungsanforderungen angepassten Betrieb der MGU eine größere Reichweitenverlängerung erreichbar ist, als wenn die MGU mit konstanter Leistungseinspeisung betrieben wird. Dadurch kann bei Stadtzyklen mit einer 15 kW MGU sowie einem 45 kW Elektromotor eine Reichweitenvergrößerung, im Vergleich zur Einpunktstrategie, um 3,2 % erreicht werden. Positiver Nebeneffekt einer leistungsangepassten MGU ist die Reduktion des Stressfaktors der Batterie um bis zu 59,0 %, was zu einer Lebensdauerverlängerung führt. Der Stressfaktor nach Gl. 3.4.1 schätzt hierbei die mittleren Stromwärmeverluste der Batterie während der Fahrt ab. Ein niedriger Stressfaktor steht somit für eine geringe Belastung der Batterie, was zu einer längeren Lebensdauer führt (Anhang Abb. 10.8.1 ).

$$SF_{Batterie} = \frac{\int_0^T |i^2| \cdot dt}{T} \tag{3.4.1}$$

In [110] wurde für die Elektrofahrzeugkonfiguration untersucht, welche Auswirkungen eine Kombination von Doppelschichtkondensatoren mit modernen Batterien für den Stressfaktor sowie die Reichweite haben Abb. 3.4.2 . Hierbei konnte ermittelt werden, dass Reichweitensteigerungen zwischen 3,0-6,0 % möglich sind, wobei eine Stressreduktion der Batterie von bis zu 41,0 % realistisch ist. Dies ist dadurch erreichbar, da hohe Stromspitzen, die vor allem während starken Beschleunigungs- bzw. Rekuperationsphasen auftreten, durch die Supercaps abgefangen werden. Dadurch kann der Batteriestrom während der Fahrt in einem relativ konstanten Toleranzband gehalten werden, was zu einer Stressreduktion der Batterie führt. Gerade für NiMh Batterien konnte eine Steigerung der Reichweite durch die Ergänzung um Supercaps um bis zu 5,0 % für Überlandzyklen ermittelt werden. LiFePo4 Batterien erzielen jedoch geringere Reichweiten. Der Grund hierfür liegt in dem ohnehin schon sehr hohen Wirkungsgrad des Batterietyps. Die weitere Erhöhung des Wirkungsgrads kompensiert in diesem Fall nicht das höhere Gewicht, welches aufgrund der Supercaps gegeben ist.

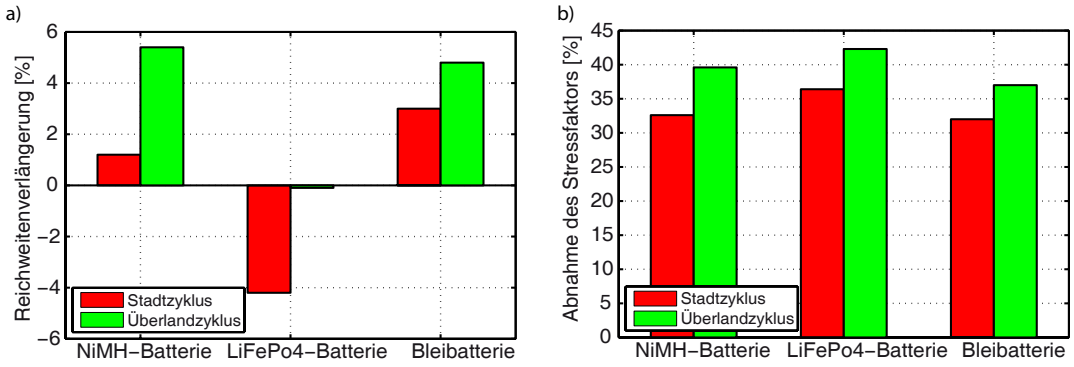



**Abbildung 3.4.2:** *(a) Reichweitenverlängerung des Elektrofahrzeuges durch Supercapunterstützung, (b) Stressfaktorverringerung durch Supercapunterstützung bei verschiedenen Batterietypen*

### 3.4.1 Verbrauchsauswertung

Da der Fokus dieser Arbeit auf der Betrachtung des Energieverbrauchs unter realistischen Fahrbedingungen liegt, hat die Verbrauchsauswertung das Ziel, die Energieverbrauchswerte der modellierten Fahrzeugmodelle mit Energieverbrauchsangaben laut Hersteller, von vergleichbar motorisierter Fahrzeuge, zu vergleichen. Für die Verbrauchsberechnungen wurden sämtliche Werte auf eine Strecke von 100 Kilometern skaliert. Der Vergleich erfolgt am synthetischen NEFZ-Zyklus sowie aus der Mittelwertbildung von vier selbst aufgezeichneten realen Fahrzyklen. Diese Fahrzyklen enthalten sowohl Stadt- und Überlandfahrten als auch eine Autobahnfahrt. In Abb. 3.4.3 ist hierzu der Soll- und Ist-Geschwindigkeitsverlauf des Batteriefahrzeugmodells mit einer Motorisierung von 50 kW zu sehen. Wie zu erkennen ist, kommt es beim NEFZ-Zyklus zu einem maximalen Regelfehler von 1 km/h.

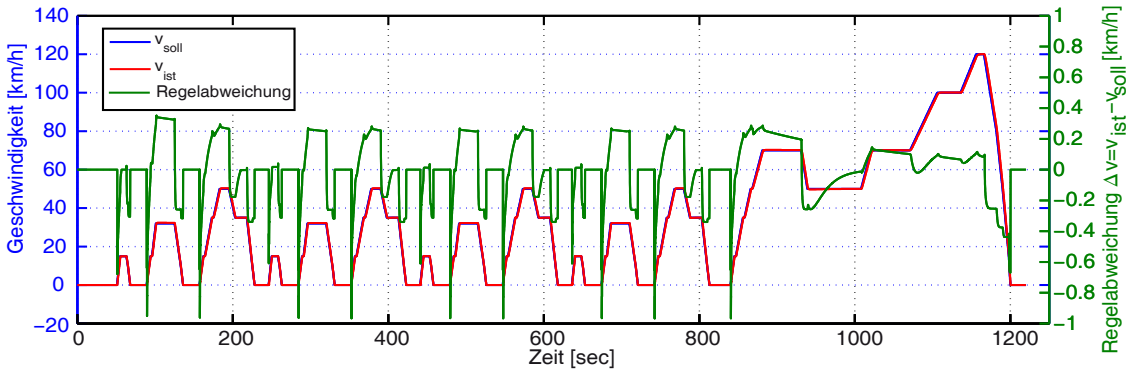



**Abbildung 3.4.3:** *Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsverlauf (rot) sowie Regelabweichung (grün) des Elektrofahrzeuges beim NEFZ-Zyklus*

Im Batteriestrom Abb. 3.4.4 (a) sind die negativen Ströme während den Rekuperationsphasen bei den Verzögerungsvorgängen zu sehen, welche sich auch in einem Anstieg des Ladezustandes (SOC) der Batterie widerspiegelt. In Abb. 3.4.4 (b) ist außerdem die mechanische Bremskraft (rot) sowie die generatorische Bremskraft (blau) dargestellt. Um möglichst viel Energie während des Bremsvorgangs rekuperieren zu können, ist es wünschenswert, die mechanische Bremse so wenig wie möglich zu betätigen. Wie zu erkennen ist, kommt die mechanische Bremse beim NEFZ-

Zyklus nur sehr wenig zum Einsatz. Sämtliche Ergebnisse für die realen Zyklen sind im Anhang in Abb. 10.6.1 und Abb. 10.6.2 zu finden.

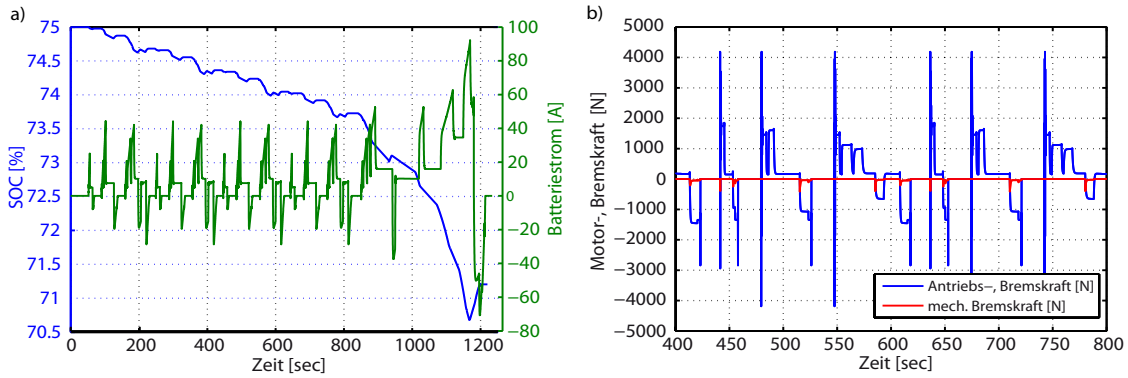



**Abbildung 3.4.4:** *Batterieladezustandsverlauf (SOC), (a) Batteriestrom, (b) generatorische und mechanische Bremskraft beim NEFZ-Zyklus*

Tabelle 3.4.1 und Tab. 3.4.2 vergleichen die Verbrauchswerte der modellierten Elektrofahrzeuge mit den Herstellerangaben ähnlich motorisierter Fahrzeuge. Insgesamt lässt sich eine Tendenz eines etwas geringeren Energieverbrauchs der modellierten Fahrzeuge erkennen. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Verbrauchswerte der modellierten Fahrzeuge im Rahmen dieser Arbeit ohne Bordnetzlast erstellt wurden. Wie Kap. 4.1 zeigt, sind die Verbraucher des Bordnetzes ein weiterer wichtiger Faktor für die Verbrauchsberechnungen. Die detaillierten Fahrzeugdaten aller modellierten Fahrzeuge finden sich im Anhang in Kap. 10.1.

**Tabelle 3.4.1:** *Verbrauchsangaben der modellierten / betrachteten Elektrofahrzeuge*

Modellierte Fahrzeuge

| Typ/Leistung [-/ kW] | Batteriekapazität [kWh] | Energieverbrauch [kWh/100 km] | |
|---|---|---|---|
| | | NEFZ | realer Zyklus |
| 37 kW | 28,0 | 7,3 | 8,6 |
| 50 kW | 28,0 | 9,4 | 11,7 |
| 80 kW | 28,0 | 12,6 | 15,9 |
| 100 kW | 28,0 | 15,0 | 16,0 |

**Tabelle 3.4.2:** *Verbrauchsangaben vergleichbar motorisierter Elektrofahrzeuge laut Hersteller*

Industriefahrzeuge

| Typ/max. Leistung [-/ kW] | Batteriekapazität [kWh] | Energieverbrauch [kWh/100 km] |
|---|---|---|
| Smart fortwo electric drive / 35-55 [37] | 17,6 | 12,1 |
| Citroen C-Zero / 49 [32] | 16,0 | 13,5 |
| VW Golf Blue e-motion / 85 [142] | 26,5 | 17,6 |

## 3.5 Parallel-Hybridfahrzeug (PHEV)

Abbildung 3.5.1 zeigt den strukturellen Aufbau eines Parallelhybrids. Prinzipiell gibt es für Parallelhybride vier verschiedene Antriebsstrangstrukturen. Die hier gewählte Struktur besteht aus zwei Kupplungen. Durch das Öffnen von Kupplung Nr. 2 ist es möglich, den Verbrennungsmotor durch den Elektromotor zu starten. Während den Rekuperationsphasen kann durch das Öffnen von Kupplung Nr. 1 die gesamte kinetische Energie an den Generator übertragen werden, ohne dass Verluste durch das Schleppmoment des Verbrennungsmotors entstehen. Außerdem ist mit geöffneter Kupplung Nr. 1 ein rein elektrischer Betrieb möglich.

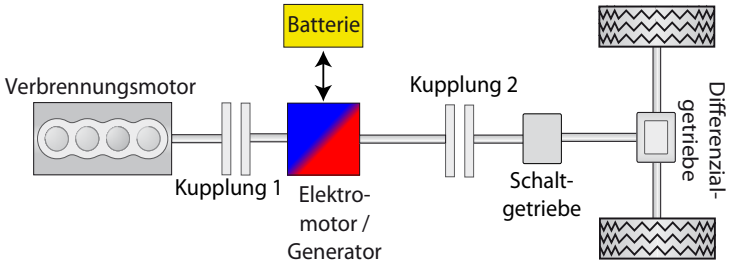



**Abbildung 3.5.1:** *Prinzipieller Aufbau eines Parallel-Hybridfahrzeuges*

### 3.5.1 Betriebsstrategie

Durch die Anordnung des Verbrennungsmotors sowie des Elektromotors auf derselben Antriebswelle ist es möglich, die Betriebspunkte in den jeweiligen Gängen (Abb. 3.3.1 (a), (b)) der Motoren senkrecht zu verschieben. Dadurch kann eine Verschiebung der Betriebspunkte zu besseren Wirkungsgradbereichen der einzelnen Aggregate erreicht werden, unter der Randbedingung, dass die Summe der Antriebsmomente gleich dem angeforderten Antriebsmoment entspricht. Außerdem ist es möglich, durch eine Lastpunktanhebung, sprich durch eine zusätzliche Belastung des Verbrennungsmotors durch den Elektromotor, die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors hin zu höheren Wirkungsgraden zu verschieben. Für das hier implementierte Parallel-Hybridfahrzeug wurde die kostenfunktionsbasierte Betriebsstrategie nach [125] implementiert. Diese entscheidet aufgrund des Ladezustandes der Batterie (SOC) und einer Kostenfunktion über die Verteilung der angeforderten Leistung zwischen Verbrennungsmotor und Elektromotor Gl. 3.5.1.

$$K_{ges} = k_v \cdot P_V + k_E \cdot P_E \tag{3.5.1}$$

Dadurch erfolgt vermehrt eine elektrische Unterstützung des Verbrennungsmotors mithilfe des Elektromotors, wenn der Ladezustand der Batterie hoch ist. Mit fallendem Ladezustand steigen die elektrischen Kosten, was zu einer Verteuerung der elektrischen Energie führt, wodurch verstärkt der Verbrennungsmotor zum Einsatz kommt. In Abb. 3.5.3 (b) ist diese Drehmomentaufteilung zwischen Elektromotor und Verbrennungsmotor zu erkennen. Der Elektromotor kommt in erster Line bei geringen Drehmomentanforderungen, sprich beim Anfahren oder bei geringen Geschwindigkeiten, zum Einsatz. Da ein häufiges Wechseln des Gangs in der Theorie geringfügig bessere Betriebszustände erlaubt, in der Realität jedoch eine kurzzeitige Unterbrechung der Antriebskraft und einen damit verbundenen Geschwindigkeitseinbruch bedeutet, wurde ebenfalls wie in [126] empfohlen, eine Gear-Hunting Unterdrückung realisiert.

### 3.5.2 Verbrauchsauswertung

Abbildung 3.5.2 zeigt die Soll- und Ist-Geschwindigkeit des Parallelhybrids sowie die Regelabweichung $\Delta v$. Für die Verbrauchsauswertung Abb. 3.5.3 (a) wurde der SOC so eingestellt, dass der Ladezustand zu Beginn der Fahrt identisch mit dem End-SOC ist. Dadurch ist es ausreichend, lediglich den Dieselkraftstoffverbrauch in die Verbrauchsberechnung mit einzubeziehen. In Tab. 3.5.1 sind die Verbrauchswerte für eine Voll- und Mild-Hybrid Variante aufgeführt.

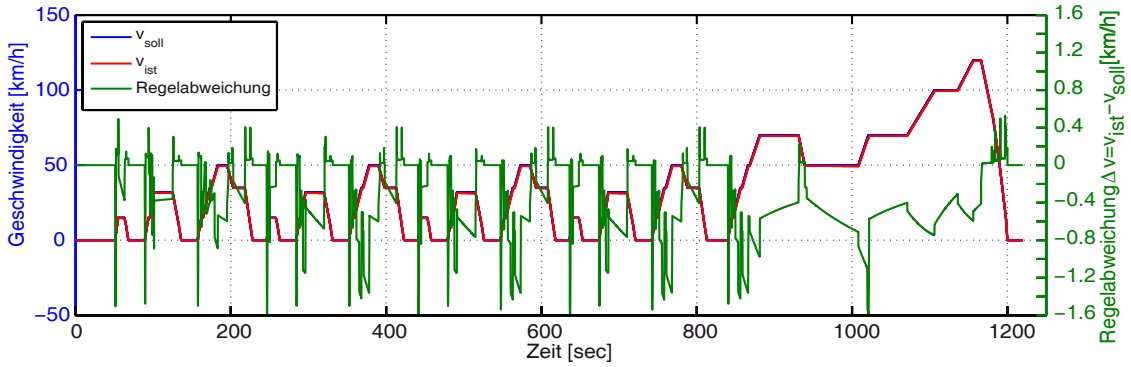



**Abbildung 3.5.2:** *Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsvergleich (rot) sowie Regelabweichung des PHEV beim NEFZ-Zyklus*

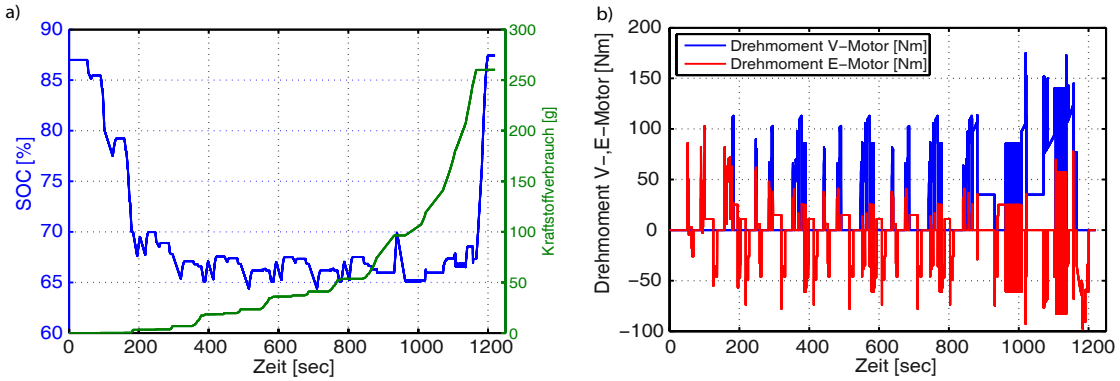



**Abbildung 3.5.3:** *(a) Batterieladezustandsverlauf (SOC), Batteriestrom, (b) Aufteilung des angeforderten Drehmoments zwischen V-Motor und E-Motor*

**Tabelle 3.5.1:** *Ermittelte Verbrauchswerte von Parallel-Hybridfahrzeugen mit unterschiedlicher Motorisierung*

Modellierte Fahrzeuge

| Typ/Leistung V-Motor, E-Motor [-/ kW/ kW] | Batteriekapazität [Wh] | Kraftstoffverbrauch [l/ 100km] | |
|---|---|---|---|
| | | NEFZ | realer Zyklus |
| Voll-Hybrid / 66/30 | 500,0 | 2,8 | 3,4 |
| Mild-Hybrid / 66/6 | 500,0 | 3,1 | 3,7 |

Vergleichbare Verbrauchsangaben von Herstellern sind der Toyota Yaris mit 4,2 l/100 km sowie der Honda Insight mit einem Verbrauch laut Hersteller von 4,1-4,3 l/100 km [65].

## 3.6 Konventionelle Fahrzeuge (ICEV)

Abbildung 3.6.1 zeigt die klassische vergleichsweise einfache Struktur eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor, bestehend aus einem Verbrennungsmotor sowie einer Kupplung und einem Schalt- und Differenzialgetriebe.

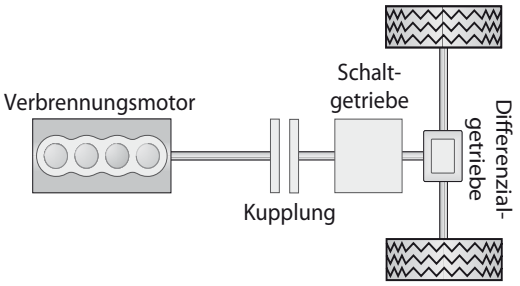



**Abbildung 3.6.1:** *Prinzipieller Aufbau eines konventionellen Fahrzeuges*

Abbildung 3.6.2 zeigt, dass das modellierte Fahrzeug der Soll-Geschwindigkeitstrajektorie gut folgt und es zu einer maximalen Regelabweichung auf dem NEFZ-Zyklus von |1,4 km/h| kommt. Wie im Kraftstoffverbrauch Abb. 3.6.3 (a) zu erkennen ist, kommt es während den Standphasen des Fahrzeuges zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs bedingt durch den Leerlaufverbrauch, welcher mit 0,14 g/s angesetzt wurde. Für die hier vorliegende 66 kW Dieselmotorisierung ergibt sich ein Kraftstoffverbrauch von 4,2 l/100 km für den NEFZ-Zyklus. Für den Mittelwert aus vier realen Zyklen ergibt sich ein Verbrauchswert von 4,4 l/100 km. Dieser Verbrauchswert deckt sich gut mit den Herstellerangaben vergleichbar motorisierter Dieselfahrzeuge Tab. 3.6.1.

Abbildung 3.6.3 (b) zeigt die Motor- sowie die Bremskraft, welche an die Räder übertragen wird. Für eine verbrauchsarme Fahrweise ist ein wichtiges Kriterium, dass Bremse und Gas nicht gleichzeitig betätigt werden. Wie in der Abb. 3.6.3 (b) zu sehen ist, ist dies der Fall. Weiterhin haben beide Stellgrößen keine große Oszillationen, was für einen gleichmäßigen und moderaten Einsatz von Gas- und Bremspedal spricht.

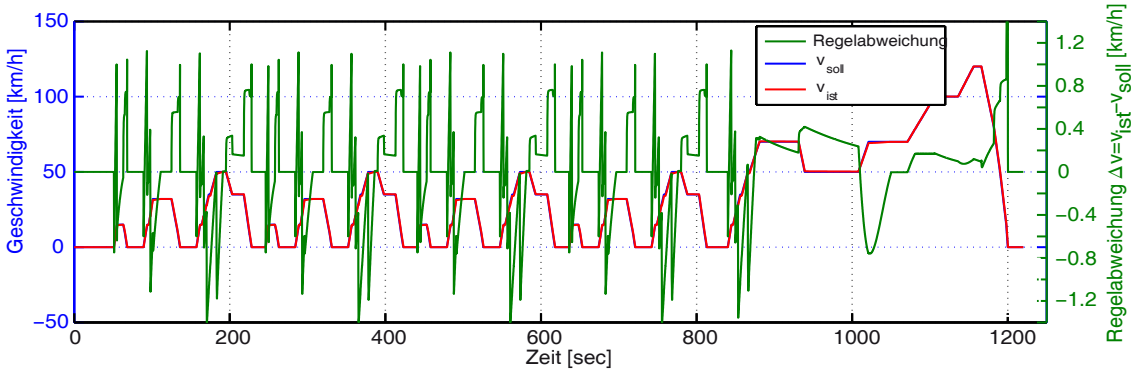



**Abbildung 3.6.2:** *Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsverlauf (rot) sowie Regelabweichung des Elektrofahrzeuges beim NEFZ-Zyklus*

Damit die Kraftstoffverbrauchswerte besser mit denen des Hybrids sowie dem Elektrofahrzeug verglichen werden können, wurden für spätere Berechnungen sämtliche Dieselverbrauchsangaben in Kilowattstunden mit dem Heizwert von Diesel (11,8 kWh/ kg) umgerechnet.

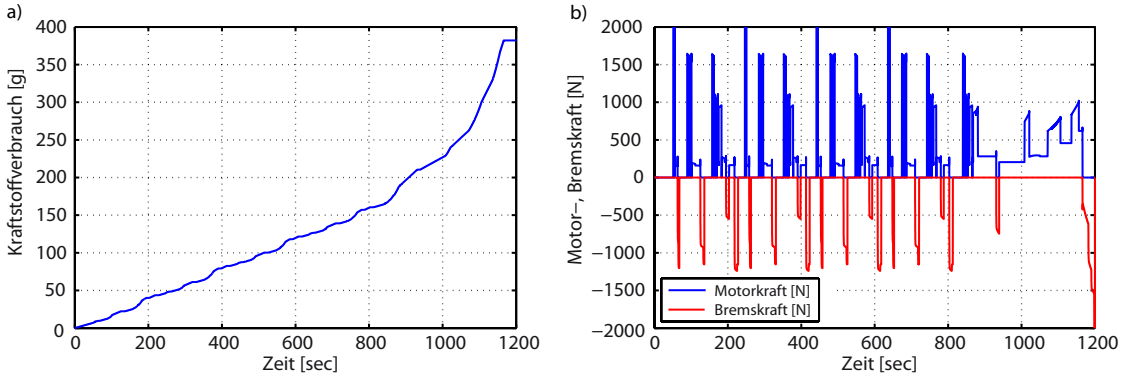



**Abbildung 3.6.3:** *(a)Kraftstoffverbrauch konventionelles Fahrzeug, (b) Motor-, Bremskraft für den NEFZ-Zyklus*

**Tabelle 3.6.1:** *Vergleich Kraftstoffverbrauch Fahrzeugmodelle mit den Herstellerangaben ähnlich motorisierter Fahrzeuge*

| Modellierte Fahrzeuge | | | Industriefahrzeuge | |
|---|---|---|---|---|
| Leistung [kW] | NEFZ [l/100 km] | realer Zyklus [l/100 km] | Typ / Leistung [-/ kW] | städtisch/außerorts/insgesamt [l/100 km] |
| 40 | 3,4 | 3,3 | Renault Twingo dci 65 *eco*$^2$ /47 | - / - / 4,3 [11] |
| 66 | 4,2 | 4,4 | Audi A3 1.6 TDI /66 | 5,6 / 3,7 / 4,4 [10] |
| 164 | 8,6 | 8,5 | Audi A8 3.0 TDI quattro / 171 | 12,0 / 6,4 / 8,4 [13] |

Für die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor wurde ein Gangwahlalgorithmus implementiert, welcher den Gang wählt mit dem maximalen Wirkungsgrad. Hierbei wurde ebenfalls eine Gear-Hunting Unterdrückung realisiert, um zu häufiges Wechseln des Gangs aufgrund geringfügig besserer Betriebspunkte zu vermeiden. Die blauen Punkte Abb. 3.3.1 (a) markieren eine geforderte Leistung von 20 kW. Diese angeforderte Leistung kann mithilfe der fünf Gänge in fünf mögliche Betriebspunkte auf der 20 kW Leistungshyperbel verschoben werden, um so einen besseren Wirkungsgradbereich des Verbrennungsmotors erreichen zu können.

Tabelle 10.1.4, im Anhang 10.1 zeigt alle Fahrzeugtypen mit ihrer Motorisierung im Überblick die in ULTraSim implementiert sind. Wie die Tabelle zeigt, ist außerdem ein Busmodell implementiert, mit dem individuelle Busstrecken abgefahren werden können. Hierbei sind dynamische Massevariationen und Wartezeiten an Bushaltestellen möglich. Dies ermöglicht zusätzliche Betriebsstrategien für serielle Hybrid Busse zu implementieren und auf Funktionalität im Verkehrsfluss zu testen [108].

## 3.7 Zusammenfassung

Durch die Integration der in diesem Kapitel vorgestellten unterschiedlichen submikroskopischen Fahrzeugmodellen sowie dem in Kapitel 2 vorgestellten Verkehrssimulator, steht somit ein Simulationstool zur Verfügung, welches detaillierte Analysen zukünftiger und aktueller Fahrzeugpopulationen ermöglicht. Hierzu wurden die Modellierung und Verifizierung der einzelnen Fahrzeugmodelle vorgestellt, auf deren Basis zukünftige Kraftstoff- und Energieverbrauchsberechnungen basieren.

# 4 Kraftstoff- / Energieverbrauchsanalyse bei hohen Verkehrsdichten

In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse des Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs von Fahrzeugflotten bei unterschiedlichen Verkehrszuständen. Hierzu wurden in Abschnitt 4.1 die Auswirkungen des Bordnetzes auf konventionelle Fahrzeuge sowie Elektrofahrzeuge bei unterschiedlichen Lastszenarien und Verkehrszuständen untersucht. In Abschnitt 4.2 erfolgt anhand eines Beispielszenarios, welche Auswirkungen nicht optimale Ampelschaltungen und daraus resultierende Stop-and-Go-Wellen auf den Kraftstoffverbrauch haben und welche Verbrauchssteigerungen daraus resultieren. In Abschnitt 4.3 werden schließlich für unterschiedliche Verkehrsdichten bzw. Verkehrsflüsse der Energieverbrauch von verschiedenen Fahrzeugtopologien analysiert. Diese Verbrauchswerte als Funktion der Verkehrsdichte bilden hierbei eine wichtige Grundlage für spätere Überlegungen.

## 4.1 Bordnetzlast

Bei der Entwicklung neuer Fahrzeugmodelle ist die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs ein wichtiges Entwicklungsziel. Durch die Entwicklung immer neuer Fahrerassistenzsysteme zur Verbesserung der aktiven und passiven Sicherheit sowie Komfortsysteme, ist eine zunehmende Anzahl an elektrischen Verbrauchern in modernen Fahrzeugen zu verzeichnen. Schon heute haben moderne Luxusfahrzeuge bis zu 80 elektronische Steuereinheiten an Bord [63], [101], wobei eine zunehmende Elektrifizierung ursprünglich mechanisch angesteuerter Komponenten erfolgt. Dies führt zu einer deutlichen Steigerung der elektrischen Last des Bordnetzes mit immer größer werdenden Lastspitzen von bis zu 2 kW [99]. Da dies eine hohe Belastung für das Bordnetz darstellt, spielt die Spannungsstabilität [77] und ein intelligentes Energiemanagement zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, bedingt durch das elektrische Bordnetz, eine immer wichtigere Rolle [76].

Bei konventionellen Fahrzeugen werden in der Regel sämtliche Nebenaggregate über Riemen vom Verbrennungsmotor angetrieben. Hierzu zählen unter anderem Pumpen für den Kühl- und Ölkreislauf oder die Klimaanlage. Die Versorgung des elektrischen Bordnetzes wird bei einem konventionellen Fahrzeug über eine 12 V Batterie sowie den Klauenpolgenerator sichergestellt. Der Klauenpolgenerator ist hierzu an den Verbrennungsmotor angeflanscht und belastet diesen durch ein zusätzliches Lastmoment je nach geforderter elektrischer Leistung. Durch eine Start-Stopp-Automatik können hierbei je nach Fahrzyklus bis zu 8,0 % zusätzlich eingespart werden [25]. Gleichzeitig führt eine Start-Stopp-Automatik zu einer stärkeren Belastung des Bordnetzes, da sämtliche elektrische Verbraucher, während der Motor abgestellt ist, nicht über den Klauenpolgenerator, sondern ausschließlich über die Fahrzeugbatterie versorgt werden müssen. Aufbauend auf die Arbeiten [86] und [26], in denen ein Modell eines 2,64 kW Klauenpolgenerators (Valeo12V220A) erstellt und validiert sowie wichtige Bordnetzverbraucher modelliert und ver-

messen wurden, wurden die Fahrzeuge des ULTraSim Verkehrssimulators um eine Bordnetzsimulation erweitert. Elektrische Verbraucher können nach ihrer Einschaltdauer sowie nach ihrem physikalischen Verhalten klassifiziert werden [105], [144]. Hierbei erfolgt eine Einteilung nach der Einschaltdauer in Dauer-, Langzeit- sowie Kurzzeitverbraucher. Außerdem lässt sich das physikalische Verhalten in statische, dynamische und stochastische Verbraucher unterteilen. Zu den Bordnetzverbrauchern eines konventionellen Fahrzeuges zählen zum einen Dauerverbraucher wie die Kraftstoffpumpe sowie das Steuergerät und Langzeitverbraucher wie der Radio, die Front-, Rücklichter, der Kühllüfter und die Innenraumlüftung. Zum anderen Kurzzeitverbraucher wie Bremslichter, Blinker, Front- und Heckscheibenwischer oder die Heckscheibenheizung. Den größten Anteil mit ca. 71,0 % an der Bordnetzlast haben bei konventionellen Fahrzeugen die Elektromotoren, den zweit größten Anteil mit ca. 12,0 % bilden die Leuchtmittel [82].

Bei Elektrofahrzeugen wird hingegen die Energie für das 12 V-Bordnetz mittels eines DC/DC-Wandlers direkt aus der Hochvoltbatterie versorgt, wie Abb. 4.1.1 (b) zeigt. Dies hat zur Folge, dass eine hohe Bordnetzlast die Reichweite eines Elektrofahrzeuges zusätzlich reduziert. Vor allem im Winter, kann es bedingt durch eine elektrische Innenraumheizung zu einer Reichweitenreduzierung von 50-60 % kommen [4]. Da der Elektromotor eines Elektrofahrzeuges lediglich eine sehr geringe Abwärme bedingt durch einen hohen Wirkungsgrad erzeugt, ist es notwendig, die Heizleistung zur Aufheizung des Innenraumes elektrisch bereitzustellen. Für die Heizleistung ist eine Leistung von 4-6 kW [25] erforderlich. Da sich diese hohe Leistungsanforderung vor allem bei tiefen Temperaturen negativ auf die Lebensdauer der Batterie und die Reichweite des Fahrzeuges auswirkt, gibt es bereits Konzepte, die Beheizung und Kühlung des Innenraumes durch Zusatzaggregate zu ermöglichen, welche mittels Bioethanol betrieben werden [146]. Andere Verbraucher, wie die Kraftstoffpumpe oder die Zündung, entfallen bei der Simulation des Bordnetzes für Elektrofahrzeuge hingegen.

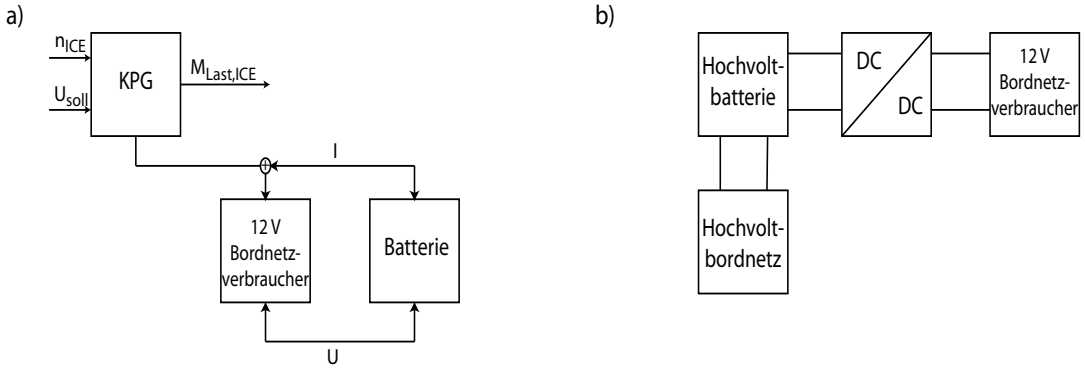



**Abbildung 4.1.1:** *Simulationsmodell elektrisches Bordnetz, (a) konventionelles Fahrzeug, (b) Elektrofahrzeug*

Für die Analyse der Auswirkungen der Bordnetzlast auf den Energieverbrauch wurde ein Simulationsmodell eines Elektrofahrzeuges sowie eines konventionellen Fahrzeuges mit Bordnetz aufgebaut Abb. 4.1.1 (a). Außerdem wurden zwei Lastszenarien generiert, siehe Anhang Abb. 10.7.1 , welche das Bordnetz des Fahrzeuges für den Sommer bzw. Winter beschreiben. Die Ansteuersignale für Dauerverbraucher, wie die Zündung, die Kraftstoffpumpe und das Steuergerät sowie die Ansteuersignale für Kurzzeitverbraucher, wie Bremslicht und Blinker werden hierzu direkt aus dem Fahrzeugmodell generiert. Weitere Verbraucher, wie Front- und Heckscheibenwischer, Fahrzeugbeleuchtung oder die Innenraumlüftung und Innenraumheizung werden über Triggersignale je nach Lastszenario angesteuert.

### 4.1.1 Kraftstoff- und Energieverbrauchsanalyse bei Berücksichtigung der Bordnetzlast

Abbildung 4.1.2 zeigt den Kraftstoffverbrauch (a) eines konventionellen Fahrzeuges bzw. den Ladezustand der Batterie (b) eines Elektrofahrzeuges über der Strecke. Analysiert wurde eine Fahrt mit niedrigem Verkehrsaufkommen sowie eine Fahrt mit sehr hohem Verkehrsaufkommen, so dass sich in dem hier gezeigten Fall ein zeitlicher Anstieg, durch das erhöhte Verkehrsaufkommen, der Fahrzeit von 52,0 % ergibt. Auch wurde der Energie- und Kraftstoffverbrauch für die oben erwähnten Winter- und Sommerlastszenarien untersucht. Ohne Betrachtung der Bordnetzlast ergibt sich bei einem hohen Verkehrsaufkommen im Vergleich zu einem geringen Verkehrsaufkommen eine Steigerung des Kraftstoffverbrauchs von 23,0 % für ein konventionelles Fahrzeug und für ein Elektrofahrzeug von 17,5 %. Betrachtet man das Sommerlastprofil, so ist eine Steigerung des Kraftstoffverbrauchs bedingt durch das hohe Verkehrsaufkommen von 24,9 % beim konventionellen Fahrzeug und für das Elektrofahrzeug von 18,4 % zu erkennen. Hierbei fällt die Verbrauchssteigerung des konventionellen Fahrzeuges höher aus, da zusätzlich während den Standzeiten der Leerlaufverbrauch anfällt. Verfügt das Fahrzeug über eine Start-Stopp-Automatik, die den Verbrennungsmotor während der Standzeiten abschaltet, so steigt der Verbrauch um 16,3 % an.

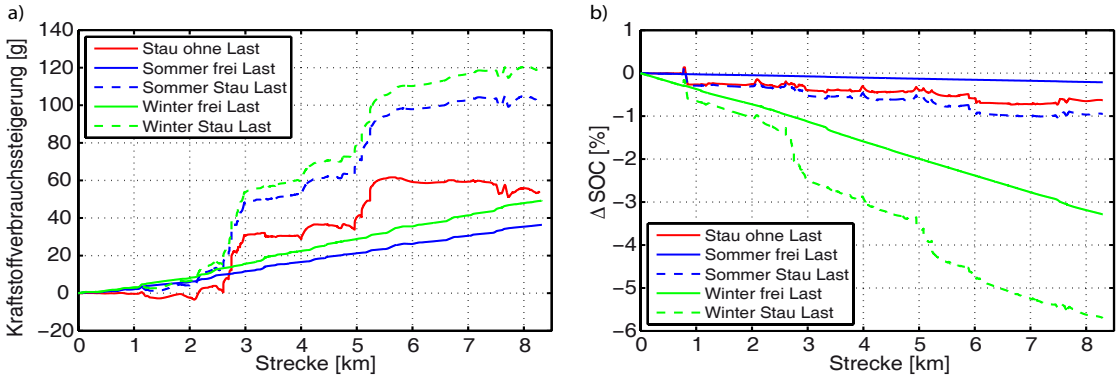



**Abbildung 4.1.2:** *Kraftstoffverbrauchsteigerung mit verschiedenen Last- sowie Verkehrsszenarien normiert auf eine freie Fahrt ohne Last, (a) konventionelles Fahrzeug, (b) Ladezustand der Batterie eines Elektrofahrzeuges*

Betrachtet man hingegen den Bordnetzlastfall für ein Winterszenario, so ist für das konventionelle Fahrzeug ein Anstieg von ebenfalls 24,9 %, im Vergleich zur freien Fahrt, zu verzeichnen. Beim Elektrofahrzeug ist der Anstieg mit 34,2 % deutlich höher. Der Grund hierfür liegt darin, dass die elektrische Heizung im Winter bei langen Standzeiten einen hohen Energieverbrauch hat. Diese Steigerungen des Energieverbrauchs entstehen allein aufgrund hoher Verkehrsdichten und der damit verbundenen längeren Fahrzeit.

Um aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich des Kraftstoff- und Energieverbrauchs bei geringen und hohen Verkehrsdichten zu erhalten, wurden insgesamt 13 verschiedene Routen verglichen. Hierzu wurden die Routen bei einem geringen Verkehrsaufkommen, was einer freien Fahrt entspricht und bei einem hohen Verkehrsaufkommen analysiert. Beim hohen Verkehrsaufkommen gab es eine Steigerung der Fahrzeit von 60-70 %. Bei allen untersuchten Routen liegt die durchschnittliche Fahrzeitsteigerung bei 62,8 %.

Abbildung 4.1.3 (a) zeigt die Kraftstoffverbrauchssteigerung des konventionellen Fahrzeuges mit Betrachtung des Bordnetzes bei freier Fahrt sowie bei Stau. Sämtliche Werte wurden auf ein Fahrzeug ohne Bordnetzlast bezogen. Außerdem wurde differenziert, ob das Fahrzeug über ei-

ne Start-Stopp-Automatik verfügt und dadurch bei einem stehenden Fahrzeug kein Leerlaufverbrauch anfällt. Da bei einer ungehinderten Fahrt fast keine Standzeiten auftreten, fallen die Ergebnisse für die Untersuchung mit und ohne Leerlaufverbrauch nahezu gleich aus. Zu erkennen ist, dass im Winter die Steigerung des Energieverbrauchs, im Vergleich zum Sommer, bei einer freien Fahrt um 4,9 % höher liegt. Dies liegt daran, dass im Winter die Bordnetzlast (siehe Anhang Abb. 10.7.1 (a)) im Durchschnitt um 285 W höher liegt als im Sommer. Dafür verantwortlich sind zusätzliche Verbraucher, wie die Heckscheibenheizung, die Beleuchtung oder die Scheibenwischer. Interessant ist auch der Vergleich zum hohen Verkehrsaufkommen. Hier sind deutliche Unterschiede zu erkennen, ob das Fahrzeug über eine Start-Stopp-Automatik verfügt oder nicht. So liegen die Verbrauchswerte ohne Start-Stopp-Automatik im Durchschnitt um 10,0 % höher als mit Start-Stopp-Automatik. Vergleicht man die Verbrauchssteigerung mit Bordnetzlast und ohne Start-Stopp-Automatik, so steigt diese im Sommer von 16,1 % auf 34,6 % an. Im Winter ist ein Anstieg von 21,1 % auf 40,9 %, durch das höhere Verkehrsaufkommen, zu verzeichnen. Dies entspricht einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs im Winter von 4,5 l/100 km auf 5,3 l/100 km, was einer Steigerung von 17,8 % entspricht.

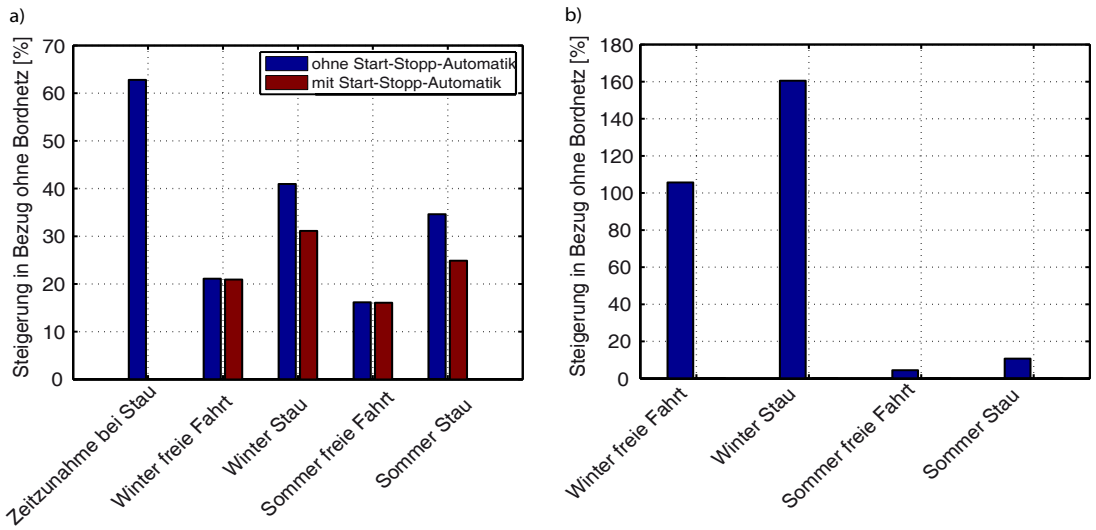



**Abbildung 4.1.3:** *Steigerung des Energieverbrauchs bezogen auf die Verbrauchswerte ohne Bordnetzlast bei niedrigem bzw. hohem Verkehrsaufkommen. (a) Konventionelles Fahrzeug, (b) Elektrofahrzeug*

Betrachtet man die Steigerung für ein Elektrofahrzeug Abb. 4.1.3 (b), so sind die Auswirkungen auf den Energieverbrauch vor allem im Winter deutlicher. Bei einer Fahrt mit niedrigem Verkehrsaufkommen ergibt sich im Sommer, bedingt durch das Bordnetz, lediglich eine Steigerung des Energieverbrauchs um 6,8 %. Bei hohem Verkehrsaufkommen steigt dieser Wert auf 10,7 % an. Dies entspricht einem Energieverbrauch von 12,4 bzw. 12,5 kWh/100 km. Da im Winter bei Elektrofahrzeugen die Wärmeleistung zur Aufwärmung des Fahrzeuginnenraumes nicht aus der Abwärme des Verbrennungsmotors gewonnen werden kann, muss die Leistung von 5 kW elektrisch bereitgestellt werden. Dies bedeutet eine deutlich höhere Belastung der Batterie im Winter, was zur Folge hat, dass der Energieverbrauch bei niedrigem Verkehrsaufkommen um durchschnittlich 105,0 %, bei hohem Verkehrsaufkommen sogar um bis zu 160,0 %, steigt. Die Folge ist, dass der Energieverbrauch pro 100 Kilometer auf bis zu 22 bzw. 28,0 kWh/100 km steigt und dadurch die Reichweite je nach Batteriekapazität um bis zu 50-60 % reduziert wird.

## 4.2 Auswertung des Flottenenergieverbrauchs/ Vergleich BEV, ICEV, PHEV

Für die Analyse des Energieverbrauchs einer Fahrzeugflotte wurde exemplarisch ein Szenario gewählt, bei dem sich ein konstanter Fahrzeugfluss von 800 Fzg/h (insgesamt 430 Fahrzeuge) auf eine signalisierte Kreuzung bewegen. Die Grünphase der Ampelschaltung beträgt 23 Sekunden bei einer Umlaufzeit von 45 Sekunden. Abb. 4.2.1 (a) zeigt die Auswertung des Geschwindigkeitsprofils aller 430 Fahrzeuge über der Strecke. In x-Richtung ist hierzu das Geschwindigkeitsprofil jedes Fahrzeuges über der Strecke aufgetragen. Jeder senkrechte Verlauf in Abb. 4.2.1 entspricht einem Geschwindigkeitsverlauf. Wie zu erkennen ist, kann das Fahrzeug Nummer eins die Kreuzung, welche sich an der Streckenposition 1 650 Meter befindet, ungehindert passieren. Das Fahrzeug mit der Nummer 400 muss mehrere Ampelphasen (insgesamt fünf Stop-and-Go-Wellen) durchqueren, dies ist an den blauen Bereichen mit sehr niedriger Geschwindigkeit zu erkennen. Auch kann aus Abb. 4.2.1 (a) abgelesen werden, dass sich ein Stau mit einer maximalen Länge von 800 Metern hinter der Lichtsignalanlage aufbaut.

Da alle Fahrzeuge submikroskopisch simuliert werden, ist es nun möglich, jede beliebige Größe des Antriebsstranges der Fahrzeuge im Flottenverband zu vergleichen. In Abb. 4.2.1 (b) und (c) ist der Energieverbrauch in kWh einer Flotte von Elektrofahrzeugen sowie konventionellen Fahrzeugen aufgetragen. Hierzu wurde der Kraftstoffverbrauch mit dem Heizwert von Diesel (11,8 kWh/kg) in kWh umgerechnet. Wie beim Energieverbrauch der konventionellen Fahrzeuge (c) zu erkennen ist, steigt der Energieverbrauch der hinteren Fahrzeuge in der Flotte (200-430), bedingt durch die Stop-and-Go-Wellen, deutlich an. Vergleicht man dies zu (b) mit Elektrofahrzeugen, so ist zu erkennen, dass durch die Rekuperationsphasen (grün markierte Bereiche) die Steigerung des Energieverbrauchs deutlich geringer ausfällt. Als weiterer Vergleich ist der Verbrauch des Verbrennungsmotors einer parallel hybriden Antriebsstruktur im Anhang Abb. 10.7.2 dargestellt. Abbildung (a) beschreibt hierzu den Energieverbrauch des Verbrennungsmotors, wobei (b) den Energieumsatz der Batterie darstellt. Wie zu erkennen ist, erfolgt bei den ersten Fahrzeugen (Nr. 1-200) im Streckenbereich von 1 000 bis 1 500 Meter eine elektrische Unterstützung des Verbrennungsmotors. Je weiter sich der Stau aufbaut, desto mehr nimmt die elektrische Unterstützung ab (Fahrzeug Nr. 200-430).

Weiter wurde der Gesamtenergieverbrauch der Flotte für dieses Szenario untersucht. In Abb. 4.2.2 ist hierzu der Energieverbrauch aller Fahrzeuge in der Flotte in Bezug zum ersten Fahrzeug aufgetragen. Hierbei steigt der Energieverbrauch bei den konventionellen Fahrzeugen um bis zu 70,0 % an. Bei der parallel hybriden Antriebsstruktur bzw. bei den Elektrofahrzeugen ist ein deutlich geringerer Anstieg von 15-20 % zu erkennen.

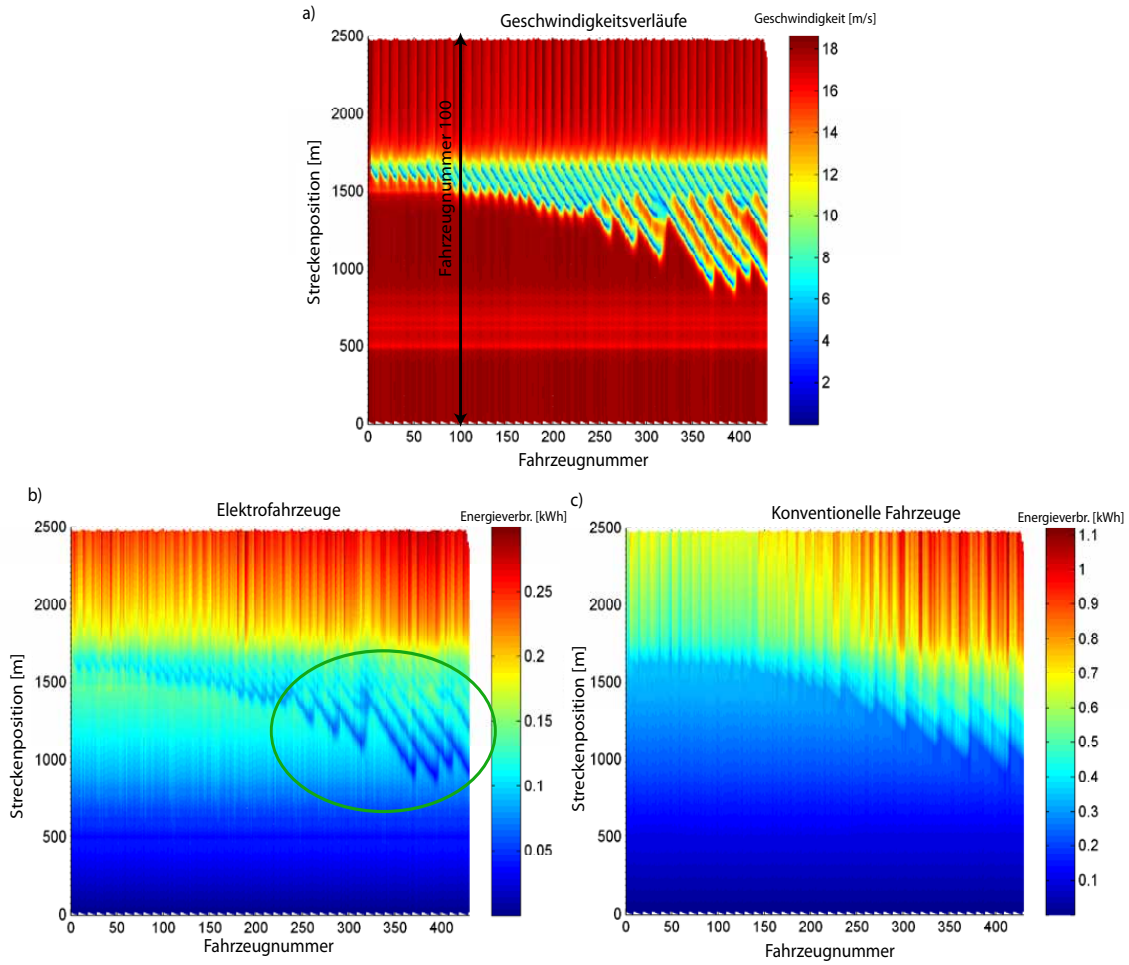



**Abbildung 4.2.1:** *Energieverbrauch [kWh] einer Fahrzeugflotte bei Annäherung an eine Ampel, dargestellt ist der Energieverbrauch aller 430 Fahrzeuge in der Flotte über der Streckenposition, (a) Geschwindigkeitsverlauf, (b) Elektrofahrzeuge, (c) konventionelle Fahrzeuge*

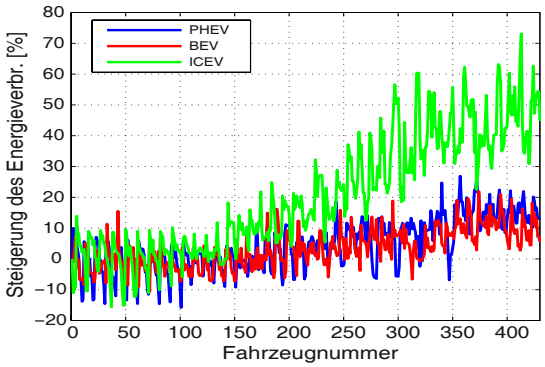



**Abbildung 4.2.2:** *Vergleich des Anstiegs des Energieverbrauchs der Fahrzeugflotte für PHEV, BEV und ICEV in Bezug zum ersten Fahrzeug*

## 4.3 Kraftstoffverbrauch als Funktion der Verkehrsdichte / des Verkehrsflusses

Beim energieoptimierten Fahrzeugrouting ist der Energieverbrauch als Funktion der Verkehrsdichte ein wichtiges Kriterium. Abb. 4.3.1 (a) zeigt den Energieverbrauch, welcher mittels Sensoren in ULTraSim ermittelt wurde, als Funktion der Verkehrsdichte. Für die Betrachtung wurde die Bordnetzlast nicht berücksichtigt. Zunächst ist ein Rückgang des Energieverbrauchs bei konventionellen und parallel hybriden Antriebsstrukturen erkennbar, was durch die Abnahme der Durchschnittsgeschwindigkeit erklärbar ist. Mit steigender Verkehrsdichte steigt der Kraftstoffverbrauch bei konventionellen Fahrzeugen deutlich stärker an als bei den Parallel-Hybridfahrzeugen. Betrachtet man konventionelle Fahrzeuge mit Start-Stopp-Automatik, so ist ein Anstieg des Energieverbrauchs vergleichbar mit dem des Parallelhybrids zu verzeichnen. Die Ursache liegt darin, dass bei sehr hohen Verkehrsdichten hauptsächlich Beschleunigungsvorgänge auf sehr geringe Geschwindigkeiten stattfinden, um bei Stauwellen im Verkehr mitfließen zu können. In diesen Bereichen hat der Verbrennungsmotor einen sehr schlechten Wirkungsgrad, was zu einem Anstieg des Energieverbrauchs führt. Der deutliche Anstieg ab 90 Fahrzeuge pro Kilometer bei konventionellen Fahrzeugen ist bedingt durch den Leerlaufverbrauch. Ab dieser Verkehrsdichte herrscht ein ausgeprägter Stau und der Energieverbrauch wird fast ausschließlich über die Höhe des Leerlaufverbrauchs sowie die Verweildauer im Stau bestimmt.

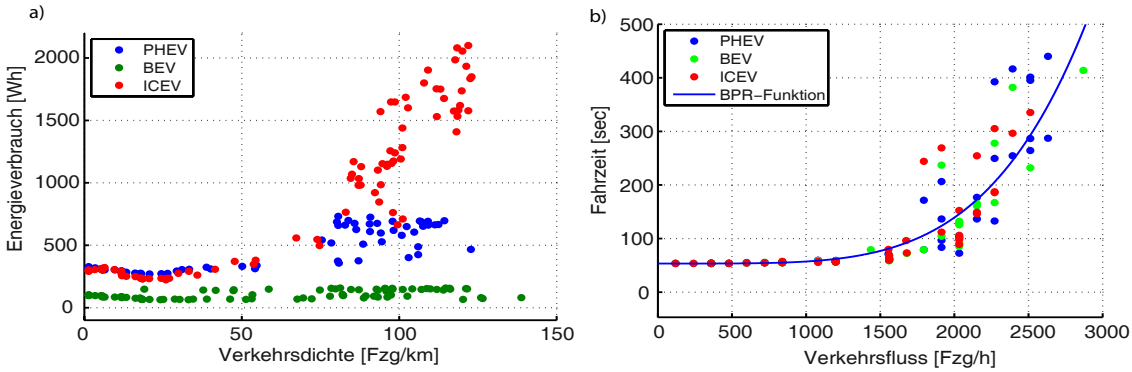



**Abbildung 4.3.1:** *(a) Energieverbrauch für konventionelle Fahrzeuge (mit Start-Stopp-Automatik), Elektrofahrzeuge und Hybridfahrzeuge als Funktion der Verkehrsdichte, (b) Fahrzeit*

Bei Elektrofahrzeugen hingegen bleibt der Kraftstoffverbrauch über der Verkehrsdichte relativ konstant, da Elektrofahrzeuge im Stillstand, unter Vernachlässigung der Bordnetzlast, keine Energie verbrauchen und der Wirkungsgrad des Elektromotors in nahezu allen Bereichen sehr hoch ist. Auch wirkt sich positiv auf die Energiebilanz aus, dass Elektro- und Hybridfahrzeuge während des Abbremsens in Stop-and-Go-Wellen wieder ein Teil der Energie rekuperieren können.

Abbildung 4.3.1 (b) zeigt den Anstieg der Fahrzeit über dem Verkehrsfluss. Wie zu erkennen ist, deckt sich die ermittelte Fahrzeit mit denen aus der Theorie bekannten Fahrzeitfunktionen (capacity-restraint-functions). Eine häufig angewendete Fahrzeitfunktion ist die sogenannte BPR-Funktion des U.S. BUREAU OF PUBLIC ROADS nach Gl. 4.3.1 [34]. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen Fahrzeit und dem aktuellen Verkehrsfluss $q$. Wobei $c_{max}$ die maximale Kapazität der Strecke beschreibt und $\alpha$ und $\beta$ Modellparameter darstellen, welche in den Bereichen

$\alpha \in (0;\infty)$ und $\beta \in (0;10)$ variiert werden.

$$t_{aktuell}(q) = t_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{c_{max}}\right)^{\beta}) \tag{4.3.1}$$

## 4.4 Zusammenfassung

Durch die Verbrauchsanalysen mit Bordnetzlast konnte in diesem Kapitel verdeutlich werden, welche Verbrauchssteigerungen, bedingt durch ein hohes Verkehrsaufkommen und hohe verkehrsbedingte Standzeiten, auftreten. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, dass Fahrzeuge möglichst schnell und koordiniert navigiert werden müssen, um unnötige Standzeiten zu verhindern und somit den Kraftstoffverbrauch zu senken bzw. die Reichweite von Elektrofahrzeugen nicht unnötig zu verkürzen. Des Weiteren konnten im zweiten Abschnitt anhand eines Fallbeispiels die Unterschiede in der Verbrauchssteigerung bei hohem Verkehrsaufkommen dargelegt werden. Abschließend erfolgte ein Vergleich der Fahrzeit- und Energieverbrauchsentwicklung über der Verkehrsdichte von konventionellen Fahrzeugen, Elektro- und Hybridfahrzeugen. Diese ermittelten Werte werden in Kap. 5 wieder aufgegriffen und dienen als wichtige Grundlage für das zeit- und energieeffiziente Routing.

# 5 Dynamisches Verkehrsrouting

Im Rahmen dieses Kapitels werden die theoretischen Hintergründe sowie Überlegungen für ein zentrales Verkehrsmanagement mit dynamischem Verkehrsrouting dargestellt. Zunächst wird hierzu in Abschnitt 5.2 auf die Graphentheorie sowie die geeigneten Algorithmen und notwendigen Anpassungen für diese Arbeit, zur Lösung des Kürzesten-Wege-Problems, in einem Graphen eingegangen. Schließlich wird in Abschnitt 5.4 ein Routingkonzept für ein zentrales Verkehrsmanagement entwickelt. Dieses hat zum Ziel, durch eine optimale Navigation aller Verkehrsteilnehmer, u.a. die Fahrzeit und den Energieverbrauch aller Verkehrsteilnehmer mittels eines intelligenten und dynamischen Routings der Fahrzeuge, zu minimieren. Um einen Vergleichsergebnisraum zu schaffen, der den Ist-Zustand des Verkehrs beschreibt, wird in Abschnitt 5.6 der vollständig unbeeinflusste Verkehrsfluss definiert und erläutert.

## 5.1 Stand der Forschung auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Verkehrsnavigation

Das Forschungsgebiet der Verkehrstelematik und des dynamisch, strategischen Verkehrsroutings ist nicht nur für die Automobilindustrie, sondern auch für die Kommunen ein sehr attraktives und innovatives Forschungsgebiet. Für die Kommunen ist es deshalb sehr wichtig, da es die Möglichkeit bietet, ihre Innenstädte von Verkehrsstaus zu entlasten und das hohe Verkehrsaufkommen effektiv und effizient zu steuern. Somit können die Innenstädte von den Verkehrsteilnehmern schneller erreicht werden, was wiederum dazu führt, dass die Innenstädte attraktiver werden und die Wirtschaftskraft des Einzelhandels gestärkt wird. Aber auch besonders für die Automobilindustrie gibt es mehrere Vorteile. Zum einen kann durch eine intelligente Routenplanung die Fahrzeit und der Energieverbrauch von Fahrzeugen gesenkt werden. Des Weiteren kann die Kundenzufriedenheit erheblich erhöht und strenge gesetzliche Vorgaben zum Umweltschutz erfüllt werden. Zum anderen ist ein strategisches Routing in Ballungsräumen für Automobilhersteller eine Möglichkeit, den Nachteil der noch begrenzten Reichweite von Elektrofahrzeugen durch intelligente Telematiksysteme, bei denen der Kunde intelligent und schnellstmöglichst an sein Ziel geroutet wird, abzumildern.
So gab und gibt es in den letzten Jahren viele vom Bund und der Europäischen Union geförderte Verbundprojekte, wie [97], [36], [2] zwischen Industrie, Universitäten und öffentlichen Trägern mit dem Ziel, die Vernetzung zwischen intelligenten Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur voranzutreiben. Diese Projekte haben vorrangig das Ziel, die Steigerung der Leistungsfähigkeit des Streckennetzes und die Optimierung des Verkehrsflusses auf Bundesautobahnen zu erreichen. Aber auch Schwerpunkte auf dem Gebiet der aktiven Sicherheit und der Fahrzeugkommunikation sind wichtige Bestandteile. Gerade auf dem Gebiet der Vernetzung zwischen Lichtsignalanlagen und der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation in Form von prädiktiven Fahrerassistenzsystemen ist die Forschung in den letzten Jahren sehr aktiv, mit dem Ziel, den Energieverbrauch und die Wartezeit von Fahrzeugen zu senken sowie den Verkehrsfluss zu verbessern [104], [120].

Im Rahmen von [136] wurden vier zentrale Kernpunkte genannt, um die Mobilität auch in der Zukunft zu sichern. Hierunter zählen u. a. die bessere Nutzung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur mittels Verkehrsmanagement sowie die Kapazitätserhöhung durch Infrastrukturprojekte. Weitere wichtige Kernpunkte sind die Kooperationen zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern und die Verknüpfung von Informationsquellen, mit intelligenter Verarbeitung dieser Daten und den Anwendern. Ziel muss es in den kommenden Jahren sein, u. a. ein intelligentes Verkehrsmanagement zu verankern und das Potenzial intelligenter Routenwahlalgorithmen auszuschöpfen, um eine globale Optimierung aller Routen zu erreichen.
Bei der Fahrzeugnavigation unterscheidet man zwischen drei Arten der Navigation [68]: Der Onboard-, der Connected- und der Offboard-Navigation. Aktuell ist die Onboard-Navigation, bei der die Navigationssoftware lokal installiert ist, noch die am meisten verbreitete Variante. Gerade die Technologie der Offboard-Navigation, bei der das Kartenmaterial und die Routengenerierung auf einem zentralen Server stattfindet und ein ständiger Austausch zwischen Endgerät und Server besteht, war noch vor wenigen Jahren ein Wunschdenken. Doch mit der Weiterentwicklung der Kommunikationsnetze und der Smartphonetechnologie wurden in den letzten Jahren immer mehr Voraussetzungen für eine baldige flächendeckende Umsetzung in die Realität geschaffen.
Auch gibt es viele Forschungsbemühungen, Algorithmen und Methoden zu entwickeln und dahin gehend zu optimieren, dass mithilfe von Echtzeitinformationen über den Verkehrszustand sowie aus der Kenntnis von historischen Daten optimale Routen mit regelmäßigen Aktualisierungen berechnet werden können [114]. Andere Schwerpunkte sind die Bestimmung des optimalen Abfahrtszeitpunkts für eine geplante Route, um die Fahrzeit zu verkürzen bzw. den Verkehrsfluss gezielt zu steuern [75]. Ein wichtiges Forschungsgebiet um den Energieverbrauch von Fahrzeugen zu senken, ist außerdem das Generieren von umweltfreundlichen Routen, für die ein minimaler Energieverbrauch notwendig ist [18], [56].
Wie die Literaturrecherche ergab, gibt es bereits heute viele Ansätze den Verkehrsfluss lokal an einzelnen Knotenpunkten, wie Autobahnauffahrten und -abfahrten oder an Verkehrskreuzungen zu optimieren bzw. den Energieverbrauch zu senken. Auch gibt es viele Forschungsschwerpunkte auf dem Gebiet des Verkehrsroutings mit aktuellen Echtzeitinformationen in Verbindung mit aktuellen und historischen Daten sowie zur Verkehrszustandsprädiktion.
Großes Forschungspotenzial gibt es für die Anwendung von intelligenten Routingstrategien im städtischen Straßenverkehr. Hier gibt es neue Herausforderungen, da der Verkehrsfluss durch zusätzliche Einflussfaktoren, wie Lichtsignalanlagen und häufige Routenkreuzungen von Fahrzeugen stärker beeinflusst wird als auf Bundesautobahnen. Auch stellt sich die Frage, wie sich der Wandel hinsichtlich der Fahrzeugtopologie weg vom konventionellen Verbrennungsmotor hin zum Elektrofahrzeug auf das Routingverhalten und das Auffinden von Routen mit minimalem Energieverbrauch auswirkt. Eine sehr zentrale Frage von intelligentem, dynamischem und strategischem Routing in Ballungsgebieten ist, wie viele Verkehrsteilnehmer gezielt beeinflusst werden müssen, um nennenswerte Verbesserungen hinsichtlich Fahrzeiteinsparung und der Reduzierung des Energieverbrauchs der Fahrzeuge zu erreichen.

## 5.2 Graphentheorie

Zur Routensuche in Verkehrsnetzen werden Streckennetze mithilfe der Graphentheorie auf gerichtete Graphen abgebildet. Die Graphentheorie geht auf erste Überlegungen von Leonard Euler aus dem Jahr 1736 zurück. Wie bei der Implementierung des Streckennetzes in Kapitel 2.5 erläutert, ist das gesamte Streckennetz durch eine Menge von Knoten und gerichteten Kanten definiert.

Ein gerichteter Graph hat im Gegensatz zu einem ungerichteten Graphen den Vorteil, dass richtungsabhängige Kantengewichte definiert oder Einbahnstraßen berücksichtigt werden können. In einem Graphen wird jede Kante durch Kosten charakterisiert. Diese Kosten können je nach Optimierungsziel die Routenlänge, der Fahrzeitbedarf oder der Energiebedarf sein. Für die Suche nach der kürzesten, zeit- oder energieeffizientesten Routen gibt es sogenannte Matrix- [38] oder Suchbaumverfahren. Da die Matrixverfahren noch zeitintensiver als die Suchbaumverfahren sind, haben sich zur Routenbestimmung die Suchbaumverfahren durchgesetzt.

## 5.3 Dynamische Programmierung nach Bellman / Dijkstra

Ziel des Optimierungsalgorithmus ist es, aus einem geeignet aufgebauten Graphen die Knotenfolge, von einem Startknoten zu einem Endknoten mit den minimalsten Gesamtkosten zu finden. Je nach Optimierungsaufgabe kann dies die Route mit der kürzesten Länge, der geringsten Fahrzeit oder die Route mit dem minimalsten Energieverbrauch sein. Eine Gesamtroute ergibt sich somit aus einer Folge von Knoten und Kanten bzw. auf ein Verkehrsnetz übertragen aus einer Folge von Kreuzungen und Einzelstrecken.

Grundlage von Algorithmen der dynamischen Programmierung ist das Optimalitätsprinzip nach Bellman. Dieses besagt, dass sich bei einem Optimierungsproblem die Optimallösung aus optimalen Teillösungen zusammensetzt [20]. Um den global kürzesten Weg in einem Graphen zu ermitteln, gibt es eine Vielzahl von Algorithmen wie der Dijkstra-Algorithmus, der Bellman-Algorithmus, der A*-Algorithmus oder der Algorithmus von Floyd und Warshall. Bekanntester Vertreter zur Lösung des Kürzesten-Wege-Problems ist der Dijkstra-Algorithmus [40] oder der Bellman-Ford-Algorithmus, welche im Folgenden kurz erläutert werden, da sie die Grundlage für das spätere zentrale Verkehrsmanagement bilden.

### 5.3.1 Bellman-Ford-Algorithmus

Der Bellman-Ford-Algorithmus wurde in den Jahren 1953-1957 von Bellman und Ford [19], [47] entwickelt und beruht auf dem Optimalitätsprinzip nach Bellman. Beim Bellman-Algorithmus wird ausgehend von einem Ausgangsgraphen ein Teilgraph wachsen gelassen. Der Unterschied zum Dijkstra-Algorithmus ist, dass kein Knoten zu keinem Zeitpunkt abschließend untersucht wurde und somit der kürzeste Weg erst nach Beendigung des Algorithmus feststeht.
Großer Vorteil des Bellman-Algorithmus ist, dass er sowohl mit positiven als auch mit negativen Kantengewichten umgehen kann, da ein Knoten nie endgültig bei der Routensuche abgeschlossen wird. Die einzige Einschränkung besteht darin, dass keine negativen Zyklen auftreten dürfen. Keine negativen Zyklen bedeutet, dass die gefundene Folge von Kanten keinen geschlossenen Kreis bilden dürfen mit einer negativen Gesamtsumme der Kantengewichte. Gibt es einen solchen negativen Zyklus kann keine Lösung gefunden werden, da eine unendliche Minimierung der Gesamtkosten erfolgen würde. Da beim Auftreten eines negativen Zyklus, der Algorithmus nie terminieren würde, muss dies z. B. durch einen Zähler, der ein Überschreiten der maximalen Knotenanzahl einer Route oder das doppelte Auftreten einer Kante in der Lösungsroute detektiert. Wird ausgehend von einem Startknoten die kürzeste Route zu allen anderen Knoten gesucht, so ergibt sich nach Gl. 5.3.1 eine Laufzeit, die vom Produkt der Anzahl der Knoten $n$ und Kanten

$m$ des Graphens abhängt.

$$O(n \cdot m) \tag{5.3.1}$$

### 5.3.2 Dijkstra-Algorithmus

Bekanntester Vertreter des Kürzesten-Wege-Problems (Single-Source-Shortest-Path-Problem) ist der Dijkstra-Algorithmus [40]. Grundidee des Dijkstra-Algorithmus ist es immer, diejenige Kantenfolge mit den geringsten Gesamtkosten zu verfolgen.

Für die Lösungssuche wird der Graph in drei Teilmengen eingeteilt. Zum einen, eine Gruppe von Knoten, die noch nicht untersucht wurden. Die zweite Gruppe umfasst Knoten, die am Rand des Untersuchungsgebietes liegen, die also noch nicht abschließend untersucht wurden und drittens die Gruppe von Knoten, zu denen bereits ein kürzester Weg gefunden wurde. Ausgehend von einem Startknoten wird somit ein Teilgraph erstellt, der nach und nach alle Knoten des Ausgangsgraphens beinhaltet, wobei jeder Knoten nur einmal betrachtet wird. Von seinem Ablauf gehört der Dijkstra-Algorithmus zu der Klasse der Greedy-Algorithmen, da er stets die momentan Beste, sprich die Teillösung mit den in Summe geringsten Kantengewichten verfolgt. Eine Einschränkung des Dijkstra-Algorithmus besteht darin, dass er lediglich mit positiven Kantengewichten umgehen kann. Die gefundene Route hingegen stellt die optimale Lösung dar, d. h. dass es kein kostengünstigeres Ergebnis als die gefundene Route gibt.

Gerade für die Routenberechnung eines Zentralnavigationssystems, bei dem viele Routinganfragen vorliegen, ist eine schnelle Routenbestimmung wichtig. Für die Beurteilung der Laufzeit ist die Wahl der Datenstruktur von entscheidender Bedeutung. Abhängig von der implementierten Datenstruktur ergibt sich beim Dijkstra-Algorithmus eine Laufzeit nach Gl. 5.3.2, bei Verwendung von Fibonacci-Heaps. Wobei $n$ die Knotenanzahl und $m$ die Anzahl der Kanten beschreibt. Die Laufzeit ist also logarithmisch von der Knotenzahl $n$ abhängig [81].

$$O(m + n \cdot log(n)) \tag{5.3.2}$$

Zur Reduzierung der Laufzeit gibt es nach [81] verschiedene Verfahren. So besteht eine Möglichkeit darin, geografische Informationen der Start-Ziel-Knoten auszuwerten. Dadurch ist es möglich, die Größe des Graphens zu reduzieren. Eine anderes Verfahren sind die sog. Highway-Hierarchien, in denen Straßen Kategorien zugeordnet werden. Dies ermöglicht, dass bei der Planung von langen Routen ausschließlich unterschiedliche Straßenkategorien wie Landstraßen, Autobahnen usw. betrachtet werden. Eine andere Beschleunigungstechnik sind die sog. Contraction Hierarchies [50]. Durch eine aufwendige Vorverarbeitung des Graphens wird versucht, die Knotenanzahl zu reduzieren. Alternativen zu den analytischen Algorithmen sind generische Algorithmen, wie der Ameisenalgorithmus (Kap. 7). Diese ermitteln Lösungsvorschläge, die im Idealfall der optimalen Lösung entsprechen. Vorteil der generischen Algorithmen sind, wie in Kapitel 7 dargestellt, die deutlich geringeren Laufzeiten. Ein Nachteil hingegen ist, dass nur sehr schwer eine Aussage über die Qualität der gefundenen Lösung gemacht werden kann.

### 5.3.3 Dijkstra-Algorithmus mit negative Kantengewichten

Der Dijkstra-Algorithmus hat den Vorteil, dass er wesentlich schneller als der Bellman-Ford-Algorithmus eine Lösung findet. Jedoch hat er den Nachteil, dass er nicht mit negativen Kantengewichten umgehen kann. Da aber gerade für ein energieoptimiertes Verkehrsrouting negative Kantengewichte bei Elektrofahrzeugen oder Hybridfahrzeugen auftreten können, ist die Anwendung des Dijkstra-Algorithmus nicht möglich. Negative Kantengewichte treten vor allem bei Streckenabschnitten mit starkem Gefälle auf, bei denen Elektrofahrzeuge viel Energie rekuperieren können und somit die Gesamtenergiebilanz des Streckenabschnittes negativ ausfällt. Dies entspricht einem negativen Energieverbrauch (Energiegewinn). Um dennoch den Dijkstra-Algorithmus anwenden zu können ist es notwendig, den ursprünglichen Graphen mit negativen Kantengewichten in einen äquivalenten Graphen, der lediglich positive Kantengewichte enthält, umzuwandeln.

Abhilfe schafft der sogenannte Johnson Algorithmus [70]. Dieser macht es möglich, durch hinzufügen eines künstlichen Knotens $S$ den Bellman-Ford-Algorithmus einmalig auf die Quelle $S$ anzuwenden Abb. 5.3.1 . Somit kann, unter der Bedingung, dass kein Kreis negativer Länge im Graphen vorliegt, das Potenzial zu jedem Knoten berechnet werden. Dieses Potenzial beschreibt den kürzesten Weg zwischen dem Knoten $S$ und allen anderen Knoten. Da hier negative Kantengewichte auftreten, muss hierzu einmalig ein Algorithmus angewendet werden, der negative Kantengewichte berücksichtigen kann. Damit ergeben sich wie in Abb. 5.3.1 (b) gezeigt die Knotenpotenziale. Das neue Kantengewicht des äquivalenten Graphens $c_{neu}$, der jeweiligen Kante berechnet sich nun nach Gl. 5.3.3.

$$c_{neu,(A,B)} = \Phi(A) + c_{alt,(A,B)} - \Phi(B) \tag{5.3.3}$$

Dies bedeutet, dass die Kantengewichte des äquivalenten Graphens von den Kosten der ursprünglichen Kante $c_{alt,AB}$ sowie dem Potenzial des Anfangs- $\Phi(A)$ und Endknotens $\Phi(B)$ abhängt.

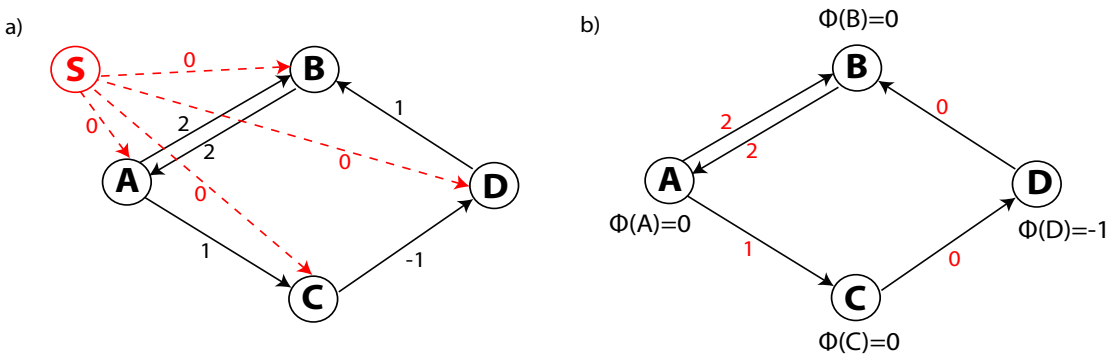



**Abbildung 5.3.1:** *(a) Ursprünglicher Graph mit negativen Kantengewichten und Hilfsknoten (S), (b) angepasster Graph mit positiven Kantengewichten*

Da nun ein Graph mit ausschließlich positiven Kantengewichten vorliegt, ist es möglich den deutlich schnelleren Dijkstra-Algorithmus auf den Graphen anzuwenden. Die Gesamtlaufzeit des Johnson-Algorithmus beläuft sich somit auf $O(m \cdot n + n^2 \cdot \log(n))$. Hierbei muss beachtet werden, dass der äquivalente Graph, mit nicht negativen Kantengewichten, nur einmalig berechnet werden muss. Sämtliche Routenberechnungen können im Anschluss mithilfe des Dijkstra-Algorithmus durchgeführt werden.

### 5.3.4 Berücksichtigung von Abbiegekosten durch kantenorientierte Graphen / Arc-Label-Shortest-Path-Algorithmus

Beim knotenorientierten Graphen werden zur Bestimmung der kürzesten Route lediglich die Kantengewichte der Strecken herangezogen. Wie der Übergang von einer ankommenden Kante zu einer abgehenden Kante bei einem Knoten erfolgt, fließt in die Berechnung nicht mit ein. In realen Verkehrsnetzen entspricht dieser Übergang z. B. der Fahrzeit, die zum Überqueren einer Kreuzung benötigt wird. Dabei treten je nach Abbiegerichtung unterschiedliche Abbiegekosten für die Fahrzeit, die zusätzliche Streckenlänge oder den Energieverbrauch auf. Da es gerade im Stadtverkehr durch vergleichbar kurze Streckenabschnitte zu häufigen Kreuzungsüberquerungen kommt, soll im Folgenden der knotenorientierte Graph zu einem kantenorientierten Graphen verändert werden. Dieser ermöglicht es, neben den Kantengewichten für die Strecken auch Kosten für den Abbiegevorgang bei der Routensuche zu berücksichtigen.

Eine Möglichkeit Abbiegevorgänge bei der Routenplanung mit zu berücksichtigen ist, die Erweiterung des Graphens („Expanded Network“). Hierzu wird jede Kreuzung um ergänzende Knoten ausmodelliert, um die möglichen Abbiegevorgänge im Graphen abzubilden. Nachteil dieses Verfahrens ist es, dass die Knoten- und Kantenanzahl und damit auch die Berechnungsdauer deutlich ansteigt. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Algorithmen, die sich damit beschäftigen Abbiegevorgänge möglichst effektiv bei der Routensuche mit zu betrachten [51], [141]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Arc-Label-Shortest-Path-Algorithmus gewählt, dieser ähnelt dem Dijkstra-Algorithmus [28]. Durch diesen Algorithmus ist es möglich, schnell weitere Datenstrukturen wie Abbiegeinformationen und die dafür entsprechenden Kantenkosten zu implementieren. Im Gegensatz zum Dijkstra-Algorithmus, bei dem ausgehend von einem knotenbasierten Graphen eine Route eine Folge von Knoten darstellt, ist der Arc-Label-Shortest-Algorithmus ein kantenorientierter Suchalgorithmus. Dies bedeutet, dass eine Route durch eine Folge von Kanten repräsentiert wird.

Zur Verdeutlichung soll anhand eines Beispielgraphens der Arc-Label-Shortets-Path-Algorithmus erläutert werden. Ziel ist es, den kürzesten Weg vom Startknoten A zu allen anderen Knoten zu finden. Zu Beginn erfolgt wie beim Dijkstra-Algorithmus eine Initialisierung des Graphens. Hierzu wird jeder Kante ein Kantengewicht zugeordnet. Zusätzlich wird hinterlegt, welche Abbiegevorgänge einer ankommenden Kante in einem Knoten erlaubt sind. Hierzu wurden mithilfe des Streckennetzgenerators (Kap. 2.5) in jedem Knoten Informationen über ankommende und abgehende Kanten sowie deren Verknüpfungen untereinander hinterlegt. Außerdem erhält jede Kante die Eigenschaften „Distanz“ und „Vorgängerkante“.

Zur Berechnung einer Route muss zunächst eine Startkante Abb. 5.3.2 (b), mit keinem Kantengewicht und keinen Abbiegekosten hinzugefügt werden. Danach wird der Dijkstra-Algorithmus solange durchgeführt, bis alle erreichbaren Kanten untersucht wurden (c). Da die Kanten (A,B) und (A,C) nur die Startkante als Vorgänger haben, wird diese als Vorgängerkante zugeordnet und grün markiert. Als nächstes wird die Kante mit dem geringsten Gesamtgewicht untersucht (A,B), (c). Das Kantengewicht der Kanten (B,C) und (B,D) setzt sich aus den Abbiegekosten und dem eigentlichen Kantengewicht zusammen. Nachdem Kante (A,B) als besucht markiert wurde wird in (e) die Kante (A,C) untersucht. Da sie nur einen Nachbar hat (C,D), erhält dieser die Kante (A,C) als Vorgängerkante. Als nächstes wird in (f) Kante (B,C) untersucht. Da ihre Nachbarkante (C,D) bereits den Vorgänger (A,C) hat, muss nach Gl. 5.3.4 untersucht werden, ob die Vorgängerkante

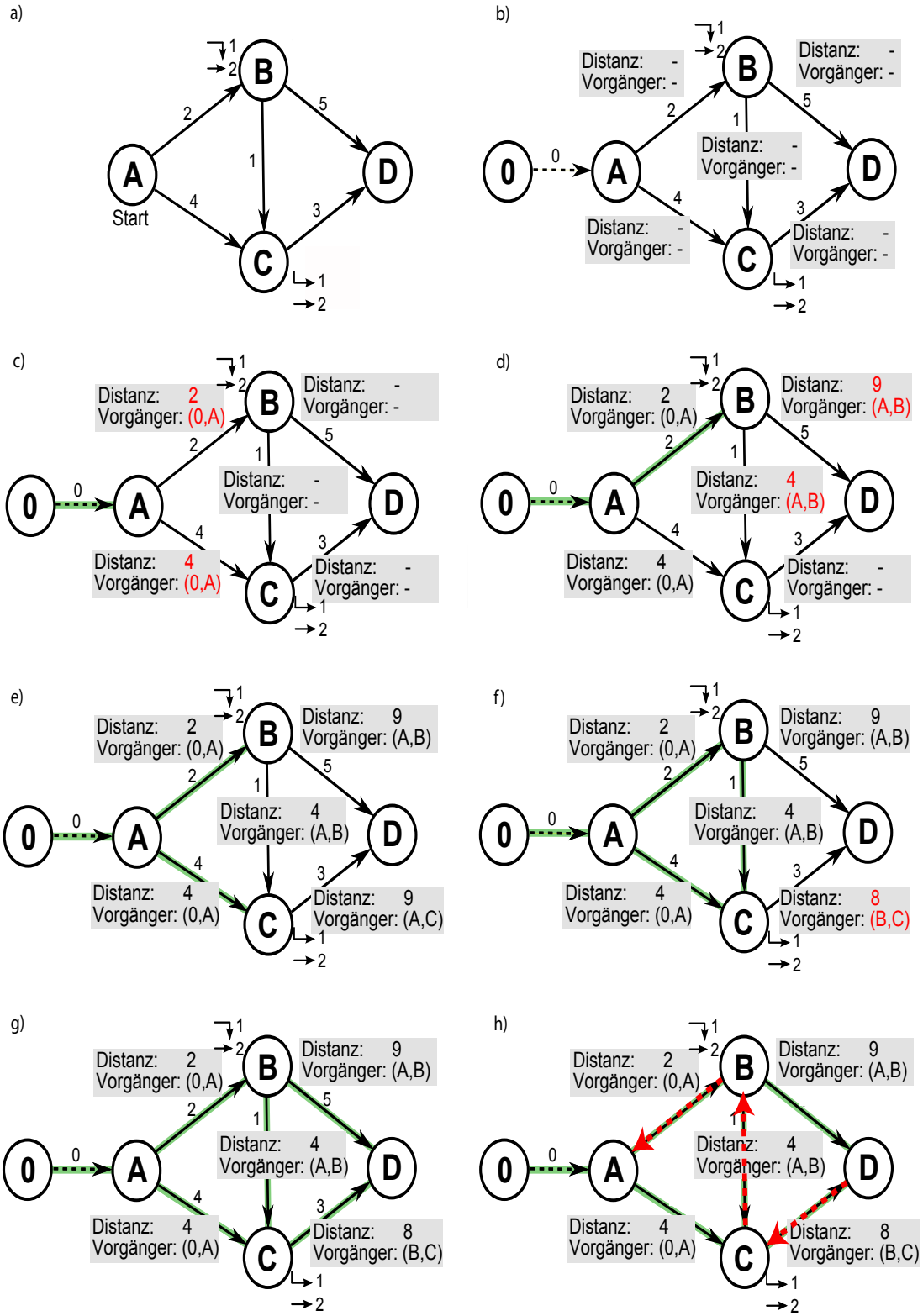



**Abbildung 5.3.2:** *Arc-Label-Shortest-Path-Algorithmus Beispiel [151]*

(B,C) einen günstigeren Weg bietet.

$$d_{(B,C)} + \lambda_{(B,C)\to(C,D)} + g_{(C,D)} < d_{(C,D)} \tag{5.3.4}$$

Hierbei entspricht $d$ der Distanz sowie $\lambda$ den Abbiegekosten und $g$ den Kosten für die jeweilige Kante. Da diese Ungleichung in diesem Fall erfüllt ist, wird der Vorgänger von Kante (C,D) durch die Kante (B,C) ersetzt. Die abschließenden Kanten (B,D) und (C,D) in (g) können direkt als besucht markiert werden, da sie keine abgehenden Nachbarkanten aufweisen.

Zur Bestimmung der kürzesten Route (h) von z. B. A nach D müssen zunächst alle in den Zielknoten führenden Kanten ermittelt werden (hier (B,D) und (C,D)). Nun verfolgt man den Weg der Kanten mit der geringsten Gesamtdistanz unter Beachtung der jeweiligen Vorgängerkante zurück zum Startknoten. In diesem Beispiel entspricht dies unter Berücksichtigung der Abbiegekosten der Route von Knoten A über B und C nach D.

## 5.4 Völlig kontrollierter Verkehrsfluss $VKV_{Z,E}$

Je mehr Fahrzeuge sich auf einem Streckenabschnitt befinden, desto höher ist die Verkehrsdichte, welche sich nach dem Fundamentaldiagramm ab einem Schwellwert von 25 Fahrzeugen pro Kilometer negativ auf die Fahrzeit sowie den Kraftstoffverbrauch ausübt. Dies kann dazu führen, dass eine ursprüngliche energie- oder zeiteffiziente Route mit steigendem Verkehrsaufkommen immer ineffektiver wird und dadurch eine neue zeit- oder energieeffiziente Route zum aktuellen Zeitpunkt effektiver wäre. Dieser Effekt wird aktuell durch die steigende Anzahl an Navigationsgeräten immer mehr verstärkt. Ein Navigationsgerät plant für jeden Verkehrsteilnehmer die persönlich optimale Route, ohne die anderen Verkehrsteilnehmer bei der Routenplanung zu berücksichtigen. Dies führt dazu, dass die optimale Route sehr stark frequentiert wird, so dass auf dieser ein hohes Verkehrsaufkommen zu verzeichnen ist. Sobald ein Stau aufgetreten ist, werden die Fahrzeuge auf eine Alternativroute geroutet, da bereits viele moderne Navigationsgeräte über einen Traffic Message Channel (TMC) mit aktueller Stauumfahrung verfügen. Da aber alle Navigationsgeräte zeitgleich diese Nachricht erhalten, führt dies dazu, dass die Route aller Fahrzeuge geändert wird und damit das eigentliche Problem, des Verkehrsstaus, nun auf die Alternativroute verlagert wird. Abhilfe für dieses Problem schafft ein zentrales Verkehrsnavigationssystem, das ein global optimiertes Routing aller Verkehrsteilnehmer übernimmt. Dieser Verkehrszustand, dass alle Verkehrsteilnehmer mittels eines zentralen Navigationsgerätes optimal navigiert werden, wird im Folgenden als völlig kontrollierter Verkehrsfluss bezeichnet.

### 5.4.1 Nutzeroptimum und Systemoptimum

Bei der Optimierung des Verkehrsflusses wird in der Literatur zwischen Nutzeroptimum sowie Systemoptimum unterschieden. Ein Nutzergleichgewicht ist nach dem ersten Wardrop'schen Prinzip [145] dann erreicht, wenn die Fahrzeit eines jeden Fahrzeuges minimal ist und ein Wechsel auf eine andere Route zu einer Vergrößerung der individuellen Fahrzeit führen würde. Einen Wechsel der Route eines einzelnen Nutzers würde also eine Erhöhung der Fahrzeit für den Verkehrsteilnehmer zur Folge haben. Dieser Gleichgewichtszustand stellt jedoch nicht den optimalen Zustand des Systemoptimums dar. Ein Systemoptimum ist dann erreicht, wenn die Fahrzeit aller Verkehrsteilnehmer minimal ist. Dies bedeutet, dass eventuell einzelne Verkehrsteilnehmer eine höhere Fahrzeit in Kauf nehmen müssen, damit global betrachtet, alle Verkehrsteilnehmer in Summe eine minimale Fahrzeit erreichen. Da das Nutzergleichgewicht somit lediglich einer lokal optimalen Lösung entspricht muss es das Ziel sein, der global optimalen Lösung des Systemoptimums möglichst nahe zu kommen.

Zur Berechnung des Nutzergleichgewichts gibt es verschiedene Verfahren. Nachteil dieser Verfahren ist, dass lediglich eine Optimierung hinsichtlich der Fahrzeit möglich ist. Ein Nutzergleichgewicht bezüglich einer gezielten Verbrauchsminimierung mit der Differenzierung nach unterschiedlichen Fahrzeugtopologien ist hingegen nicht möglich. Ein weiterer Nachteil dieser Algorithmen ist, dass potenzielle Engstellen wie Kreuzungen und Lichtsignalanlagen, an denen sich Routen kreuzen, keine Berücksichtigung bei der Routenplanung finden. Ein Algorithmus zur Erzeugung eines Nutzergleichgewichts in einem Verkehrsnetz [121], [113] wird im Anhang 10.9 vorgestellt und Ergebnisse mit dem hier vorgestellten Routingkonzept verglichen.

Die Verkehrsflusslenkung in einem komplexen Verkehrsnetz zur Erzeugung eines Systemoptimums ist bedingt durch sehr viele Einflussfaktoren deutlich schwieriger. In [24] wurde ein ma-

thematischer Ansatz entwickelt und auf seine Funktionalität in einem kleinen Netzbeispiel unter VISSIM überprüft.

### 5.4.2 Routingkonzept des völlig kontrollierten Verkehrsflusses

Das im Rahmen dieser Dissertation neu entwickelte Routingkonzept sieht ein zentrales Verkehrsmanagement vor, das sämtliche Routen aller Verkehrsteilnehmer registriert und verwaltet. Ziel ist es, durch die globale Optimierung aller Routen, die Gesamtfahrzeit sowie den Energieverbrauch aller Verkehrsteilnehmer zu senken. Außerdem ist es das Ziel, sämtliche Fahrzeuge so auf der Verkehrsinfrastruktur zu verteilen, dass der Verkehrsfluss auch bei hohen Verkehrsbelastungen aufrechterhalten wird. Das Routingkonzept bietet die Möglichkeit, die Fahrzeuge unter Beachtung verschiedener Fahrzeugtopologien, nach verschiedenen Optimierungskriterien wie der kürzesten, zeiteffizientesten oder energieeffizientesten Route zu navigieren. Teile des im Folgenden vorgestellten Algorithmus wurden im Rahmen der Diplomarbeit [151] von Dipl.-Ing. Sebastian Zinser implementiert.

Die Anforderungen an das Zentralnavigationssystem sind, dass es zum aktuellen Zeitpunkt optimale Routenempfehlungen, unter Beachtung aller geplanten und aktuell befahrenen Routen, gibt. Um dies zu ermöglichen Bedarf es einer Vielzahl von Informationen mittels deren die Routenberechnung erfolgt. Zur Verbesserung der Ist-Situation ist es zunächst notwendig, die Routenplanung mit der Kenntnis von ständig aktualisierten Verkehrsinformationen durchzuführen Abb. 5.4.1 (a). Hierunter fallen sämtliche Verkehrsdaten, welche mit Streckensensoren ermittelt werden können sowie aktuelle Informationen über die Warteschlangenlänge an Lichtsignalanlagen, vorausgesetzt diese sind verfügbar. Da ein großes Verkehrsnetz mit vielen Verkehrsteilnehmern einer hohen Dynamik unterliegt, können zunächst optimale Routen sehr schnell ineffizient werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass ständig ein Abgleich mit dem Zentralnavigationssystem erfolgt, ob es zum aktuellen Zeitpunkt eine kostengünstigere Route als die aktuelle Route gibt und ob gegebenenfalls die aktuelle Route durch die kostengünstigere Route ersetzt werden sollte. Ist dies nicht der Fall erfolgt keine Aktualisierung der Route. Dadurch ist es möglich, gezielt auf aktuelle Gegebenheiten wie Verkehrsstaus, Unfälle oder ein hohes Verkehrsaufkommen zu reagieren. Diese Art des Verkehrsroutings wird in den Folgenden Analysen als *Routing mit Echtzeitinformationen* (EZI) bezeichnet.

Das Routing mit Echtzeitinformationen beinhaltet zusammengefasst folgende Punkte:

- Einbeziehen aktueller Echtzeitinformationen über das Streckennetz, welche in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden
- Einbeziehen der Anzahl an Fahrzeugen, die an Lichtsignalanlagen warten, soweit diese Daten verfügbar sind

Um eine globale Optimierung der Fahrzeit sowie des Energieverbrauchs aller Verkehrsteilnehmer zu ermöglichen, ist es notwendig, dass ein zentraler Speicher, der alle Routen erfasst, vorhanden ist. Dadurch können die Routen aller Verkehrsteilnehmer sowie die Abhängigkeit der Routen untereinander in die Berechnung neuer Routen einfließen, um den gesamten Verkehrsraum und Verkehrsfluss zu optimieren.

Zur Realisierung eines global optimierten Routings mittels eines Zentralnavigationssystems sind folgende drei Faktoren von Bedeutung:

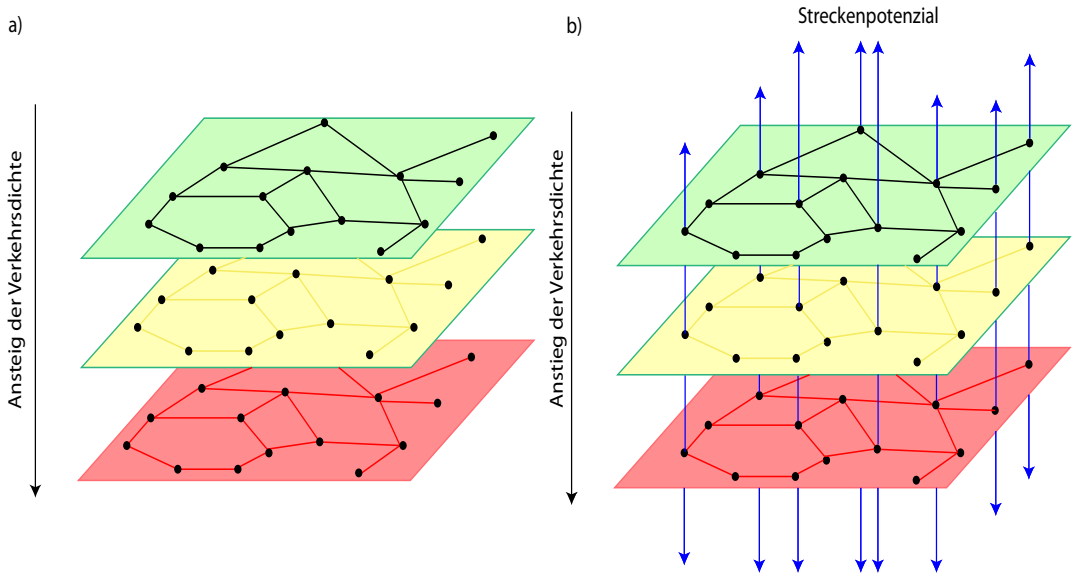



**Abbildung 5.4.1:** *(a) Routingkonzept mit dynamischer Routenumlegung mittels Echtzeitinformationen, (b) dynamische Routenumlegung auf Basis von Echtzeitinformationen und Streckenpotenzialfunktion sowie prädiziertem Zeitfenster und Verkehrsdichteprädiktion*

**Streckenpotenzialfunktion:** Bei der Streckenpotenzialfunktion handelt es sich um ein Kostenmaß für alle aktuell befahrenen sowie geplanten Routen Abb. 5.4.1 (b). Diese Kosten sind ein Maß dafür wie hoch die Belastung der Route in der Zukunft sein wird. Bei der Suche einer optimalen Route nach dem Arc-Label-Shortes-Path-Algorithmus werden die Kosten minimiert. Durch die zusätzliche Minimierung der Streckenpotenzialfunktion erfolgt somit eine Routensuche unter Beachtung aller zukünftig geplanten Routen. Dies hat zur Folge, dass bei der Planung eine Route bevorzugt wird, die in der Zukunft eine geringere Belastung hat als eine Route mit hoher zukünftiger Verkehrsbelastung.

**Zeitfensterprädiktion mit eventueller Knoten-/ Kreuzungssperrung:** Da es sich beim Straßenverkehr um ein sehr komplexes und dynamisches System mit sehr vielen Parametern handelt, ist es sehr schwer diesen so zu regeln, dass ein globales Minimum der Fahrzeit oder des Energieverbrauchs aller Verkehrsteilnehmer erreicht wird. Um zu erreichen, dass alle Fahrzeuge zum aktuellen Zeitpunkt, die für sie als auch für alle Verkehrsteilnehmer optimale Route befahren, muss man sich der Abhängigkeiten und Einflussfaktoren, welche durch Routenumlegungen auftreten, im Klaren sein. Ein sehr großer Einflussfaktor sind hierbei Lichtsignalanlagen und Kreuzungen, die gerade im Stadtverkehr sehr häufig anzutreffen sind. Aus diesem Grund wurde eine Zeitfensterprädiktion mit eventueller Knotensperrung eingeführt, welches verhindern soll, dass Kreuzungen zu stark frequentiert und dadurch überbelastet werden.

**Streckenreservierung zur Verkehrsdichteprädiktion:** Die Streckenreservierung zur Verkehrsdichteprädiktion sieht vor, mittels einer Streckenreservierung die zukünftige Verkehrsdichte auf einzelne Strecken zu prädizieren. Bei der Planung von kostengünstigen Routen spielen aktuelle Fahrzeiten sowie der aktuelle Energieverbrauch auf der Route eine wichtige Rolle. Je genauer die Kostenentwicklung jeder Strecke vorhergesagt werden kann, umso besser kann

die Route geplant werden. Ziel muss es sein, dass die geplanten Kosten, sprich die geplante Fahrzeit bzw. der Energieverbrauch, möglichst genau mit den realen Kosten übereinstimmen. Gerade bei langen Routen, bei denen das Ende der Route erst in 20-30 Minuten erreicht wird, ist es schwierig, die Entwicklung der Fahrzeit vorherzusagen. Aus diesem Grund reserviert das Zentralnavigationssystem für jedes Fahrzeug die geplante Route. Mithilfe dieser Information ist es dann möglich, eine möglichst genaue Aussage über die Entwicklung der Verkehrsdichte einzelner Strecken zu machen.

Auf die Realisierung der einzelnen Module des Zentralnavigationssystem wird im Folgenden im Detail eingegangen.

### 5.4.3 Zentrales Verkehrsmanagement / Routingablauf im Überblick

Abbildung 5.4.2 zeigt das zentrale Verkehrsmanagementsystem mit seinen drei Hauptbestandteilen:

- Globaler Routenspeicher / Verwaltung
- Echtzeitinformationen / Datenaktualisierung
- Routenberechnung

### 5.4.4 Routenreservierung mittels Streckenpotenzialfunktion

Durch das Einführen einer Streckenpotenzialfunktion für die jeweiligen Routensegmente, welche die Verkehrsbelastung in der Zukunft widerspiegeln, kann eine Prädiktion der Streckenbelastung vorhergesagt werden. Die Idee ist, jede geplante Route eines Fahrzeuges zu betrachten und diese in die Berechnung der optimalen Route mit einfließen zu lassen. Je mehr Fahrzeuge ihre Route über einen Streckenabschnitt planen, desto wahrscheinlicher ist es, dass dies zu einer höheren Belastung der Strecke führt und damit zu einem Anstieg der Fahrzeit und des Energieverbrauchs. Aufgrund der aktuellen Verkehrsnetzinformationen kann die Ankunftszeit $\hat{t}$ sowie die Verweildauer auf einer Strecke eines Fahrzeuges prädiziert werden. Mittels Gl. 5.4.1 kann somit jeder Strecke der geplanten Route ein zusätzlicher Streckenpotenzialwert, welcher dem reziproken Wert der prädizierten Ankunftszeit entspricht, zugeordnet werden.

$$\Phi_S = \Phi_{S,\,aktuell} + \frac{1}{\hat{t}} \tag{5.4.1}$$

Der Ansatz beruht darauf, dass weit entfernte Fahrzeuge einen geringen Einfluss auf die aktuelle Verkehrsdichte eines Streckensegments haben, als Fahrzeuge, die in unmittelbarer Zukunft auf dem Streckensegment eintreffen werden. Dies ist wichtig um sicherstellen zu können, dass Fahrzeuge die in Kürze eine Strecke befahren wollen, nicht durch Fahrzeuge, die zu einem deutlich späteren Zeitpunkt dieselbe Strecke befahren möchten, auf eine Alternativroute gezwungen werden. Würde man die Streckenpotenzialfunktion über die gesamte geplante Route gleichmäßig verteilen, so würde dies bei einer großen Flotte von Fahrzeugen, die eine Strecke in 10 Minuten erreichen, dazu führen, dass Fahrzeuge zum aktuellen Zeitpunkt diese Strecke meiden, obwohl die Strecke schon wieder frei wäre, wenn die Flotte von Fahrzeugen die Strecke befahren würde.

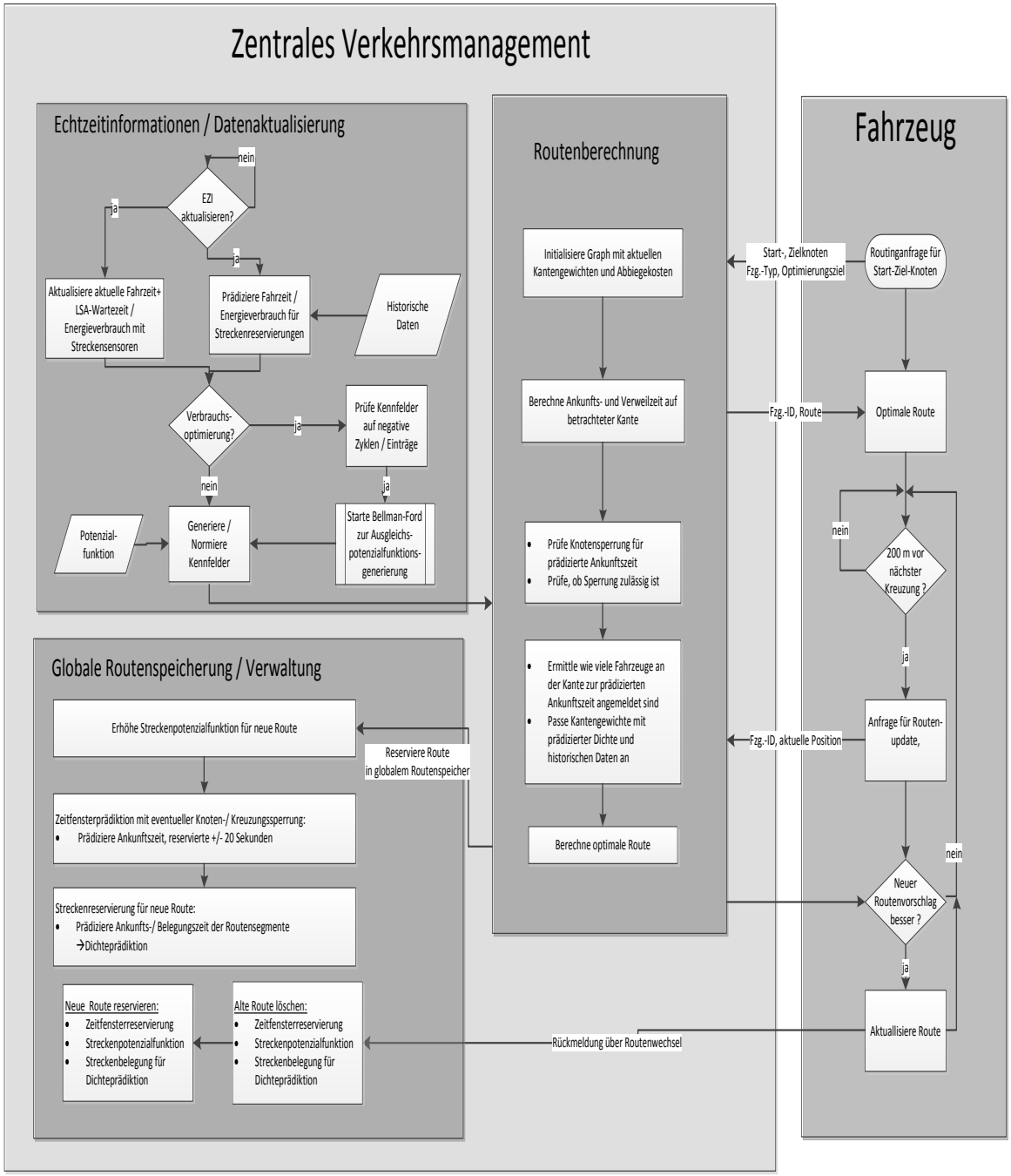



**Abbildung 5.4.2:** *Überblick zentrales Verkehrsnavigationssystem*

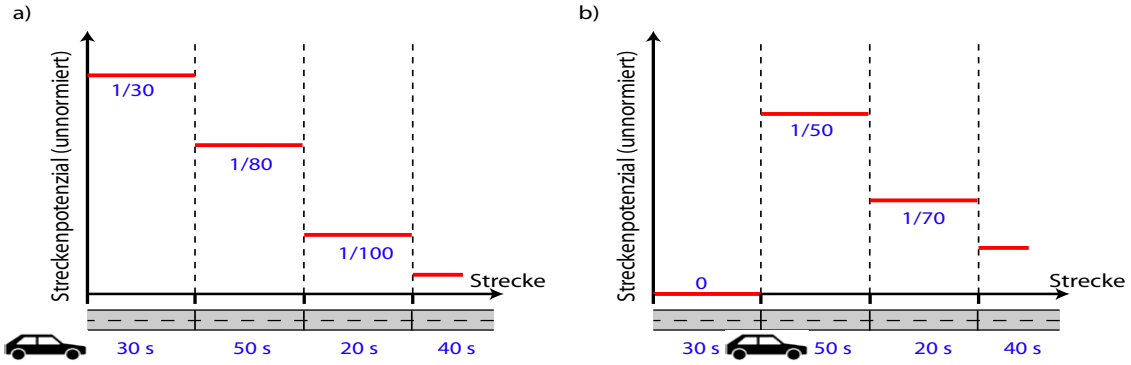



**Abbildung 5.4.3:** *Potenzialverlauf als Funktion der Fahrzeugposition*

Da jede Strecke eine unterschiedliche Kapazität $C$ hat, muss das Potenzial für jedes Streckensegment individuell normiert werden. Die Normierung erfolgt nach Gl. 5.4.2, hierzu fließt die Verkehrsdichte $k_{opt}$ jeder Strecke ein, die sich bei der maximalen Kapazität der Strecke ergibt. Außerdem wird die Streckenlänge $l_s$ sowie die Anzahl der Spuren $s_p$ und die Fahrzeit $t_0$ bei einer geringen Verkehrsdichte berücksichtigt. Hierbei wurde von einer Verkehrsdichte bei maximaler Verkehrsstärke von 25 Fahrzeugen pro Kilometer und Spur ausgegangen. Diese Verkehrsdichte entspricht nach der Geschwindigkeitsdichterelation des Fundamentaldiagramms (Abb. 2.12.1 ) einem Verkehrsaufkommen des teilgebundenen bzw. gebundenen Verkehrs.

$$\Phi_{Smax} = \frac{l_s \cdot k_{opt} \cdot s_p}{t_0} \tag{5.4.2}$$

Die Normierung ist so gewählt, dass das normierte Streckenpotenzial genau dann sein Maximum erreicht, wenn die Kapazitätsgrenze der Strecke von 25 Fahrzeugen pro Kilometer prognostiziert wird. Zusammengefasst berechnet sich das Potenzial eines Streckensegments nach Gl. 5.4.3. Abbildung 5.4.3 zeigt den Verlauf des unnormierten Streckenpotenzials für drei aufeinander folgende Strecken. Befindet sich das Fahrzeug auf der Kreuzung vor der ersten Strecke (a), so wird nach Gl. 5.4.1 jedem Streckenelement ein Streckenpotenzialwert zugeordnet. Im Streckenpotenzialverlauf ist gut der abschwächende Verlauf für Strecken, die zu einem späteren Zeitpunkt erreicht werden, zu erkennen. Sobald das Fahrzeug die nächste Kreuzung erreicht (b) wird zunächst der Potenzialwert der vorherigen Strecke zurückgesetzt, da das Fahrzeug hier keinen Einfluss mehr auf die Verkehrsdichte hat. Dabei wird der Potenzialwert aller verbleibenden Routensegmente aktualisiert.

$$\Phi(s) = \sum_{v=1}^{n} \frac{1}{\sum_{i=1}^{s} t_i} \cdot \frac{t_0}{l_s \cdot k_0 \cdot s_p} \tag{5.4.3}$$

Abbildung 5.4.4 zeigt anhand einer Beispielroute mit einer Start-Ziel-Beziehung, den Verlauf des Streckenpotenzials sowie der Anzahl an angemeldeten Fahrzeugen über den Routensegmenten und der Simulationszeit. Insgesamt besteht die Route aus 16 Streckenelementen, wobei für jede Strecke der Streckenpotenzialwert in einem Intervall von 30 Sekunden aufgezeichnet wurde. Abbildung (a) zeigt den Streckenpotenzialverlauf, wenn alle Fahrzeuge die gleiche Route befahren im Vergleich zu (b), wenn die Fahrzeuge mit Streckenpotenzialfunktion geroutet werden. Wie im

Vergleich zu erkennen ist, steigt in (a) die Streckenpotenzialfunktion kontinuierlich an, wobei bis zu 120 Fahrzeuganmeldungen auf einem Streckenelement zu verzeichnen sind. Beim Routing mit Streckenpotenzialfunktion kann sowohl das Streckenpotenzial als auch die Anzahl angemeldeter Fahrzeuge gering gehalten werden. Dies wird dadurch erreicht, da Fahrzeuge mit steigendem Potenzial auf Alternativrouten umgeleitet werden und somit die hier betrachteten Streckenelemente entlastet werden.

Nähere Details zur Auswertung der Streckenpotenzialfunktion bei komplexen Verkehrsszenarien finden sich in Abschnitt 6.3.3.

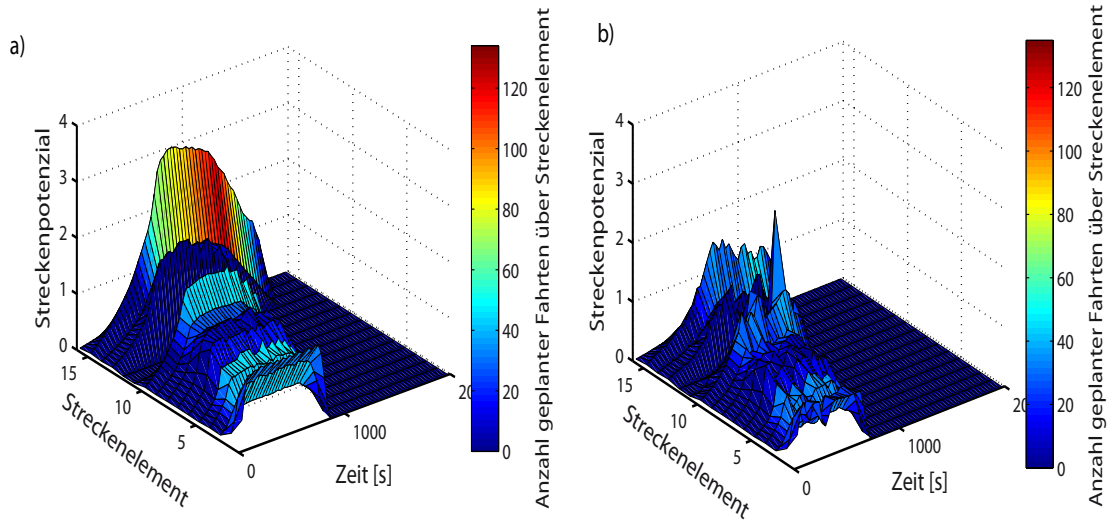



**Abbildung 5.4.4:** *Streckenpotenzialverlauf, Anzahl angemeldeter Fahrzeuge einer Beispielroute, (a) alle Fahrzeuge befahren die gleiche Route, (b) Routing mit Streckenpotenzialfunktion*

### 5.4.5 Zeitfensterprädiktion mit eventueller Knotensperrung

Für die Planung einer Route sind bisher Echtzeitinformationen über den aktuellen Verkehrszustand einzelner Strecken eingeflossen. Auch wurde die Streckenpotenzialfunktion eingeführt, welche jedem Fahrzeug einen virtuellen Platz auf einem Streckensegment reserviert. Somit kann schon im Voraus verhindert werden, dass es zu einer zu hohen Verkehrsbelastung auf einzelnen Strecken kommt. Ein weiterer sehr kritischer Punkt in den Verkehrsnetzen sind die Kreuzungen. Da eine Vielzahl von Strecken in einem Knoten zusammenlaufen, sind diese vermehrt Auslöser für Verkehrsbehinderungen. Um zu verhindern, dass der Zufluss auf einzelne Kreuzungen zu hoch wird, bedarf es bei der Routenplanung einer Prädiktion, wie viele Fahrzeuge in einem gegebenen Zeitfenster die Kreuzung passieren werden. Hierzu wurde das Routingkonzept um eine Zeitfensterprädiktion erweitert. Dies bedeutet, dass jedes Fahrzeug, das eine bestimmte Route gewählt hat, auf Basis der aktuellen Fahrzeiten, die Ankunftszeit an einem Knoten nach Gl. 5.4.4 berechnet und sich zu diesem Zeitpunkt am Knoten anmeldet. Da eine genaue Fahrzeitprädiktion bei sehr langen Routen, durch viele Verkehrseinflüsse, schwer abzuschätzen ist, wird ein Intervall

von $\pm$ 20 $s$ reserviert.

$$\hat{t}_{Ankunft,\,K_i} = \sum_{i=1}^{s} t_i \pm 20\ s \tag{5.4.4}$$

Durch das Aufsummieren aller in den Knotenpunkt mündenden Spuren, kann somit prädiziert werden, wie viele Fahrzeuge den Knotenpunkt zu einem gegebenen Zeitpunkt passieren werden. Dies ermöglicht es, bei Überschreiten eines Schwellwertes von fünf Fahrzeugen pro ankommender Spur den Knotenpunkt für neue Fahrzeuge, welche ihre Route zum Zeitpunkt der Überlastung über den Knotenpunkt planen, zu sperren. Hierbei gilt die Einschränkung, dass eine Knotensperrung nur dann erfolgen darf, wenn Alternativrouten zur Verfügung stehen. Handelt es sich hingegen bei dem Knoten um einen Zielknoten des Fahrzeuges bzw. um einen reinen Durchgangsknoten oder wenn alle anderen Nachbarknoten bereits gesperrt sind und somit keine fahrbare Route mehr vorhanden ist, so darf trotz drohender Überbelastung des Knotenpunktes keine Sperrung erfolgen.

Umgesetzt wurde dieses Verfahren in dem beim Durchlaufen des Arc-Label-Shortes-Path-Algorithmus, nach Abschnitt 5.3.4, zusätzlich berücksichtigt wird, zu welchem Zeitpunkt das Fahrzeug die Kante befahren wird. Mithilfe dieser Ankunftsinformationen und der prädizierten Auslastung des Knotenpunktes kann somit entschieden werden, ob die Kante in die Routensuche involviert werden darf oder ob sie für diesen Zeitpunkt gesperrt ist. Da in Verkehrsnetzen mit vielen Fahrzeugen die Fahrzeiten einzelner Routen sich sehr schnell verändern können, muss ständig eine Aktualisierung der Zeitfensterprädiktion stattfinden. Diese wurde dahin gehend gewählt, dass immer wenn ein Fahrzeug eine Routinganfrage an das zentrale Verkehrsmanagement stellt, auf Basis neuer Echtzeitdaten die prädizierten Ankunftszeiten und damit die Zeitfensterprädiktion neu berechnet wird. Außerdem fließen somit in die Berechnung ständig aktuelle Informationen über Wartezeiten an den Lichtsignalanlagen ein.

In Abb. 5.4.5 ist der Vergleich der an einem Beispielverkehrsknoten angemeldeten Fahrzeuge über der Simulationszeit dargestellt. Die rote Linie markiert die maximale Anzahl an Fahrzeugen, die sich gleichzeitig zu einem Zeitpunkt am Knotenpunkt anmelden dürfen. Bedingt durch fünf ankommende Spuren des Knotens liegt diese hier bei 25 Fahrzeugen. Wie in der Zeitfensterprädiktion mit Knotensperrung Abb. 5.4.5 (a) zu erkennen ist, liegt die maximale Anzahl an gemeldeten Fahrzeugen immer in der Nähe des Schwellwertes. Erfolgt keine Knotensperrung (b), so melden sich bis zu 58 Fahrzeuge gleichzeitig am Knoten an, was zwangsläufig zu Verkehrsbehinderungen führt.

### 5.4.6 Streckenreservierung zur Verkehrsdichteprädiktion

Wichtiges Kriterium für die Routengenerierung ist eine genaue Kenntnis über die Kantenkosten. Je genauer die Kantenkosten, wie Fahrzeit oder Energieverbrauch den Ist-Zustand beschreiben, desto besser stimmt die gefundene Lösung mit der Realität überein. Da es sich beim Verkehr um ein sehr dynamisches System handelt und Routen in die Zukunft geplant werden, ist es wichtig, Kenntnisse über die zukünftige Verkehrsentwicklung in die Routenplanung mit einzubeziehen. Dies wird beim Zentralnavigationssystem dadurch erreicht, dass jedes Fahrzeug seine geplante Route reserviert. Hierbei erfolgt auf Basis des aktuellen Verkehrszustandes eine Abschätzung über die Ankunfts- sowie Verweildauer auf den einzelnen Routenteilstücken, welche dann für

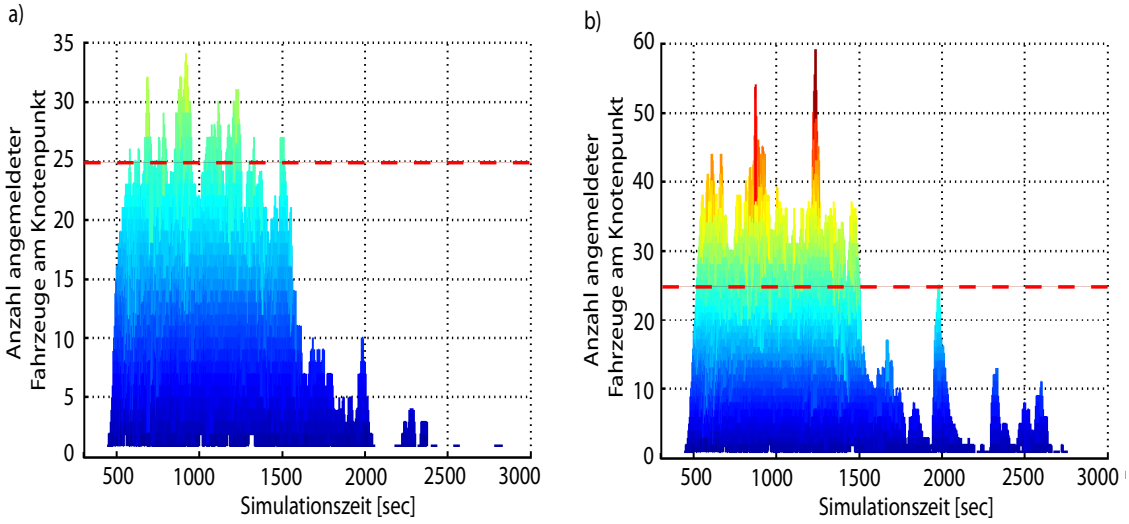



**Abbildung 5.4.5:** *(a) Zeitfensterprädiktion mit Knotensperrung um Überbelastungen zu vermeiden, (b) ohne Knotensperrung*

diesen Zeitraum reserviert werden. Dadurch verfügt das zentrale Verkehrsmanagement über die Kenntnis, wie sich die Verkehrsdichte in der Zukunft auf einzelnen Strecken entwickeln wird. Über die Datenfusion mit historischen Daten ist es somit möglich, eine genauere Routenempfehlung abzugeben. Hierzu muss das Zentralnavigationssystem über einen Datenpool verfügen, welcher als Funktion der Verkehrsdichte für jede Strecke Informationen über Fahrzeit sowie den Energieverbrauch unterschiedlicher Fahrzeugtopologien verfügt.

Bei der Planung einer neuen Route wird dann die Ankunftszeit auf einer Strecke auf Basis der prädizierten Verkehrsdichteentwicklung abgeschätzt. Die Kosten der Kante ergeben sich somit nicht aus den aktuellen Kosten, sondern aus Informationen wie viele Fahrzeuge zu dieser Ankunftszeit die betreffende Strecke reserviert haben. Wenn z. B eine Strecke zum Zeitpunkt der Routenplanung eine sehr geringe Verkehrsdichte aufweist, würde diese aufgrund geringer Kantenkosten in der Routenplanung bevorzugt werden. Also würden viele Fahrzeuge diese Strecke bevorzugen, wodurch sich die Verkehrsdichte und die Fahrzeit erhöht. Erst wenn die Fahrzeuge real auf der Strecke angekommen sind würde sich dies in den Kosten widerspiegeln. Durch die Streckenreservierung steigen die Kosten schon zu einem Zeitpunkt, wenn ein Fahrzeug lediglich plant eine Route zu befahren sie aber noch nicht real befahren hat. Somit kann schon viel früher auf eine mögliche Überbelastung mittels Ausweichrouten reagiert werden, bevor es überhaupt zu einem hohen Verkehrsdichteaufkommen auf der jeweiligen Strecke kommt.

### 5.4.7 Routengenerierung und Routenupdate

Neben der globalen Routenspeicherung und Routenverwaltung ist die Echtzeitdatenaktualisierung sowie das Routenupdate ein entscheidender Punkt des Routingkonzeptes. Hierzu sieht das Routingkonzept vor, dass jedes Fahrzeug während der Fahrt sich mit dem zentralen Verkehrsmanagement abgleicht, ob zum aktuellen Zeitpunkt eine kostengünstigere Route als die aktuelle

Route nach Gl. 5.4.5 vorliegt.

$$K_{neue\ Route} < K_{aktuelle\ Route} \tag{5.4.5}$$

Diese Überprüfung erfolgt 200 Meter vor jeder Kreuzung, bei der ein Wechsel auf eine alternative Route möglich ist. Der Grenzwert von 200 Meter wurde gewählt, da die verbleibende Strecke noch ausreichend ist, um den eventuell notwendigen Spurwechsel auf eine Ausweichroute vorzunehmen. Somit erfolgt auf 88,1 % der betrachteten Strecken des Verkehrsnetzes ein Routenabgleich. Bei den restlichen 11,9 % der Strecken handelt es sich um Strecken, die kürzer als 200 Meter sind.

Je nach Optimierungsziel sind bei der Routenberechnung unterschiedliche Optimierungsfunktionen möglich. Hierzu ist es notwendig, je nach dem Optimierungsziel, wie z. B. der Fahrzeit $K_{Zeit}$, dem Energieverbrauch $K_{Energie}$ oder der Streckenlänge $K_{Laenge}$, unterschiedliche Gewichtungsmatrizen zu generieren. Damit sich das aktuelle Verkehrsgeschehen optimal in den Kantengewichten widerspiegelt und um optimale Routingergebnisse zu erzielen, ist eine ständige Aktualisierung dieser Gewichtungsmatrizen, welche eine Funktion der Verkehrsdichte $\rho$ sind, notwendig.

Die Gesamtoptimierungsfunktion ergibt sich mit den Gewichtungsfaktoren $g_{Laenge}$, $g_{Zeit}$, $g_{Energie}$ und $g_{Streckenpotenzial}$ nach Gl. 5.4.6. Hierzu werden die einzelnen Kantengrößen linear auf ihren Maximalwert normiert, so dass alle Kantengrößen in einem Intervall von $[0, 1]$ vorliegen.

$$\begin{aligned} K_{ges} = g_{Laenge} \cdot K_{Laenge} + g_{Zeit} \cdot K_{Zeit}(\rho) + \\ g_{Energie} \cdot K_{Energie}(\rho) + g_{Streckenpotenzial} \cdot K_{Streckenpotenzial} \end{aligned} \tag{5.4.6}$$

**Tabelle 5.4.1:** *Übersicht Optimierungsziele, Abkürzungen*

| Optimierungsziel | Abkürzung | Gewichtung $g_x$ [%] | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Zeit | Energie | Streckenpotenzial |
| alle Fahrzeuge zeiteffizient | $ZE$ | 100 | 0 | 0 |
| alle Fahrzeuge energieeffizient | $EE$ | 0 | 100 | 0 |
| völlig kontrollierter Verkehrsfluss, zeiteffizient | $VKV_Z$ | 95 | 0 | 5 |
| völlig kontrollierter Verkehrsfluss, energieeffizient | $VKV_E$ | 0 | 99 | 1 |

Tabelle 5.4.1 zeigt die verschiedenen Optimierungsziele sowie die Gewichtung der einzelnen Kantenkosten. Je größer die Gewichtung der Streckenpotenzialfunktion $g_{Streckenpotenzial}$ ist, desto mehr Alternativrouten werden befahren.

Durch die multivariate Optimierungsfunktion des völlig kontrollierten Verkehrsflusses erfolgt bei der Routensuche gleichzeitig eine Minimierung der Fahrzeit sowie der Streckenpotenzialfunktion. Dies bedeutet, dass die Route mit der in Summe in der Zukunft minimalen Verkehrsbelastung (Streckenpotenzialfunktion) sowie der minimalen Fahrzeit bzw. des Energieverbrauchs gewählt wird. Die Analysen einer Vielzahl von Szenarien (siehe Abschnitt 6.2) ergaben, dass sich beim zeitoptimierten Routing bei einer Gewichtung von 5 % der Streckenpotenzialfunktion ein Einsparungsmaximum ergibt. Beim energieeffizienten Routing entsteht dieses Einsparungsmaximum für den Energieverbrauch bei einer Gewichtung von 1 %. Eine höhere Gewichtung der Streckenpotenzialfunktion führt beim energieeffizienten Routing dazu, dass mehr kostengünstigere aber längere Alternativrouten gefunden werden, was in der Summe aber zu einem höheren Energieverbrauch führt.

### 5.4.8 Auswertung für eine Start-Ziel-Beziehung

Abbildungen 5.4.6 und 5.4.7 zeigen die Ergebnisse für den zeiteffizienten und völlig kontrollierten Verkehrsfluss $VKV_Z$ für eine Start-Ziel-Beziehung. Insgesamt umfasst das Beispiel 300 Fahrzeuge, die eine Route vom Quellknoten 88 zum Zielknoten 39 suchen (siehe Anhang 10.2 (a)). Um eine hohes Verkehrsaufkommen zu simulieren, wurde der Quellfluss des Quellknotens mit 1 800 Fahrzeugen pro Stunde definiert. Dies bedeutet, dass durchschnittlich alle zwei Sekunden ein neues Fahrzeug im Quellknoten initialisiert wird. Um aussagekräftige Vergleichsergebnisse der verschiedenen Routingstrategien zu erreichen, ist es wichtig sicherzustellen, dass der Sollfluss der Quellknoten bei allen zu vergleichenden Routingstrategien gleich ist.

In dem Fall, wenn alle Fahrzeuge die zeiteffizienteste Route ohne Routenupdate befahren (rot) ist zu erkennen, dass ein näherungsweise linearer Anstieg der Fahrzeit zu verzeichnen ist. Dies ist dadurch zu begründen, da durch die gleiche Routenwahl aller Fahrzeuge, die Verkehrsdichte auf dieser Route stark ansteigt und sich dadurch an Straßenverengungen und Kreuzungen Verkehrsstaus bilden, bedingt durch das hohe Verkehrsaufkommen. Insgesamt ergibt sich eine durchschnittliche Fahrzeit von 944,9 Sekunden mit einer Standardabweichung von 85,0 Sekunden sowie eine durchschnittliche Standzeit je Fahrzeug von 39,1 Sekunden.

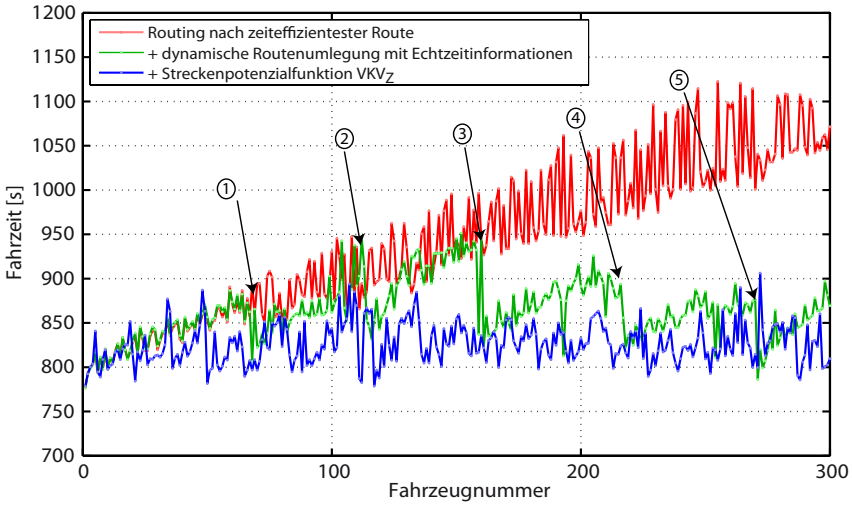



**Abbildung 5.4.6:** *Entwicklung der Fahrzeit für eine Start-Ziel-Beziehung*

Erfolgt das Routing der Fahrzeuge mit Echtzeitinformationen sowie dynamischer Routenumlegung durch ein Update der Route und Anpassung an die Verkehrssituation (grün), ist zunächst auch ein linearer Anstieg der Fahrzeit bis zum Punkt (1) erkennbar. An dem Punkt (1) ist eine deutliche Reduzierung der Fahrzeit zu verzeichnen. Zu diesem Zeitpunkt spiegelt sich das entstandene hohe Verkehrsaufkommen in den Sensordaten der Verkehrsdatenerfassung wider. Dadurch ergibt sich beim Routingupdate eine kostengünstigere Alternativroute, weshalb die Fahrzeuge auf diese umgeleitet werden. Dadurch, dass nun die Fahrzeuge die Alternativroute wählen, steigt auf dieser die Verkehrsdichte an, wohingegen die ursprünglich beste Route entlastet wird. In den Punkten (2) bis (5) erfolgt ebenfalls aufgrund eines hohen Verkehrsaufkommens ein Update auf eine kostengünstigere Alternativroute, wodurch sich ein sägezahnähnlicher Verlauf der Fahrzeit ergibt. Wie zu erkennen ist, reagiert das System lediglich auf Situationen mit hoher Verkehrsdichte und umfährt diese nach dem Auftreten. Eine Vermeidung des Staus durch ein intelligentes

Verteilen ist lediglich mit Echtzeitinformationen nicht möglich. Insgesamt ergibt sich somit eine durchschnittliche Fahrzeit von 864,2 Sekunden, was einer Einsparung von 8,5 % entspricht, die Standzeit reduziert sich auf 6,8 Sekunden. Auch lässt sich die Standardabweichung der Fahrzeit von 85,0 Sekunden auf 33,6 Sekunden und die der Standzeit von 35,6 Sekunden auf 9,6 Sekunden senken.

Werden die Fahrzeuge nach dem entwickelten Routingkonzept für den völlig kontrollierten Verkehrsraum geroutet, ergibt sich ein Fahrzeitverlauf wie in Abb. 5.4.6 (blau) dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass kein linearer Anstieg mehr mit der Anzahl der Fahrzeuge zu verzeichnen ist. Insgesamt werden die Fahrzeuge auf 16 Alternativrouten verteilt, wobei jedes Fahrzeug durchschnittlich 2,3-mal ein Routenupdate erhält. Dadurch kann erreicht werden, dass die durchschnittliche Fahrzeit auf 826,3 Sekunden reduziert werden kann mit einer deutlich geringeren Standardabweichung von 22,8 Sekunden. Dies entspricht einer Einsparung von 12,6 %, gegenüber dem Fall, wenn alle Fahrzeuge die gleiche Route befahren. Außerdem reduziert sich die Standzeit weiter auf 1,7 Sekunden mit einer Standardabweichung von 4,4 Sekunden. In Abbildung 5.4.7 ist die Entwicklung der Durchschnittsgeschwindigkeit je Fahrzeug aufgetragen. Diese beträgt beim Routing nach der zeiteffizientesten Route 55,3 km/h, beim $VKV_Z$-Routing hingegen steigt sie auf 59,3 km/h.

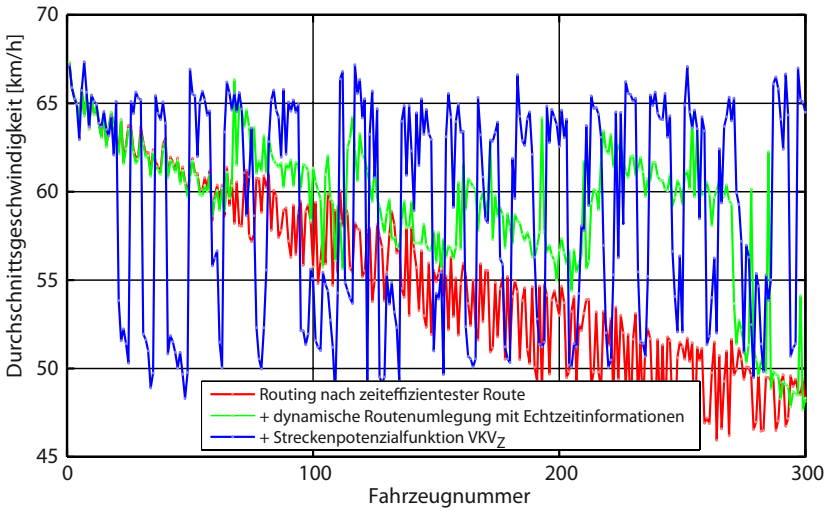



**Abbildung 5.4.7:** *Entwicklung der Durchschnittsgeschwindigkeit bei verschiedenen Routingkonzepten*

Ziel des entwickelten Routingkonzeptes ist es, dem globalen Optimum bezüglich der Fahrzeit von allen Fahrzeuge möglichst nahe zu kommen. Da das globale Optimum durch sehr viele Parameter beeinflusst wird und nicht geschlossen berechnet werden kann, ist lediglich eine Abschätzung möglich, wie nahe man dem globalen Optimum kommt. Für diese Abschätzung wurde als Bezugspunkt die Fahrzeit des ersten Fahrzeuges gewählt, welche 782,0 Sekunden beträgt. Diese Fahrzeit entspricht der minimal möglichen Fahrzeit für die betrachtete Start-Ziel-Beziehung. Für ein hohes Verkehrsaufkommen entspricht diese Fahrzeit somit der global optimalen mittleren Fahrzeit aller Fahrzeuge. Diese global optimale Fahrzeit kann bei hohem Verkehrsaufkommen in der Realität nicht erreicht werden, da mit steigendem Verkehrsaufkommen die Fahrzeit, bedingt durch die begrenzte Kapazität einer Strecke, ansteigt. Vergleicht man das Routingkonzept des völlig kontrollierten zeitoptimierten Verkehrsflusses ($VKV_Z$), so ist durchschnittlich ein Plus von 5,7 % zur minimal möglichen Fahrzeit zu verzeichnen. Dies entspricht einer Steigerung von

44,3 Sekunden. Wenn mit Echtzeitinformationen ohne zentrale Verwaltung der Routen geroutet wird, liegt die durchschnittliche Fahrzeit 10,5 % über dem Optimum (+82,2 Sekunden). Wenn alle Fahrzeuge ihre persönlich zeiteffizienteste Route befahren, liegt die durchschnittliche Fahrzeit sogar 20,8 % über dem Optimum (+162,9 Sekunden). Wie diese Abschätzung zeigt, kommt das entwickelte Routingkonzept für den völlig kontrollierten Verkehrsfluss dem globalen Optimum der Fahrzeit sehr nahe.

Die Anwendung, Analyse und Diskussion des entwickelten Algorithmus für einen völlig kontrollierten Verkehrsfluss bei Anwendung auf komplexe und realistische Szenarien erfolgt in Kapitel 6.

## 5.5 Kantengewichtsbestimmung für unterschiedliche Verkehrsdichten

Ein sehr wichtiger Baustein für die Funktionalität des Routingalgorithmus, wie er im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, sind aktuelle und möglichst genaue Daten über den Zustand des Verkehrsnetzes, was durch die Kantengewichte beschrieben wird. Hierzu ist es notwendig, den Verkehrszustand für einen Zeithorizont von wenigen Augenblicken bis hin zu 10 Minuten zu prädizieren, um möglichst genaue Aussagen über die Fahrzeit und den Energieverbrauch für das Befahren eines Streckensegments zu machen. In [93] und [39] werden Algorithmen vorgestellt, welche adaptiv aus einer Historie an Geschwindigkeitsprofilen den Kraftstoffverbrauch eines einzelnen Fahrzeuges prädizieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Verfahren implementiert und getestet. Beim ersten werden durch Streckensensoren ständig aktuelle Informationen, wie die aktuell benötige Fahrzeit, Wartezeiten an LSA oder der Durchschnittsverbrauch für das jeweilige Streckensegment übermittelt. Die Aktualisierungsrate der Daten beträgt hierbei je nach Einstellung zwischen 30 Sekunden bis hin zu 5 Minuten. (Eine genaue Analyse und Optimierung hinsichtlich einer optimalen Aktualisierungsrate findet sich in Kap. 8.1.1). Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass ständig ein genaues Abbild des Ist-Zustands gegeben ist, auf dessen Basis neue Gewichtungsmatrizen erstellt werden können. Nachteil ist, dass sehr viele Daten benötigt werden, was mit dem heutigen Ausbau der Infrastruktur hinsichtlich V2X-Kommunikation nur bedingt möglich ist.

Beim heutigen Stand der Technik verfügen Verkehrsstreckensensoren, welche Streckenabschnitte überwachen, lediglich über Informationen wie den aktuellen Verkehrsfluss bzw. die aktuelle Anzahl an Fahrzeugen auf dem jeweiligen Streckensegment. Aus diesem Grund wurde ein zweites Verfahren untersucht, das adaptiv die Fahrzeit und den Kraftstoff-, Energieverbrauch je Streckensegment anlernt. Für die Ermittlung der Daten wurde das Streckennetz mit vielen Fahrzeugen unterschiedlicher Topologie angelernt und der arithmetische Mittelwert der gewünschten Daten aller Fahrzeuge gebildet. Dadurch, dass die Fahrzeit sowie der Energieverbrauch von sehr vielen Fahrzeugen bei den verschiedensten Verkehrsdichten detektiert wird und die Kennlinien ständig aktualisiert werden, ist es möglich, stochastische Effekte, wie Ampelphasen, in den charakteristischen Fahrzeit-Dichte- und Energieverbrauch-Dichte-Kennlinien zu erfassen. Dadurch ergeben sich, wie in Abschnitt 4.3 Abbildung 4.3.1 erläutert, typische Verläufe für die Fahrzeit sowie den Energieverbrauch über der Verkehrsdichte. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sich für jede Fahrzeugtopologie sowie für jeden Fahrzeugtyp eine individuelle Energieverbrauchskennlinie ergibt.

Da sowohl bei der Erfassung von Echtzeitinformationen als auch bei den historisch adaptiv angelernten Daten immer Mittelwertbildungen mehrerer Fahrzeuge durchgeführt werden, wurde in Abb. 5.5.1 analysiert, wie hoch die Abweichung der ermittelten Werte von den Ist-Fahrzeiten und

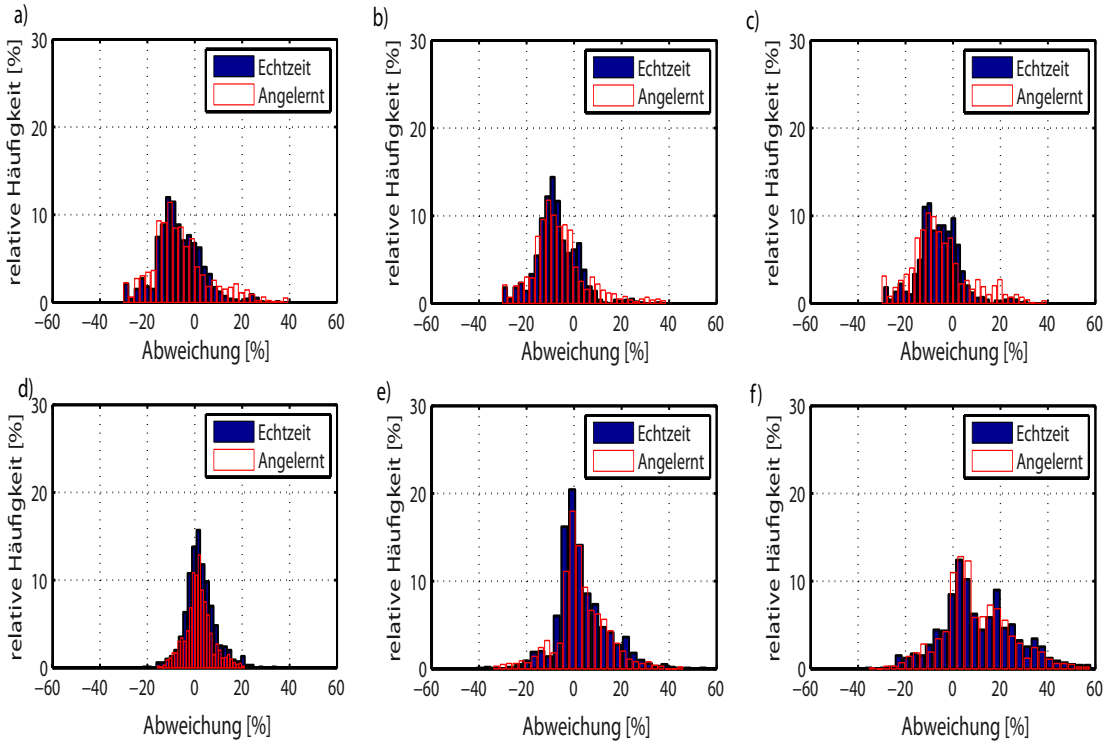



**Abbildung 5.5.1:** *Abweichung zwischen Ist-Energieverbrauch und Fahrzeit von den adaptiv angelernten Datensätzen sowie von Echtzeitinformationen.*
*Fahrzeit: (a) ICEV, (b) BEV, (c) PHEV*
*Energieverbrauch: (d) ICEV, (e) BEV, (f) PHEV*

den Ist-Energieverbräuchen einzelner Fahrzeuge ist. Hierzu wurden der Ist-Energieverbrauch sowie die Ist-Fahrzeit pro Streckensegment aufgezeichnet und mit den Daten auf deren Basis geroutet wurde verglichen. In Abb. 5.5.1 ist hierzu die relative Häufigkeit über der prozentualen Abweichung aufgetragen. Betrachtet man die zeitliche Abweichung zwischen Ist-Werten und prädizierten Werten, so ist bei der Fahrzeit durchschnittlich eine Abweichung von 6-7 %, sowohl bei den Echtzeitdaten als auch bei den angelernten Daten, auszumachen. Betrachtet man die Standardabweichung, so ist zu erkennen, dass sie bei den Echtzeitinformationen durchschnittlich bei 9 % Abweichung liegt und bei den angelernten Daten bei durchschnittlich 12 %. Beim Energieverbrauch ist der Mittelwert der Abweichung sowohl bei den angelernten Daten als auch bei den Echtzeitinformationen zwischen 2,3 % und 2,9 %. Betrachtet man die Standardabweichung, so liegt diese bei Elektrofahrzeugen durchschnittlich bei 10,9 % und bei konventionellen Fahrzeugen bei 6,1 %.

Die Abweichungen zwischen Ist-Daten und den angelernten- bzw. Echtzeitdaten sind der Problematik geschuldet, dass bei kurzen Strecken, wie sie im Stadtverkehr häufig auftreten, schon geringfügige Veränderungen im Verkehrsfluss zu großen Veränderungen im Fahrzeit- und Energiebedarf führen. Hierbei ist vor allem entscheidend, mit welcher Geschwindigkeit Fahrzeuge auf ein Streckensegment einfahren bzw. wie sie es wieder verlassen und ob Beschleunigung- oder Verzögerungsvorgänge notwendig sind. Abbildung 5.5.2 (a) zeigt den Energieverbrauch verschiedener Fahrzeugtopologien für einen Beschleunigungsvorgang aus dem Stand auf eine gewünschte Endgeschwindigkeit. Wie daraus zu entnehmen ist, führt z. B. ein Beschleunigungsvorgang,

aufgrund einer roten Ampel, eines konventionellen Fahrzeuges auf eine Endgeschwindigkeit von 40 km/h auf einen zusätzlichen Energiebedarf von 72 Wh. Bei durchschnittlichen Energieverbräuchen von konventionellen Fahrzeugen bei kurzen Strecken im Stadtverkehr zwischen 0,7-1,5 kWh entspricht dies einer Steigerung von 9 %.

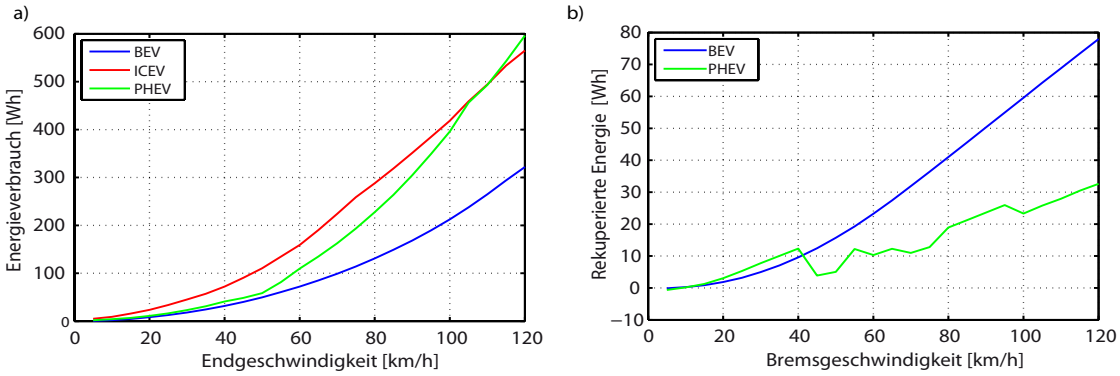



**Abbildung 5.5.2:** *(a) Vergleich Energieverbrauch / rekuperierte Energie für verschiedene Beschleunigungsvorgänge, (b) Bremsvorgänge bei verschiedenen Fahrzeugtopologien*

### 5.5.1 Abbiegekosten

Zum Durchfahren einer Kreuzung tritt neben der Verlängerung der Route ein zusätzlicher Zeitbedarf sowie Energiebedarf auf. Deshalb ist es notwendig, für eine realistische Routengenerierung, diese zusätzlichen Kosten mit in die Routenplanung einzubeziehen. Bei genauer Betrachtung sind Abbiegekosten von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Hierunter zählt zum einen die Größe der Kreuzung und mit welcher Geschwindigkeit ein Fahrzeug an die Kreuzung heranfährt und zum anderen die Verkehrsdichte. Bei hohen Verkehrsdichten muss dementsprechend mehr Zeit für den Abbiegevorgang, durch eventuelle Behinderungen in der Kreuzung, eingeplant werden.

Zur Ermittlung der zusätzlichen Weglänge wurden anhand von Satellitenbildern eine Vielzahl von Kreuzungen unterschiedlicher Größe vermessen und Durchschnittswerte für die jeweiligen Abbiegerichtungen ermittelt. Für die Bestimmung des Verbrauchs- und der Zeitbedarfswerte wurden mittels Messfahrten an verschiedenen Kreuzungen im Raum Ulm, eine Vielzahl von Geschwindigkeitstrajektorien aufgenommen. Mittels der aufgezeichneten GPS-Position und der Geschwindigkeitstrajektorie des Messfahrzeuges, war es somit möglich, den Energie- und Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge, mit den in Kap. 3 entwickelten Modellen, zu ermitteln. Tab. 5.5.1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Kosten für die Abbiegevorgänge.

**Tabelle 5.5.1:** *Abbiegekosten für verschiedene Fahrzeugtypen, Klassifiziert nach der Abbiegerichtung*

| | Gerade | Rechts | Links |
|---|---|---|---|
| Weglänge [m] | 15 | 12 | 28 |
| Zeit [s] | 2.7 | 3.5 | 4 |
| Energieverbrauch konventionelles Fahrzeug [Wh] | 34 | 23 | 41 |
| Energieverbrauch Elektrofahrzeug [Wh] | 8 | 5 | 11 |
| Energieverbrauch Hybridfahrzeug [Wh] | 20 | 14 | 25 |

Um den Einfluss der Abbiegekosten auf das Routingverhalten zu ermitteln, wurden 2 000 Fahr-

zeuge mit beliebigen Start-Ziel-Beziehungen, einmal mit und einmal ohne Beachtung der Abbiegekosten, geroutet. Die Ergebnisse zeigen, dass beim Routing nach der kürzesten Route die Gesamtsumme der Abbiegevorgänge aller Fahrzeuge nahezu unverändert bleibt. Im Durchschnitt besteht eine Route aus zweimal links, zweimal rechts und 8,5 geradeaus Kreuzungsüberquerungen. Routet man hingegen zeiteffizient, so fällt auf, dass vor allem zeitintensivere Linksabbiegevorgänge vermieden werden. Somit ergibt sich bei den Linksabbiegevorgängen ein Rückgang von durchschnittlich 15 % bei Berücksichtigung der Abbiegekosten. Vergleicht man die Gesamtzahl aller Abbiegevorgänge, so ist durch die Abbiegekosten beim zeiteffizienten Routing ein Rückgang von 3,1 %, beim energieeffizienten Routing von 5,6 % von Abbiegevorgängen zu verzeichnen. Da der Einfluss der Abbiegevorgänge also vergleichsweise gering ist, ist eine noch detailliertere Modellierung der Abbiegekosten für die weiteren Untersuchungen und Analysen nicht notwendig.

## 5.6 Unbeeinflusster Verkehrsfluss $UBV$

Zur Abbildung des Ist-Zustandes, hinsichtlich des Routenwahlverhaltens von Verkehrsteilnehmern, wird im Folgenden der unbeeinflusste Verkehrsfluss $UBV$ definiert. Der unbeeinflusste Verkehrsfluss soll in den folgenden Analysen und Vergleichen als Referenzzustand dienen, um Einsparungen bezüglich der Fahrzeit sowie des Energieverbrauchs des völlig kontrollierten Verkehrsflusses (Abschnitt 5.4) bewerten zu können.

Die Wahl einer Route um von A nach B zu gelangen, wird in der Regel auf Basis von zeitlichen und ökonomischen Faktoren, aus mehreren alternativen Routen, getroffen. Auch haben Faktoren wie Ortskenntnisse, Gewohnheiten, Kenntnisse über die Verkehrssituation usw. Einfluss auf die individuelle Routenwahl des einzelnen Verkehrsteilnehmers. Zur mathematischen Beschreibung des stochastischen Routingverhaltens vieler Verkehrsteilnehmer werden sogenannte Entscheidungsmodelle herangezogen. Bei den Entscheidungsmodellen wird jede Alternative bewertet und diejenige gewählt, die den größten Nutzen für den Verkehrsteilnehmer verspricht. Hierbei wird vorausgesetzt, dass Verkehrsteilnehmer rational handeln und Alternativen mit dem größten Nutzen wählen. Dies trifft jedoch nur zu einem gewissen Maß zu, wie Hilligest [64] postulierte. Dieses Postulat besagt, dass die Wahl einer Route aus einem endlichen Satz von Alternativrouten, eine Funktion des sozioökonomischen Hintergrunds jedes Verkehrsteilnehmers ist. Diesen Schwankungen in der Entscheidungsfindung und Bewertung von Alternativrouten versuchen Entscheidungsmodelle Rechnung zu tragen. Gängige Modellansätze in der Literatur sind das Probitmodell, das Logitmodell sowie das C-Logitmodell. Eine gute Übersicht über weitere Algorithmen zur stochastischen Verkehrsaufteilung findet sich in [143].

Beim Logitmodell handelt es sich um ein multinominales diskretes Entscheidungsmodell. Die Wahrscheinlichkeit für die Wahl der Alternative $i$ ist gleich der Wahrscheinlichkeit, dass diese Alternative den größten Nutzen im Vergleich zu anderen Alternativen aufweist. Das Problem des Logitmodells ist, dass davon ausgegangen wird, dass die zur Verfügung stehenden Routen zueinander in keinem Bezug stehen, es also keine Überschneidung durch Routenabschnitte gibt. Da dies in der Realität nur sehr selten der Fall ist, treten an Überschneidungsstellen zwangsläufig hohe Verkehrsbelastungen bei Anwendung des Logitmodells auf. Abhilfe schafft das sogenannte C-Logitmodell [30], welches außerdem die Abhängigkeit der einzelnen Alternativrouten berücksichtigt.

### 5.6.1 C-Logitmodell

Zur Berechnung und Beurteilung verschiedener Routen ist es notwendig, den Nutzen $V_i$ (Gl. 5.6.1) jeder Alternativroute zu kennen. Eine Möglichkeit den Nutzen einer Route zu bestimmen ist nach Gl. 5.6.2 über den normierten Widerstand. Hierbei entspricht der Widerstand der Länge der Route.

$$V_i = -\hat{w}_i \tag{5.6.1}$$

$$\hat{w}_i = \frac{w_i}{w_{min}} = \frac{L_i}{L_{min}} \tag{5.6.2}$$

Die Normierung jeder Alternativroute auf die vermeintlich kürzeste Route bewirkt, dass die Län-

gendifferenzen zwischen den Alternativrouten jeweils unter Berücksichtigung der Gesamtlänge der Route richtig beurteilt werden. So entspricht bei einer 5 km langen Strecke ein Umweg von 5 km eine Steigerung um 100 %. Bei einer 100 km langen Strecke entspricht ein Umweg von 5 km hingegen lediglich einer Steigerung von 5 % [72].

Beim C-Logitmodell wird neben dem Nutzen $V$ der Route außerdem der Überschneidungsfaktor (communality factor) $CF$ zwischen den Alternativen berücksichtigt. Für die Realisierung des Überschneidungsfaktors gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine ist nach Gl. 5.6.3, hierbei beschreibt die Länge $L_{ij}$, die Länge der Route, die die Route $i$ und $j$ gemeinsam haben. Wobei $L_i$ und $L_j$ die Gesamtlängen der jeweiligen Routen sind.

$$CF_i = \beta \cdot ln \left( \sum_{j=1}^{n} \left( \frac{L_{ij}}{\sqrt{L_i}\sqrt{L_j}} \right)^{\gamma} \right) \tag{5.6.3}$$

Beim Parameter $\beta$ handelt es sich um einen Schätzparameter, welcher in einem Intervall zwischen null und eins gewählt wird. Der Parameter $\gamma$ wird nach [72] auf einen Wert zwischen eins und zwei gesetzt. Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternativroute wird schließlich nach Gl. 5.6.4 bestimmt.

$$P(i) = \frac{e^{\mu(V_i - CF_i)}}{\sum_{j=1}^{n} e^{\mu(V_j - CF_j)}} \tag{5.6.4}$$

Zur Bestimmung einer Route sind somit folgende drei Schritte notwendig:

1. Zunächst wird zur Simulation des unkontrollierten Verkehrsflusses ein Satz von Alternativrouten generiert. Hierunter fallen die kürzeste Route, die zeit- und energieeffizienteste Route sowie Alternativrouten, wenn jeweils zu Beginn und am Ende diese Routenstreckensegmente gesperrt werden. Nach [88] sind einem Autofahrer durchschnittlich zwischen zwei und vier Alternativrouten bekannt. Die eigentliche Routenentscheidung für eine Alternativroute beschränkt sich hingegen auf eine durchschnittliche Wahl zwischen zwei und drei Routen. Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass gerade zu Beginn der Route sowie zum Ende der Route Autofahrer aus vielen Alternativ- und Ausweichrouten auswählen. Im Mittelteil der Route hingegen findet fast keine Variation durch Alternativrouten statt.

2. Im zweiten Schritt erfolgt die Anwendung des C-Logitmodells mit Berechnung der Überlappungen der Alternativrouten sowie der Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeit $P(i)$.

3. Abschließend wird bei einer Fahrzeuganfrage für eine gewünschte Start-Ziel-Beziehung mithilfe der Monte Carlo Simulation, aus dem Satz von Alternativrouten, eine Route zugewiesen.

Abbildung 5.6.2 und Tab. 5.6.2 zeigen die Alternativrouten sowie die berechnete Auswahlwahrscheinlichkeit nach dem C-Logitmodell einer Beispielroute. Wie den Gleichungen 5.6.3 und 5.6.4 zu entnehmen ist, verfügt das C-Logitmodell über drei freie Parameter, die je nach Wahl über die Verkehrsbelastung der einzelnen Alternativrouten bestimmen. Nach [72], wo eine Vielzahl von Parameterkombinationen untersucht wurden, ergibt sich mit $\mu = 2$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$ eine gleichmäßige Verteilung der Fahrzeuge auf die jeweiligen Alternativrouten, ohne dass es zu einer Überbelastung einzelner Alternativrouten mit geringem Widerstand kommt.

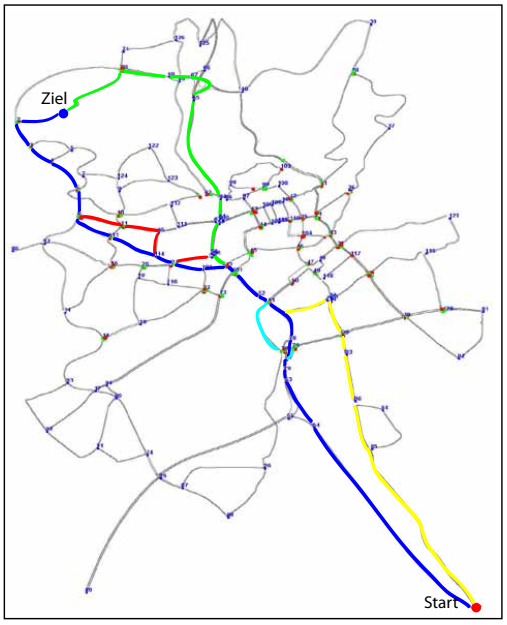



**Abbildung 5.6.1:** *Alternativrouten 27-1 des unbeeinflussten Verkehrsflusses UBV*

| Alternative | Länge [km] | $V_i$ [1] | $CF_i$ [1] | P [%] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 13,9 | -1,05 | 0,8 | 23,5 |
| 2 | 13,5 | -1,02 | 0,9 | 16,0 |
| 3 | 14,4 | -1,08 | 0,4 | 41,0 |
| 4 | 13,6 | -1,02 | 1,2 | 10,5 |
| 5 | 13,3 | -1,00 | 1,3 | 8,8 |

**Tabelle 5.6.1:** *Übersicht über die Parameter der Alternativrouten 27-1*

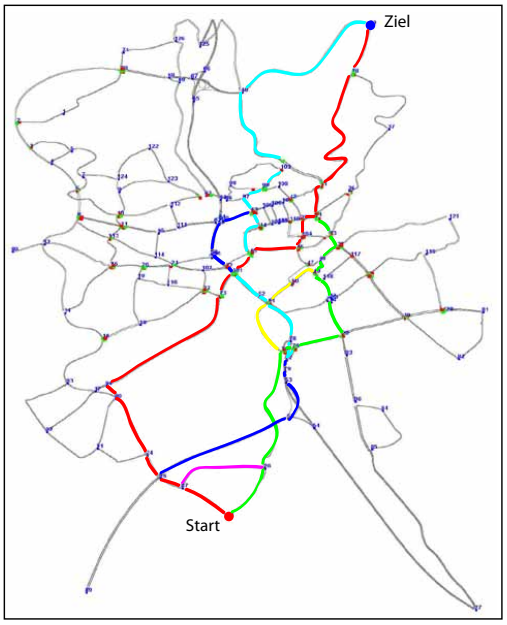



**Abbildung 5.6.2:** *Alternativrouten 88-39 des unbeeinflussten Verkehrsflusses UBV*

| Alternative | Länge [km] | $V_i$ [1] | $CF_i$ [1] | P [%] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 12,5 | -1,12 | 1,1 | 3,6 |
| 2 | 12,5 | -1,12 | 0,8 | 7,0 |
| 3 | 11,3 | -1,01 | 0,7 | 9,9 |
| 4 | 12,2 | -1,09 | 0,8 | 7,1 |
| 5 | 13,8 | -1,23 | -0,4 | 63,8 |
| 6 | 11,2 | -1,00 | 0,8 | 8,6 |

**Tabelle 5.6.2:** *Übersicht über die Parameter der Alternativrouten 88-39*

## 5.7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die beiden Ergebnisräume für den unbeeinflussten Verkehrsfluss, welcher die Ist-Situation beschreibt sowie den völlig kontrollierten Verkehrsfluss definiert. Für den völlig kontrollierten Verkehrsraum wurde ein Routingkonzept entworfen, das es ermöglicht mittels eines intelligenten, zentralisierten und dynamischen Routingalgorithmus, die Routen aller Fahrzeuge zentral zu verwalten und dynamisch an die Verkehrssituation anzupassen. Des Weiteren ist es das Ziel des Routingkonzepts, die Routinganfragen der Fahrzeuge so auf die bestehende Infrastruktur zu verteilen, dass eine Minimierung der Fahrzeit und des Energieverbrauchs erreicht werden kann. Hierzu wurde das Routingkonzept theoretisch anhand einer einfachen Start-Ziel-Beziehung erläutert. Im Rahmen von Kapitel 6 erfolgt eine Anwendung sowie eine detaillierte Auswertung des Routingkonzepts anhand realistischer Verkehrsszenarien.

# 6 Analyse des Verkehrsroutingkonzeptes

In diesem Kapitel werden die in Kap. 5 erläuterten und entwickelten Routingalgorithmen anhand von komplexen realistischen Verkehrsszenarien, welche in Abschnitt 6.2 definiert werden, untersucht. Zunächst wird in Abschnitt 6.1 näher erläutert, welche Unterschiede sich hinsichtlich verschiedener Optimierungsziele und Fahrzeugtopologien bei der Routenwahl ergeben. Anschließend wird in Abschnitt 6.3 analysiert, welche Verbesserungen in punkto des Verkehrsflusses, der Fahrzeit und der Energieeinsparung durch einen völlig kontrollierten Verkehrsfluss erreichbar sind. In Abschnitt 6.4 erfolgt ein direkter Vergleich des völlig kontrollierten Ergebnisraumes, welcher den optimalen Zustand beschreibt sowie dem unkontrollierten Ergebnisraum, welcher den Ist-Zustand beschreibt. Schließlich erfolgt in Abschnitt 6.5 eine genaue Analyse wie viele Fahrzeuge direkt in die optimale Navigation involviert sein müssen, um vergleichbare Ergebnisse zum völlig kontrollierten Verkehrsfluss erreichen zu können.

## 6.1 Routenwahl bei unterschiedlichen Optimierungszielen in Abhängigkeit der Fahrzeugtopologie

Bei der Routenwahl kann je nach Optimierungskriterium nach verschiedenen Anforderungen und Optimierungszielen eine Route generiert werden. Im Folgenden wird zwischen drei Typen von Routen unterschieden. Erstens der kürzesten Route, sprich der Route mit dem kürzesten Weg. Dies entspricht der Routenwahl, wie sie von den meisten Navigationssystemen vorgeschlagen wird. Als Zweites, die zeiteffizienteste Route. Dies entspricht einer Routenwahl, welche zur geringsten Fahrzeit führt und in der Regel die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit aufweist. Da die Fahrzeit eine sehr große Abhängigkeit von der Verkehrsdichte hat, muss hierbei natürlich der Verkehrszustand mit in die Berechnungen einbezogen werden. Als Drittes, kann eine Route nach der energieeffizientesten Route gewählt werden. Dies entspricht einer Routenwahl, welche den geringsten Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch aufweist, um von A nach B zu gelangen. Wichtige Faktoren für die Generierung einer energieeffizienten Route sind, die Streckentopologie, die Durchschnittsgeschwindigkeit sowie die Fahrzeugtopologie. Die Fahrzeugtopologie spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da Elektrofahrzeuge während des bergab Fahrens Energie rekuperieren können. Dadurch fallen Routensegmente mit negativer Steigung für Elektrofahrzeuge positiv ins Gewicht.

Klassische Diesel- oder Benzinfahrzeuge können aus Bergabpassagen keinen Gewinn erzielen bzw. Kraftstoff einsparen. Allerdings kann eine Kraftstoff- bzw. Energieeinsparung durch eine Reduzierung der Geschwindigkeit erreicht werden, was aber zu einer Zunahme der Fahrzeit führt. Deshalb muss bei der Bewertung der energieeffizienten Route auch immer die Zunahme der Fahrzeit mit in Betrachtung gezogen werden. Im Folgenden wurde untersucht, welche Abhängigkeiten zwischen den Faktoren Fahrzeugtopologie und Streckentopologie bei der energieeffizienten Routenwahl gegeben sind. Hierzu wurden insgesamt 13 individuelle Start-Ziel-Beziehungen unter-

sucht und jeweils bei einer geringen Verkehrsdichte für verschiedene Fahrzeugtopologien, sprich mit klassischem Antrieb (ICEV), Elektrofahrzeuge (BEV) und Parallel-Hybridfahrzeuge (PHEV), die kürzeste, energieeffizienteste und zeiteffizienteste Route bestimmt. Hierbei liegt der Fokus der Analyse vor allem auf den Unterschieden, die sich bei den jeweiligen Routen hinsichtlich der Fahrzeugtopologie und der Streckencharakteristik ergeben.

### 6.1.1 Vergleich der kürzesten , zeiteffizientesten und energieeffizienten Route

Abbildung 6.1.1 (a) zeigt das Ergebnis der Kraftstoffeinsparung von energieeffizientem Routing bei ICEV, BEV, PHEV bezüglich der kürzesten Route. Wie zu erkennen ist, hängt das Einsparpotenzial ganz individuell von der Start-Ziel-Beziehung ab und ob genügend vergleichbare alternative Routen zur Verfügung stehen. Bei den 13 untersuchten Routen kann durch die Wahl der energieeffizienten Route bis zu 24,7 % Energie eingespart werden, im Vergleich zur kürzesten Route. Im Durchschnitt ergibt sich eine Einsparung von 2,9 % für ICEV Fahrzeuge sowie 8,5 % für BEV und 7,5 % für PHEV. In den analysierten Routen ergibt sich im Durchschnitt eine Steigerung der Fahrzeit Abb. 6.1.1 (b) von 8,8 % für konventionelle Fahrzeuge, 10,0 % für Elektrofahrzeuge und 16,5 % für Hybridfahrzeuge.

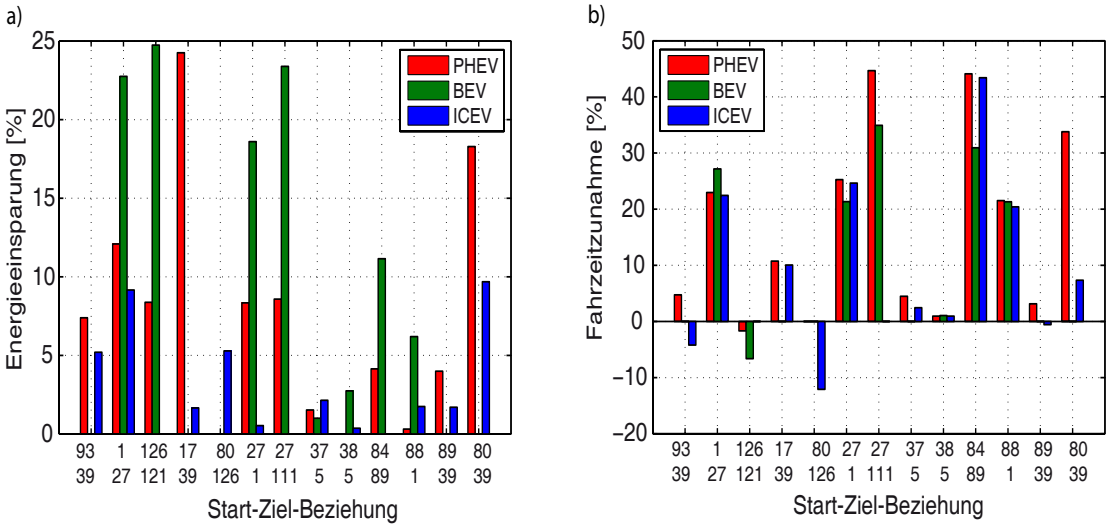



**Abbildung 6.1.1:** *(a) Vergleich Energieeinsparung und (b) Fahrzeitzunahme der energieeffizienten Route gegenüber der kürzesten Route für ICEV, BEV, PHEV*

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit der zeiteffizienten Route im Durchschnitt um 10,1 % höher liegt, als die der kürzesten Route. Die Durchschnittsgeschwindigkeit der energieeffizienten Route liegt durchschnittlich 2 % unter der kürzesten und 12,0 % unter der zeiteffizienten Route. Tabelle 6.1.1 zeigt einen Überblick über Route 80-39 hinsichtlich Durchschnittsgeschwindigkeit, positive und negative Höhenmeter sowie Länge der Route. Wie zu erwarten war, liefert die Optimierung nach der kürzesten Strecke die geringste Gesamtlänge. Bei der Optimierung nach der zeiteffizientesten Route liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit um ca. 15 km/h über der energieeffizienten bzw. kürzesten Strecke. Außerdem ist die kürzeste bzw. zeiteffizienteste Route unabhängig von der Fahrzeugtopologie, im Gegensatz zur energieeffizienten Route.

**Tabelle 6.1.1:** *Detailübersicht Route 80-39, Vergleich energieeffiziente, kürzeste und zeiteffizienteste Route (BEV, ICEV, PHEV)*

| | Durchschnitts-v [km/h] | | | Routenlänge [m] | | | positive Höhenmeter [m] | | | negative Höhenmeter [m] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Länge | Zeit | Energie | Länge | Zeit | Energie | Länge | Zeit | Energie | Länge | Zeit | Energie |
| BEV | 60,1 | 75,8 | 60,1 | 8,9 | 9,3 | 8,9 | 169 | 175 | 169 | 99 | 106 | 99 |
| ICEV | 60,1 | 75,8 | 64,3 | 8,9 | 9,3 | 9,8 | 169 | 175 | 185 | 99 | 106 | 115 |
| PHEV | 60,1 | 75,8 | 61,6 | 8,9 | 9,3 | 11,1 | 169 | 175 | 187 | 99 | 106 | 117 |

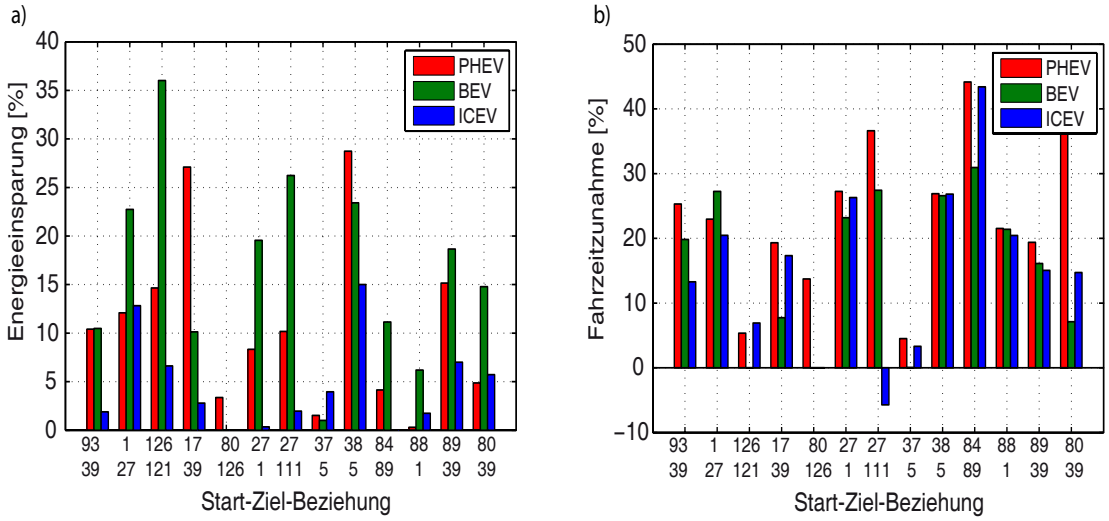



**Abbildung 6.1.2:** *(a) Energieeinsparung und (b) Fahrzeitzunahme der energieeffizienten Route bzgl. der zeiteffizientesten Route*

Vergleicht man die durchschnittlichen Energieeinsparungen der energieeffizienten Route bezüglich der zeiteffizienten Route Abb. 6.1.2 (a), so ergibt sich für konventionelle Fahrzeuge eine Einsparung von 4,6 %, für Elektrofahrzeuge von 15,4 % sowie für PHEV von 10,8 %. Gleichzeitig führt dies zu einer durchschnittlichen Fahrzeitzunahme Abb. 6.1.2 (b), bedingt durch die energieeffiziente Route, von 15,6 % für ICEV Fahrzeuge, 16,0 % für BEV und 23,8 % für PHEV.

Abbildung. 6.1.3 zeigt die Unterschiede im Höhenprofil der Routenwahl für Route 80-39, wenn nach Zeitoptimalität, Energieeffizienz und nach der kürzesten Strecke geroutet wird. Wie im Höhenprofil zu erkennen ist, wählen die verschiedenen Fahrzeugtopologien unterschiedliche Routen. Vergleicht man die energieeffiziente mit der kürzesten Route, so ist mit einem konventionellen Fahrzeug (ICEV), wie Tab. 6.1.2 zeigt, eine Kraftstoffeinsparung von 9,6 % bei energieeffizientem Routing möglich. Beim BEV ist die kürzeste Route sowie die energieeffiziente Route die gleiche. Im Vergleich zur zeiteffizienten Route ist eine Energieeinsparung des Elektrofahrzeuges von 14,7 % möglich bei einer Fahrzeitzunahme von 7,8 %. Da alle drei Fahrzeugtopologien gleich stark motorisiert sind, sind die Routen der kürzesten und zeiteffizientesten Route vom Fahrzeugtyp unabhängig. Deutliche Unterschiede gibt es hingegen bei der energieeffizienten Route, wie Abschnitt 6.1.2 näher zeigt.

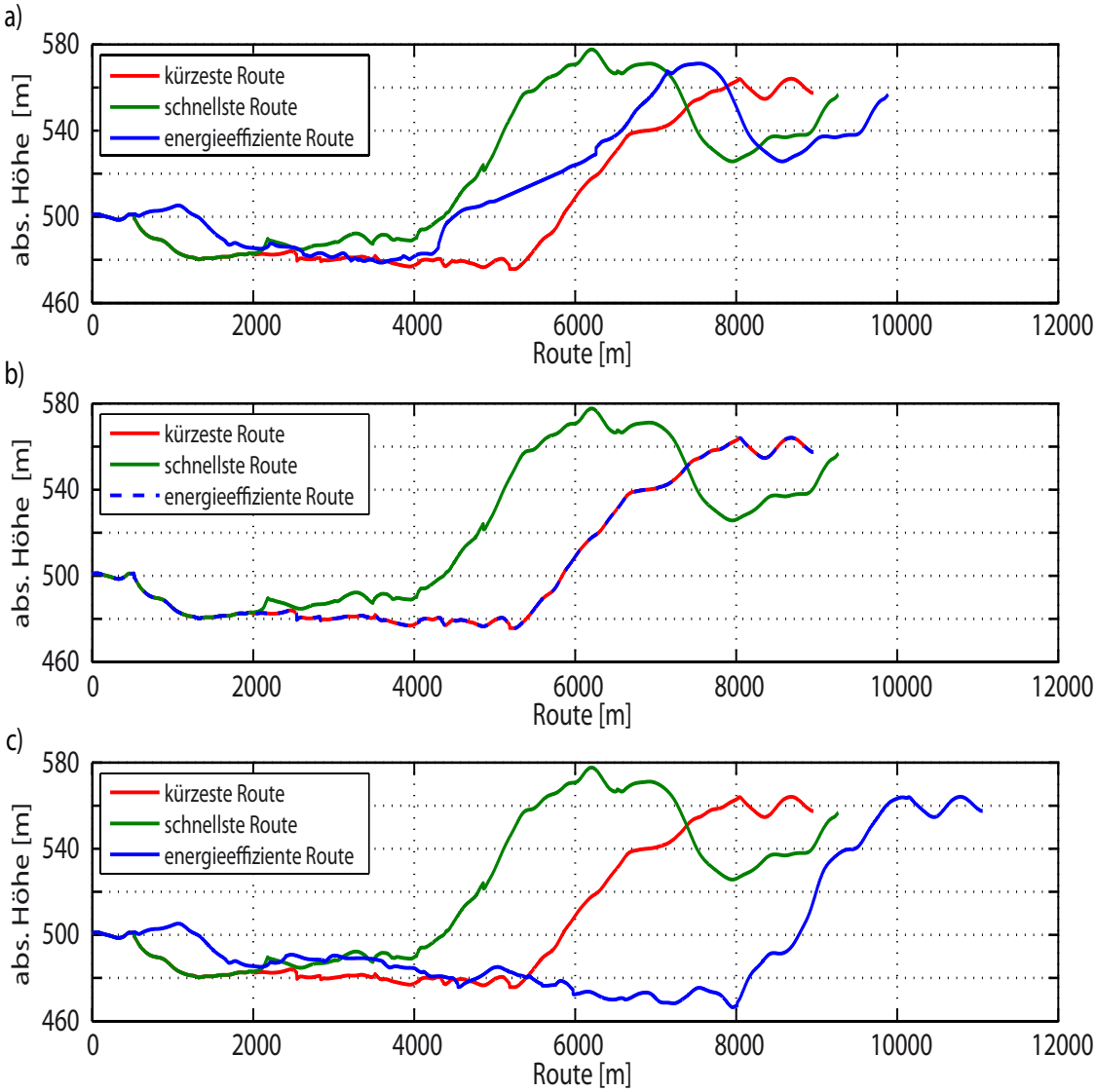



**Abbildung 6.1.3:** *Höhenprofil der kürzesten, schnellsten und energieeffizienten Route (80-39) von (a) ICEV, (b) BEV, (c) PHEV*

**Tabelle 6.1.2:** *Vergleich Kraftstoffeinsparung energieeffiziente Route gegenüber der kürzesten Route von ICEV, BEV und PHEV (Route 80-39)*

| | ICEV | BEV | PHEV |
|---|---|---|---|
| Energieeinsparung gegenüber kürzester Route | 9,6 % | 0,0 % | 18,3 % |
| Fahrzeitzunahme gegenüber kürzester Route | 7,3 % | 0,0 % | 33,7 % |
| Energieeinsparung gegenüber zeiteffizientesten Route | 5,7 % | 14,7 % | 4,8 % |
| Fahrzeitzunahme gegenüber zeiteffizientesten Route | 14,7 % | 7,8 % | 42,9 % |

### 6.1.2 Fahrzeugtopologiebedingte Unterschiede bei der energieeffizienten Routenwahl für ICEV, BEV und PHEV

Abbildung 6.1.4 vergleicht das Höhenprofil von Route 80-39 für konventionelle, Elektro- und Hybridfahrzeuge mit ähnlicher Masse und Motorisierung. Wie zu erkennen ist, wählt das Elektrofahrzeug für die energieeffiziente Route einen Streckenverlauf, der die Rekuperationsphasen möglichst optimal ausnützt. Betrachtet man hier die Durchschnittsgeschwindigkeit, so liegt sie bei der energieeffizienten Route deutlich unter der zeiteffizienten und kürzesten Route. Zur Visualisierung der Routen sind in Abb. 10.8.2 im Anhang die energieeffiziente Route der drei Fahrzeugtopologien im Geländemodell dargestellt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass bei Bergauffahrten, die energieeffiziente Route des Elektrofahrzeuges in der Mehrzahl der Fälle mit der kürzesten Route, sprich dem direktesten Weg, übereinstimmt. Bei Bergabfahrten hingegen gibt es deutliche Unterschiede, da es für konventionelle Fahrzeuge nicht effektiv ist, eine kurzzeitige Zwischensteigung (2 800-3 500 Meter) in Kauf zu nehmen, da während der späteren Bergabstrecke keine Energie zurückgewonnen werden kann und dadurch die energieeffiziente Route des Elektrofahrzeuges unter Umständen sogar ineffizienter für das konventionelle Fahrzeug ist.

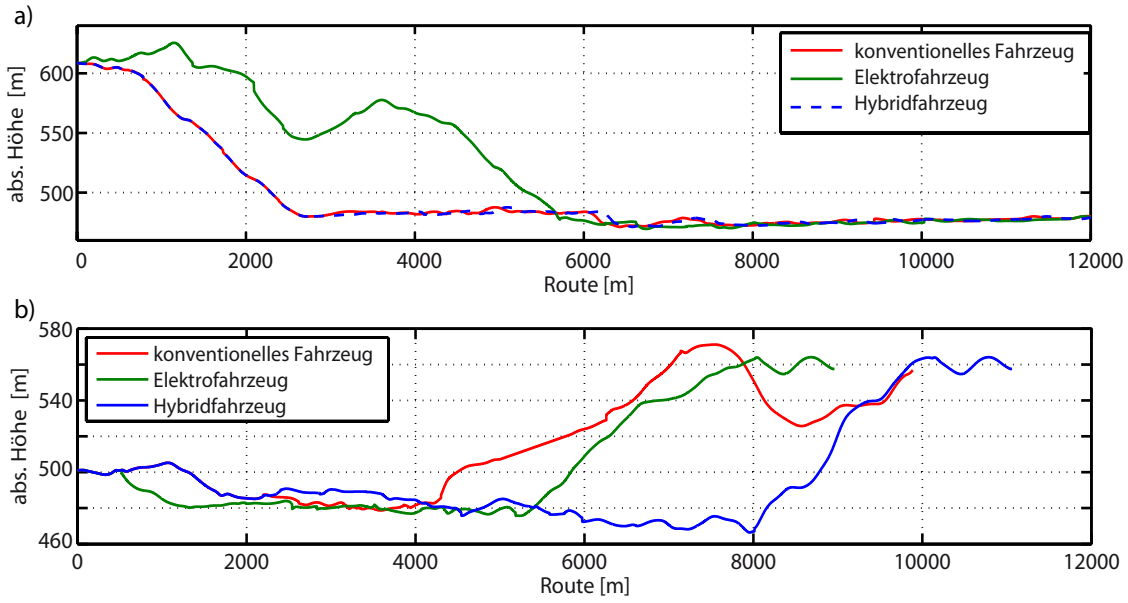



**Abbildung 6.1.4:** *Vergleich des unterschiedlichen Höhenprofils der energieeffizienten Route (a) 1-27 Bergabfahrt, (b) 80-39 Bergauffahrt, für ICEV, BEV und PHEV*

Als Fazit für die Differenzierung der Routenwahl nach der Fahrzeugtopologie kann festgestellt werden, dass es je nach Fahrzeugtopologie unterschiedliche energieeffiziente Routen gibt. Je nach Ausprägung des Höhenprofils des Streckennetzes und der zur Verfügung stehender Alternativrouten unterscheiden sich diese stärker. Es ist jedoch nur sehr schwer möglich, allgemeingültige Aussagen bezüglich der energieeffizienten Route zu machen. Die Auswertungen haben gezeigt, dass diese ganz individuell von der Start-Ziel-Beziehung, vom Geschwindigkeitsprofil der Strecken sowie der jeweiligen Steigung abhängt. Eine Tendenz dahingegen ist erkennbar, dass bei Routen, bei denen das Ziel deutlich höher liegt als der Startpunkt, bei Elektrofahrzeugen die energieeffizienteste Route in sehr vielen Fällen, der kürzesten Route entspricht. Bei Bergabfahrten hingegen sind für Elektrofahrzeuge für die energieeffiziente Route oft kurze Zwischensteigungen, um die Rekuperationsphase verlängern zu können, von Vorteil [111].

## 6.2 Definition von Auswerteszenarien

Zur Analyse des völlig kontrollierten Verkehrsflusses nach Kapitel 5.4 sowie dem unkontrollierten Verkehrsflusses und der Analyse der Durchdringung von Fahrzeugen wurden insgesamt sieben verschiedene realistische Verkehrsszenarien generiert, die im Folgenden verglichen werden sollen. Tabelle 6.2.1 zeigt die untersuchten Verkehrsszenarien mit dem jeweiligen Verkehrsfluss, den Quellknoten sowie der Anzahl an Start-Ziel-Beziehungen.

**Szenario 1:** Szenario eins bildet lediglich eine Start-Ziel-Beziehung ab. Dieses soll dazu dienen zu untersuchen, wie sich eine geringe Anzahl an Fahrzeugen, die bei ihrer Routenwahl nicht durch kreuzende Routen anderer Start-Ziel-Beziehungen beeinflusst werden, auf die Lösungsqualität auswirken.

**Szenario 2:** Bei Szenario zwei handelt es sich um ein Szenario, das sich aus Szenario eins sowie einer weiteren Route zusammensetzt. Beide Routen kreuzen hierbei in der Mitte, wodurch untersucht werden soll, welche Beeinflussungen durch die gegenseitige Behinderung der Routen entstehen und wie stabil das System darauf reagiert.

**Szenario 3:** Szenario drei beschreibt ein Szenario mit insgesamt fünf Start-Ziel-Beziehungen. Hierbei wird der morgendliche Berufsverkehr von im Umland liegenden Stadtteilen zur Arbeitsstelle im Industriegebiet, Universität, Innenstadt und Autobahnzubringer in Ulm abgebildet.

**Szenario 4:** Szenario vier bildet ein Szenario ab, bei dem viele Fahrzeuge von unterschiedlichen Startpunkten lediglich zwei Ziele anfahren möchten. Hierzu wurden die Universität Ulm sowie der Hauptbahnhof Ulm gewählt. Durch diese Wahl ergeben sich zwangsläufig in der Nähe der Zielknoten potenzielle Engstellen.

**Szenario 5:** Bei Szenario fünf handelt es sich ebenfalls um ein realistisches Verkehrsszenario wie es im morgendlichen bzw. abendlichen Berufsverkehr auftritt. Quellpunkte für Fahrzeuge bilden hierbei große Einfallstraßen aus nördlicher, westlicher und südlicher Richtung von Ulm. Ziel der Fahrzeugrouten sind u. a. die Industriegebiete von Ulm und Neu-Ulm sowie die Universität.

**Szenario 6:** Bei Szenario sechs handelt es sich um das gleiche Szenario wie fünf nur mit deutlich mehr Fahrzeugen, die mit einem größeren Zufluss in das Netz strömen. Dieses Szenario soll dazu dienen zu analysieren, welche Unterschiede sich ergeben, hinsichtlich des Zuflusses aus den jeweiligen Quellknoten.

**Szenario 7:** Bei Szenario sieben handelt es sich um ein Szenario mit insgesamt 10 000 Fahrzeugen und 13 Startknoten. Die Startknoten befinden sich hierbei sowohl an großen Einfallstraßen von Ulm und Neu Ulm sowie in großen Wohn- und Industriegebieten. Die Fahrzeuge werden stochastisch zwischen insgesamt fünf Zielen aufgeteilt. Die Ziele liegen hier in erster Linie an der Universität sowie verschiedene Ziele in der Innenstadt von Ulm und Neu Ulm. Dadurch wird erreicht, dass es eine starke Konzentration aller Fahrzeuge auf die Innenstadt von Ulm gibt, was zwangsläufig zu starken Behinderungen führt. Der Quellfluss sämtlicher Quellen beträgt hierbei 900 Fahrzeuge pro Stunde.

**Tabelle 6.2.1:** *Übersicht der analysierten Simulationsszenarien für ULTraSim*

| Szenario Nr. | Anzahl Startknoten | Anzahl Zielknoten | Fahrzeuganzahl | Quellfluss [Fzg/h] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 300 | 1800 |
| 2 | 2 | 2 | 600 | 1800 |
| 3 | 5 | 5 | 2000 | 1000 |
| 4 | 7 | 1 | 2000 | 1000 |
| 5 | 6 | 6 | 2000 | 1000 |
| 6 | 6 | 6 | 3000 | 1800 |
| 7 | 13 | 5 | 10 000 | 900 |

Für eine anschauliche und verständliche Analyse der Ergebnisse wurde die Anzahl von Fahrzeugen bzw. die Start- und Zielknoten begrenzt. Dies stellt jedoch keine Einschränkung, die dem Routingalgorithmus bzw. der Simulationssoftware geschuldet ist, dar. Gleiche bzw. noch bessere Ergebnisse sind mit deutlich größeren Simulationsszenarien zu erwarten, wie Abschnitt 6.4.1 zeigt. Jedoch sind solche große Szenarien ungeeignet zur übersichtlichen visuellen Darstellung und Analyse einzelner Teilergebnisse.

In Abb. 6.2.1 ist das Verkehrsszenario drei exemplarisch dargestellt. Insgesamt besteht es aus fünf Start-Ziel-Beziehungen mit den eingezeichneten zeitoptimalen Routen. Wie zu erkennen ist, ergeben sich sechs Schnittstellen der Routen, welche potenzielle Engpässe durch Kreuzungen und Lichtsignalanlagen darstellen. Zur Auswertung wurde das Szenario mit einer Fahrzeuganzahl zwischen 500 und 3 500 Fahrzeugen beaufschlagt, die mit einem Verkehrsfluss von 1 000 Fzg/h in das Verkehrsnetz strömen. Eine Übersicht über die Start-Ziel-Knoten der anderen analysierten Szenarien findet sich im Anhang Abb. 10.2.1 . Des Weiteren sind hierbei jeweils die kürzeste Route zwischen den einzelnen Start- und Zielpunkten eingezeichnet.

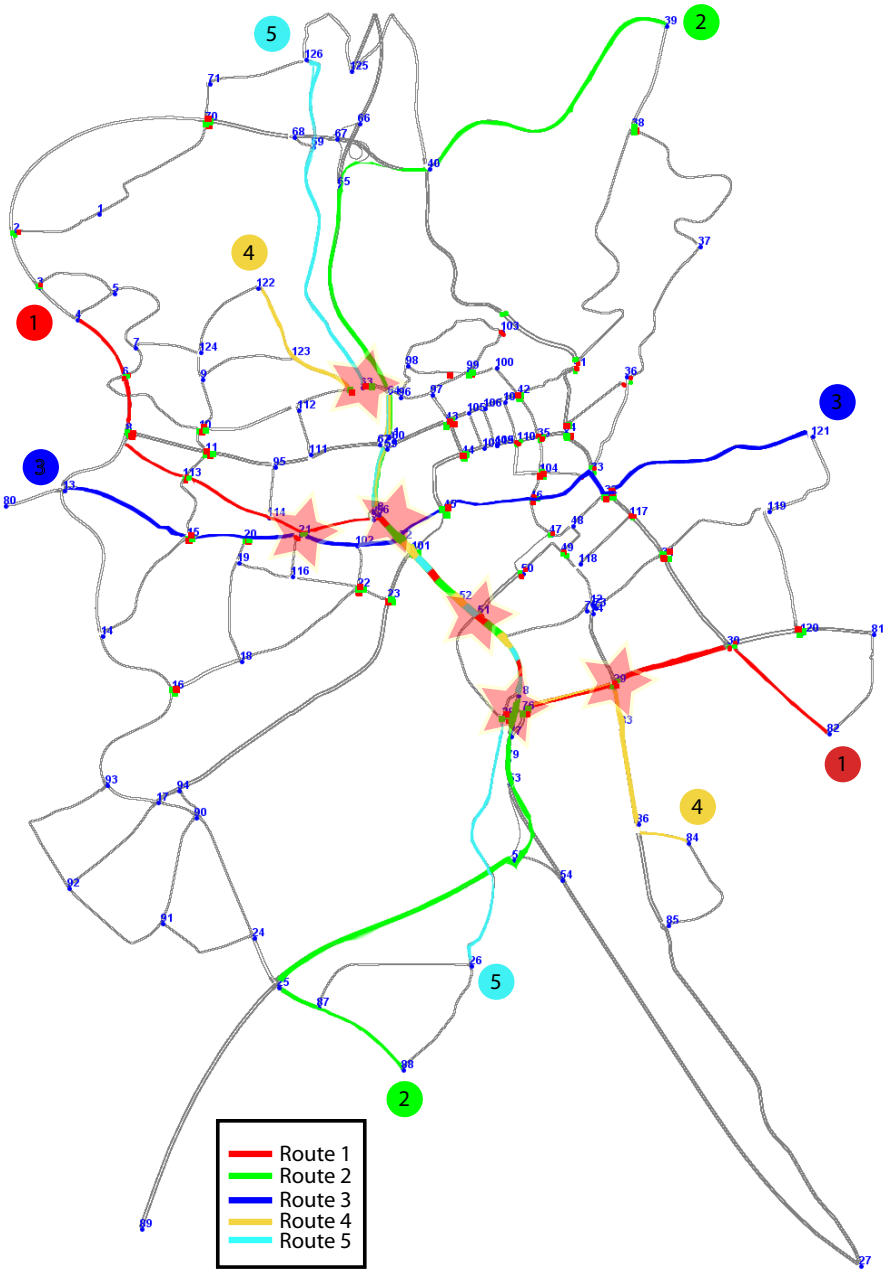



**Abbildung 6.2.1:** *Streckennetz mit eingezeichneten kürzesten Routen von Szenario drei sowie mögliche Engpässe durch Routenkreuzungen (Sterne)*

## 6.3 Analyse des völlig kontrollierten Verkehrsflusses $VKV_{Z,E}$ bei komplexen Routingszenarien

Die in Abschnitt 6.1 generierten zeit- und energieeffizienten Routen sind nur für den Augenblick der Routengenerierung optimal. Wenn viele Fahrzeuge zeitgleich dieselbe Route befahren, so wird zwangsläufig diese optimale Route ineffizient, da die Verkehrsbelastung hier überproportional ansteigt. Diese Situation tritt durch die zunehmende Nutzerakzeptanz von Navigationssystemen heute immer verstärkter auf, da in der Regel alle Navigationssysteme nach den gleichen Optimierungskriterien die möglichen Routen ermitteln. In diesem Abschnitt wird verglichen, wenn zum einen alle Verkehrsteilnehmer ihre zeit- oder energieeffizienteste Route befahren und wenn zum anderen, die Fahrzeuge ein Routenupdate aufgrund von Echtzeitinformationen (EZI) erhalten. Dritter Vergleichsfall ist, wenn die Fahrzeuge mit dem Algorithmus wie er in Kapitel 5 vorgestellt wurde geroutet werden, was im Folgenden mit $VKV_{Z,E}$ (*völlig kontrollierter Verkehrsfluss zeit-, energieeffizient*) bezeichnet wird. Für die Ermittlung der Kraftstoffverbrauchsergebnisse der einzelnen Fahrzeuge wurde, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, keine Bordnetzlast berücksichtigt. Außerdem wurde bei konventionellen Fahrzeugen von einer Start-Stopp-Automatik ausgegangen und kein Leerlaufverbrauch berücksichtigt. Dies ist zulässig, da die reine Standzeit aller Fahrzeuge ermittelt wurde und somit auf den Zusatzverbrauch zurückgerechnet werden kann. Im Folgenden werden die Ergebnisse von Szenario drei im Detail dargestellt und analysiert, die Ergebnisse der anderen vorliegenden Szenarien werden jeweils in Tabellen zusammengefasst.

### 6.3.1 Zeitoptimiertes Routing

In Abb. 6.3.1 sind die Ergebnisse für die Fahrzeit (a), den Kraftstoffverbrauch (b) sowie die Routenlänge (c) und die Durchschnittsgeschwindigkeit (d) von Szenario drei dargestellt. Hierbei wurden die Werte nach der Start-Ziel-Beziehung und in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Das Optimierungsziel des Verkehrsroutings ist es, die Fahrzeuge möglichst zeiteffizient an ihr Ziel zu routen. Hierzu wurde in Abb. 6.3.1 verglichen, wenn alle Fahrzeuge ihre zeiteffiziente Route $ZE$ wählen, ohne dass ein Update, sprich eine Angleichung der geplanten Route an das aktuelle Verkehrsgeschehen, erfolgt.

Analysiert man zunächst die Fahrzeit Abb. 6.3.1 (a), so ergibt sich, wenn alle Fahrzeuge ihre zeiteffiziente Route befahren, ein deutlicher Anstieg der Fahrzeit. Dies kommt dadurch zustande, da sich Verkehrsstaus bilden, da die Fahrzeuge nicht auf Alternativrouten ausweichen. Beim Routing mit Echtzeitinformationen weichen die Fahrzeuge bei Detektion einer hohen Verkehrsbelastung auf andere Strecken aus, dadurch lässt sich die durchschnittliche Fahrzeit aller Verkehrsteilnehmer um 32 % senken. Werden außerdem die Routen aller Fahrzeuge bei der Planung neuer Routen mitberücksichtigt wie in Abschnitt 5.4 ($VKV_Z$) vorgestellt, kann die durchschnittliche Fahrzeit um weitere 4,2 % gesenkt werden, so dass sich eine Verbesserung um 36,2 %, im Vergleich zu dem Fall, wenn alle Fahrzeuge ihre zeiteffiziente Route befahren, ergibt. Analysiert man die Durchschnittsgeschwindigkeit (d), so ergibt sich beim ZE-Routing eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 33,8 km/h, beim ZE+EZI-Routing von 47,5 km/h und beim $VKV_Z$-Routing von 50,3 km/h. Die Routen im vollkommen kontrollierten Verkehrsfluss können also deutlich schneller von den Fahrzeugen zurückgelegt werden. Die hohe Fahrzeit wird stark durch die Standzeit der Fahrzeuge z. B. an Lichtsignalanlagen oder in Verkehrsstaus beeinflusst. Die reine Standzeit liegt beim ZE-Routing bei durchschnittlich 319 Sekunden pro Fahrzeug, beim zeiteffizienten Routing mit

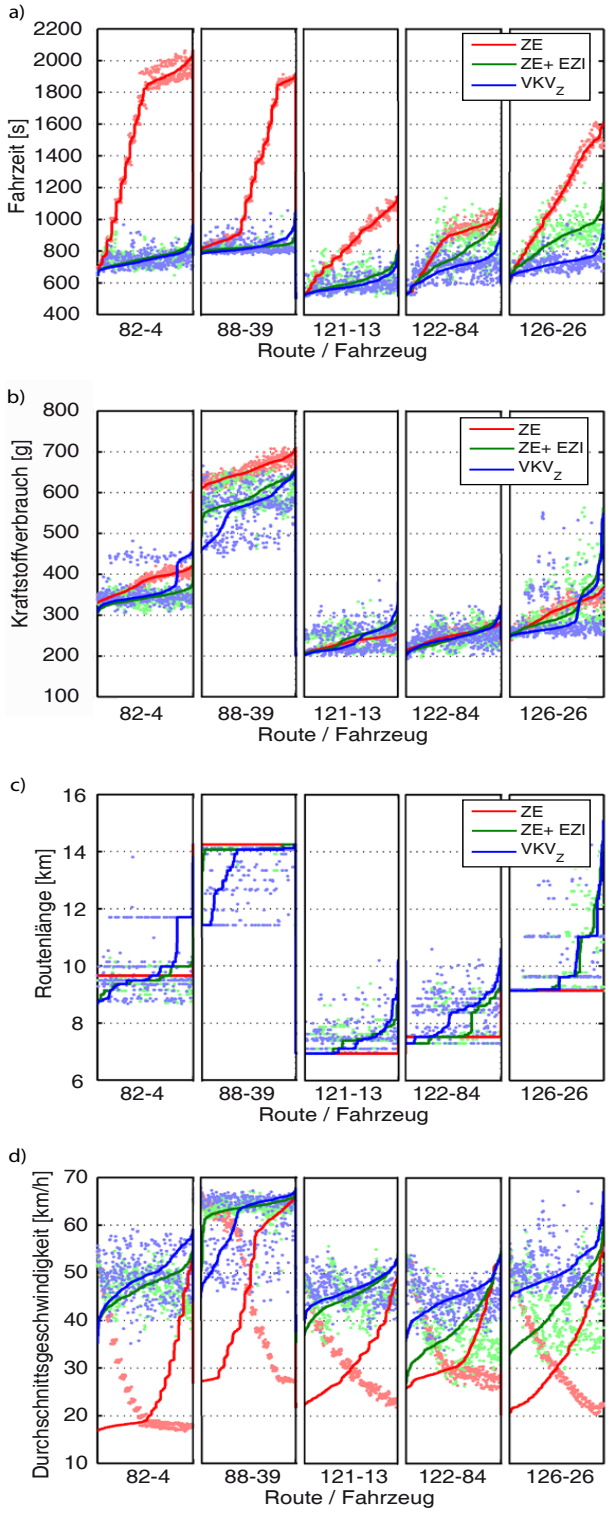



**Abbildung 6.3.1:** *Szenario 3: Zeiteffizientes Routen: Aufsteigend sortierte (a) Fahrzeit, (b) Kraftstoffverbrauch, (c) Routenlänge, (d) Durchschnittsgeschwindigkeit,*
*ZE: alle Fahrzeuge fahren ihre zeiteffizienteste Route*
*ZE + EZI: Routenupdate auf Basis von Echtzeitinformationen (EZI)*
*$VKV_Z$: Vollkommen kontrollierter Verkehrsraum, zeiteffizientes Routing*

Echtzeitinformationen sinkt diese um 85 % auf durchschnittlich 46,8 Sekunden. Im vollkommen kontrollierten Verkehrsfluss kann schließlich eine durchschnittliche Standzeit von 21,9 Sekunden ermittelt werden, was einem Rückgang von 93 % entspricht. Auch nimmt die Standardabweichung von durchschnittlich 203 auf 37 und auf 21 Sekunden ab. Diese Tatsache macht sich auch direkt im Kraftstoffverbrauch bemerkbar Abb. 6.3.1 (b). Hierzu wurde in diesem Fall eine Flotte von konventionellen Kraftfahrzeugen untersucht. Ohne Leerlaufverbrauch ergibt sich somit ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von 4,58 l/100 km für das ZE-Routing, 4,29 l/100 km für das Routing mit Echtzeitinformationen sowie 4,21 l/100 km für das $VKV_Z$ Routing, was einer Einsparung von 8 % entspricht. Geht man davon aus, dass die Fahrzeuge über keine Start-Stopp-Automatik verfügen, steigt der Kraftstoffverbrauch proportional mit der Standzeit, so dass sich beim $VKV_Z$-Routing ein Kraftstoffverbrauch von 4,25 l/100 km ergibt.

Die Tatsache, dass der Kraftstoffverbrauch des vollkommen kontrollierten Verkehrsflusses, welcher zeitoptimal geroutet wird in Abb. 6.3.1 (b) vereinzelt über dem Kraftstoffverbrauch liegt, wenn ausschließlich mit Echtzeitinformationen geroutet wird, ist nicht im Widerspruch, da in dieser Analyse lediglich eine Optimierung nach der Zeitoptimalität erfolgt ist. Das gleiche Verhalten zeigt sich auch in Tab. 6.3.3, da die Kraftstoffeinsparungen nur gering ausfallen, wenn nach Zeitoptimalität geroutet wird. Dies ist deshalb der Fall, da beim völlig kontrollierten Verkehrsfluss Fahrzeuge vereinzelt deutlich längere Routen mit einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit in Kauf nehmen, um ihre Fahrzeit zu optimieren. Dies führt zu einer Kraftstoffverbrauchssteigerung bzw. nur geringen zusätzlichen Kraftstoffeinsparungen des völlig kontrollierten Verkehrsflusses im Vergleich dazu, wenn ausschließlich mit Echtzeitinformationen geroutet wird.

Analysiert man das Routenwahlverhalten Abb. 6.3.1 (c), so lässt sich feststellen, dass die Fahrzeuge im vollkommen kontrollierten Verkehrsfluss im Durchschnitt eine um einen Kilometer längere Strecke als die zeiteffizienteste Route in Kauf nehmen. Durchschnittlich wechseln die Fahrzeuge, die lediglich über Echtzeitinformationen verfügen, ihre Route 2,95 mal. Beim völlig kontrollierten Verkehrsraum steigt dieser Faktor nur geringfügig auf 3 mal an. Es ist jedoch zu beobachten, dass der Wechsel der Routen deutlich früher erfolgt. Dies bedeutet, beim völlig kontrollierten Verkehrsraum reagiert der Algorithmus frühzeitig mittels Routenumlagerung um Verkehrsstaus zu verhindern. Wenn mit Echtzeitinformationen geroutet wird, kann das System lediglich auf bereits entstandene Verkehrsstaus reagieren, wodurch der Wechsel auf eine alternative Route später erfolgt. In Abb. 6.3.2 sind die Einsparungen nach Kraftstoff (a) und Zeit (b) für jede Start-Ziel-Beziehung nochmals im Detail aufgeführt. Die Fahrzeiteinsparung sowie die Reduzierung der Standzeit der anderen analysierten Szenarien findet sich in Tab. 6.3.1, Tab. 6.3.2 und Tab. 6.3.3. Im Durchschnitt ist es möglich, die Fahrzeit um 22,2 % durch einen völlig kontrollierten Verkehrsfluss zu senken. Außerdem konnte die Standzeit von durchschnittlich 239,1 Sekunden auf 79,7 Sekunden pro Fahrzeug reduziert werden. Diese Einsparungen beziehen sich hierbei auf den Vergleichsfall, wenn alle Fahrzeuge ihre zeiteffizienteste Route befahren.

**Tabelle 6.3.1:** *Durchschnittliche Fahrzeiteinsparung beim Routing mit Echtzeitinformationen (EZI) bzw. beim Routing mit Echtzeitinformationen und Streckenpotenzial (Vollkommen kontrollierter Verkehr, $VKV_Z$), im Vergleich, wenn alle Fahrzeuge die zeiteffizienteste Route $ZE$ befahren*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $EZI_Z$ bzgl. $ZE$ [%] | 8,5 | 4,8 | 32,0 | 2,6 | 20,3 | 2,0 | 34,2 |
| $VKV_Z$ bzgl. $ZE$ [%] | 12,6 | 7,8 | 36,2 | 17,2 | 21,7 | 17,0 | 42,6 |
| Zusätzlicher Rückgang [%] | +4,1 | +3,0 | +4,2 | +19,8 | +1,4 | +15,0 | +8,4 |

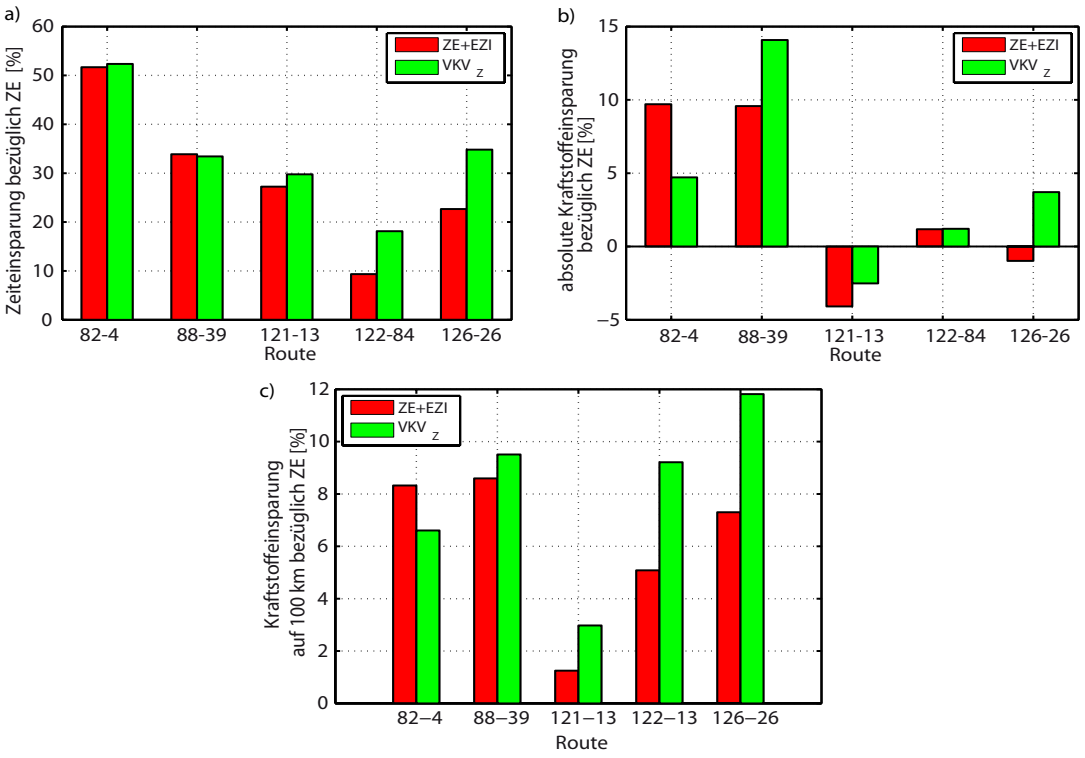



**Abbildung 6.3.2:** *(a) Zeiteinsparung $VKV_Z$- und $ZE + EZI$-Routing gegenüber, wenn alle Fahrzeuge ihre zeiteffizienteste Route befahren, (b) absolute Kraftstoffeinsparung (ICEV mit Start-Stopp-Automatik), (c) Kraftstoffeinsparung pro 100 km bezogen auf zeiteffizientes Routing, Szenario drei aufgesplittet nach Start-Ziel-Beziehung*

**Tabelle 6.3.2:** *Durchschnittliche Standzeit je Fahrzeug*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $ZE$ [s] | 39,1 | 16,7 | 319,0 | 625,2 | 166,8 | 229,5 | 277,5 |
| $EZI_Z$ [s] | 6,8 | 7,0 | 46,8 | 579,9 | 29,8 | 183,4 | 63,2 |
| $VKV_Z$ [s] | 1,7 | 2,0 | 21,9 | 430,5 | 23,4 | 57,4 | 20,9 |

**Tabelle 6.3.3:** *Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch je Fahrzeug (ICEV) mit Start-Stopp-Automatik*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $ZE$ [l/100 km] | 5,1 | 5,1 | 4,6 | 6,0 | 4,3 | 4,4 | 4,8 |
| $EZI_Z$ [l/100 km] | 5,2 | 5,1 | 4,3 | 5,7 | 4,3 | 4,4 | 4,3 |
| $VKV_Z$ [l/100 km] | 5,0 | 5,0 | 4,2 | 5,5 | 4,2 | 4,3 | 4,1 |

### 6.3.2 Energieoptimiertes Routing

Abbildung 6.3.3 zeigt die Vergleichsergebnisse, wenn nach Energieeffizienz ($EE$) geroutet wird. Aufgetragen ist der Kraftstoffverbrauch (a) und die durchschnittliche Fahrzeit (b), wenn alle Fahrzeuge ihre energieeffizienteste Route befahren, ohne andere Verkehrsteilnehmer in die Berechnung der Route zu involvieren. Grün beschreibt das Routing mit Echtzeitinformationen. Im hier dargestellten Szenario Nr. drei ergibt sich insgesamt eine Kraftstoffeinsparung für konventionelle Fahrzeuge von 5,0 %. Gleichzeitig kann die durchschnittliche Fahrzeit, wenn lediglich mit Echtzeitinformationen geroutet wird, um 26,4 % gesenkt werden. Betrachtet man den völlig kontrollierten Verkehrsfluss $VKV_E$ mit dem Optimierungsziel die Fahrzeuge energieeffizient zu navigieren, so kann die Energieeinsparung auf 8,6 % gesteigert werden. Außerdem lässt sich die Fahrzeiteinsparung deutlich auf 42,0 % steigern. Dies entspricht einer Einsparung beim $VKV_E$ von durchschnittlich 0,4 l/100 km, im Vergleich, wenn alle Fahrzeuge ihre energieeffizienteste Route befahren würden und der Leerlaufverbrauch nicht betrachtet wird. Kommt der Leerlaufverbrauch von konventionellen Fahrzeugen hinzu, bedeutet dies sogar eine Einsparung von 1,2 l/100 km. Abbildungen 6.3.4 zeigt die Fahrzeit- und die absolute Kraftstoffeinsparung nach Routen aufgesplittet. Wie zu erkennen ist, ist beim $VKV_E$-Routing bei allen Start-Ziel-Beziehungen eine Reduzierung der Fahrzeit möglich.

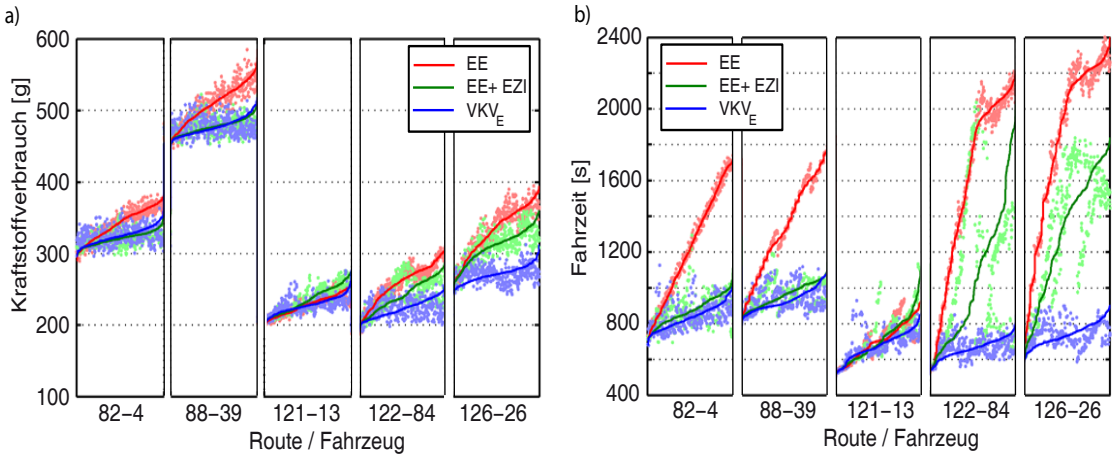



**Abbildung 6.3.3:** *Szenario 3: Energieeffizientes Routen: Aufsteigend sortierter (a) Kraftstoffverbrauch, (b) Fahrzeit,*
*EE: alle Fahrzeuge fahren ihre energieeffizienteste Route*
*EE + EZI: Routenupdate auf Basis von Echtzeitinformationen (EZI)*
*$VKV_E$: Vollkommen kontrollierter Verkehrsraum, zeiteffizientes Routing*

Betrachtet man das Szenario Nr. drei mit einer Flotte von Elektrofahrzeugen Tab. 6.3.5, so ist erkennbar, dass beim $VKV_E$-Routing fast keine Energieeinsparung auftritt. Dies kommt dadurch zustande, da Elektrofahrzeuge bei Nichtbetrachtung der Bordnetzlast im Stillstand keine Energie verbrauchen und sich dadurch Verkehrsstaus zunächst nicht negativ auf die Energiebilanz auswirken. Des Weiteren verfügen die Synchron- und Asynchronmaschinen, welche in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen, über sehr hohe Wirkungsgrade auch bei niedrigen Drehzahlen, wie sie bei häufigem Anfahren in Verkehrsstaus auftreten. Somit wirkt sich ein häufiges Anfahren und Abbremsen durch die Rekuperationsphasen fast nicht negativ auf die Energiebilanz aus. Klassische Verbrennungsmotoren hingegen haben in diesen Bereichen einen schlechten Wirkungsgrad, was zu einer Steigerung des Kraftstoffverbrauchs führt. Weiter wirkt sich eine niedrige Durch-

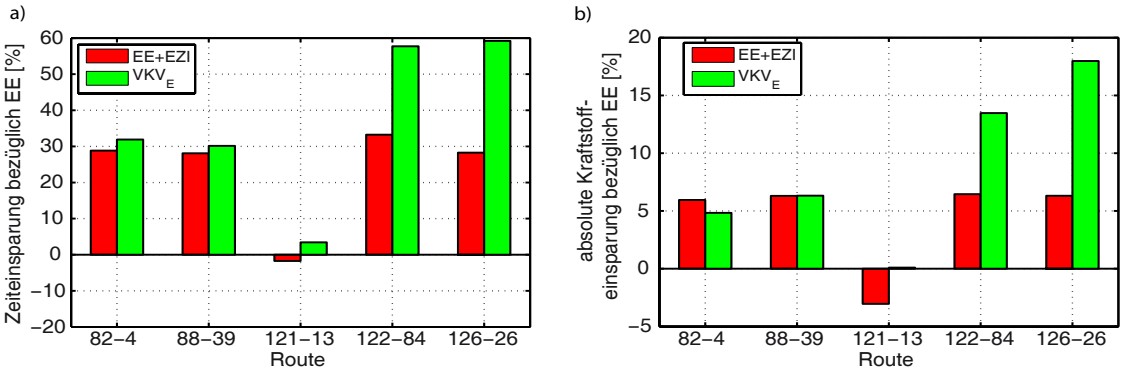



**Abbildung 6.3.4:** *(a) Zeiteinsparung $VKV_E$ und $EE + EZI$ bzgl. wenn alle Fahrzeuge ihre energieeffizienteste Route befahren, (b) Kraftstoffeinsparung (konventionelle Fahrzeuge), Szenario drei aufgesplittet nach Start-Ziel-Beziehung*

schnittsgeschwindigkeit, wie sie in Strecken mit hoher Verkehrsbelastung auftreten auf den Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen positiv aus, da diese vor allem bei hohen Geschwindigkeiten viel Energie verbrauchen. Betrachtet man die Fahrzeit beim $VKV_E$-Routing, so ist auch hier eine deutliche Reduzierung möglich. Die Unterschiede in der durchschnittlichen Fahrzeit, im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen, ergeben sich dadurch, da die energieeffizienten Routen, nicht wie die zeiteffizienten Routen, von der jeweiligen Fahrzeugtopologie abhängen und sich deshalb in der Fahrzeit unterscheiden.

Die Tabellen 6.3.4, Tab. 6.3.5 und Tab. 6.3.6 zeigen die Ergebnisse der anderen analysierten Szenarien, jeweils bei Betrachtung einer Flotte von ICEV, BEV und PHEV. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beim energieeffizienten Routing durchschnittlich eine Einsparung des Energieverbrauchs, im Vergleich dazu, wenn alle Fahrzeuge ausschließlich ihre energieeffiziente Route befahren, von 2,1 % mit und 9,6 % ohne Start-Stopp-Automatik für konventionelle Fahrzeuge sowie -0,3 % für Elektrofahrzeuge und 12,5 % für Parallelhybrid-Fahrzeuge erreicht werden kann. Bei den Auswertungen wurde keine Bordnetzlast berücksichtigt. Gleichzeitig lässt sich die Fahrzeit um durchschnittlich 23,9 % für ICEV sowie 21,6 % für BEV und 25,0 % für PHEV senken.

**Tabelle 6.3.4:** *Durchschnittliche Fahrzeit- und Kraftstoffersparnis von $EZI_E$-, $VKV_E$-Routing im Vergleich zum energieeffizienten Routing (EE) für konventionelle Fahrzeuge mit / ohne Start-Stopp-Automatik*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Energieeinsparung $EZI_E$ bzgl. $EE$ [%] | -0,2/-0,3 | 3,7/4,2 | 5,1/12,9 | 0,3/-10,4 | 2,3/5,7 | -0,4/-3,8 | -0,2/9,5 |
| Fahrzeiteinsparung $EZI_E$ bzgl. $EE$ [%] | -1,2 | 3,4 | 26,4 | -29,0 | 8,6 | -7,5 | 26,7 |
| Energieeinsparung $VKV_E$ bzgl. $EE$ [%] | -3,5/-3,7 | 2,4/5,0 | 8,6/20,7 | -1,2/0,8 | 2,6/16,1 | 0,7/11,7 | 5,3/17,2 |
| Fahrzeiteinsparung $VKV_E$ bzgl. $EE$ [%] | -2,4 | 17,0 | 42,0 | 4,3 | 36,8 | 31,3 | 38,3 |

**Tabelle 6.3.5:** *Durchschnittliche Fahrzeit- und Energieeinsparung $VKV_E$-Routing im Vergleich zur energieeffizienten Route für Elektrofahrzeuge*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Energieeinsparung $VKV_E$ bzgl. $EE$ [%] | 0,8 | -1,3 | -2,0 | 0,8 | -0,3 | -0,1 | 0,3 |
| Fahrzeiteinsparung $VKV_E$ bzgl. $EE$ [%] | -1,3 | 14,5 | 33,7 | 39,4 | 17,7 | 13,6 | 33,5 |

**Tabelle 6.3.6:** *Durchschnittliche Fahrzeit- und Energieeinsparung $VKV_E$-Routing im Vergleich zur energieeffizienten Route für Hybridfahrzeuge*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Energieeinsparung $VKV_E$ bzgl. $EE$ [%] | -3,9 | -1,1 | -2,6 | 24,7 | -3,0 | 32,5 | 40,8 |
| Fahrzeiteinsparung $VKV_E$ bzgl. $EE$ [%] | -2,0 | 3,9 | 20,6 | 36,7 | 28,6 | 40,6 | 46,3 |

### 6.3.3 Streckenpotenzialanalyse

Abbildung 6.3.5 zeigt den Streckenpotenzialverlauf nach Kap. 5.4.4 für Szenario drei. Dargestellt ist die Start-Ziel-Beziehung von Knotennummer 88 nach 39. Die Abbildungen in der linken Spalte beschreiben die zeiteffizienteste Route (blau), welche aus insgesamt 16 Streckensegmenten besteht. Die Abbildungen in der rechten Spalte beschreiben die zeitlich gesehen zweitbeste Route bestehend aus elf Streckensegmenten (rot). In den Abbildungen ist jeweils das Streckenpotenzial, sprich die aktuelle sowie die zu erwartende Streckenbelastung nach Gl. 5.4.3 über der Streckensegmentnummer sowie der Zeit aufgetragen. Die Farben entsprechen der Anzahl der Fahrzeuge, die eine Fahrt über das jeweilige Streckensegment planen.

Die Abbildungen (a) und (b) zeigen den Vergleich, wenn alle Fahrzeuge lediglich ihre zeiteffizienteste Route befahren. Wie zu erkennen ist, steigt für die rote Route, die zeiteffizienteste Verbindung zwischen der Knotennummer 88 und 39, das Streckenpotenzial bis auf vier an. Gleichzeitig melden sich bis zu 180 Fahrzeuge gleichzeitig auf einem Streckensegment an, was zwangsläufig zu sehr hohen Verkehrsbelastungen und Verkehrsstaus führt. Diese hohe Verkehrsbelastung kommt dadurch zustande, da alle Fahrzeuge ihre persönlich zeiteffizienteste Route befahren. Dies ist auch in (b) zu erkennen, die ersten drei Segmente werden von keinem Fahrzeug befahren, da es sich bei diesen Streckensegmenten um eine potenzielle Ausweichroute handelt. Betrachtet man den zeitlichen Streckenpotenzialverlauf (a) der jeweiligen Streckensegmente, so ist erkennbar, dass das Potenzial nahezu kontinuierlich ansteigt. Dies ist dadurch begründet, da eine zunehmende Anzahl von Fahrzeugen ihre Route über die Streckensegmente planen und da keine Alternativrouten gewählt werden.

In den Abbildungen (c) und (d) ist der Potenzialverlauf für den Fall verglichen, wenn die Fahrzeuge aufgrund von Echtzeitinformationen eine alternative Route befahren. Wie zu erkennen ist, planen deutlich weniger Fahrzeuge eine Fahrt über die betrachteten Streckensegmente. Gleichzeitig steigt das Streckenpotenzial über der Zeit betrachtet deutlich weniger stark an. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf einer beliebigen Strecke, so ist ein wellenförmiger Verlauf erkennbar. Dies ist dadurch begründet, da zunächst viele Fahrzeuge eine Fahrt über das Streckensegment planen. Mit der Zeit steigt dadurch die Verkehrsbelastung und damit die Fahrzeit des Segments deutlich an, wodurch Alternativrouten kostengünstiger werden. Dadurch nimmt das Streckenpotenzial wieder ab, da die Fahrzeuge die Alternativrouten befahren. Analysiert man alle gefahrenen Alternativrouten beim Routing mit EZI, so bilden sich bei Szenario drei für die Knotenbeziehung 88-39 insgesamt elf Alternativrouten. Es ist jedoch zu erkennen, dass die zeiteffizienteste Route (c) größeren Schwankungen sowie einer höheren Belastung ausgesetzt ist. Dies ist eine Folge davon, da beim Routing mit Echtzeitinformationen nur auf Verkehrsstaus reagiert wird, nicht jedoch aktiv eingegriffen wird, um schon die Entstehung von Staus zu verhindern.

Der dritte Fall (e) und (f) zeigt schließlich den Vergleich des völlig kontrollierten Verkehrsflusses. Wie zu erkennen ist, unterliegt das Potenzial nun deutlich weniger Schwankungen. Auch konnte durch die Verteilung auf Alternativstrecken das Potenzial sowie die Anzahl an geplanter Routen über die jeweiligen Streckensegmente deutlich reduziert werden, so dass es zu keiner Überlastung der Strecken kommt. Vergleicht man die ersten drei Streckensegmente der Alternativroute (f, Streckensegmente 1-3), so reagiert das System schon frühzeitig durch die aktive Verteilung der Fahrzeuge auf die Alternativroute, bevor es zu Verkehrsstaus kommt. In Abbildung (d) erfolgt dies erst relativ spät (1 000 Sekunden). Insgesamt ergeben sich beim $VKV_Z$- Routing für die Knotenbeziehung 88-39 30 Alternativrouten, die zur Verteilung der Fahrzeuge über das Streckennetz genutzt werden.

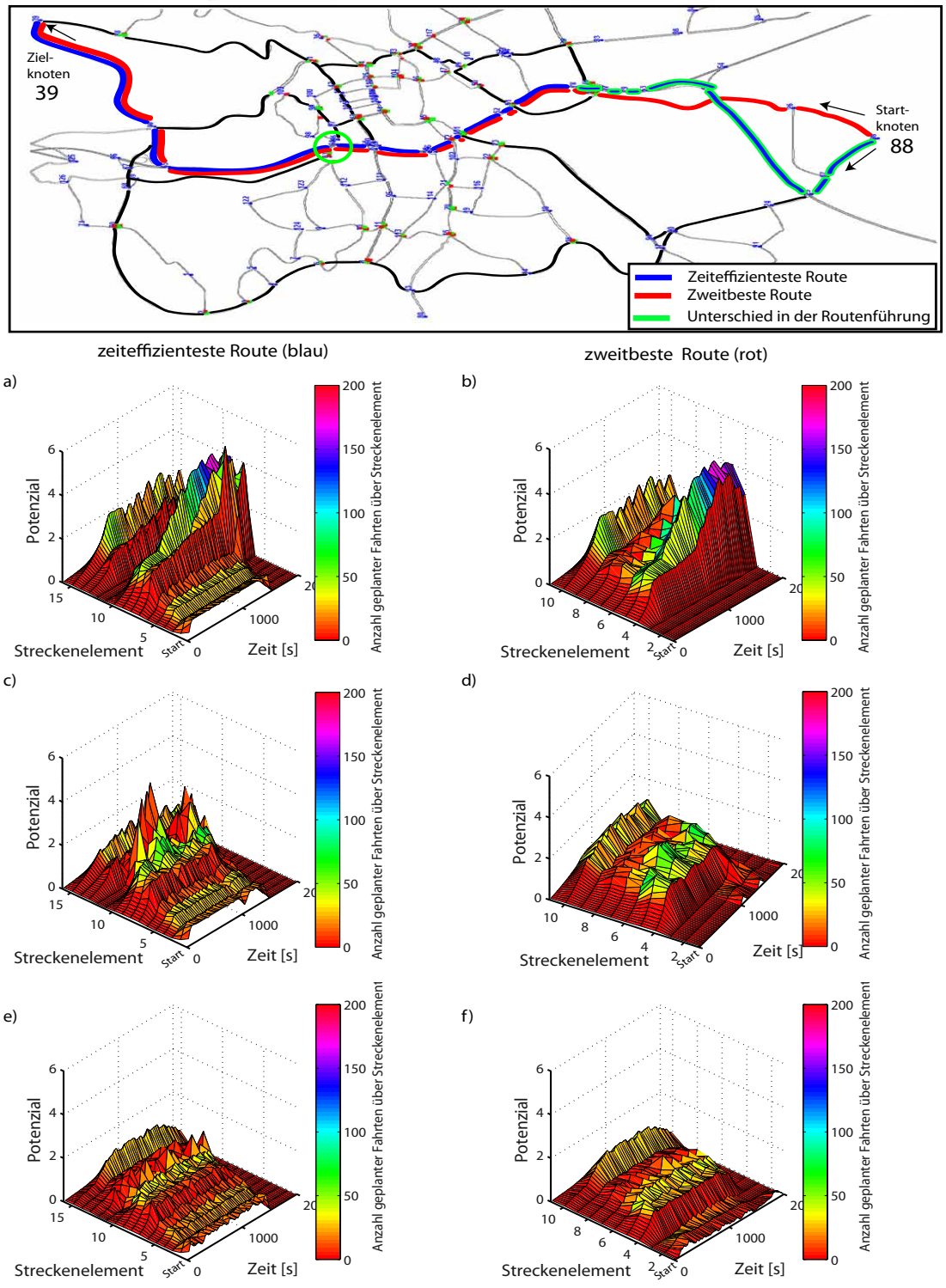



**Abbildung 6.3.5:** *Szenario 3: Vergleich Streckenpotenzialverlauf sowie angemeldete Fahrzeuge je Streckensegment für zeiteffizienteste Route (blau), zweitbeste Route (rot)*
*(a,b): zeiteffizientes Routing; alle Fahrzeuge befahren ihre zeiteffizienteste Route*
*(c,d): zeiteffizientes Routing; mit Update der Route auf Basis von EZI*
*(e,f): zeiteffizientes Routing; bei völlig kontrolliertem Verkehr*

## 6.4 Vergleich des völlig kontrollierten Verkehrsflusses $VKV_{Z,E}$ / unbeeinflussten Verkehrsflusses $UBV$

Im vorherigen Abschnitt wurde untersucht, welche Zeit- und Energieeinsparungen bei einem völlig kontrollierten Verkehrsfluss möglich sind. Hierbei konnte gezeigt werden, dass sowohl die Fahrzeit als auch der Energieverbrauch deutlich reduziert werden kann. Für die Analysen wurde der Extremfall angenommen, dass alle Fahrzeuge Kenntnis über die aktuelle zeiteffizienteste bzw. energieeffizienteste Route haben. Dies würde voraussetzen, dass eine einhundertprozentige Ausstattung der Fahrzeuge mit Navigationssystemen gegeben ist und dass alle Fahrer die vom Navigationsgerät vorgeschlagene Route befolgen. Da in der Realität keine einhundertprozentige Abdeckung mit Navigationsgeräten gegeben ist und auch wegen den in Abschnitt 5.6 genannten Gründen, tritt in der Realität ein stochastisches Routingverhalten auf, was im Folgenden als unbeeinflusster Verkehrsfluss $UBV$ bezeichnet wird. Damit beschreibt der $UBV$ das Verkehrsgeschehen, wie es in der Realität zu beobachten ist.

Abbildung 6.4.1 zeigt den Vergleich für das Szenario Nr. drei, für konventionelle Fahrzeuge (linke Spalte) und Elektrofahrzeuge (rechte Spalte). Verglichen wurde der vollkommen kontrollierte Verkehrsfluss bei zeit- bzw. energieeffizientem Routing ($VKV_{Z,E}$) mit dem unbeeinflussten Verkehrsfluss ($UBV$).

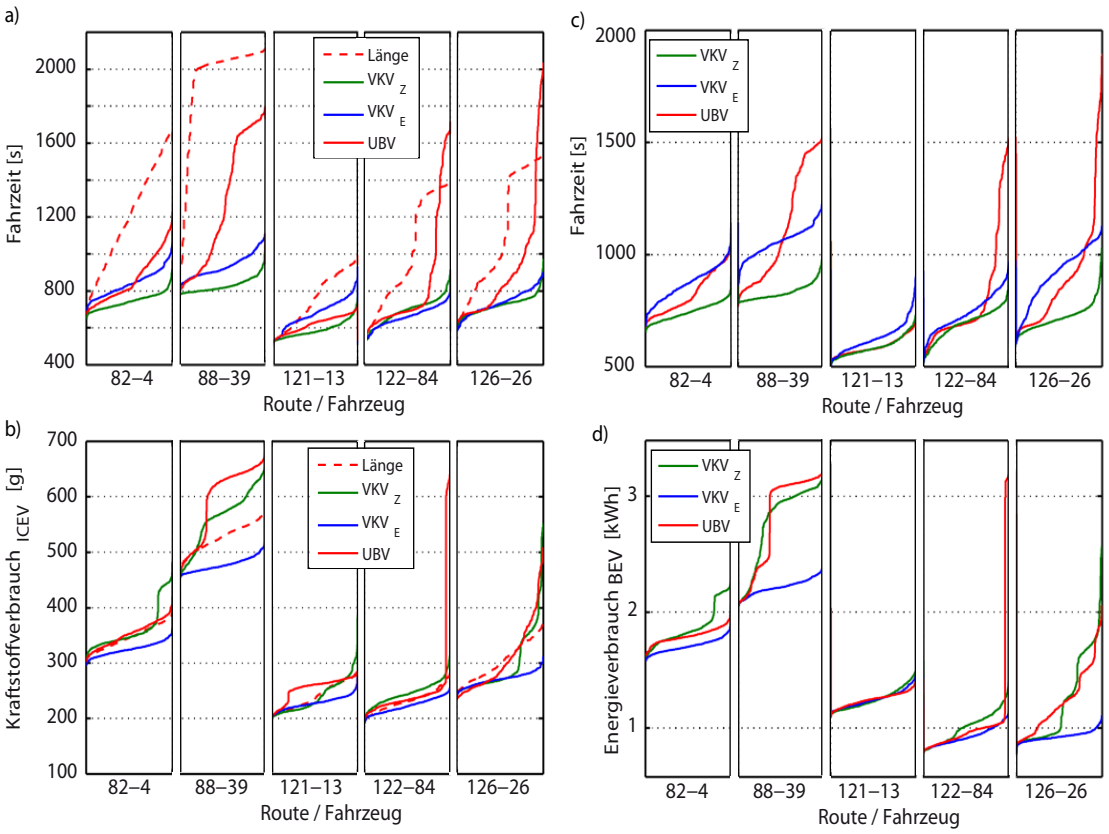



**Abbildung 6.4.1:** *Szenario 3: Vergleich der Fahrzeit des Kraftstoffverbrauchs bei völlig kontrolliertem Verkehr VKV und unbeeinflusstem Verkehr UBV bei verschiedenen Optimierungszielen, (a, b) konventionelle Fahrzeuge, (c, d) Elektrofahrzeuge*

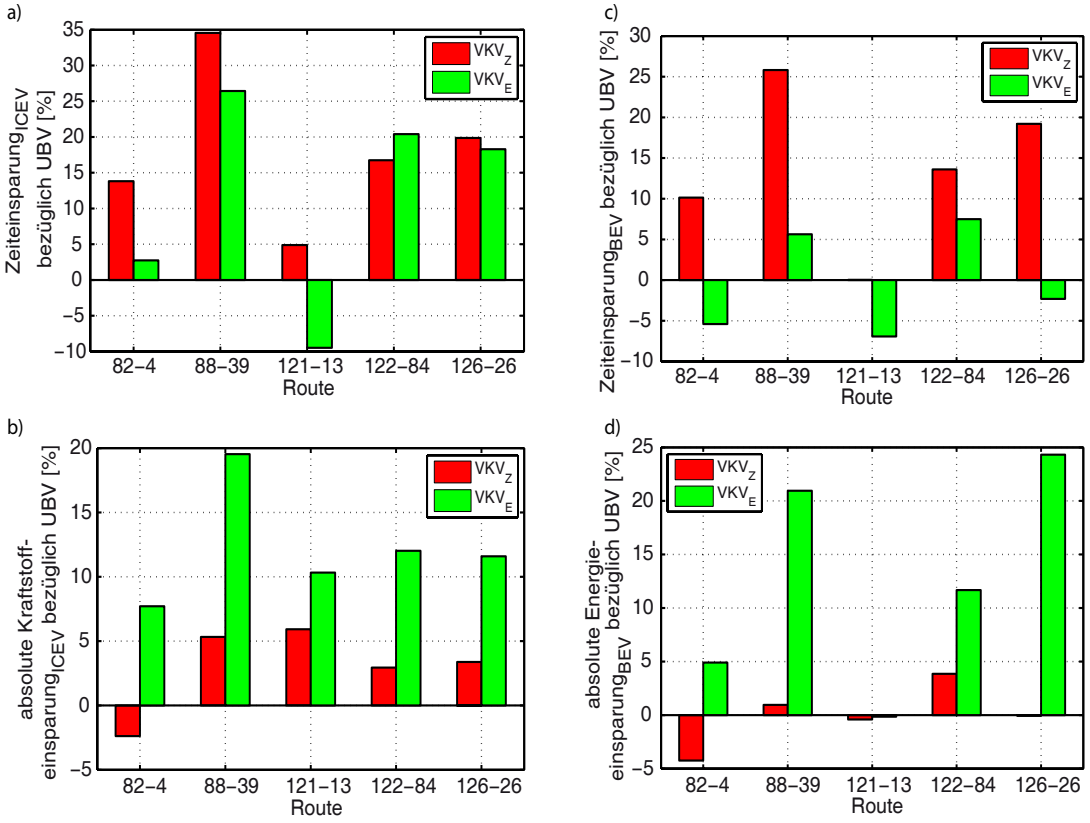



**Abbildung 6.4.2:** *Szenario 3: Zeit- bzw. Kraftstoffeinsparung des völlig kontrollierten Verkehrs (VKV) bzgl. des unbeeinflussten Verkehrs (UBV). Aufgesplittet nach Start-Ziel-Beziehung, (a, b) konventionelle Fahrzeuge, (c, d) Elektrofahrzeuge*

Betrachtet man zunächst die Fahrzeit Abb. 6.4.2 (a) näher, so nimmt die Fahrzeit beim $VKV_Z$-Routing im Vergleich zum $UBV$-Routing um 20,3 % ab. Hierbei liegt die Standardabweichung beim $UBV$-Routing bei 241 Sekunden, beim $VKV_Z$-Routing hingegen nur bei 54,3 Sekunden. Diese Fahrzeiteinsparung wird u. a. durch eine deutlich kürzere durchschnittliche Standzeit beim $VKV_{Z,E}$ von 21,9 Sekunden bzw. 55,0 Sekunden erreicht, im Vergleich zum $UBV$-Routing von 135,25 Sekunden. Betrachtet man die durchschnittliche Routenlänge so ist feststellbar, dass sowohl $VKV_Z$ als auch $UBV$ näherungsweise die gleiche Routenlänge von 9 817 Meter und eine Standardabweichung von 970 Meter haben. Nur beim energieeffizienten Routing werden im Durchschnitt kürzere Routen von 9 086 Meter befahren, außerdem liegt eine geringere Routenvariation vor, was durch eine geringere Standardabweichung von nur 323 Meter deutlich wird.

Betrachtet man den Kraftstoffverbrauch Abb. 6.4.2 (b) des konventionellen Fahrzeuges ohne Start-Stopp-Automatik, so ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch von 4,55 l/100 km für das $UBV$-Routing, von 4,25 l/100 km beim $VKV_Z$-Routing sowie 4,13 l/100 km beim $VKV_E$-Routing. Dies entspricht einer Kraftstoffeinsparung des vollkommen kontrollierten Verkehrsflusses von 6,6 % beim zeiteffizienten Routing und 9,2 % beim energieeffizienten Routing. Für Elektrofahrzeuge ergibt sich ein Energieverbrauch von 16,6 kWh/100 km sowohl für das $UBV$-Routing als auch für das $VKV_Z$-Routing. Beim energieeffizienten Routing entsteht somit eine Energieeinsparung von 1 kWh/100 km gegenüber dem $UBV$-Routing. Wie die Einsparungen in Abb. 6.4.2 zeigen, können auf jeder Start-Ziel-Beziehung je nach zeiteffizientem oder energieeffizientem Optimierungsziel

deutliche Verbesserungen erzielt werden.

Der deutlich höhere Energieverbrauch für einzelne Fahrzeuge auf der Route 122-84 (Abb. 6.4.1 (b, d)) kommt dadurch zustande, da für die Route 122-84 nach dem C-Logitmodell insgesamt sieben Alternativrouten zur Verfügung stehen. Hierunter fällt eine Route mit einer Auswahlwahrscheinlichkeit von 5,8 %, die fast ausschließlich über die Autobahn führt jedoch doppelt so lange wie die anderen Routen ist. Aufgrund der längeren Route und deutlich höheren Durchschnittsgeschwindigkeit kommt es somit bei den Fahrzeugen, die diese Route wählen, zu einem deutlich höheren Energieverbrauch.

Abbildung 6.4.3 zeigt die Ankunftszeit über der Abfahrtszeit aller Fahrzeuge. Wie zu erkennen ist, kommen die Fahrzeuge des unbeeinflussten Verkehrsflusses später an ihr Ziel. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Sollquellfluss von 1 000 Fahrzeugen pro Quelle für das $UBV$- und $VKV_Z$-Routing gegeben ist. Beim energieeffizienten Routing sinkt dieser Wert geringfügig auf 830 Fahrzeuge pro Stunde und Quelle.

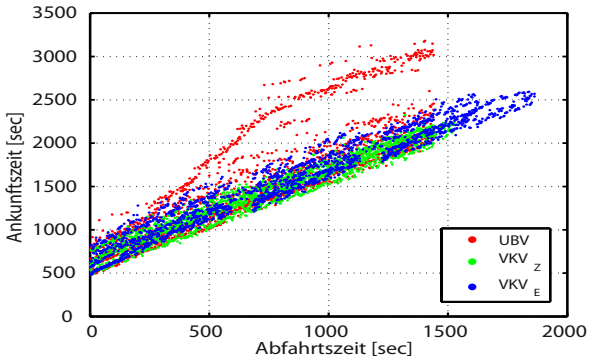



**Abbildung 6.4.3:** *Szenario 3: Ankunftszeit über der Abfahrtszeit bei $UBV$-, $VKV_Z$- und $VKV_E$-Routing*

Die Tabellen 6.4.1 und 6.4.2 zeigen die Ergebnisse der anderen analysierten Szenarien für das zeiteffiziente Routing ($VKV_Z$) im Vergleich zum unbeeinflussten Verkehrsfluss ($UBV$). Im Durchschnitt, der betrachteten Fallstudien, lassen sich 24,8 % Fahrzeit sowie 2,9 % mit und 8,9 % ohne Start-Stopp-Automatik an Kraftstoff auf 100 Kilometer bei konventionellen Fahrzeugen einsparen. Wie zu erkennen ist, hängt das Einsparpotenzial sehr stark vom betrachteten Szenario ab. Szenarien mit wenigen Fahrzeugen bzw. wenigen potenziellen Engpässen im Streckennetz bieten weniger Einsparpotenzial, als Szenarien bei denen sehr viele Fahrzeuge involviert und hohe Quellflüsse vorhanden sind. Ein Beispiel hierfür ist Szenario Nr. sieben. Hier werden 10 000 Fahrzeuge mit einem Quellfluss von 900 Fahrzeugen pro Stunde simuliert. Hierbei ergeben sich Zeiteinsparungen von durchschnittlich 55,3 % sowie Kraftstoffeinsparungen von 12,6 % mit und 28,5 % ohne Start-Stopp-Automatik auf 100 Kilometer. Dies entspricht einer Einsparung von 0,6 Litern bzw. 1,7 Litern an Kraftstoff pro 100 Kilometer, im Vergleich zum unbeeinflussten Verkehrsfluss. Durchschnittlich ergibt sich bei der Betrachtung der großen Szenarien drei bis sieben eine Kraftstoffeinsparung bei konventionellen Fahrzeugen zwischen 0,2 Litern bis 0,7 Litern pro 100 Kilometern, wobei vor allem bei vielen beteiligten Fahrzeugen die Kraftstoffeinsparungen steigen. Für Elektrofahrzeuge steigt der Energieverbrauch geringfügig um 0,3 kWh/ 100 km. Dies ist jedoch kein Widerspruch, da das Optimierungsziel des völlig kontrollierten Verkehrsflusses in diesem Fall die Zeiteffizienz ist.

**Tabelle 6.4.1:** *$VKV_Z$ zu UBV für konventionelle Fahrzeuge mit / ohne Start-Stopp-Automatik*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fahrzeiteinsparung [%] | 5,7 | 8,9 | 20,3 | 17,2 | 26,7 | 39,5 | 55,3 |
| Energieeinsparung (absolut) [%] | 0/0,4 | 0,8/1,4 | 3,2/7,3 | -6,0/0,7 | -0,1/4,6 | -2,6/9,1 | 12,6/28,5 |
| Energieeinsparung pro 100 km [%] | 1,0/1,4 | 0,6/1,2 | 2,8/6,7 | -1,8/3,3 | 2,1/6,7 | 2,8/14,0 | 12,5/28,9 |
| Energieeinsparung [l/100 km] | 0,05/0,07 | 0,03/0,06 | 0,12/0,30 | -0,10/0,21 | 0,09/0,31 | 0,13/0,72 | 0,59/1,71 |

**Tabelle 6.4.2:** *$VKV_Z$ zu UBV für Elektrofahrzeuge*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $VKV_Z$ zu $UBV$ Fahrzeiteinsparung [%] | 4,5 | 7,0 | 15,5 | 15,8 | 23,0 | 38,2 | 55,7 |
| $VKV_Z$ zu $UBV$ Energieeinsparung (absolut) [%] | -2,6 | -1,3 | -0,2 | -7,5 | -6,0 | -6,6 | 3,6 |
| $VKV_Z$ zu $UBV$ Energieeinsparung pro 100 km [%] | -1,3 | -1,7 | 0,3 | -1,9 | -3,5 | -0,7 | 3,9 |

Vergleicht man die Ergebnisse des energieeffizienten völlig kontrollierten Verkehrsflusses $VKV_E$ und setzt sie zum $UBV$-Routing in Bezug, Tab. 6.4.3, Tab. 6.4.4 und Tab. 6.4.5 , so ist erkennbar, dass die Fahrzeiteinsparung beim energieeffizienten Routing geringfügig geringer als beim zeiteffizienten Routing ausfällt. Im Durchschnitt liegt hier eine Zeiteinsparung von 9,8 % vor, wobei bei konventionellen Fahrzeugen das größte Einsparpotenzial mit 14,7 % gegeben ist. Vor allem bei den großen Simulationsszenarien Nummer drei bis sieben liegt eine durchschnittliche Fahrzeiteinsparung von 19,5 % vor. Betrachtet man die Energieeinsparung, so sind durchschnittlich 11,9 % mit und 15,3 % ohne Start-Stopp-Automatik an Kraftstoff bei konventionellen Fahrzeugen einsparbar. Dies entspricht einer durchschnittlichen Kraftstoffeinsparung auf 100 Kilometern von 0,3-0,6 Litern. Die maximale Kraftstoffeinsparung ergibt sich in Szenario sieben mit insgesamt bis zu 1,3 Litern pro 100 Kilometer bei Fahrzeugen ohne Start-Stopp-Automatik. Für Elektrofahrzeuge ergibt sich eine durchschnittliche Energieeinsparung für alle betrachteten Szenarien von 9,3 % bzw. 2,0 kWh pro 100 Kilometer. Für Hybridfahrzeuge steigt die durchschnittliche Energieeinsparung auf 16,2 % pro 100 Kilometer.

**Tabelle 6.4.3:** *$VKV_E$ zu UBV für konventionelle Fahrzeuge mit / ohne Start-Stopp-Automatik*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fahrzeiteinsparung [%] | -6,4 | -5,3 | 14,1 | 12,8 | 12,5 | 32,3 | 43,2 |
| Energieeinsparung (abs.) [%] | 15,4/14,6 | 6,9/6,9 | 13,4/15,7 | 7,1/9,5 | 9,9/12,2 | 10,7/18,7 | 19,8/29,6 |
| Energieeinsparung pro 100 km [%] | 7,0/6,1 | 5,6/5,6 | 5,7/7,9 | -1,0/-0,4 | 9,9/12,2 | 11,1/19,1 | 10,8/20,9 |
| Energieeinsparung [l/100 km] | 0,36/0,31 | 0,28/0,28 | 0,25/0,36 | -0,05/-0,03 | 0,43/0,56 | 0,49/0,98 | 0,51/1,32 |

**Tabelle 6.4.4:** *$VKV_E$ zu UBV für Elektrofahrzeuge*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $VKV_E$ zu $UBV$ Fahrzeiteinsparung [%] | -16,3 | -19,4 | 2,1 | 11,4 | 11,1 | 27,8 | 30,3 |
| $VKV_E$ zu $UBV$ Energieeinsparung (absolut) [%] | 14,8 | 13,7 | 13,5 | 9,9 | 13,5 | 12,5 | 17,8 |
| $VKV_E$ zu $UBV$ Energieeinsparung pro 100 km [%] | 7,3 | 11,9 | 4,9 | 2,9 | 14,7 | 13,9 | 9,3 |
| $VKV_E$ zu $UBV$ Energieeinsparung [kWh/ 100km] | 1,5 | 3,9 | 2,6 | 0,8 | 0,6 | 2,5 | 2,3 |

**Tabelle 6.4.5:** *$VKV_E$ zu $UBV$ für Hybridfahrzeuge*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $VKV_E$ zu $UBV$ Fahrzeiteinsparung [%] | -20,0 | -18,7 | 11,6 | 11,4 | 6,4 | 30,9 | 35,4 |
| $VKV_E$ zu $UBV$ Energieeinsparung (absolut) [%] | 21,4 | 13,8 | 20,4 | 11,3 | 14,6 | 25,2 | 33,6 |
| $VKV_E$ zu $UBV$ Energieeinsparung pro 100 km [%] | 16,9 | 13,8 | 12,1 | 0,7 | 15,8 | 27,4 | 26,4 |

Nach Berechnung des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg lag die Jahresfahrleistung im Stadtkreis Ulm im Jahr 2010 auf Inner- und Außerortsstraßen bei insgesamt 904,1 Millionen Kilometer [124]. Betrachtet man den Mittelwert der großen Szenarien drei bis sieben, so ergeben sich beim zeiteffizienten Routing durchschnittliche Kraftstoffeinsparungen von 0,65 Litern pro 100 Kilometer bei konventionellen Fahrzeugen. Dies würde einer Kraftstoffeinsparung von 5,9 Millionen Litern Dieselkraftstoff pro Jahr alleine für den Stadtkreis Ulm entsprechen, bei einer gleichzeitigen Fahrzeitverkürzung von 23,0 %.

In Abb. 6.4.4 ist der historische Positionsverlauf von Szenario Nr. drei dargestellt. Hierzu ist die Position jedes Fahrzeuges im Streckennetz jeweils im 60 Sekundentakt übereinander geplottet. Die Farben beschreiben die Abweichung zwischen Wunsch- und Ist-Geschwindigkeit. Dies bedeutet, dass es bei hohen Abweichungen von der Wunschgeschwindigkeit zu Fahrzeuganhäufungen kommt, welche in Abb. 6.4.4 mit rot gekennzeichnet sind. Durch die zeitliche Anordnung aller Fahrzeugpositionen kann schnell auf die Güte des Verkehrsflusses sowie die Routenwahl der Fahrzeuge geschlossen werden. Wie im Vergleich des $UBV$ (a) sowie des $VKV_Z$ (b) für Szenario Nr. drei zu erkennen ist, weist (b) nur vereinzelt rote Stellen auf, welche meist aufgrund von kurzen Standzeiten an Lichtsignalanlagen auftreten. In (a) hingegen sind große Ansammlungen von Fahrzeugen niedriger Geschwindigkeit, vor allem um den Punkt eins, zu erkennen. Hierbei handelt es sich um eine potenzielle Engstelle, da hier Fahrzeuge von mehreren Routen auf eine mehrspurige Hauptverkehrsstraße auffahren möchten, wodurch sich, wie es auch in der Realität beobachtbar ist, Verkehrsstaus bilden.

Wie in (b) zu erkennen ist, versucht der Routingalgorithmus diese Engstelle zu vermeiden. Außerdem ist anhand der durchgehend dunkelblauen Färbung zu erkennen, dass der Verkehrsfluss während der gesamten Zeit aufrechterhalten wird. Vergleicht man die räumliche Verteilung der Fahrzeuge in (a) und (b), so ist festzustellen, dass sich beim unbeeinflussten Verkehrsfluss (a) deutlich verschiedene Hauptrouten herauskristallisieren. In (b) hingegen findet eine breite räumliche Verteilung der Fahrzeuge über viele Alternativrouten des Streckennetzes statt.

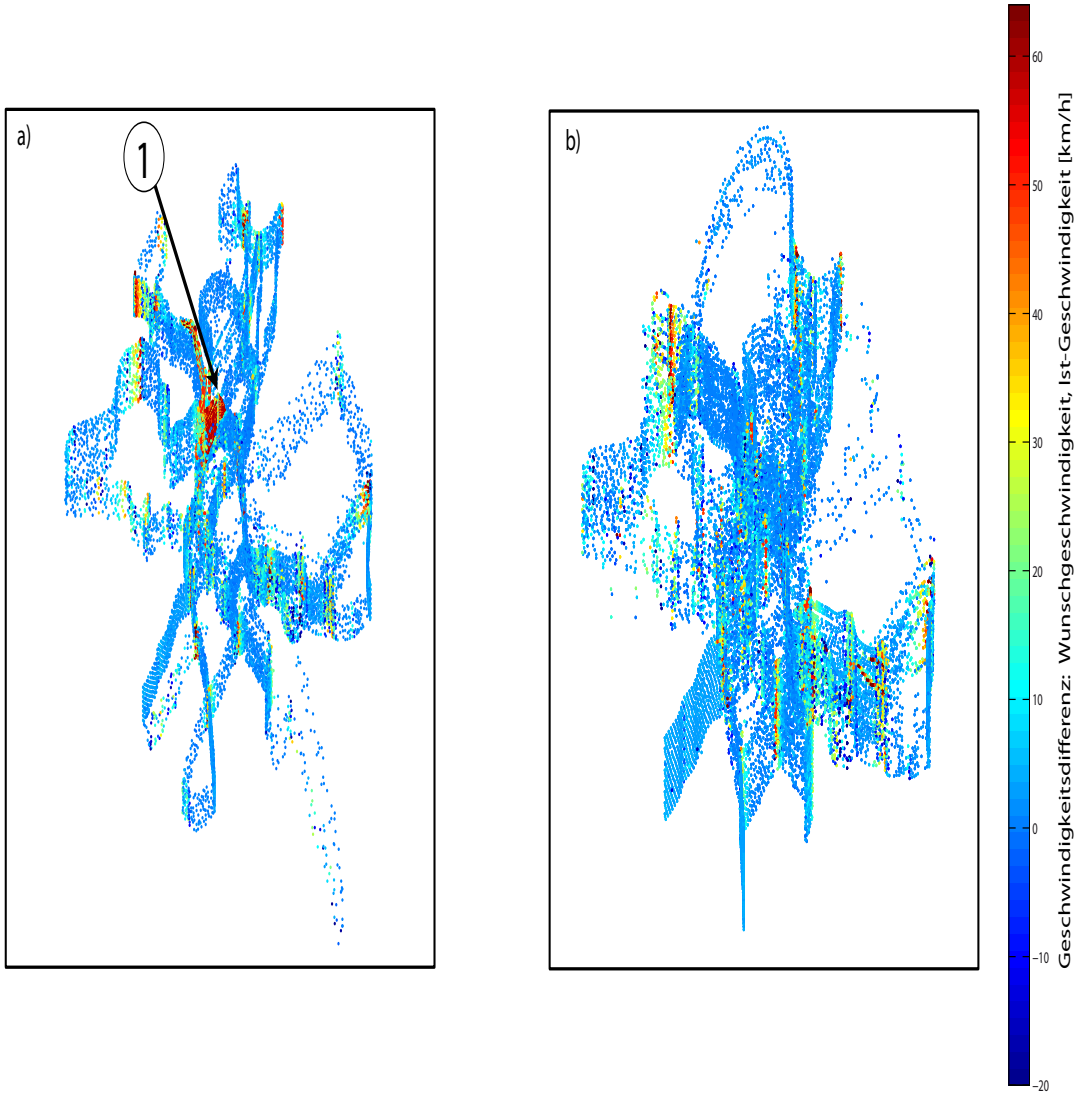



**Abbildung 6.4.4:** *Szenario 3: Übereinandergeplottete historische Positionsdarstellung jedes Fahrzeuges, die Farbe entspricht der Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit jedes Fahrzeuges, (a) unbeeinflusster Verkehr, (b) völlig beeinflusster Verkehr*

### 6.4.1 Einfluss der Verkehrsteilnehmeranzahl auf die Lösungsqualität des $UBV$- und $VKV_{Z,E}$-Routings

Ein Parameter der großen Einfluss auf das Verkehrsgeschehen hat, ist die Anzahl der Fahrzeuge. In den vorherigen Abschnitten konnte anhand von verschiedenen Szenarien mit unterschiedlich hohen Fahrzeugzahlen und Quellflüssen gezeigt werden, dass der vollkommen kontrollierte Verkehrsraum deutliche Verbesserungen hinsichtlich Fahrzeit und Energieverbrauch bewirkt. Wie die Ergebnisse von Szenario Nr. eins und zwei zeigen, fallen die Einsparungen bei weniger beteiligten Verkehrsteilnehmern geringer aus als bei vielen Verkehrsteilnehmern, wie in Szenario Nr. drei bis sechs. Um die Lösungsqualität des in Abschnitt 5.4 entwickelten Algorithmus für den völlig kontrollierten Verkehrsfluss hinsichtlich Verkehrsteilnehmerzahlen beurteilen zu können,

ist in Abb. 6.4.5 die durchschnittliche Fahrzeit (a) sowie der durchschnittliche Energieverbrauch (b) über der Anzahl von Verkehrsteilnehmern dargestellt.

Wie in allen Vergleichen wurde sichergestellt, dass der Quellfluss aller Quellknoten bei konstant 1 000 Fahrzeugen pro Stunde liegt. Betrachtet man die Fahrzeit bzw. die durchschnittliche Standzeit Abb. 6.4.6 , so ist beim Routing nach der kürzesten Route bzw. beim $UBV$-Routing ein näherungsweise linearer Anstieg zu erkennen. Analysiert man das $VKV_Z$-Routing, so ist zunächst ein Anstieg der Fahrzeit und Standzeit zu erkennen. Die Werte pendeln sich jedoch ab 1 000-1 500 Fahrzeugen konstant bei einer Steigerung der Fahrzeit von 13,0 - 13,5 %, bezogen auf die Fahrzeit von 500 Fahrzeugen, ein. Dies bedeutet bei 3 500 Fahrzeugen beim $UBV$-Routing eine Steigerung der Fahrzeit um 65,0 % und lediglich um 13,4 % beim $VKV_Z$-Routing. Beim $VKV_E$-Routing fallen die Werte geringfügig höher, mit einer Steigerung von 26,0 %, aus.

Wie die Auswertung des Kraftstoffverbrauchs für konventionelle Fahrzeuge zeigt, haben alle Routingalgorithmen das gleiche Verhalten. Unterschiede sind lediglich in den Absolutwerten zu erkennen. Wie zu erwarten war, hat der energieeffiziente vollkommen kontrollierte Verkehrsraum den geringsten Kraftstoffverbrauch zur Folge. So liegt der Kraftstoffverbrauch bei 3 500 Fahrzeugen beim $VKV_E$-Routing 0,55 kWh unter dem $UBV$-Routing, was einer Einsparung von 3,0 kWh/100 km bzw. 0,3 l/100 km entspricht.

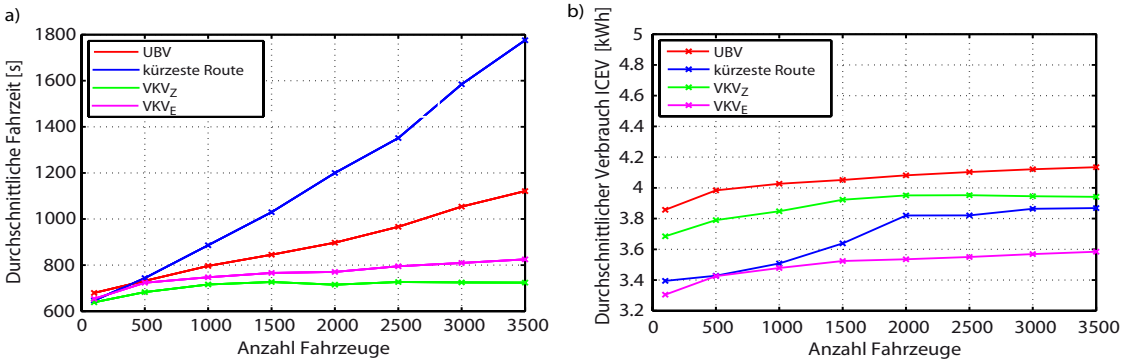



**Abbildung 6.4.5:** *Szenario 3: (a) Entwicklung der durchschnittlichen Fahrzeit, (b) des durchschnittlichen Energieverbrauchs als Funktion der in die Simulation involvierten Fahrzeuge*

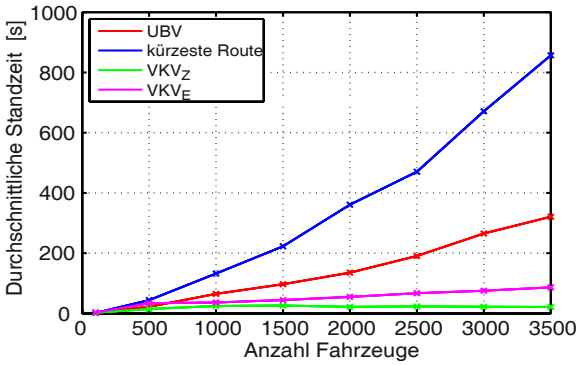



**Abbildung 6.4.6:** *Szenario 3: Entwicklung der durchschnittlichen Standzeit als Funktion der in die Simulation involvierten Fahrzeuge*

### 6.4.2 Reaktion des Routingalgorithmus auf unvorhergesehene Ergebnisse / Systemstabilität

Ein weiterer wichtiger Faktor für den vollkommen kontrollierten Verkehrsraum ist, wie stabil der Algorithmus auf Ereignisse, wie Streckensperrungen, die durch Baustellen oder Unfälle auftreten können, reagiert. Hierzu wurde eine Hauptverkehrsader von Szenario Nr. drei, wie Abb. 6.4.7 (c) zeigt, gesperrt. Hierbei handelt es sich um ein Streckensegment, welches von vielen Fahrzeugen benutzt wird (vgl. Abb. 6.2.1 ), da die Strecke durch ihren dreispurigen Ausbau viele Fahrzeuge aufnehmen kann. Dieses Szenario wurde generiert, da es sich um einen sehr realistischen Fall handelt, wie er auch in der Realität aufgrund von häufigen Straßenbaumaßnahmen vorkommt.

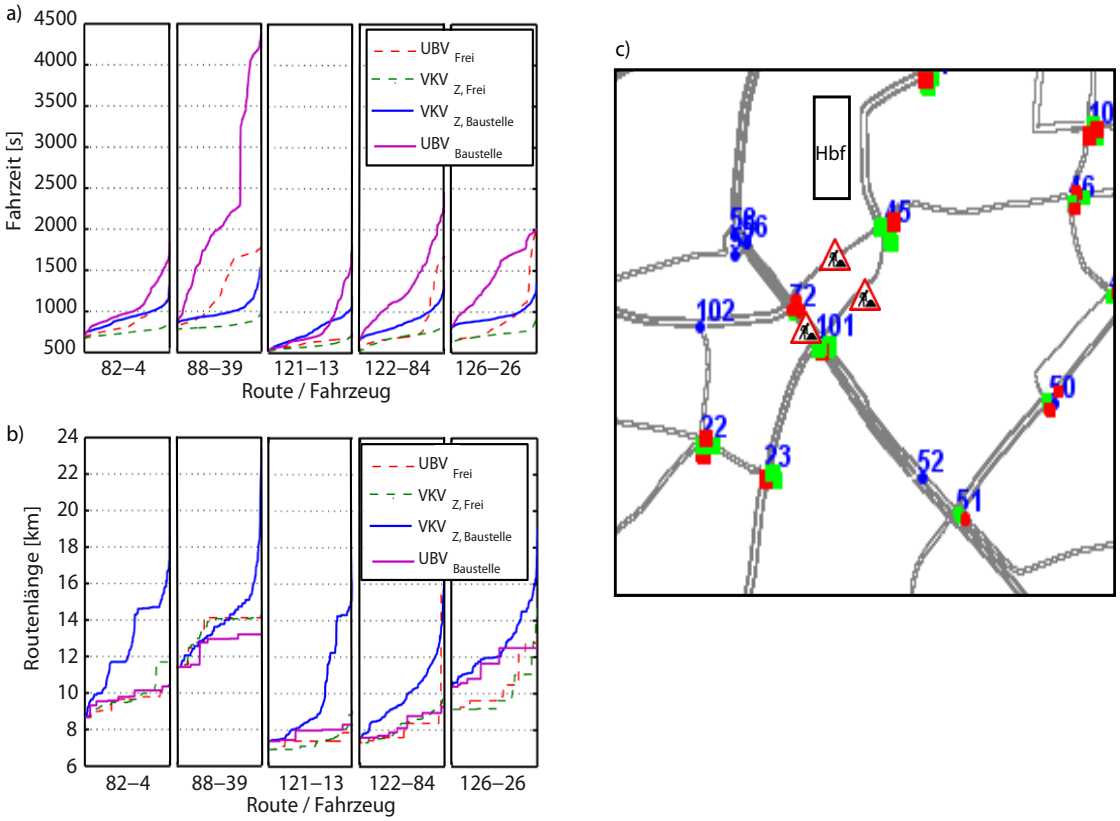



**Abbildung 6.4.7:** *Szenario 3: (a) Auswirkungen einer Streckensperrung auf die Fahrzeit, (b) Routenlänge bei $UBV$- sowie $VKV_Z$-Routing*

Abbildung 6.4.7 (a) zeigt den Vergleich der Fahrzeit. Wie zu erkennen ist, steigt beim völlig kontrollierten Verkehrsfluss $VKV_Z$, durch die Sperrung, die durchschnittliche Fahrzeit um 26,0 % an, wobei der Kraftstoffverbrauch von 4,2 l/100 km auf 4,4 l/100 km steigt. Betrachtet man hingegen den unbeeinflussten Verkehrsfluss, so ist ein Anstieg der durchschnittlichen Fahrzeit von 52,7 % zu verzeichnen, wobei der Kraftstoffverbrauch von 4,3 l/100 km auf 4,7 l/100 km durch die Streckensperrung steigt. Geht man bei konventionellen Fahrzeugen von keiner Start-Stopp-Automatik aus und berücksichtigt zusätzlich den Leerlaufverbrauch, so ist beim $UBV$ ein Anstieg durch die Baustelle von 4,6 l/100 km auf 5,4 l/100 km zu verzeichnen. Beim vollkommen kontrollierten Verkehrsraum erfolgt lediglich ein Anstieg von 4,3 l/100 km auf 4,4 l/100 km. Somit ist es in diesem Fall, durch den vollkommen kontrollierten Verkehrsfluss möglich, bis zu einem Liter Diesel auf 100 Kilometer einzusparen.

Analysiert man die Standzeit, so ist beim $VKV_Z$-Routing lediglich ein Anstieg der Standzeit um durchschnittlich 12,4 Sekunden pro Fahrzeug zu verzeichnen. Beim $UBV$-Routing steigt die Standzeit hingegen um durchschnittlich 316,1 Sekunden. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den Routenlängen wie sie in Abb. 6.4.7 (b) dargestellt sind. Beim vollkommen kontrollierten Verkehrsraum werden frühzeitig Alternativrouten gewählt und die Engstelle von der Mehrzahl der Fahrzeuge weiträumig umfahren. So liegt die durchschnittliche Routenlänge mit Streckensperrung beim $VKV_Z$-Routing um 2,3 km höher, als wenn keine Streckensperrung vorliegt. Auch ist die Standardabweichung mit einem Anstieg von 873 Meter auf 2102 Meter deutlich höher, was ein Indiz für mehr genutzte Alternativrouten ist. Bedingt durch die Streckensperrung wechselt ein Fahrzeug mit dem $VKV_Z$-Routing 6,1 mal seine Route. Wenn keine Streckenbehinderung vorliegt erfolgt lediglich durchschnittlich dreimal ein Routenwechsel.

In der historischen Fahrzeugpositionsentwicklung in Abb. 6.4.8 ist gut zu erkennen, wie sich beim $UBV$ (a) um den Bereich der Streckensperrung Verkehrsstaus bilden. Außerdem weichen die Fahrzeuge nur begrenzt auf alternative Routen aus, was an der geringen räumlichen Verteilung der Fahrzeuge zu erkennen ist. Beim $VKV_Z$-Routing hingegen sind die Fahrzeuge über fast das gesamte Streckennetz verteilt. Auch wird der Bereich um die Streckensperrung von den Fahrzeugen gemieden. Vergleicht man die Farben, was der Abweichung zwischen Wunsch- und Ist-Geschwindigkeit entspricht, so ist erkennbar, dass sich beim vollkommen kontrollierten Verkehrsraum nur sehr vereinzelt Verkehrsbehinderungen bilden. Beim unbeeinflussten Verkehrsfluss gibt es hingegen viele Streckenabschnitte, auf denen eine sehr niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge herrscht.

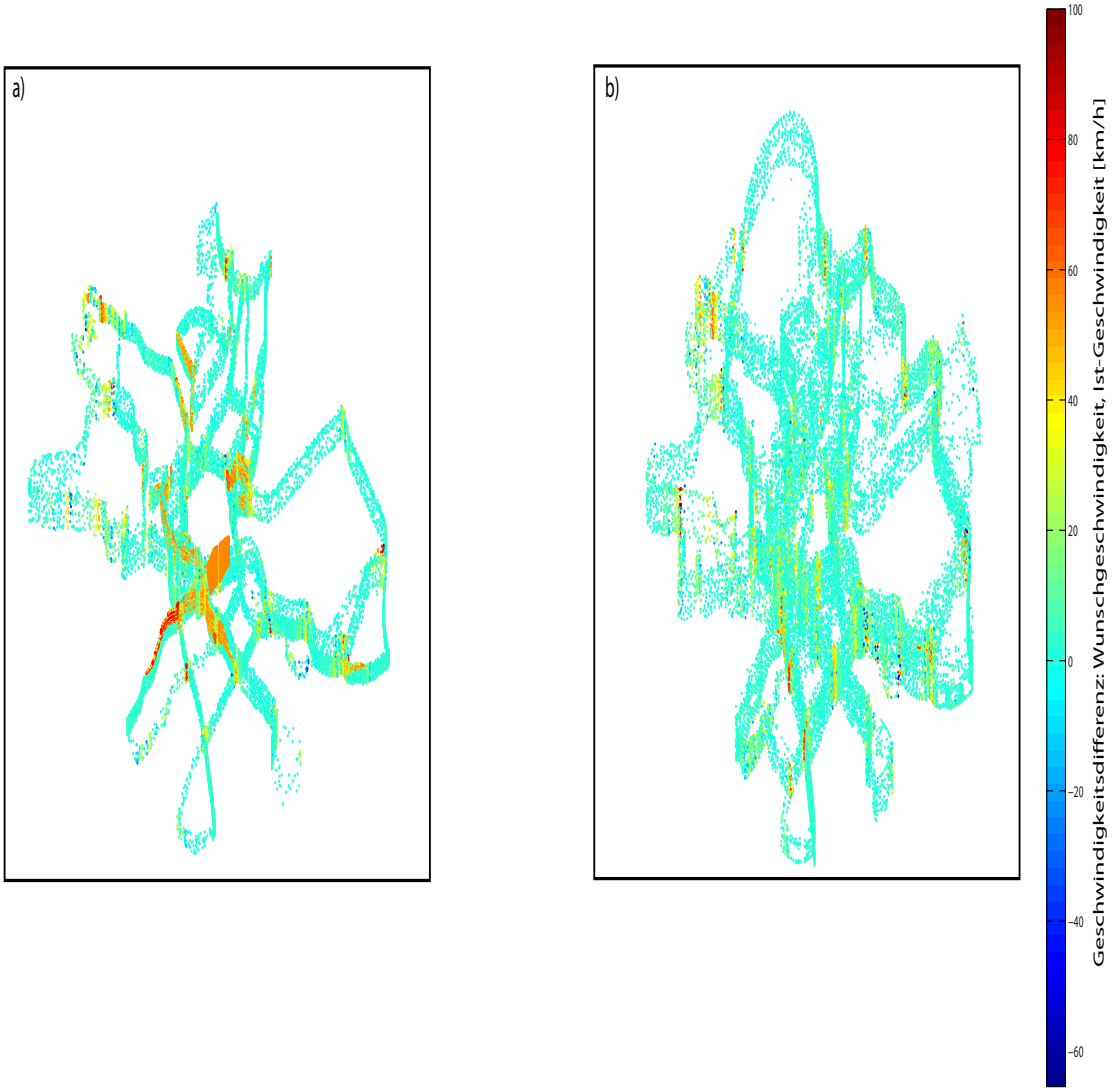



**Abbildung 6.4.8:** *Szenario 3 mit Streckensperrung: Übereinander geplottete historische Positionsdarstellung jedes Fahrzeuges, die Farbe entspricht der Abweichung von der Wunschgeschwindigkeit jedes Fahrzeuges, (a) unbeeinflusster Verkehr, (b) völlig beeinflusster Verkehr*

## 6.5 Prozentuale Einflussnahme einer Zentralnavigation auf das Verkehrsflussverhalten

Die in den vorherigen Abschnitten erzielten Fahrzeit- und Energieeinsparungen des vollkommen beeinflussbaren Verkehrsraumes würden implizieren, dass einhundert Prozent der Verkehrsteilnehmer durch eine Zentralnavigation in ihrer Routenwahl beeinflussbar sind. Da eine einhundertprozentige Marktabdeckung in der Realität nie erreicht werden kann, ist es das Ziel dieses Abschnitts zu untersuchen, ab wie viel Prozent Marktdurchdringung merkliche Effekte bei der Verbesserung des Verkehrsflusses auftreten. Hierzu wählen die Fahrzeuge je nach analysierter Marktdurchdringung ihre Route zufällig, wie im unkontrollierten Verkehrsraum oder die Fahrzeuge erhalten ihre Route durch eine Zentralnavigation, wie im vollkommen kontrollierten Verkehrsraum erläutert. Diese Zuordnung der Fahrzeuge zum $UKV$ bzw. $VKV_{Z,E}$ erfolgt hierbei je nach Durchdringung mittels eines Zufallsprozesses. Um die Ergebnisse im Folgenden besser vergleichen zu können wurden die zwei Fälle untersucht, dass die Zentralnavigation alle Fahrzeuge zeiteffizient bzw. energieeffizient routet.

### 6.5.1 Zeiteffizientes Routing

Abbildung 6.5.1 zeigt die Entwicklung der Fahrzeiteinsparung für die durchgeführten Szenarien über der Marktdurchdringung, sprich der Fahrzeuge, die ihre Route durch eine Zentralnavigation erhalten. Die Zentralnavigation routet die Fahrzeuge mit dem Optimierungsziel, alle Verkehrsteilnehmer möglichst zeiteffizient an ihr Ziel zu navigieren.

Abbildung 6.5.1 (a) zeigt die absolute Fahrzeiteinsparung je Szenario. In (b) ist der jeweilige Wert auf einhundert Prozent Erreichbarkeit normiert. Wie zu erkennen ist, ergibt sich bereits bei achtprozentiger Durchdringung, bei allen Szenarien ein positiver Effekt von mindestens 10 % der maximal möglichen Zeitersparnis. Um eine 50 % ige Einsparung zu erzielen, ist es notwendig, zwischen 15 % und 35 % der Fahrzeuge zu erreichen. Wie die Szenarien zeigen, ist dies jedoch stark vom untersuchten Szenario abhängig. Wie zu erkennen ist, verhält sich die relative Fahrzeitersparnis und die notwendige Durchdringung nicht linear. Der größte Verbesserungszuwachs ist zwischen 10 % und 40 % Durchdringung zu erreichen. Ab einer Durchdringung von 60 % sind nur noch geringfügige Verbesserungen hinsichtlich der maximal möglichen Fahrzeiteinsparung möglich.

Dieser Effekt ist auch bei detaillierter Betrachtung der Fahrzeitentwicklung von Szenario Nr. sechs zu sehen Abb. 6.5.2 . Wie in den aufsteigend nach Fahrzeit und Routen sortierten Fahrzeugen zu erkennen ist, kann die größte Verbesserung zwischen 0 % (rot) und 30 % (grün) Durchdringung erreicht werden. Eine höhere Durchdringung als 50 % bringt nur noch minimale Verbesserungen in der Fahrzeiteinsparung. Bei Szenario Nr. sechs bedeutet dies, dass maximal 39,5 % Einsparpotenzial vorhanden ist. Mit 30 % Durchdringung konnten bereits 20 % erreicht werden, bei 50 % iger Durchdringung bereits 30 %. Eine Erhöhung der Durchdringung um weitere 50 % ermöglicht also nur noch 10 % an zusätzlicher Einsparung. Bei Szenario Nr. drei fällt dies sogar noch extremer aus. Hier sind maximal 20 % Einsparung möglich, wovon mit 30 % iger Durchdringung bereits 15,8 % und mit 50 % iger Durchdringung bereits 16,6 % an Fahrzeiteinsparung möglich sind.

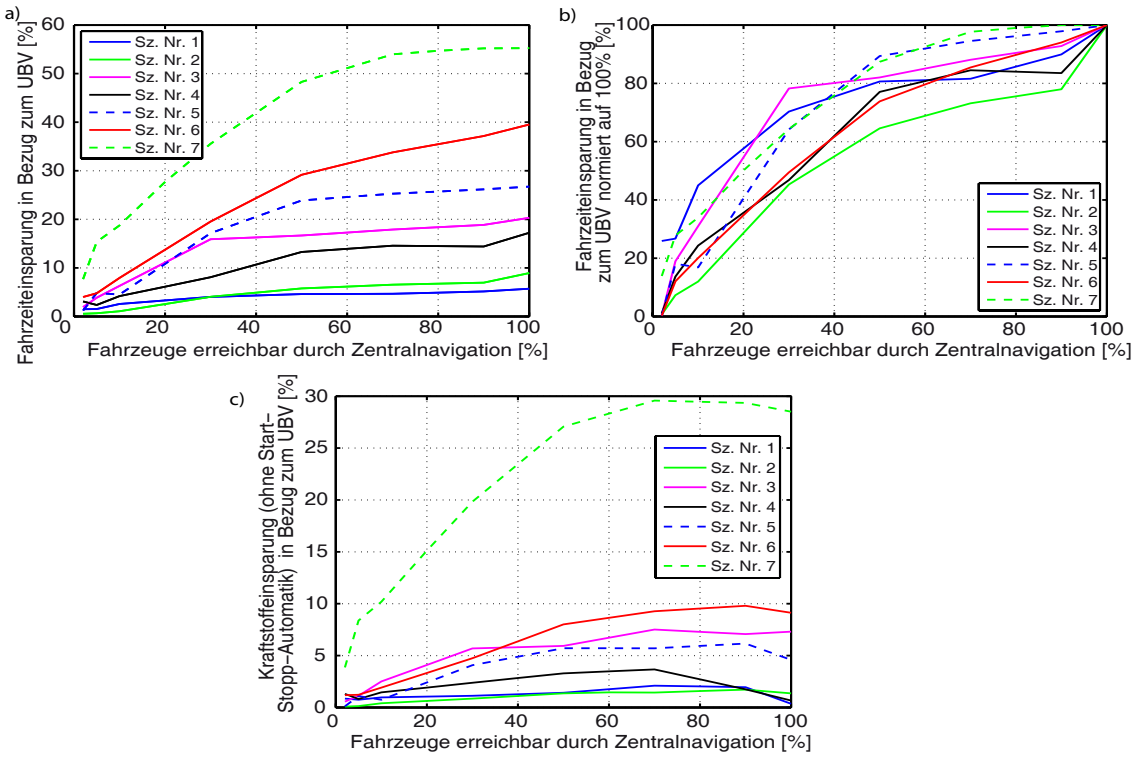



**Abbildung 6.5.1:** *(a) Fahrzeiteinsparung als Funktion der prozentual beeinflussbaren Fahrzeuge durch eine Zentralnavigation, (b) normiert auf 100 % Durchdringung, (c) Kraftstoffeinsparung bei konventionellen Fahrzeugen ohne Start-Stopp-Automatik*

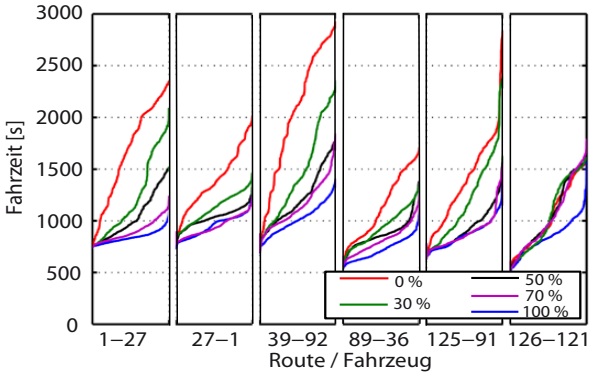



**Abbildung 6.5.2:** *Szenario 6: Fahrzeitentwicklung nach Strecke, aufsteigend sortiert, bei prozentualer Erreichbarkeit der Fahrzeuge durch eine Zentralnavigation*

### 6.5.2 Energieeffizientes Routing

Routet die Zentralnavigation die Fahrzeuge energieeffizient, so ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen Kraftstoffeinsparung und Durchdringung, wie Abbildung 6.5.3 (a) zeigt. Hierzu ist in Abb. 6.5.3 (a,b) die Kraftstoffeinsparung von konventionellen Fahrzeugen mit Start-Stopp-Automatik aufgetragen, die Ergebnisse für die Kraftstoffeinsparung ohne Start-Stopp-Automatik finden sich im Anhang (Abb. 10.10.1 ). Der lineare Zusammenhang zwischen Kraftstoffeinsparung und Durchdringung ist darin begründet, da beim zeiteffizienten Routing durch Teilverlagerung von Fahrzeugrouten, sowohl das Fahrzeug auf der Alternativroute einen Zeitvorteil hat als auch das Fahrzeug auf der ursprünglichen Route, da diese entlastet wird. Das energieeffiziente Routing ist hingegen an bestimmte energieeffiziente Routen gebunden, die sehr oft nicht mit der kürzesten bzw. zeiteffizientesten Route übereinstimmt, wie Abschnitt 6.1.2 zeigt. Durch ein gezieltes Umleiten der erreichbaren Fahrzeuge durch die Zentralnavigation kann somit eine stetige Verbesserung der Kraftstoffeinsparung erreicht werden, je höher die Durchdringung erreichbarer Fahrzeuge ist.

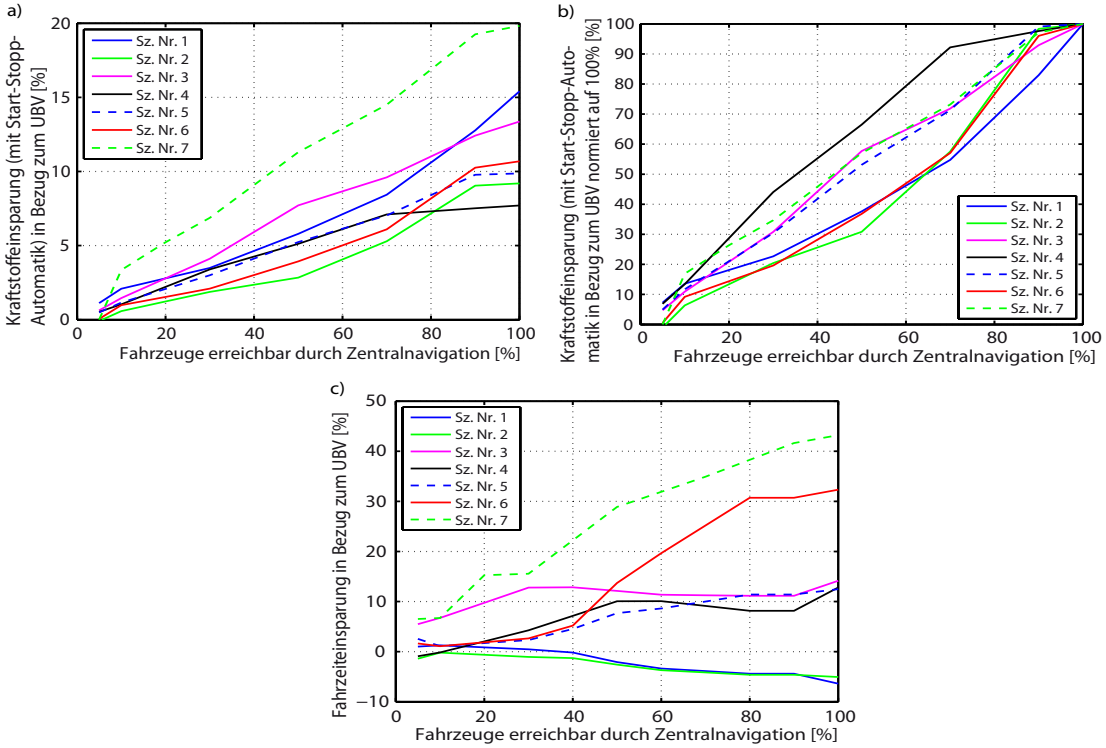



**Abbildung 6.5.3:** *(a) Kraftstoffeinsparung von konventionellen Fahrzeugen mit Start-Stopp-Automatik als Funktion der prozentual beeinflussbaren Fahrzeuge durch eine Zentralnavigation, (b) Kraftstoffeinsparung normiert auf 100 % Durchdringung, (c) Reisezeiteinsparung*

### 6.5.3 Einfluss der Fahrzeuganzahl

Auch bei der Analyse der prozentualen Durchdringung von Verkehrsteilnehmern, die unmittelbar über eine Zentralnavigation beeinflussbar sind, spielt die Anzahl von Fahrzeugen eine Rolle. Hierzu wird nachfolgend exemplarisch für Szenario Nr. drei der Zusammenhang zwischen Fahrzeiteinsparung, Verkehrsteilnehmern und Durchdringung untersucht.

#### Zeiteffizientes Routing

Abbildung 6.5.4 (a) zeigt den Verlauf der Fahrzeiteinsparung über der Anzahl an Fahrzeugen und der prozentualen Durchdringung. Bei der Fahrzeiteinsparung ergibt sich unabhängig von der Anzahl der Verkehrsteilnehmer der größte Verbesserungseffekt bei einer Durchdringung zwischen 8 % und 30 %. Bei allen simulierten Verkehrsteilnehmerzahlen sind bereits bei einer Durchdringung von 30 %, 80 % bis 90 % der maximal möglichen Fahrzeiteinsparung, bei einem vollkommen kontrollierten Verkehrsraum, erreicht.

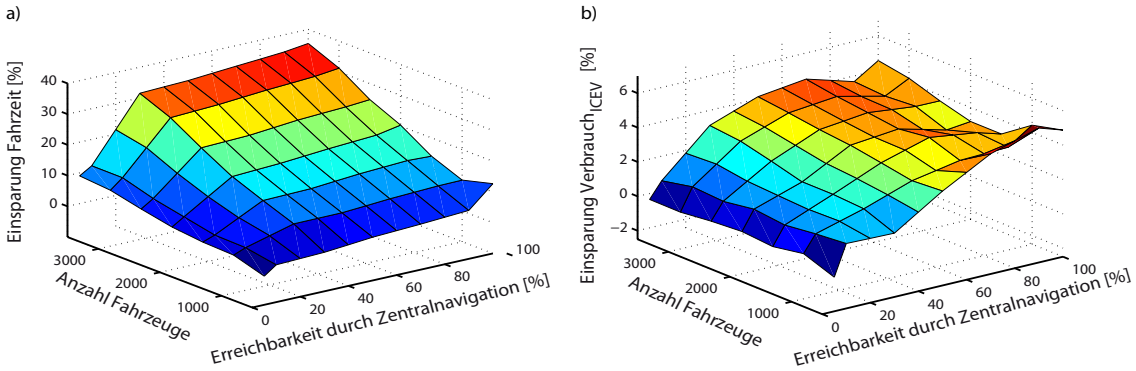



**Abbildung 6.5.4:** *Zeiteffizientes Routing, (a) Fahrzeiteinsparung, (b) Kraftstoffeinsparung ICEV über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation*

Wie in Abschnitt 6.4.1 für den $VKV_Z$ gezeigt wurde, steigt mit zunehmender Verkehrsteilnehmerzahl das Einsparpotenzial. So steigt das Einsparpotenzial bei 30 % Durchdringung zwischen 1 000 und 3 500 Fahrzeugen um 23 %. Die Fahrzeit der Fahrzeuge wird direkt von der Standzeit beeinflusst. Wie in Abb. 6.5.5 dargestellt, zeigt sich auch bei der Standzeiteinsparung ein ähnliches Verhalten. Die größte Steigerung der Standzeiteinsparung ergibt sich bis zu einer Durchdringung von 30 %. Hierbei sind Einsparungen von 30 % bei 1 000 Fahrzeugen und bis zu 87 % bei 3 500 Fahrzeugen möglich. Ein positiver Nebeneffekt, durch den flüssigeren Verkehrsfluss und die geringeren Standzeiten, ist die Kraftstoffeinsparung wie Abb. 6.5.4 (b) für eine Flotte von konventionellen Fahrzeugen zeigt. Analysiert man hier die Steigerung des Verbrauchseinsparpotenzials, so lässt sich feststellen, dass ab einer Verkehrsteilnehmerzahl von 1 500 Fahrzeugen, bei bereits 30 % Durchdringung, zwischen 66 % und 70 % des maximalen Einsparpotenzials ausgeschöpft ist. Ab 60 % Durchdringung sind nahezu 100 % erreicht. Ab einer Durchdringung von 80 % und höher geht eine weitere Fahrzeiteinsparung auf Kosten der Kraftstoffeinsparung, da die Kraftstoffeinsparung zwischen 60 % und 80 % Durchdringung ihr Maximum hat. Dies bedeutet, dass ab einer Durchdringung von 80 % und höher die letzten 5 % bis 10 % zusätzlicher Fahrzeiteinsparung auf Kosten des Energieverbrauchs erreicht werden.

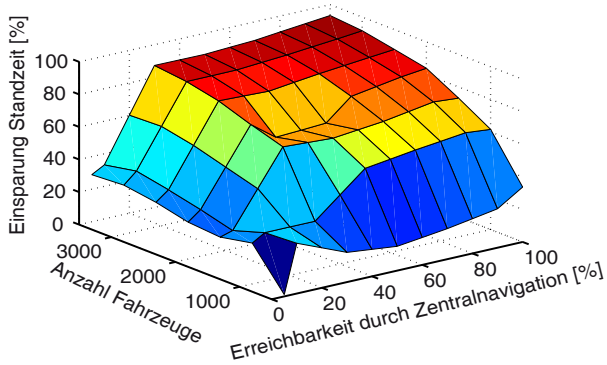



**Abbildung 6.5.5:** *Zeiteffizientes Routing, Reduzierung der Standzeit über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation*

### Energieeffizientes Routing

Werden alle Verkehrsteilnehmer energieeffizient durch die Zentralnavigation geroutet, so ergibt sich, wie schon in Abschnitt 6.5.2 für 2 000 Verkehrsteilnehmer erläutert, unabhängig von der Verkehrsteilnehmerzahl, ein linearer Zusammenhang zwischen Durchdringung, Verkehrsteilnehmern und Kraftstoffeinsparung, vgl. Abb. 6.5.6 (b). Betrachtet man die Fahrzeiteinsparung (a), so ist erkennbar, dass diese ihren größten Anstieg auch beim energieeffizienten Routing bis zu einer Durchdringung von 30 % hat. Wie auch beim zeiteffizienten Routing für die Verbrauchseinsparung, stellt sich beim energieeffizienten Routing für die Fahrzeiteinsparung der Effekt ein, dass ab einer Durchdringung von 60 % und höher, die zusätzliche Energieeinsparung auf Kosten der Fahrzeiteinsparung geht. Da die Energieeinsparung jedoch linear mit der Durchdringung steigt, stellt sich beim energieeffizienten Routing kein Maximum ein bei denen beide Größen ihr maximales Einsparpotenzial ausschöpfen.

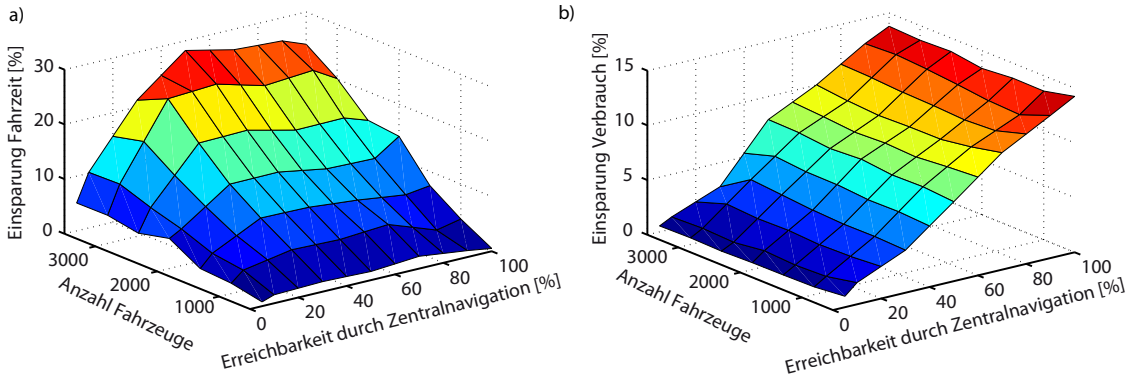



**Abbildung 6.5.6:** *Energieeffizientes Routing, (a) Fahrzeiteinsparung, (b) Kraftstoffeinsparung ICEV über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation*

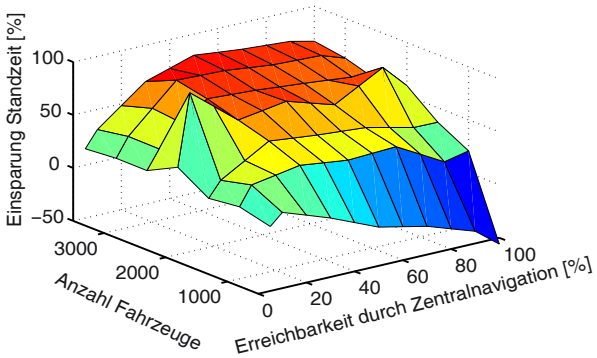



**Abbildung 6.5.7:** *Energieeffizientes Routing, Reduzierung der Standzeit über der Fahrzeuganzahl und Erreichbarkeit von Fahrzeugen durch die Zentralnavigation (ICEV)*

## 6.6 Stochastische Fahrzeugpopulationen

In naher Zukunft wird die Anzahl an Elektro- und Hybridfahrzeugen im Straßenverkehr stetig steigen. Wie in Abschnitt 6.1 gezeigt werden konnte, gibt es je nach Fahrzeugtopologie unterschiedliche energieeffiziente Routen. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt analysiert, welche Synergieeffekte sich beim energieeffizienten Routing durch eine stochastische Fahrzeugpopulation ergeben. Abbildung 6.6.1 zeigt die Verteilung der verschiedenen Fahrzeugtopologien für die Szenarien Nr. eins, zwei und fünf.

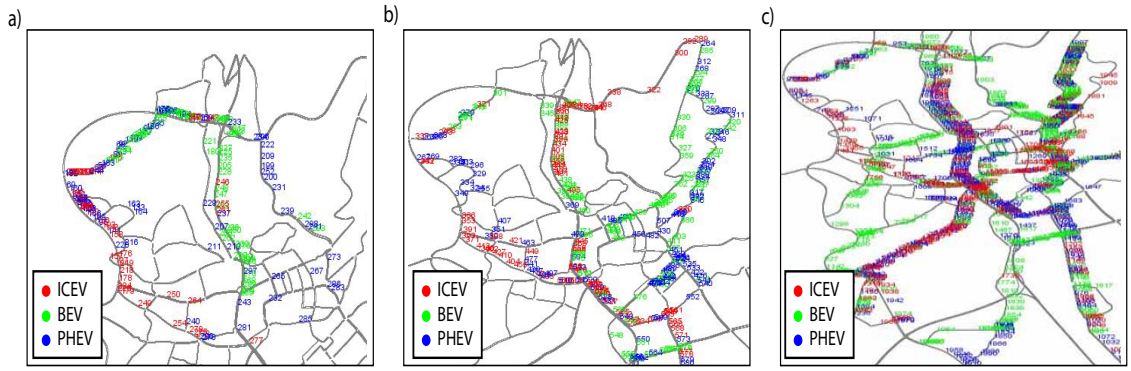



**Abbildung 6.6.1:** *Verteilung der verschiedenen Fahrzeugtopologien auf dem Simulationsnetz für die Szenarien (a) eins, (b) zwei und (c) fünf, ICEV (rot), BEV (grün), PHEV (blau)*

Abbildung 6.6.2 zeigt den Energieverbrauch (a) sowie die Fahrzeit (b), wenn jeweils eine monotone Fahrzeugpopulation aus ICEV, BEV oder PHEV energieeffizient geroutet wird, sowie wenn eine stochastische Verteilung dieser Fahrzeugtopologien vorliegt. Wie im Energieverbrauch zu erkennen ist, kann vor allem der Energieverbrauch von konventionellen Fahrzeugen und Hybridfahrzeugen gesenkt werden. Insgesamt lässt sich somit der Energieverbrauch, wenn verschiedene Fahrzeugtopologien im Verkehrsnetz energieeffizient geroutet werden, um weitere 6,0% senken. Bei allen untersuchten Szenarien ergibt sich eine zusätzliche durchschnittliche Energieeinsparung von 3,7 % wie Tab. 6.6.1 zeigt. Bei der Fahrzeit ergibt sich ein durchschnittlicher zusätzlicher Rückgang, im Vergleich zum $VKV_E$ mit monotonen Fahrzeugpopulationen, von 1,8 %.

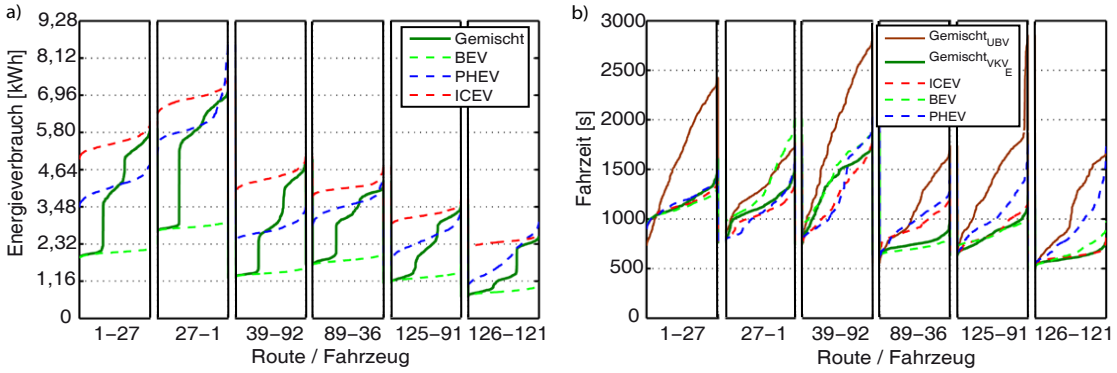



**Abbildung 6.6.2:** *Szenario 6: Vergleich (a) Energieverbrauch, (b) Fahrzeit bei monotonen, stochastischen Fahrzeugpopulationen bei energieeffizientem Routing*

**Tabelle 6.6.1:** *Zusätzliche Fahrzeit- und Energieeinsparung bei einer stochastischen Fahrzeugpopulation im Vergleich zum $VKV_E$-Routing mit monotonen Fahrzeugpopulationen*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| zusätzliche Fahrzeiteinsparung [%] | 5,5 | 3,2 | 2,8 | -3,8 | -0,4 | 3,7 |
| zusätzliche Energieeinsparung [%] | 2,3 | 0,2 | 2,0 | 9,5 | 1,9 | 6,0 |

## 6.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der neu entwickelte Algorithmus für den völlig kontrollierten Verkehrsfluss anhand von komplexen Simulationsszenarien untersucht. Hierzu wurde zunächst analysiert, welche Unterschiede es hinsichtlich kürzesten, zeiteffizientester und energieeffizienter Route bei Hybrid-, Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen gibt. Durch die Analyse von sieben Simulationsszenarien konnte in unterschiedlichen Analysen gezeigt werden, dass das Routingkonzept des völlig kontrollierten Verkehrsflusses sowohl beim zeitoptimierten Routing als auch beim energieoptimierten Routing ein großes Einsparpotenzial hinsichtlich der Fahrzeit als auch des Energieverbrauchs hat und erheblich zur Verbesserung des Verkehrsflusses beiträgt. Außerdem wurde die Lösungsqualität des Routingalgorithmus hinsichtlich der Anzahl an Verkehrsteilnehmern sowie auf unvorhergesehene Ereignisse untersucht. Um eine prozentuale Aussage der notwendigen Durchdringung von Fahrzeugen, die gezielt geroutet werden müssen, treffen zu können, so dass nennenswerte Einsparungen bei der Fahrzeit- und Energieeinsparung erzielt werden können, wurde der völlig kontrollierte Verkehrsfluss mit den Ergebnissen des unbeeinflussten Verkehrsflusses verglichen. Im Rahmen dieser Untersuchungen fand eine genaue und detaillierte Analyse der notwendigen Durchdringung, in punkto Verkehrsteilnehmern, Optimierungsziel und Fahrzeugtopologie, statt.

# 7 Generische Routingalgorithmen zur Rechenzeitreduzierung

Ziel der beiden folgenden Kapitel ist es, Erweiterungen des in Kapitel 5 erläuterten zentralen Verkehrsmanagements vorzustellen, welche eine Umsetzung in die Realität erlauben. Die Routenbestimmung mithilfe des Dijkstra-Algorithmus ist wie in Abschnitt 5.3.2 vorgestellt sehr zeitintensiv. Mit steigender Knoten- und Kantenzahl steigt auch die Berechnungszeit für die Bestimmung der optimalen Route. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein Vertreter der generischen Algorithmen, der Ameisenalgorithmus vorgestellt und dessen Anwendbarkeit auf das Verkehrsrouting untersucht. Anschließend wird in Abschnitt 7.2 verglichen, welche Lösungsqualität mittels Ameisenalgorithmen bei der Routengenerierung erreicht werden kann und welche Rechenzeiteinsparungen im Vergleich zum Dijkstra-Algorithmus möglich sind. Abschließend erfolgt in Abschnitt 7.3 eine Untersuchung inwiefern Ameisenalgorithmen für die Generierung zeit- und energieeffizienter Routen geeignet sind.

## 7.1 Ameisenalgorithmen

Der hier vorgestellte Ameisenalgorithmus wurde zu denen in der Literatur bekannten Heuristiken dahin gehend erweitert, dass der Ameisenalgorithmus durch eine geeignete Heuristik in der Lage ist, neben der kürzesten auch eine zeit- und energieeffiziente Route zu bestimmen. Generische Algorithmen bieten zwar keine Garantie für das optimale Ergebnis, doch erzielen sie bei guter Kalibrierung ein Resultat nahe am Optimum, bei einer deutlichen Rechenzeitreduzierung. Ausgehend von einem Initialzustand wird durch kleine systematische Veränderungen an der Basislösung und durch die Kenntnisse von charakteristischen Eigenschaften das Optimum gesucht. Vertreter sind z. B. Tabu Search, genetische Algorithmen oder Agenten-basierte Modelle, zu denen der Ameisenalgorithmus zählt.

Erste Forschungen an Ameisenalgorithmen gehen auf das Jahr 1989 zurück, wo Deneubourg et al. [117] versuchte das Verhalten von Ameisen analytisch zu erfassen. Hierbei stellte er fest, dass sich zu Beginn eines Experiments, Ameisen auf verschiedene Wege gleichmäßig verteilen, doch schon nach kurzer Zeit bestimmte Wege häufiger gewählt werden. Durch Pheromonablagerungen der Ameisen, die sie während ihres Rückweges zum Nest abgeben, wird dieser Effekt verstärkt und der gewählte Weg für kommende Ameisen markiert. Deneubourg et al. [12] erstellte hierzu ein mathematisches Modell, welches die Wahrscheinlichkeit beschreibt, für welchen Weg sich eine Ameise entscheidet. 1991 wurde das Prinzip von Colorni, Dorigo und Maniezzo wieder aufgegriffen und auf das Traveling-Salesman-Problem (TSP) angewandt [33]. Hierbei handelt es sich um die Fragestellung, eine vorgegebene Anzahl von Orten in einer Reihenfolge zu verbinden, so dass die Gesamtreiselänge die kürzeste Route ist. Diese Problemstellung findet vor allem in der effektiven Routenplanung von Flugzeugen, Paketdiensten, Speditionen oder bei Müllfahr-

zeugen Anwendung. Schon bei einer Problemstellung mit 20 Städten steigt der Lösungsraum auf 20!=2,4 Trillionen potenzieller Routen. Wenn man alle Routen ausprobiert und eine Zeit von 0,5 Sekunden pro Route ansetzt, würde dies 38 570 Jahre benötigen. Mit einem Ameisenalgorithmus ist die Lösung dieses Problems in weniger als einer Sekunde zu bewältigen [59].

Bei einem Ameisenalgorithmus werden zunächst wie in der Natur ständig „digitale Ameisen" auf die Suche nach der kürzesten Route geschickt. Sobald eine Ameise $k$ ihr Ziel erreicht hat, wird der gefundene Weg durch Pheromonwerte $\tau_{i,j}$ markiert und die in der Route enthaltenen Strecken um den Pheromonwert $\Delta\tau_{i,j}^{k}$ erhöht. Entscheidend hierbei ist, wie kurz die gefundene Route $L_k$ ist. Je kürzer die gefundene Route, desto höher die abgelegte Pheromonkonzentration. Aus diesem Grund wird die Pheromonkonzentration antiproportional zur Routenlänge angesetzt. Da in der Natur eine natürliche Fluktuation der Pheromonkonzentration stattfindet, wird diese Verdunstungsrate durch einen festen Prozentsatz $\rho$ beschrieben. Daraus berechnet sich die Pheromonkonzentration einer Strecke nach Gl. 7.1.1.

$$\tau_{i,j} = (1-\rho)\cdot\tau_{i,j} + \sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{i,j}^{k} \tag{7.1.1}$$

Nach Gl. 7.1.2 wird schließlich die Wahrscheinlichkeit $p$ für die nächste Strecken- und Knotenwahl bestimmt. Woraus mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation die nächste zu befahrene Strecke gewählt wird. In Gl. 7.1.2 steht hierzu im Nenner die Summe aller möglichen Strecken, die zur Auswahl stehen. Außerdem fließt in die Wahrscheinlichkeitsberechnung eine weitere Heuristik $\eta$ sowie die Parameter $\alpha$ und $\beta$ ein. Je nach dem ob $\alpha$ oder $\beta$ zu Null gewählt wird, kann eine vollständige Gewichtung auf die Botenstoffe $\tau$ bzw. die Heuristik $\eta$ erfolgen. Beim TSP wird diese Heuristik $\eta$ über den reziproken Wert der einzelnen Streckenlängen $L_{i,j}$ gebildet, so dass näher liegende Knoten häufiger gewählt werden.

$$p_{i,j}^{k} = \begin{cases} \frac{\tau_{i,j}^{\alpha}\cdot\eta_{i,j}^{\beta}}{\sum_{l\in erlaubt\ \mathrm{k}}\tau_{i,l}^{\alpha}\cdot\eta_{i,l}^{\beta}} & , j \in \text{ erlaubte k} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \tag{7.1.2}$$

### 7.1.1 Ameisenalgorithmen Anwendung auf Verkehrsrouting

Im Laufe der Zeit gab es viele Erweiterungen und Varianten des Ameisenalgorithmus. Zu den wichtigsten zählen das Ant Colony System [41], das Hybrid Ant System [27], [130] und das Ant Based Control (ABC) [116]. Der Unterschied zum TSP besteht beim Verkehrsrouting darin, dass nicht alle Knoten besucht werden müssen. Auch birgt die bestehende Heuristik $\eta = \frac{1}{L_{i,j}}$ Probleme, da der reziproke Wert der Streckenlänge nur eine bedingte Korrelation mit der kürzesten Strecke aufweist. Im Gegenteil, dies kann vor allem beim zeit- bzw. energieoptimierten Routing dazu führen, dass viele kurze Strecken gewählt werden, wodurch viele Kreuzungen angefahren werden, was zusätzliche Zeiteinbußen bzw. viele Start-Stopp-Phasen mit sich bringt. Hierzu wurde im Rahmen einer Studienarbeit eine Heuristik implementiert und untersucht, welche auf der Fahrtrichtung des jeweiligen Fahrzeuges basiert [44].

Die Idee hierbei ist, dass je kleiner der Winkel $\gamma$ zwischen Nachbarknoten und Zielknoten ist, desto besser sollte der Nachbarknoten sein, um dem Zielknoten näher zu kommen. Abbildung 7.1.1

zeigt, wie mithilfe des Cosinussatzes Gl. 7.1.3 der Winkel bestimmt und über Gl. 7.1.4 die Heuristik berechnet wird.

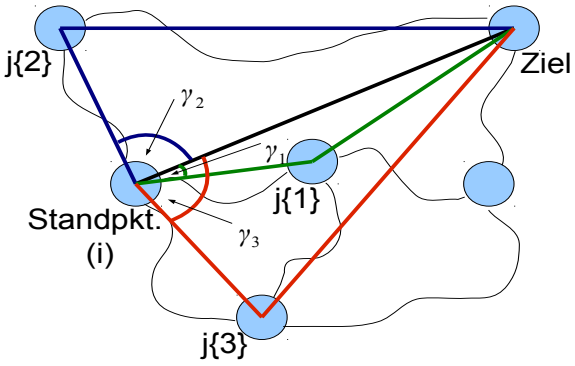



**Abbildung 7.1.1:** *Heuristikbestimmung mittels Fahrtrichtung [44]*

$$\gamma = arccos\left(\frac{\overline{i,j}^2 + \overline{i,ziel}^2 - \overline{j,ziel}^2}{2 \cdot \overline{i,j} \cdot \overline{i,ziel}}\right) \tag{7.1.3}$$

Da Fälle auftreten können, bei denen die Heuristik bei reziproker Wahl sehr groß werden kann, wurde für die Heuristik eine Geradengleichung mit dem Exponenten $\beta$ gewählt. Über den Parameter $\beta$ kann somit festgelegt werden, wie stark kleine bzw. große Winkel in die Heuristik eingehen.

$$\eta = \left(\frac{180° - \gamma}{180°}\right)^{\beta} \tag{7.1.4}$$

Dies führt dazu, dass für $\beta > 1$ verstärkt Knoten mit kleinen Winkeln gewählt werden. Dagegen gehen bei $\beta = 1$ alle Winkel gleichverteilt in die Heuristik ein. Eine weitere Einschränkung für die Suche des kürzesten Wegs ist, dass keine Knoten von den Ameisen doppelt besucht werden dürfen. Sollte dies der Fall sein, ist dies ein Indiz dafür, dass der bisher eingeschlagene Weg mit hoher Wahrscheinlichkeit weit vom optimalen Weg entfernt ist.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Lösungsqualität ist, wie die Botenstoffupdates über das Streckennetz verteilt werden. Hierbei gibt es zwei Alternativen:

- Das Botenstoffupdate $\Delta\tau_{i,j}$ erfolgt unter Betrachtung der gesamten gefundenen Route. Dies bedeutet, wenn eine Ameise zu Beginn einer Route einen schlechten Weg eingeschlagen, zum Ende jedoch den optimalen Weg gefunden hat, so wird die gesamte Route nur gering mit Botenstoffen beaufschlagt. Der Grund dafür ist der Umweg zu Beginn ihrer Route. Im Folgenden wird dies als *konstantes Update* nach Gl. 7.1.5 bezeichnet. Hierbei beschreibt $L_g$ die geschätzten Kosten der optimalen Route und $L_k$ die Kosten der von der Ameise gefundenen Route.

$$\Delta\tau_{i,j} = \frac{L_{g,Start,Ziel}}{L_{k,Start,Ziel}} \tag{7.1.5}$$

- Um diese Problematik zu umgehen, dass durch schlechte Routenabschnitte (Strecken) die gesamte Route schlecht bewertet wird, besteht die Möglichkeit, jede Strecke individuell zu beurteilen. Somit können gezielt Streckenelemente hervorgehoben werden. Dadurch kann erreicht werden, dass vermehrt Botenstoffe sowohl vom Startknoten als auch vom Zielknoten abgelagert werden und sich somit die Ameisenstraße schneller bildet. In den folgenden Analysen wird dies als *variables Update* nach Gl. 7.1.6 bezeichnet.

$$\Delta\tau_{i,j} = \frac{L_{g,i,Ziel}}{L_{k,i,Ziel}} \tag{7.1.6}$$

$L_g$ in Gl. 7.1.5 und Gl. 7.1.6 bezeichnet die geschätzte Routenlänge und dient zur Normierung der gefundenen Route. Die Normierung ist notwendig, da die Länge der Route von der individuellen Start-Ziel-Beziehung abhängt und direkten Einfluss auf die abzugebende Botenstoffmenge hat. Zur Initialisierung des Systems wurden für die verschiedenen Optimierungsziele die geschätzten Kosten nach Tab. 7.1.1 gewählt. Diese basieren auf der geschätzten Routenlänge zwischen Start und Ziel, welche sich bei kurvenreichen Routen in einem Intervall zwischen der 1,3 bis 3-fachen Luftlinie befindet. Die Abschätzung der Fahrzeit, sowie des Energieverbrauchs der einzelnen Fahrzeugtopologien, erfolgte auf den Erkenntnissen nach Kap. 5.5.1. Hierzu wurde eine mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit für die Fahrzeit von 36 km/h sowie eine Verbrauchsabschätzung von zwischen 0,18 Wh/m und 0,51 Wh/m festgelegt.

**Tabelle 7.1.1:** *Geschätzte Kosten zur Botenstoffnormierung*

| | gesch. Verbrauch [Wh] | gesch. Zeit [s] |
|---|---|---|
| ICEV | $0,51\ Wh/m \cdot 3\cdot$ Luftlinie | $0,1\ s/m \cdot 3\cdot$ Luftlinie |
| BEV | $0,18\ Wh/m \cdot 3\cdot$ Luftlinie | $0,1\ s/m \cdot 3\cdot$ Luftlinie |
| PHEV | $0,46\ Wh/m \cdot 3\cdot$ Luftlinie | $0,1\ s/m \cdot 3\cdot$ Luftlinie |

Da die Initialwerte der geschätzten Kosten $L_g$ zum Teil stark von den realen Kosten $L_k$ abweichen können, werden diese nach jedem Iterationsschritt nach Gl. 7.1.7 aktualisiert. Dadurch wird erreicht, dass die geschätzten Kosten nach vielen Iterationsschritten nahe an den optimalen Kosten liegen.

$$L_g = \begin{cases} L_k & \text{wenn } L_k < L_g \\ L_g & \text{sonst} \end{cases} \tag{7.1.7}$$

Da beim Energieverbrauch von Elektro- und Hybridfahrzeugen negative Energiewerte auftreten können, ist es notwendig, die gefundenen Werte umzunormieren. Des Weiteren ist für die Qualität der Ergebnisse entscheidend, wie die Botenstoffe verteilt werden. Da die Alternativrouten oft nur geringe Abweichungen bei den Kosten aufweisen und dadurch sich gute Strecken von weniger guten Strecken nur geringfügig im Botenstoffwert unterscheiden, ist eine Umnormierung auf ein größeres Intervall nach Gl. 7.1.8 notwendig. Dies bringt mit sich, dass der maximale Botenstoffwert ausgegeben wird, wenn die geschätzte Route gleich der gefundenen Route entspricht. Wenn hingegen die geschätzte Route multipliziert mit einer maximal akzeptierten Abweichung $\Delta\lambda_{max}$ kleiner als die gefundene Route ist, so wird lediglich die minimale Botenstoffmenge $\Delta\tau_{min}$

abgegeben.

$$\Delta\tau_{i,j} = \begin{cases} \left(\frac{L_{g,i,j}}{L_{k,i,j}} - \frac{1}{\lambda_{max}}\right) \cdot \frac{\tau max - \Delta\tau_{min}}{1 - \frac{1}{\lambda_{max}}} + \Delta\tau_{min} & \text{wenn } L_{g,i,j} \cdot \lambda_{max} > L_{k,i,j} \\ \Delta\tau_{min} & \text{sonst} \end{cases} \tag{7.1.8}$$

## 7.2 Analyse der Lösungsqualität / Rechenzeitbedarf zur Routengenerierung mit Ameisenalgorithmen

Damit der Ameisenalgorithmus optimal funktioniert, ist es notwendig, eine Vielzahl von Parametern zu analysieren und optimal einzustellen, was in [44] durchgeführt wurde. Abbildung 7.2.1 zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Ameisenstraße auf der optimalen Route ausbildet (a) sowie den Rechenzeitbedarf (b) über der Anzahl an Iterationen. Für die Auswertung wurde die Richtungsabhängigkeit $\beta$ zu Null gewählt und jede Iteration mit 30 Ameisen durchgeführt. Wie im Vergleich bei variablem und konstantem Botenstoffupdate zu erkennen ist, bildet sich ab 40 Iterationen mit einer Wahrscheinlichkeit von 77,8 % bei konstantem Botenstoffupdate die Ameisenstraße auf der optimalen Route aus. Durch ein variables Botenstoffupdate ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit auf 82,0 % zu steigern. Analysiert man die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Ameise die optimale Route findet, so liegt diese bei 40 Iterationen beim variablen Update bei 100,0 %, hingegen beim konstanten Botenstoffupdate bei lediglich 90,0 %. Betrachtet man die Abweichung der am schlechtesten gefundenen Route, so liegt diese nach 100 Iterationen beim konstantem Botenstoffupdate bei 9,2 %, bei variablem Botenstoffupdate kann dies auf 2,7 % reduziert werden. Auch kann durch die variable Botenstoffablagerung die Berechnungszeit von 10,0 ms auf 8,3 ms für 40 Iterationen gesenkt werden. Die Verbesserungen durch ein variables Ablagern von Botenstoffen können dadurch erreicht werden, da sich bei der variablen Botenstoffablagerung die Ameisenstraße vom Zielkonten als auch vom Quellknoten gleichzeitig bildet. Bei der konstanten Botenstoffablagerung hingegen bildet sich die optimale Ameisenstraße nur langsam vom Quell- zum Zielknoten.

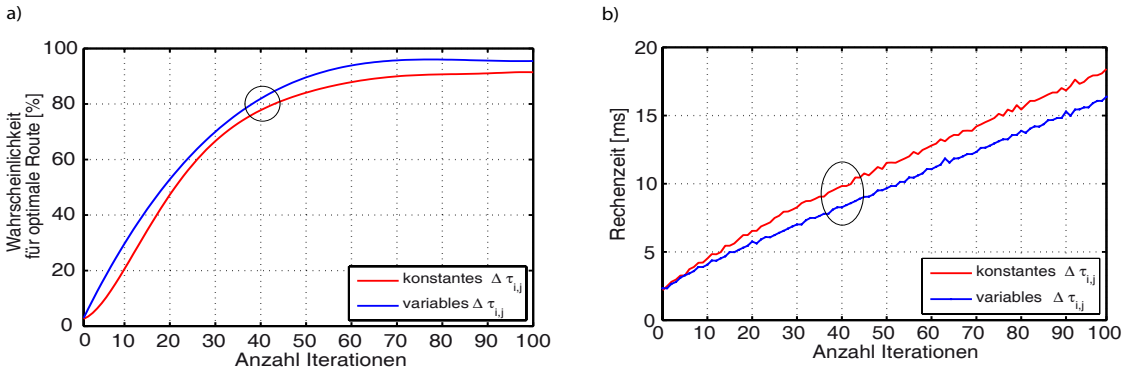



**Abbildung 7.2.1:** *(a) Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Ameisenstraße auf der optimalen Route bildet, (b) benötigte Rechenzeit*

In einer weiteren Untersuchung wurde für ein variables Botenstoffupdate die Richtungsabhängigkeit variiert. Wie in Abb. 7.2.2 (b) zu sehen ist, sinkt die Rechenzeit mit steigender Gewichtung der Richtung. Dies ist damit zu begründen, da die Ameisen auf ihrer Wegsuche nun den direkten Weg

zum Ziel suchen. Besonders wenn wenig Botenstoffe im Netz verteilt sind, wirkt sich dieses sehr positiv aus. Schon durch eine Gewichtung mit $\beta = 0,5$ lässt sich die Rechenzeit bei 40 Iterationen um 2,6 ms senken. Es ist jedoch auch zu beobachten, dass bei Gewichtungen der Richtung mit $\beta > 3$ keine Verbesserungen erzielt werden können. Im Gegenteil, eine weitere Erhöhung führt zu einer deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse, da die Ameisen durch die hohe Gewichtung von kleinen Winkeln nur sehr wenig alternative Routen ausprobieren, wie die Abb. 7.2.2 (a) zeigt.

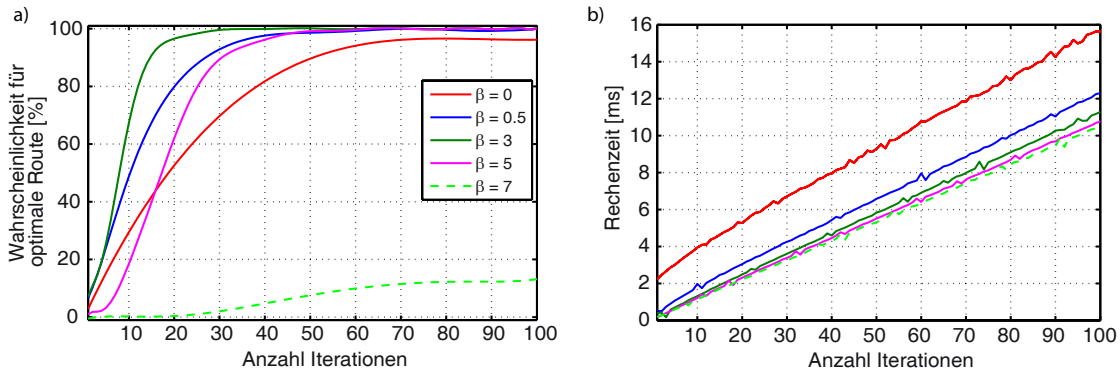



**Abbildung 7.2.2:** *Einfluss der Richtungsabhängigkeit auf die Lösungsqualität, (a) Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Ameisenstraße auf der optimalen Route ausbildet, (b) Rechenzeitbedarf*

Beim Dijkstra-Algorithmus liegt die Berechnungszeit einer Route, bei dem in Tab. 2.6.1 vorgestellten Simulationsnetz, zwischen 10,0 ms und 15,0 ms pro Fahrzeug und Route. Abbildung 7.2.3 zeigt bei einer Richtungsgewichtung von $\beta = 1$, dass mit zunehmender Routenlänge mehr Iterationen notwendig sind, um eine ausreichend hohe Wahrscheinlichkeit für das Auffinden der optimalen Route gewährleisten zu können. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Routenlänge die benötigte Rechenzeit (b) an. Insgesamt wurden eine Vielzahl von Start-Ziel-Beziehungen mit verschieden langen Routen untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass bei 40 Iterationen die Rechenzeit zwischen 3,6 ms und 5,8 ms liegt, wobei sich die Ameisenstraße in 90,0 % der Fälle auf der optimalen Route ausbildet.

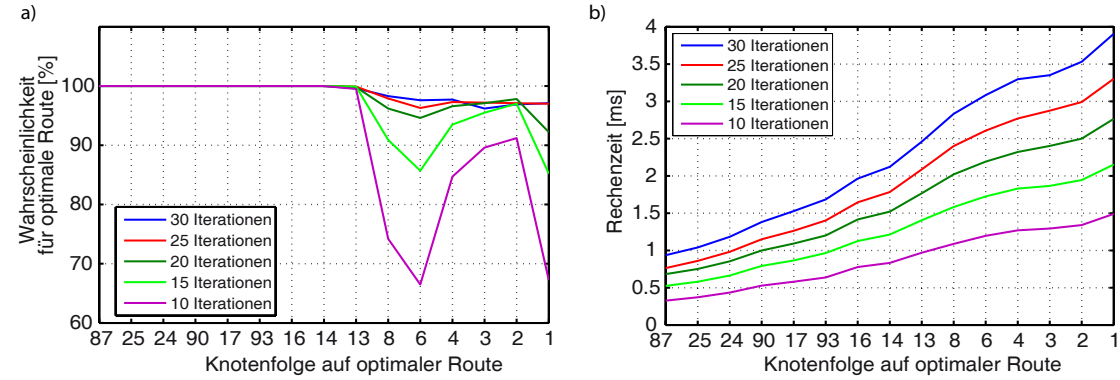



**Abbildung 7.2.3:** *(a) Einfluss der Routenlänge und Iterationsanzahl auf die Lösungsqualität und (b) den Rechenzeitbedarf*

## 7.3 Anwendbarkeit von Ameisenalgorithmen auf die zeit- und energieeffiziente Routengenerierung

In Abb. 7.3.1 wurde die Anwendbarkeit des Ameisenalgorithmus auf andere Optimierungsziele, wie die zeit- und energieeffiziente Route analysiert. Untersuchungen ergaben, dass die höchste Wahrscheinlichkeit für die optimale Route mit einer Gewichtung der Richtungsabhängigkeit von $\beta = 0,3$ erreicht werden kann.

In Abb. 7.3.1 wurde jeder Iterationsschritt mit 30 Ameisen durchgeführt. Abbildung 7.3.1 (a) zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Ameise die optimale Route findet, welche bei 40 Iterationen über 98,0 % liegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Ameisenstraße auf der optimalen Route ausbildet ist hierbei nicht so hoch und hat eine hohe Abhängigkeit von der Qualität der Alternativrouten. Bei den fünf hier analysierten Zielfunktionen liegt die Wahrscheinlichkeit, nach 40 Iterationen, dass sich die Ameisenstraße auf der optimalen Route ausbildet, im Durchschnitt bei 46,0 %. Gleichzeitig muss beachtet werden, dass der Fehler (b) von der optimalen Lösung der jeweils schlechtesten Ameisenroute im Durchschnitt bei 2,8 % nach 40 Iterationen liegt.

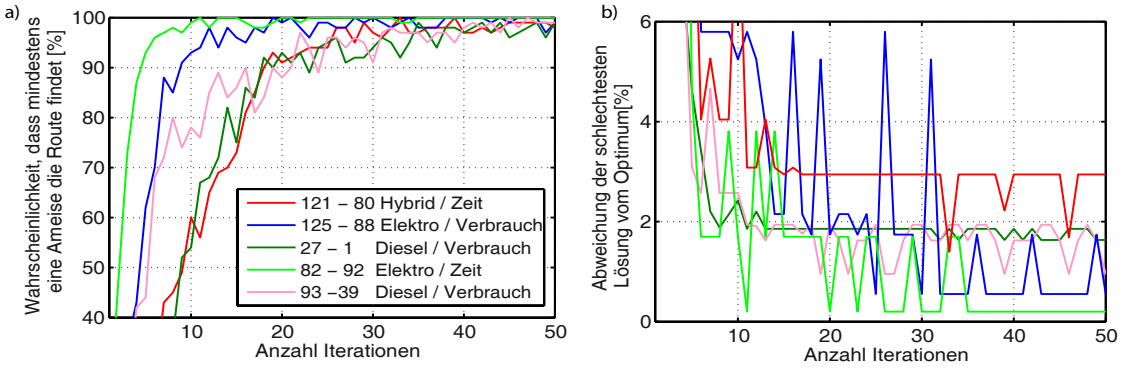



**Abbildung 7.3.1:** *Zeit- und energieeffizientes Routing, (a) Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Ameise die optimale Route findet, (b) Abweichung der schlechtesten Lösung von der optimalen Lösung*

## 7.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es mithilfe von Ameisenalgorithmen möglich ist, die Berechnungszeit für die Routengenerierung in großen Streckennetzen deutlich zu senken. Es konnte mit der hier eingeführten Heuristik gezeigt werden, dass Ameisenalgorithmen auch für die Routengenerierung, hinsichtlich zeit- und energieeffizienter Routen, geeignet sind. Die größte Wahrscheinlichkeit für die Ausbildung einer Ameisenstraße auf der optimalen Route ist jedoch beim Routing nach der kürzesten Route gegeben. Beim zeit- und energieeffizienten Routing ist die Lösungsqualität und die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Ameisenstraße auf der kostengünstigsten Route bildet, stark von der Anzahl und der Qualität der Alternativrouten abhängig.

# 8 Analyse der V2X Kommunikation bei einer Zentralnavigationslösung

Im Rahmen dieses Kapitels soll untersucht werden, welche technischen Voraussetzungen, für die Umsetzung des zentralen Verkehrsmanagements in die Realität, notwendig sind. Hierzu wird zunächst in Abschnitt 8.1 erläutert, wie relevante Verkehrskenngrößen erfasst werden können. Da die Kommunikation der Fahrzeuge mit einem Zentralnavigationssystem hierbei eine zentrale Rolle spielt, erfolgt zunächst in Abschnitt 8.3 die Definition eines Kommunikationsprotokolls, das es ermöglicht, das Datenvolumen und die notwendige Datenübertragungsrate für ein zentrales Verkehrsmanagement abzuschätzen. In Abschnitt 8.5 wird schließlich die Entwicklung einer Endbenutzerschnittstelle in Form einer Smartphone-App vorgestellt, welche das Verbindungsstück zwischen Verkehrsteilnehmern und zentralem Verkehrsmanagement herstellt.

## 8.1 Datenerhebung verkehrstechnischer Kenngrößen

Für die gezielte Lenkung und Steuerung des Verkehrs ist eine möglichst genaue Kenntnis über die aktuelle Verkehrslage notwendig. Hierzu gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verkehrserhebung. Zu den bekanntesten Vertretern gehören die Induktionsschleifen, Kontrollbrücken, wie sie meist auf Autobahnen zur Mauterhebung verwendet werden oder Trackingverfahren mittels Videobildern. Aber auch Floating-Car-Daten und anonymisierte Daten von Handynutzern haben in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen.

**Induktionsschleifen** Induktionsschleifen sind im Straßenverkehr am häufigsten vertreten, wobei eine Unterscheidung in einfache sowie doppelte Induktionsschleifen erfolgt. Einfache Induktionsschleifen haben den Nachteil, dass keine direkte Messung der Geschwindigkeit möglich ist und diese auf indirektem Weg über eine mittlere Fahrzeuglänge berechnet werden muss, was jedoch sehr fehleranfällig ist. Deshalb finden einfache Induktionsschleifen meist z. B. an Kreuzungen als Kontaktschleifen Anwendung. Doppelinduktionsschleifen sind in der Regel in einem Abstand von einem Meter angeordnet, so kann über die zeitlich versetzten Anstiegsflanken die Geschwindigkeit des Objektes ermittelt werden. Technisch gesehen sind Induktionsschleifen meist ein elektromagnetischer Schwingkreis.

**Floating-Car-Daten** Eine weitere Möglichkeit für die Erhebung aktueller Verkehrskenngrößen ist die Nutzung von Floating-Car-Daten bzw. Extended-Floating-Car-Daten (XFCD) [128]. Hierzu werden von Fahrzeugen, die am Verkehrsgeschehen teilnehmen, relevante Daten, wie die Position und Geschwindigkeit in regelmäßigen Abständen via Mobilfunk an eine Zentrale übermittelt. Bei Pilotprojekten in Berlin [140] und Wien wurden zur Datengenerierung Taxiflotten herangezogen.

Eine andere Möglichkeit zeigt Google aktuell auf. Hier werden anonymisierte Smartphonedaten in regelmäßigen Abständen ausgewertet, um daraus ein aktuelles Bild des Verkehrsgeschehens zu generieren [21].

**Verkehrsmesssystem mit Echtzeitdatenübertragung** In [91] wurde ein mobiles radargestütztes Verkehrsmesssystem realisiert, welches es ermöglicht, in Echtzeit die erfassten Daten der Verkehrsmessung per Funk an eine Basisstation zu übermitteln Abb. 8.1.1 . Hierzu wurde ein Messsystem mit einem nach dem CW-Prinzip arbeitenden Radarsensor aufgebaut, welcher mit einer Senderfrequenz von 24 Ghz arbeitet. Mittels dieses Radarsensors und der entwickelten Signalverarbeitung (b) ist das Verkehrsmesssystem in der Lage, den Verkehr auf zwei Spuren separat zu erfassen. Hierbei ist neben der Geschwindigkeitsdetektion außerdem eine Klassifizierung der Fahrzeuge in verschiedene Fahrzeugklassen möglich. Neben der Erfassung und lokalen Abspeicherung der Daten auf einer SD-Karte verfügt das Messsystem über ein Funkmodul, welches im 868 Mhz Bereich betrieben wird. Mittels einer maximalen Sendeleistung von 500 mW (27 dBm) des Funkmoduls, kann laut Hersteller eine Reichweite, bei einer optimalen Sichtverbindung, von 20 km erreicht werden [5]. Dadurch ist das Verkehrsmesssystem in der Lage, in regelmäßigen Intervallen die ermittelten Verkehrsdaten via Funk an eine Basisstation zu übermitteln.

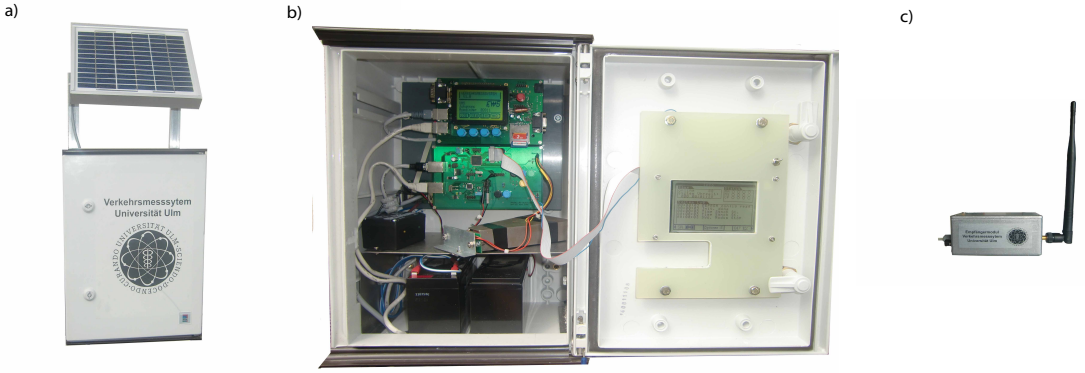



**Abbildung 8.1.1:** *Radargestütztes Verkehrsmesssystem, (a) Gesamtaufbau mit autarker Energieversorgung, (b) Hardware, (c) Empfängermodul*

Abbildung 8.1.2 zeigt eine exemplarische Verkehrsmessung, welche mit dem radargestützten Verkehrsmesssystem an der Albert-Einstein-Allee in Ulm durchgeführt wurde. Zu erkennen ist, dass vor allem in den Morgenstunden und zu Arbeitsbeginn, ein erhöhter Verkehrsfluss vom Berliner Ring in Richtung Universität stattfindet. In dem Zeitraum zwischen 15:00 Uhr und 18:00 Uhr ist ein erhöhter Verkehrsfluss in Richtung Berliner Ring zu verzeichnen. Der nahezu konstante Anteil an Schwerlastverkehr ist dadurch zu erklären, da auf dem gemessenen Streckenabschnitt zwei Buslinien verkehren.

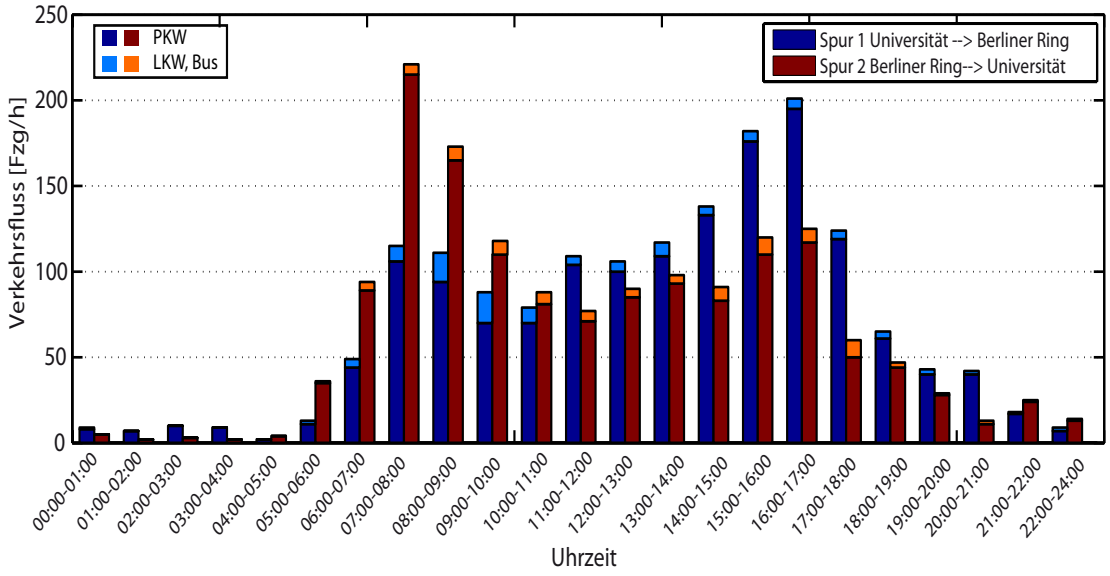



**Abbildung 8.1.2:** *Verkehrsmessung an der Albert-Einstein-Allee Ulm*

### 8.1.1 Einfluss der Aktualisierungsrate der Verkehrsdatenerfassung auf die Lösungsqualität

Abbildung 8.1.3 zeigt die Entwicklung der Fahrzeiteinsparung (a) und die Kraftstoffeinsparung (b) des völlig kontrollierten Verkehrsflusses in Abhängigkeit des Updateintervalls, der Echtzeitinformationen und der Durchdringung. Wie in der Fahrzeiteinsparung als auch in der Kraftstoffeinsparung zu erkennen ist, sinkt die Lösungsqualität nur um wenige Prozentpunkte, selbst bei einer deutlichen Vergrößerung des Updateintervalls der Echtzeitinformationen von 30 Sekunden auf bis zu 1 000 Sekunden.

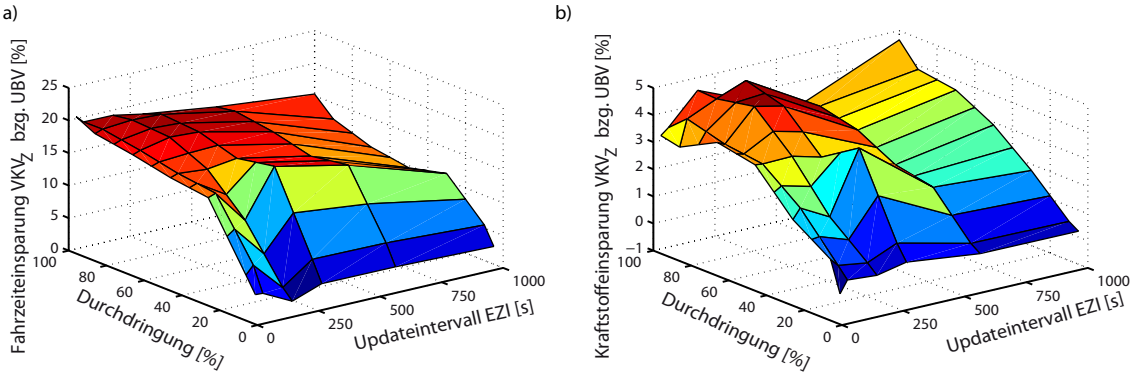



**Abbildung 8.1.3:** *(a) Entwicklung der Fahrzeiteinsparung, (b) Kraftstoffeinsparung als Funktion der Updaterate des Zentralnavigationssystems mit Echtzeitdaten*

Der Grund für den nur geringen Rückgang des Einsparpotenzials bei einer Vergrößerung des Updateintervalls der Echtzeitinformationen ist darin begründet, da das zentrale Verkehrsmanagement die Routen aller Fahrzeuge intern selbst verwaltet. Dadurch hat es über die Datenfusion von historischen Daten und der Verkehrsdichteprädiktion genügend Informationen über die

Belastung des aktuellen und zukünftigen Streckennetzes, so dass die Lösungsqualität auch bei wenigen Echtzeitinformationen nur geringfügig leidet. Bei einer Durchdringung von 100 % sind alle Routen im Zentralnavigationsgerät erfasst, wodurch ein sehr realistisches Bild der aktuellen Streckennetzsituation gegeben ist. Dadurch fällt die Fahrzeiteinsparung Abb. 8.1.3 (a) von 20,3 % auf 15,3 %, wenn das Updateintervall von 30 auf 1 000 Sekunden vergrößert wird. Bei einer Durchdringung von 5 % werden hingegen nur 5 % der Fahrzeugrouten zentral durch das zentrale Verkehrsmanagement verwaltet, somit fällt die Fahrzeiteinsparung bei einer Vergrößerung des Updateintervalls von 30 Sekunden auf 1 000 Sekunden von 3,9 % auf 2,7 %. Dies bedeutet eine Verschlechterung der Lösungsqualität bei Betrachtung der Fahrzeiteinsparung von 24,6 % bei 100 % Durchdringung bzw. 30,1 % bei 5 % Durchdringung. Insgesamt lässt sich in punkto Kraftstoff- und Fahrzeiteinsparung feststellen, dass die Aktualität der Echtzeitinformationen ein wichtiger Bestandteil für eine große Fahrzeiteinsparung ist. Die Auswertung zeigt aber auch, dass bis zu einem Updateintervall von 180 Sekunden nur minimale Einbußen in der Lösungsqualität zu verzeichnen sind. Abbildung 8.1.4 zeigt den Einfluss des Updateintervalls von Echtzeitinformationen. Hierzu wurde der völlig kontrollierte Verkehrsfluss $VKV_Z$ und wenn ausschließlich mit Echtzeitinformationen zeiteffizient $ZZ + EZI$ geroutet wird verglichen. Wie zu erkennen ist, hat die Aktualisierungsrate auf das Routing mit Echtzeitinformationen einen deutlich größeren Einfluss auf die Lösungsqualität. So entstehen bei einer Vergrößerung des Updateintervalls von 30 Sekunden auf 600 Sekunden, beim $VKV_Z$ eine Verschlechterung um 4,4 %, beim Routing ausschließlich mit Echtzeitinformationen um 24,8 %.

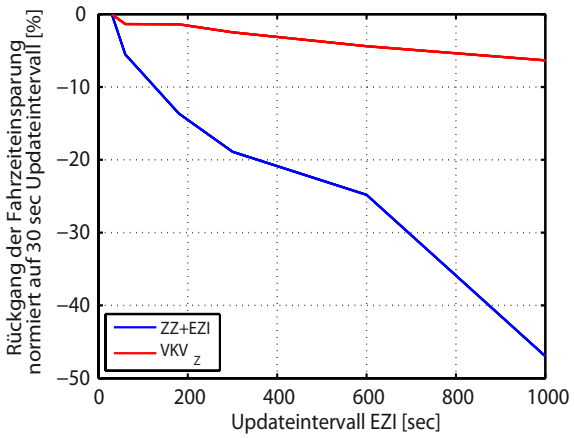



**Abbildung 8.1.4:** *Vergleich des Rückgangs der Fahrzeiteinsparung bei Vergrößerung des Updateintervalls von Echtzeitinformationen, Routing ausschließlich mit Echtzeitinformationen ($ZZ + EZI$), völlig kontrollierter Verkehrsraum ($VKV_Z$)*

## 8.2 Fahrzeugkommunikation

Bei der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation handelt es sich um ein sehr komplexes Forschungsgebiet. Die detaillierte Entwicklung und Erprobung eines Kommunikationskonzeptes für ein Zentralnavigationssystem würde vom Arbeitsaufwand einer eigenständigen Dissertation gerecht werden. Deshalb soll an dieser Stelle durch die Implementierung einer vereinfachten Fahrzeugkommunikation abgeschätzt werden, welches Datenvolumen entstehen würde bzw. welche Datenübertragungsrate bei der Umsetzung eines zentralen Verkehrsmanagements notwendig wäre.

Unter der Bezeichnung Vehicle-to-X (V2X) wird die Zusammenfassung verschiedener Kommunikationsarten wie Vehicle-to-Vehicle (V2V) und Vehicle-to-Infrastructure (V2I) verstanden. Die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander geschieht hierbei über sogenannte On-Board-Units (OBU). Zur Kommunikation besitzt jedes Fahrzeug genau eine OBU, welche die Daten sämtlicher in einem Fahrzeug eingesetzten Application-Units (AU) fusioniert und versendet. Damit die einzelnen Fahrzeuge mit der Verkehrsinfrastruktur kommunizieren können, bedarf es außerdem Kommunikationseinheiten, welche definierte Bereiche der Verkehrsinfrastruktur abdecken, die sogenannten Road-Side-Units (RSU). Neben der Verbesserung der Verkehrssicherheit, wie das Warnen vor Unfällen oder Gefahrenquellen, wie Stauenden, Glatteis bzw. Aquaplaning, bietet die Fahrzeugkommunikation auch die Möglichkeit zur aktiven Optimierung des Verkehrsflusses beizutragen.

Aktuell existieren noch keine weltweiten Standards zu der V2X-Kommunikation. So hat sich die Europäische Union darauf verständigt, das Frequenzband zwischen 5,875 GHz und 5,905 GHz für V2X Anwendungen freizugeben [60]. Außerdem hat man sich auf den Funkstandard IEEE 802.11p [69], der eine Weiterentwicklung des WLAN Standards IEEE 802.11a ist, verständigt [150].

### 8.2.1 Fahrzeug-Ad-hoc-Netzwerke

Bei der V2X-Kommunikation bilden die einzelnen Kommunikationsteilnehmer ein Netzwerk, welches sich mathematisch als Graph beschreiben lässt. Der Unterschied zu dem in Abschnitt 2.6 vorgestellten Verkehrsnetz, das ebenfalls durch einen Graphen abgebildet wurde ist, dass sich die geografischen Positionen der Kommunikationsteilnehmer ständig ändern können, weshalb man auch von Ad-hoc-Netzwerken, also Netzwerken, die für den Augenblick gemacht sind, spricht. Hierbei erfolgt eine weitere Unterteilung in sogenannte mobile Ad-hoc-Netzwerke (MANET). Dies betrifft Netzwerke, bei denen die Knoten, sprich die Kommunikationsteilnehmer mobil sind, wie z. B. tragbare Computer. Netzwerke, bei denen Fahrzeuge beteiligt sind, werden auch Vehicle-Ad-hoc-Networks (VANET) genannt. Hierbei gelten besondere Anforderungen an das Netzwerk. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer mit Relativgeschwindigkeiten von bis zu 500 km/h ist es notwendig, in Sekundenbruchteile eine Verbindung aufbauen zu können.

## 8.3 Kommunikationsprotokoll / Kommunikationsschema

Prinzipiell sind verschiedene Kommunikationsschemen, sprich, auf welchem Wege die Daten zwischen den Fahrzeugen und der Verkehrsleitzentrale ausgetauscht werden, möglich. Beim ersten analysierten Kommunikationsschema kommuniziert jedes Fahrzeug mittels einer On-Board-Unit mit der Verkehrsinfrastruktur und anderen Verkehrsteilnehmern. Hierbei findet die Kommunikation der Fahrzeug-OBUs mit den RSUs, welche in regelmäßigen Abständen an Kreuzungen oder am Streckenrand fest installiert sind, statt. Die Kommunikation zwischen den RSUs und den OBUs sowie die OBUs untereinander kommunizieren hierbei per Funk. Diese RSUs bilden zusammen mit der Verkehrsleitzentrale (VLZ) ein kabelgebundenes Netzwerk. Die Aufgabe der VLZ ist es, sämtliche Informationen aller RSUs zu bündeln und auf Basis dieser, neue Routenanfragen zu berechnen. Abbildung 8.3.1 (a) zeigt den Kommunikationsablauf zwischen VLZ, RSU und OBU, welcher außerdem durch Multi-Hopping ergänzt ist. Multi-Hopping findet dann An-

wendung, wenn sich eine RSU außerhalb der Funkreichweite eines Fahrzeuges befindet. Da bei der Funkübertragung der WLAN Standard IEEE 802.11p zum Einsatz kommt, ist die Reichweite auf ca. 1 000 Meter begrenzt. Aus diesem Grund kommunizieren somit OBUs mit ihrem besten Nachbarn, der die Nachricht dann an die betreffende RSU weiterleitet. Die Information über den besten Nachbarn ist den einzelnen OBUs daraus bekannt, da jede OBU in regelmäßigen Abständen Beacons mit ihrer geografischen Position versendet.

Beim zweiten analysierten Kommunikationsschema kommuniziert jeder Verkehrsteilnehmer mittels einer mobilen Smartphone-App über das Mobilfunknetz mit der Verkehrsleitzentrale. Wie Abb. 8.3.1 (b) zeigt, läuft hier die Kommunikation deutlich einfacher ab.

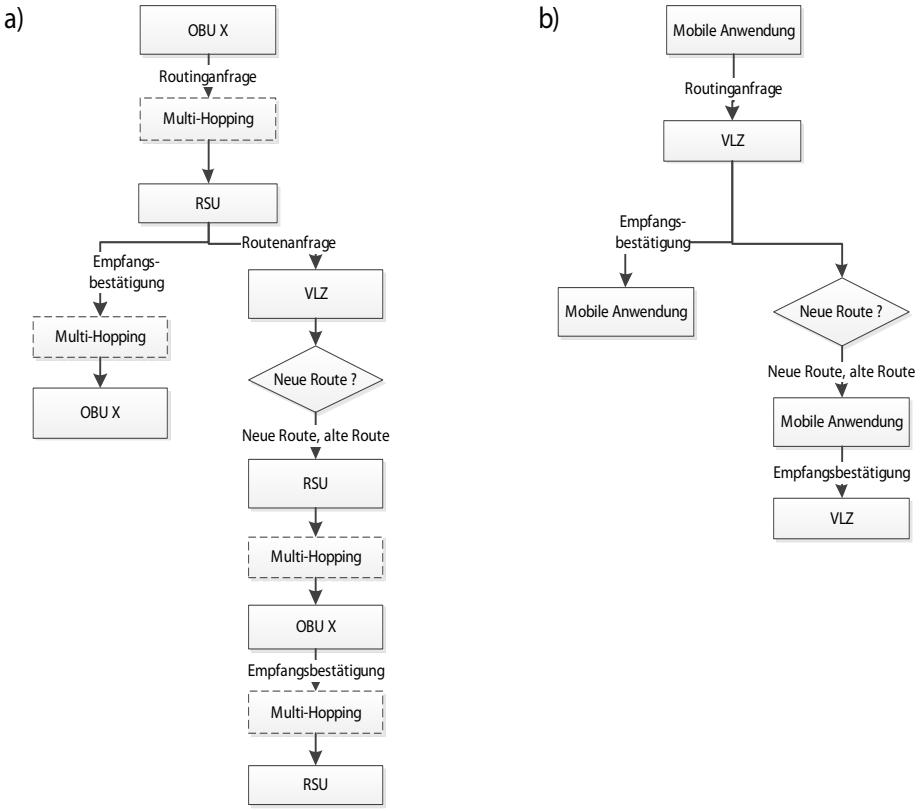



**Abbildung 8.3.1:** *(a) Kommunikationsablauf bei Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, (b) Kommunikationsablauf über das Mobilfunknetz*

Das Kommunikationsprotokoll, welches die Kommunikation zwischen den verschiedenen Verkehrsteilnehmern und dem zentralen Verkehrsmanagement regelt, besteht aus verschiedenen Nachrichten. Hierbei ist jede Nachricht aus einem Header, welcher für die korrekte Zustellung der Nachricht verantwortlich ist, sowie dem eigentlichen Inhalt, aufgebaut.
Der Header ist wie Tab. 8.3.1 zeigt aus insgesamt acht Feldern aufgebaut. Diese enthalten neben einem Zeitstempel, Informationen über den Typ des Senders bzw. Empfängers. Je nach Kommunikationsschema können Nachrichten von der OBUs, RSUs, Sensoren oder der VLZ gesendet oder empfangen werden. Neben dem Typ ist außerdem jedem Kommunikationsteilnehmer eine feste ID zugeordnet, so dass jeder Teilnehmer eindeutig identifiziert werden kann. Des Weiteren erfolgt

eine Unterteilung in Sender, Ziel und Empfänger. Dies ist dann notwendig, wenn das eigentliche Ziel des Senders nicht in der Reichweite des Senders ist. Somit müssen sogenannte Forwarder als Empfänger dienen und die Nachricht per Multi-Hopping an das eigentliche Ziel weiterleiten.

**Tabelle 8.3.1:** *Header des Kommunikationsprotokolls*

| Empfängertyp | Empfängernr. | Zieltyp | Zielnr. | Nachrichtentyp | Sendertyp | Sendernr. | Zeitstempel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 bit | 17 bit | 3 bit | 17 bit | 5 bit | 3 bit | 17 bit | 17 bit |

Der Nachrichtentyp legt fest, welche Art von Nachricht übermittelt wird. Dadurch erhält der Empfänger Informationen, wie die empfangene Nachricht verarbeitet werden soll bzw. wie auf sie reagiert werden muss. Für einen korrekten Ablauf der Kommunikation ist nach Tab. 8.3.2 eine Unterscheidung in fünf verschiedene Nachrichtentypen notwendig. Jede dieser Nachrichten enthält einen unterschiedlichen Inhalt mit unterschiedlichem Datenvolumen.

**Tabelle 8.3.2:** *Nachrichtentyp / Bezeichnung*

| **Nachrichtentyp** | **Bezeichnung** |
|---|---|
| 1 | Routinganfrage |
| 2 | Routenupdate positiv |
| 3 | Routenupdate negativ |
| 4 | Empfangsbestätigung |
| 5 | Beacon |

Exemplarisch hierfür zeigt Tab. 8.3.3 den Aufbau des Nachrichtentyps 2 für ein positives Routenupdate. Dieser Nachrichtentyp enthält neben einem aktuellen Zeitstempel und der Fahrzeugnummer, für welches die Nachricht bestimmt ist, die neue zu befahrene Route. Diese Routenlänge variiert von Nachricht zu Nachricht, so dass es sich beim Inhalt des Nachrichtentyps 2 um eine Nachricht mit flexibler Länge handelt. Außerdem enthält die Nachricht Zusatzinformationen über die aktuell gewählte Route sowie die neu vorgeschlagene Route, wie die Länge, die Fahrzeit und den Energieverbrauch.

**Tabelle 8.3.3:** *Inhalt Nachrichtentyp 2: Routenupdate positiv*

| Typ | Zeit | Fahrzeug Nummer | Neue Route | Länge alt | Länge neu | Zeit alt | Zeit neu | Verbrauch alt | Verbrauch neu | Sontiges |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 bit | 17 bit | 17 bit | xx bit | 16 bit | 16 bit | 17 bit | 17 bit | 14 bit | 14 bit | 28 bit |

Neben der eigentlichen Routenanforderung und Routenaktualisierung erfüllt das regelmäßige Übermitteln der Fahrzeugposition an die Verkehrsleitzentrale eine wichtige Funktion. Hierzu übermittelt jedes Fahrzeug in einem Intervall von 60 Sekunden Beacons an die Verkehrsleitzentrale in Form des Nachrichtentyps 5 Tab. 8.3.4. Diese Nachricht enthält Information über die aktuelle Position sowie die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Dadurch erhält die Verkehrsleitzentrale in regelmäßigen Abständen Informationen über den aktuellen Zustand des Verkehrsnetzes. Die Inhalte der anderen Nachrichtentypen finden sich im Anhang in den Tabellen 10.11.1 bis 10.11.4 wieder.

Abbildung 8.3.2 zeigt die Abfolge der Kommunikation, bei einer direkten Kommunikation des Fahrzeuges mit der Verkehrsleitzentrale über das Mobilfunknetz. Wie zu erkennen ist, sendet das Fahrzeug in Intervallen von 60 Sekunden Beacons an die VLZ. Insgesamt erbittet das Fahrzeug zu fünf Zeitpunkten um eine Routenaktualisierung durch die VLZ. Jede dieser Routinganfragen

**Tabelle 8.3.4:** *Inhalt Nachrichtentyp 5: Beacon*

| Typ | Zeit | Fahrzeugnr. | Position | Geschwindigkeit |
|---|---|---|---|---|
| 5 bit | 17 bit | 17 bit | 55 bit | 12 bit |

läuft hierbei nach dem in Abb. 8.3.1 geschilderten Schema (b) ab. Wie im Datenvolumen, das von der VLZ an die Fahrzeuge übermittelt wird zu erkennen ist, verringert sich das Datenvolumen im Laufe der Zeit. Dies liegt daran, da sich die Fahrzeuge mit der Zeit ihrem Zielknoten nähern, so dass die neue bessere Route, also immer kürzer wird und somit weniger Datenvolumen anfällt.

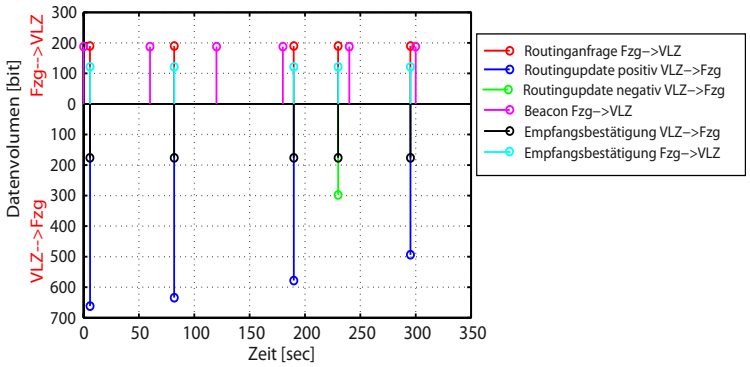



**Abbildung 8.3.2:** *Detaillierte Darstellung der Fahrzeug-Verkehrsleitzentrale-Kommunikation*

## 8.4 Analyse des Datenvolumens und der Datenübertragungsrate bei einer Kommunikation über das Mobilfunknetz

Abbildung 8.4.1 zeigt die Analyse des Datenvolumens (a) sowie der notwendigen Datenübertragungsrate (b) für Szenario drei über der Zeit. Beim Datenvolumen handelt es sich um die Kommunikation des Datenverkehrs, von den Fahrzeugen zur Verkehrsleitzentrale sowie den Daten, die von der Verkehrsleitzentrale an die Fahrzeuge gesendet werden. Auch sendet jedes Fahrzeug in einem Intervall von 60 Sekunden Beacons über seine aktuelle Position und Geschwindigkeit aus. Verglichen wurde das Datenvolumen aller Fahrzeuge, welches bei einer 10 % igen als auch bei einer 100 % igen Durchdringung auftritt. Je nach gewählter Route bzw. Fahrzeit fällt pro Fahrzeug durchschnittlich ein Datenvolumen von 1,2 kByte an, wobei 22,1 % auf die Beacons und 77,9 % auf die eigentliche Routenaktualisierung entfallen.
Unter der Datenübertragungsrate versteht man, welches Datenvolumen in einer definierten Zeiteinheit über einen Übertragungskanal übertragen wird. Die maximale Übertragungsrate gibt also eine Aussage darüber, wie stark ein Kommunikationsnetz belastet ist. Für die Analyse der Datenübertragungsrate gibt es verschiedene Betrachtungssichtweisen.
Zum einen kann man die Datenübertragungsrate einzelner Mobilfunkzellen, welche meist einen Radius im Stadtgebiet von 500 m bis 1 000 Meter haben, ermitteln. Dabei wird ermittelt, welches Datenvolumen von allen Kommunikationsteilnehmern in einem betrachteten Gebiet pro Zeiteinheit versendet bzw. empfangen wird. Zum anderen ist es von Interesse, welche Datenübertragungsrate von einer Verkehrsleitzentrale garantiert werden muss, um ein zentrales Verkehrsmanagement zu ermöglichen. Abbildung 8.4.1 (b) zeigt die Datenübertragungsrate, welche von der Verkehrsleitzentrale garantiert werden muss, bei einer 100 % igen bzw. 10 % igen Durchdringung

bei insgesamt 2 000 Fahrzeugen.

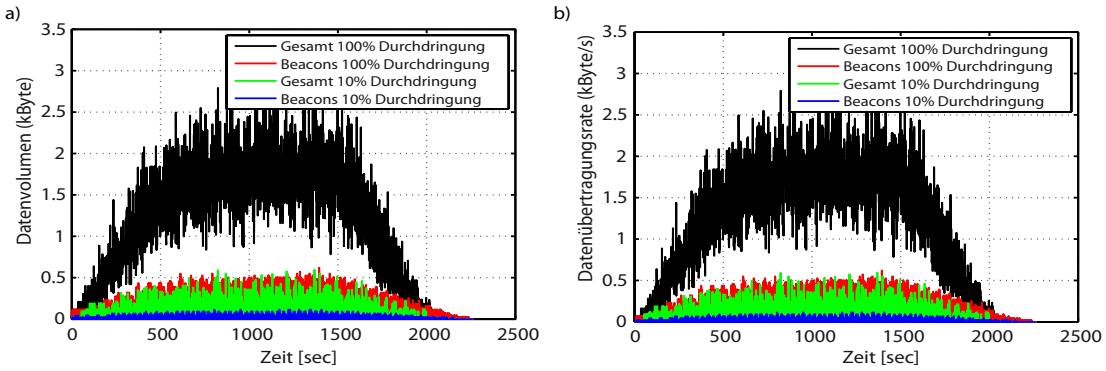



**Abbildung 8.4.1:** *Szenario drei: (a) Datenvolumen der Fahrzeuge-VLZ-Kommunikation, (b) Datenübertragungsrate der gesamten Kommunikation*

Die Simulation und Analyse der Kommunikation zwischen der Verkehrsleitzentrale und den Verkehrsteilnehmern zur Realisierung des völlig kontrollierten Verkehrsflusses zeigen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Datenvolumen und der Anzahl gerouteter Fahrzeuge besteht. Wie Abbildung 8.4.2 (a) zeigt, entsteht insgesamt ein Datenvolumen von 2,4 MByte bei einem völlig kontrollierten Verkehrsfluss, der insgesamt 2 000 Fahrzeuge beinhaltet. Hierauf entfallen 78,4 % auf die Routingdaten und 21,6 % auf die Fahrzeugbeacons. Betrachtet man die Datenübertragungsrate Abb. 8.4.2 (b) der Verkehrsleitzentrale, so ist eine Datenübertragungsrate von 3,1 kByte/s bei 2 000 gerouteten Fahrzeugen notwendig. Auch hier entfällt nur eine geringe Datenübertragungsrate auf die Beacons von 0,6 kByte/s. Gleichzeitig ist ein Sättigungseffekt in der Übertragungsrate zu beobachten, da jede Funkzelle nur eine begrenzte Kapazität für Fahrzeuge bietet.

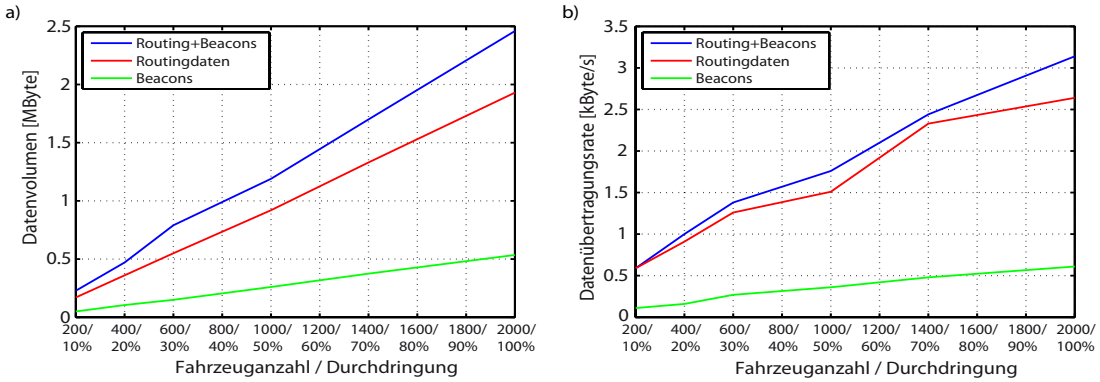



**Abbildung 8.4.2:** *(a) Gesamtdatenvolumen, (b) Datenübertragungsrate der Verkehrsleitzentrale als Funktion der Fahrzeuganzahl sowie der prozentual erreichbaren Fahrzeuge des völlig kontrollierten Verkehrsflusses*

Wie die Analysen des Datenvolumens und der Datenübertragungsrate für ein Routing der Fahrzeuge über das Mobilfunknetz gezeigt haben, stellt sowohl das Datenvolumen als auch die Datenübertragungsrate nur geringe Anforderungen an das Mobilfunknetz und ist mit der aktuell in Deutschland verfügbaren Netzabdeckung sehr gut zu bewältigen (Übersichtstabelle 10.11.5). So hat sich gezeigt, dass für die Realisierung eines zentralen Verkehrsnavigationsmanagements ein UMTS-Netz ausreichend ist. Hierbei entsteht bei 2 000 simulierten Fahrzeugen ein Datenvo-

lumen in der Größenordnung einer MP3 Musikdatei. Gleichzeitig zeigen die Analysen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Datenvolumen und der Anzahl an gerouteten Fahrzeugen gegeben ist. Eine detailliertere Analyse des Datenverkehrs sowie der Datenübertragungsrate bei der Kommunikation über das Mobilfunknetz sowie einer Kommunikation zwischen Fahrzeugen, Roade-Side-Units und Verkehrsleitzentrale findet sich in [66]. Außerdem erfolgt hier eine genaue Analyse über die Auslastung einzelner RSUs sowie deren optimalen Anordnung.

## 8.5 Smartphone-App als Endverbraucherschnittstelle

Neben einem funktionsfähigen Algorithmus ist eine Benutzerschnittstelle ein sehr wichtiges Bindeglied zwischen den Benutzern und dem Dienstleistungsanbieter. Wichtige Anforderungen an die Entwicklung und den Entwurf einer Benutzerschnittstelle ist eine benutzerfreundliche und intuitivbedienbare Menüführung sowie die übersichtliche Darstellung wichtiger Informationen. Insgesamt wurde die App in Form eines Navigationsgerätes implementiert. Neben den standardmäßigen Funktionen eines handelsüblichen Navigationsgerätes, verfügt diese App über die Funktion mithilfe der Kommunikation mit einem Zentralserver, welcher das zentrale Verkehrsmanagement übernimmt, dem Anwender die für ihn zeit- bzw. energieeffizienteste Route zu empfehlen und während der Fahrt zu aktualisieren. Mit dem in Abschnitt 8.3 erläuterten Kommunikationsprotokolls übermittelt die App in regelmäßigen Zeitabständen die GPS-Position und die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeuges an einen Server. Mithilfe dieser übermittelten Positionsdaten sowie anderer Verkehrssensoren, welche einen Rückschluss über den Verkehrszustand des Verkehrsnetzes geben, ist das zentrale Verkehrsmanagement somit in der Lage, die Optimierung des völlig kontrollierten Verkehrsflusses nach Abschnitt 5.4 vorzunehmen. Dies spiegelt auch die wichtigste Funktionalität und Neuerung der App wieder, durch eine gezielte Routenempfehlung und Anpassung der Route, welche für den jeweiligen Endverbraucher zu einer Fahrzeitverkürzung und Kraftstoffeinsparung führt, gezielt auf den Verkehrsfluss und dessen Lenkung Einfluss zu nehmen. Wie Abb. 8.5.1 (c) zeigt, werden dem Benutzer jeweils die aktuell geplante sowie die neue bessere Route vorgeschlagen. Um eine Akzeptanz für das zentrale Verkehrsmanagement sowie die App beim Benutzer zu schaffen, werden dem Benutzer außerdem Zusatzinformationen, wie die aktuell benötigte Fahrzeit, den Energieverbrauch und die aktuelle Streckenlänge sowie die Informationen für die neue effizientere Route angezeigt. Zudem wird dem Benutzer visualisiert, wie viel Fahrzeit und Energie er durch einen Wechsel auf die alternative Route einsparen kann. Neben diesen wichtigsten Funktionalitäten bietet die App viele zusätzliche Funktionen, wie die Darstellung der aktuellen Verkehrsbelastung des Streckennetzes oder statistische Auswertungen (d). Nähere Details hierzu befinden sich in [115].

Entwickelt und erprobt wurde die App auf Basis von Android 4.1.1 [92], [53] und dem von Google als Freeware bereitgestellten Android Emulator. Die Verkehrssimulationssoftware ULTraSim übernimmt hierbei die Simulation des Verkehrsgeschehens sowie die Aufgaben der Verkehrsleitzentrale. Im Unterschied zur Realität, in der die GPS-Position durch die Fahrzeugbewegung generiert wird, wurden für die Erprobung der App die Position- und Geschwindigkeitsangaben des Fahrzeuges mittels ULTraSim generiert und in regelmäßigen Abständen an die App übermittelt. Durch die reale Anbindung der App über eine TCP/IP Verbindung zum zentralen Verkehrsmanagementserver ist es somit möglich, dass über die Start- und Zieleingabe einer Route in der App in ULTraSim ein Fahrzeug generiert wird und alle relevanten Informationen, wie Routenupdates, Verkehrsinformationen usw. in Echtzeit an die App übermittelt werden.

**Abbildung 8.5.1:** *Smartphone-App, (a) Hauptmenü, (b) Adresseingabe (Routeninitialisierung), (c) Routingupdate mit Zusatzinformationen über die alte / neue Route, (d) Echtzeitinformationen über den Verkehrszustand des Streckennetzes (Kartenmaterial Quelle: Google Maps)*

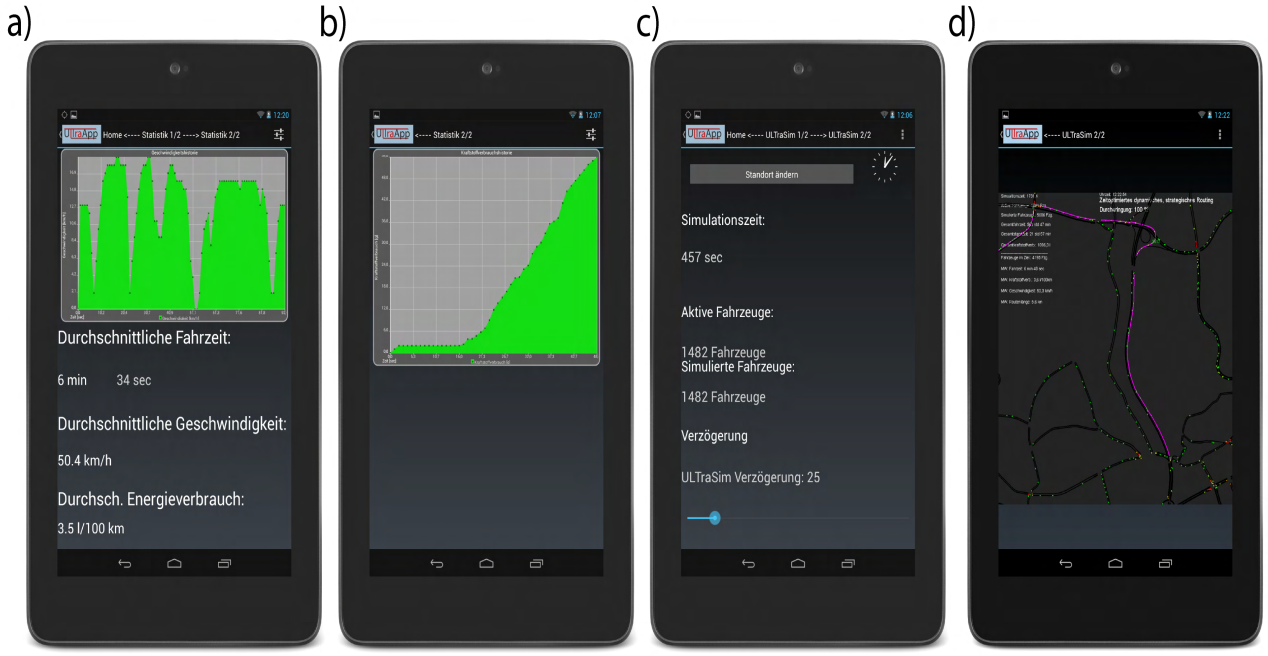



**Abbildung 8.5.2:** *Smartphone-App Zusatzinformationen, (a) Geschwindigkeitsverlauf, (b) Kraftstoffverbrauch, Echtzeitinformationen über ULTraSim (c), (d)*

## 8.6 Kostenübersicht

Für die Kostenübersicht der notwendigen Investitions- bzw. Betriebskosten eines zentralen Verkehrsmanagements lassen sich zwei Kostenmodelle unterscheiden. Ein Modell wäre, das zentrale Verkehrsmanagement über eine V2X Infrastruktur zu betreiben. Da der flächendeckende Ausbau der V2V- und V2I-Kommunikation in Deutschland noch im Anfangsstadium ist, würde dies für ein zentrales Verkehrsmanagement allerdings sehr hohe Investitionskosten bedeuten. Auch könnten momentan nur neuere Fahrzeuge der Oberklasse, welche bereits über die notwendigen technischen Voraussetzungen für eine V2I-Kommunikation verfügen, am zentralen Verkehrsmanagement teilnehmen.

Das zweite Modell wäre, dass die Verkehrsteilnehmer mittels einer Smartphone-App über das Mobilfunknetz mit der Verkehrsleitzentrale kommunizieren. Dies hat zum Vorteil, dass deutlich geringere Investitionskosten notwendig sind und die Kommunikation für alle Verkehrsteilnehmer gewährleistet ist, unabhängig vom technischen Stand der Fahrzeuge. Da bei dieser Variante die Verkehrsteilnehmer, welche am zentralen Verkehrsrouting teilnehmen, gleichzeitig als mobile Verkehrsdatenerfasser fungieren, entfallen hierbei zusätzliche Kosten für die Zustandserfassung des Verkehrsnetzes. Wie Abschnitt 8.1.1 zeigt, hat die geringere flächendeckende Verkehrsdatenerfassung nur geringfügige Einbußen in der Lösungsqualität des zentralen Verkehrsroutings zur Folge. Dies hat wiederum zum Vorteil, dass mit vergleichsweise niedrigen Investitionskosten eine schnelle Markteinführung möglich ist. Auch würden mit zunehmender Benutzerakzeptanz immer mehr Daten über das Verkehrsnetz zur Verfügung stehen, so dass keine infrastrukturelle Verkehrserfassung notwendig wäre. Für die Markteinführung wäre hierzu lediglich ein Serversystem mit Webanbindung notwendig, welches in der Lage sein muss, genügend Ressourcen bereitzustellen, um die entwickelten Algorithmen zu berechnen bzw. eine ausreichend hohe Datenübertragungsrate zur Kommunikation mit den Verkehrsteilnehmern zur Verfügung zu stellen. Um die Datenbasis für den Ist-Zustand des Verkehrsnetzes zu Beginn des Projektes zu verbessern, wären Kooperationen mit den betreffenden Kommunen sinnvoll. Die Kommunen verfügen in aller Regel über die notwendigen Echtzeitverkehrsdaten auf wichtigen Straßen des Stadtgebietes [140]. Auch wären Kooperationen mit Dienstanbietern wie Google Traffic denkbar, welche bereits heute Echtzeitdaten über den Verkehrszustand mithilfe von Smartphonenutzern sammeln [21]. Somit würden als reine Investitionskosten zunächst lediglich Mietkosten für ein Serversystem anfallen. Ausgehend von einem zu routenden Verkehrsaufkommen von 165 000 Fahrzeugen pro Tag in Ulm würde die Miete für ein Serversystem monatlich ca. 400 Euro betragen [43]. Die Bereitstellung der App könnte über verfügbare App-Stores diverser Anbieter geschehen.
Für den Benutzer sind verschiedene Kostenmodelle denkbar. Ein Modell wäre, die zentrale Verkehrsnavigation in Form einer Flatrate anzubieten, welche ein zeitlich unbegrenztes optimiertes Routing ermöglicht. Hierfür müsste ein monatlicher Kostenbeitrag entrichtet werden. Das zweite Modell ist ein Kostenmodell, bei dem der Benutzer je Start-Ziel-Beziehung ein Entgelt bezahlt. Hier wäre eine weitere Differenzierung möglich. Zum einen ein Pauschalbetrag je Start-Ziel-Beziehung oder zum anderen eine prozentuale Abgabe in Höhe der Kraftstoff- bzw. Zeiteinsparung. Dies würde bedeuten, dass der Verkehrsteilnehmer eine prozentuale Abgabe zwischen 5 % und 20 % der erreichten Kosteneinsparung, welche durch den geringeren Kraftstoffverbrauch auftrat, an den Anbieter des zentralen Verkehrsmanagements bezahlt. Würde man das Kostenmodell auf die Fahrzeiteinsparung ausrichten wollen, so wäre es möglich, den materiellen Wert der Fahrzeiteinsparung zu bestimmen und den Betreiber prozentual an der erreichten Einsparung zu beteiligen. Zur Bestimmung des finanziellen Gegenwertes der erreichten Fahrzeiteinsparung wäre es möglich, Minutentarife von Carsharing-Anbietern mit durchschnittlich 29 Cent pro Fahr-

minute heranzuziehen [29]. Eine zu entrichtende Erfolgsbeteiligung zwischen 1 und 3 Cent je erreichter Fahrzeiteinsparung, welche mithilfe des zentralen Verkehrsmanagements erzielt wird, wären hierbei vergleichsweise geringe Kosten.

Im Anhang Tab. 10.12.1 findet sich eine Kostenübersicht über die monatlichen Ausgaben sowie möglichen Einnahmen für ein zentrales Verkehrsnavigationssystem im Stadtgebiet Ulm/Neu-Ulm, unter der Randbedingung, dass 30 % der Verkehrsteilnehmer am zentralen Verkehrsmanagement teilnehmen. Wie die Kostenübersicht zeigt, stehen den monatlichen Belastungen zum Betrieb des zentralen Verkehrsmanagements vergleichsweise hohe Einnahmen gegenüber, so dass sich auch aus wirtschaftlicher Sicht das zentrale Verkehrsmanagement als realisierbar und rentabel beurteilen lässt.

## 8.7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels konnten zunächst Möglichkeiten aufgezeigt werden, um Echtzeitinformationen sowohl mit stationären Messeinrichtungen sowie mit mobilen Anwendungen bereitzustellen. Außerdem konnte anhand einer Analyse der Lösungsqualität des zentralen Verkehrsmanagements als Funktion der Aktualisierungsrate von Echtzeitdaten dargelegt werden, dass auch bei geringen Aktualisierungsraten über 300 Sekunden nur geringe Einbußen in der Lösungsqualität hinsichtlich Fahrzeit- und Energieeinsparung zu verzeichnen sind. Des Weiteren konnte im Rahmen dieses Kapitels durch die Entwicklung eines Kommunikationsprotokolls gezeigt werden, welches Datenvolumen entsteht bzw. welche Datenübertragungsrate benötigt wird, um ein zentrales Verkehrsmanagement zu ermöglichen. Hierbei zeigte sich, dass pro Fahrzeug nur ein sehr geringes Datenvolumen je Route mit entsprechenden Routenupdates und Beacons entsteht. Auch die Auswertungen der Datenübertragungsrate zeigten, dass der UMTS-Standard mit Datenübertragungsraten zwischen 384 kBit/s und 42,2 MBit/s ausreichend ist. Abschließend wurde eine Smartphone-App vorgestellt, welche eine mögliche Benutzerschnittstelle zwischen Endverbraucher und zentralem Verkehrsnavigationssystem darstellt. Über einem Navigationsgerät nachempfundene Menüführung ist es möglich, eine TCP/IP-Verbindung zum Verkehrsmanagementserver aufzubauen. Dadurch können dem Benutzer die aktuell effizienteste Route sowie regelmäßige Routenupdates, mit den in den vorherigen Kapiteln erläuterten Vorteilen, zur Verfügung gestellt werden. Auch hat die Kostenübersicht zur Realisierung des zentralen Verkehrsmanagements gezeigt, dass mit relativ geringem Kostenaufwand ein hoher Ertrag erzielt werden kann.

# 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Dissertation war, die Entwicklung und Erprobung einer Routingstrategie, welche es ermöglicht, alle Fahrzeuge bzw. eine Teilmenge an Fahrzeugen in einem Verkehrsraum zeiteffizienter und energieeffizienter an ihr gewünschtes Ziel zu navigieren. Neben der Entwicklung des Routingkonzeptes stand der Vergleich des neu entwickelten völlig kontrollierten Verkehrsflusses mit dem Ist-Zustand eines unbeeinflussten Verkehrsflusses im Fokus. Es sollte im Rahmen dieser Arbeit die zentrale Fragestellung geklärt werden, wie hoch der prozentuale Anteil an Fahrzeugen sein muss, die in ihrem Routingverhalten gezielt beeinflusst werden müssen, damit eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der Fahrzeit sowie des Energieverbrauchs und des Verkehrsflusses aller Verkehrsteilnehmer erreicht werden kann. Da eine einhundertprozentige Durchdringung in der Realität nicht erreicht werden kann.

Das erste Ziel war, die Entwicklung eines Verkehrssimulators, der es ermöglicht, eine beliebige Anzahl submikroskopischer Fahrzeugmodelle unterschiedlichster Fahrzeugtopologien zu simulieren. Außerdem war die Zielsetzung, durch den Zugriff auf alle Fahrzeugparameter eine genaue Analyse von Routingstrategien in punkto Fahrzeit und Energieverbrauch zu ermöglichen.

Bei der Entwicklung der Verkehrssimulationssoftware stand im Vordergrund ein Simulationstool namens ULTraSim zu entwickeln, welches exakt auf die Bedürfnisse zur Erforschung und Beurteilung neuer Routingkonzepte angepasst ist und um die Interaktion einer Vielzahl von Fahrzeugen untereinander und in Verbindung mit der Verkehrsinfrastruktur zu untersuchen. Hierzu wurde vom Detaillierungsgrad ein mikroskopischer Verkehrssimulator mit submikroskopischen Längsdynamikmodellen gewählt. Um bei den Analysen nicht nur auf ein Verkehrsnetz beschränkt zu sein, konnte durch die Entwicklung eines Netzgenerierungstools erreicht werden, dass jedes Streckennetz in ULTraSim geladen werden kann. Durch eine flexible Programmierung ist es außerdem möglich, unterschiedliche Fahrermodelle sowie Spurwechselmodelle zu integrieren bzw. zu erproben. Neben einer genauen Simulation der Fahrzeuge sowie der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion war die Abbildung der Verkehrsinfrastruktur ein wichtiges Kriterium. Hierzu zählen in erster Linie Lichtsignalanlagen, da diese je nach Regelungsverfahren einen großen Einfluss auf den Verkehrsfluss haben. Weiterhin wurden verschiedene Steuer- und Regelungsverfahren implementiert. Selbst durch den hohen Detaillierungsgrad konnten Analysen zeigen, dass eine Laufzeit von 2,35 mal schneller als Echtzeit bei 5 000 submikroskopisch simulierten Fahrzeugen möglich ist, was u. a. durch ein intelligentes Thread Management, welches ein paralleles Abarbeiten von Aufgaben ermöglicht, erreicht wurde.

Für die Beurteilung des Energieverbrauchs sowie der Fahrzeit wurde die Längsdynamik von Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugtopologien modelliert. Ziel war es, diejenigen Fahrzeugtopologien in die Analysen mit einzubeziehen, welche in naher Zukunft vermehrt im Straßenverkehr vertreten sein werden. Aus diesem Grund wurden detaillierte dynamische Fahrzeugmodelle für konventionelle Fahrzeuge, Parallel-Hybridfahrzeuge sowie Elektrofahrzeuge erstellt und verifiziert. Die Beurteilung ihres Energieverbrauchs wurde anhand von realen Zyklen sowie Normzyklen diskutiert. Für die Simulation der Fahrzeuglängsdynamik sowie der Fahrer-Fahrzeug-Einheit

wurde jedes Fahrzeugmodell um Reglereinheiten und fahrzeugtopologiespezifische Betriebsstrategien ergänzt. Somit steht ein Pool von Fahrzeugen unterschiedlicher Leistungsklassen sowie unterschiedlicher Fahrzeugtopologien zur Verfügung.

Anhand von Energieverbrauchsanalysen von Fahrzeugen konnte gezeigt werden, wie hoch die Verbrauchssteigerungen aufgrund von hohen Verkehrsdichten ausfallen. Hierzu wurden die Fahrzeugmodelle um eine Bordnetzsimulation erweitert, welche es zudem ermöglicht, die elektrischen Verbraucher eines Fahrzeuges in die Energiebilanz mit einzubeziehen. Anhand von Vergleichen von Fahrten bei einem geringen und hohen Verkehrsaufkommen sowie bei einer Winter- und Sommerbordnetzlast ergaben sich bei konventionellen Fahrzeugen eine Steigerung des Energieverbrauchs allein aufgrund von hohen Verkehrsaufkommen von 18,5 % im Sommer und 19,5 % im Winter. Bei Elektrofahrzeugen fiel dies mit einer Steigerung von 3,9 % im Sommer und 55,0 % im Winter noch deutlich höher aus. Auch konnte mithilfe des fahrzeugtopologiespezifischen Energieverbrauchs anhand von Verkehrsdichte-Kennlinien analysiert werden, wie sich der Energieverbrauch in Abhängigkeit der Verkehrsdichte entwickelt. Aufgrund dieser Analysen konnte erläutert werden, welche hohe Priorität eine ungehinderte Fahrt hat, um die Fahrzeit, aber vor allem auch den Energieverbrauch von Fahrzeugen, zu senken.

Kern der Dissertation war die Entwicklung und Analyse eines neuen Verkehrsroutingkonzeptes, welches eine globale Optimierung des Verkehrs in einem definierten Verkehrsraum ermöglicht. Ziel des völlig kontrollierten Verkehrsflusses ist es, dem Idealzustand eines Systemoptimums durch eine gezielte Lenkung von Verkehrsteilnehmern möglichst nahe zu kommen. Aufbauend auf die Graphentheorie sowie der kantenorientierten Routensuche in einem Graphen wurde ein zentrales Verkehrsmanagementsystem entwickelt, das aus vier zentralen Punkten besteht.
Erster Punkt für das Generieren von zeit- und energieeffizienter Routen ist, dass sämtliche Routen auf Basis von Echtzeitinformationen des Streckennetzes berechnet werden. Dies ermöglicht nur, dass auf Verkehrsstaus reagiert werden kann. Den Ursachen für ihre Entstehung kann durch das Routen mit Echtzeitinformationen nur bedingt entgegengewirkt werden.
Aus diesem Grund ist der zweite wichtige Punkt, um den gesamten Verkehrsraum zu optimieren, die Abhängigkeit aller geplanten und aktuell befahrenen Routen untereinander. Hierzu wurde eine Streckenpotenzialfunktion eingeführt. Bei dieser handelt es sich um ein zeitabhängiges Kostenmaß, wie hoch die Verkehrsbelastung einzelner Strecken aktuell und in der Zukunft sein wird. Die Minimierung des Kostenmaßes bei der Routensuche ermöglicht es, dass Routen mit einer geringen zukünftigen Verkehrsbelastung bevorzugt befahren werden, als Routen mit hoher zukünftiger Verkehrsbelastung. Dadurch kann erreicht werden, dass zukünftig zu hohe Verkehrsbelastungen schon zu einem Zeitpunkt detektiert werden, bevor sie auftreten. Somit kann frühzeitig durch das Verlagern von Fahrzeugrouten reagiert werden, bevor sich eine Strecke mit einer zu hohen Verkehrsbelastung bildet bzw. ein Stau entsteht.
Als Drittes muss außerdem vermieden werden, dass es an Kreuzungen bedingt durch Lichtsignalanlagen und sich überschneidenden Routen zu einem zu hohen Verkehrsaufkommen kommt, weshalb eine Zeitfensterprädiktion mit eventueller Knotensperrung implementiert wurde. Durch die Prädiktion der Ankunftszeit von Fahrzeugen an Verkehrskreuzungen, kann somit die Verkehrsbelastung einzelner Kreuzungen in der Zukunft vorhergesagt werden. Dadurch kann eine Kreuzung bei der Gefahr eines zu hohen Verkehrsflusses kurzzeitig für die Planung neuer Routen gesperrt werden.
Als vierter Punkt wurde eine Streckenreservierung zur Verkehrsdichteprädiktion eingeführt. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, die zukünftige Verkehrsdichte auf einzelnen Strecken vorherzusagen. Dadurch kann die Qualität der gefundenen Route deutlich gesteigert werden. Dies ist der Fall,

da die Fahrzeit bzw. der Energieverbrauch einzelner Routensegmente sehr stark von der aktuellen Situation und Verkehrsbelastung abhängt. Da Fahrzeugrouten im Stadtgebiet aber meist für 20-30 Minuten in die Zukunft geplant werden, müssen diese Kosten auf welchen die optimalen Routen geplant werden, ebenfalls an diesen Zeitraum angepasst werden. Mithilfe des zentralen Navigationssystems, das alle aktuell befahrenen sowie geplanten Routen verwaltet, ist es somit möglich, eine genaue Aussage über die zukünftige Verkehrsentwicklung zu machen.
Durch die Kombination der vier genannten Punkte ist es somit möglich, je nach Optimierungsziel den gesamten Verkehrsraum zeit- oder energieeffizient zu routen, so dass die Fahrzeit, die Standzeit und der Energieverbrauch aller Verkehrsteilnehmer möglichst gering ist.
Um einen Vergleichsergebnisraum zu schaffen, wurde die Ist-Situation durch den unkontrollierten Verkehrsfluss modelliert. Hierbei wurde aufgrund von Entscheidungsmodellen eine stochastische Routenauswahl unter Berücksichtigung des persönlichen Nutzens durchgeführt.

Die Analyse der energieeffizienten Routenwahl ergab, dass deutliche Unterschiede bei der Route je nach betrachteter Fahrzeugtopologie zu verzeichnen sind. So wurden eine Vielzahl von Start-Ziel-Beziehungen analysiert und die Route hinsichtlich der Fahrzeugtopologie untersucht. Durchschnittlich ergab sich eine Einsparung bei der energieeffizienten Route gegenüber der zeiteffizientesten Route bei konventionellen Fahrzeugen von 5,7 %, bei Elektrofahrzeugen von 14,7 % sowie bei Hybridfahrzeugen von 4,8 %. Hierbei konnte festgestellt werden, dass das Einsparpotenzial stark von der Qualität der Alternativrouten sowie dem Höhenprofil abhängig ist. Dabei bevorzugen Elektrofahrzeuge Routen, die es ermöglichen, mittels kurzen Zwischensteigungen die Rekuperationsphasen zu verlängern.
Anhand von komplexen und realistischen Verkehrsumlegungsproblemen wurde zunächst eine genaue Analyse des Verkehrsroutingkonzeptes hinsichtlich zeiteffizientem und energieeffizientem Routing durchgeführt. Es wurde verglichen, wenn alle Fahrzeuge ihre persönliche energie- oder zeiteffiziente Route befahren und wenn alle Fahrzeuge mittels des zentralen Navigationssystems navigiert werden.
Im Vergleich einer zeiteffizienten Optimierung des Verkehrsraumes dazu, wenn alle Fahrzeuge ihre zeiteffiziente Route befahren ohne die Betrachtung der Routen von anderen Verkehrsteilnehmern, ergab sich eine durchschnittliche Fahrzeiteinsparung von 22,2 %. In der Spitze ergaben sich Fahrzeiteinsparungen von bis zu 42,6 % bei den hier analysierten Szenarien. Auch bei der Standzeit der Fahrzeuge konnte ein deutlicher Rückgang von durchschnittlich 239,1 Sekunden auf 79,1 Sekunden erreicht werden.
Der Vergleich des Energieverbrauchs ergab beim völlig kontrollierten Verkehrsfluss bei einer energieeffizienten Optimierung eine Einsparungen von 2,1 % mit und 9,6 % ohne Start-Stopp-Automatik bei konventionellen Fahrzeugen. Für Hybridfahrzeuge ergab sich eine Einsparung von 12,5 % sowie -0,3 % für Elektrofahrzeuge. Bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Fahrzeit um durchschnittlich 23,5 %. Des Weiteren konnte mittels einer genauen Analyse der Streckenpotenzialfunktion verdeutlicht werden, wie die Fahrzeuge auf Alternativrouten verteilt werden bevor eine zu hohe Verkehrsbelastung auftritt und sich Verkehrsstaus bilden.

Schließlich erfolgte der Vergleich des völlig kontrollierten Verkehrsflusses mit dem unbeeinflussten Verkehrsfluss. Dabei ergab sich beim zeitoptimierten völlig kontrollierten Verkehrsfluss eine durchschnittliche Fahrzeiteinsparung von 24,8 % und eine durchschnittliche Energieeinsparung von 2,9 % mit und 8,9 % ohne Start-Stopp-Automatik auf 100 Kilometer bei konventionellen Fahrzeugen, wenn 100 % der Fahrzeuge gezielt bei ihrer Routenwahl beeinflusst werden. Dies entspricht einer durchschnittlichen Kraftstoffeinsparung zwischen 0,2 und 0,7 Liter pro 100 Kilometer. Wobei in der Spitze Einsparungen von bis zu 1,7 Liter pro 100 Kilometer zu verzeichnen

waren. Des Weiteren ergaben die Analysen, dass je nach Komplexität und Verkehrsaufkommen des betrachteten Szenarios Fahrzeiteinsparungen von bis zu 55,3 % erreicht werden können.
Wird der völlig kontrollierte Verkehrsfluss gezielt energieeffizient geroutet, ergibt sich eine durchschnittliche Energieeinsparung von 11,9 % mit und 15,3 % ohne Start-Stopp-Automatik bei konventionellen Fahrzeugen und 9,3 % bei Elektrofahrzeugen. Dies entspricht einer Reduzierung des Energieverbrauchs von 0,3-0,6 l/100 km bzw. bei Elektrofahrzeugen von 2,0 kWh/100 km. Für Hybridfahrzeuge ergab sich eine Energieeinsparung von 20,1 %. Auch konnte gezeigt werden, dass bei einer steigenden Anzahl von Fahrzeugen, die Fahrzeit, die Standzeit und der Energieverbrauch beim unbeeinflussten Verkehrsfluss stetig ansteigt, so dass bereits bei 3 500 Fahrzeugen eine Steigerung der Fahrzeit bezogen auf 500 Fahrzeuge von 65 % vorliegt. Durch das zentrale Verkehrsmanagement fällt diese Steigerung mit 13,4 % deutlich geringer aus.

Schließlich wurde die notwendige Durchdringung, das heißt, wie viele Fahrzeuge gezielt in ihrem Navigationsverhalten beeinflusst werden sollten, um vergleichbare Ergebnisse mit dem völlig kontrollierten Verkehrsfluss zu erreichen, untersucht. Hier ergab sich beim zeiteffizienten Routing, dass bereits bei einer Durchdringung von 8 %, 10 % der maximal möglichen Fahrzeiteinsparung erreicht wird. Der größte Verbesserungszuwachs allerdings lässt sich bei 10 % bis 40 % Durchdringung erreichen. Um eine 50 % ige Einsparung der maximal möglichen Fahrzeiteinsparung zu erreichen, ist es notwendig, dass zwischen 15 % und 35 % der Fahrzeuge gezielt in ihrem Navigationsverhalten beeinflussbar sind. Die Untersuchungen der Durchdringung bei energieeffizientem Routing ergaben, dass je höher der Prozentsatz gezielt beeinflussbarer Fahrzeuge ist, desto höher fällt die Energieeinsparung aus. Es zeigte sich, dass sich ein näherungsweiser linearer Zusammenhang zwischen Energieeinsparung und Durchdringung ergab.
Abschließend wurde untersucht, welche Synergieeffekte sich beim energieeffizienten Routing bedingt durch stochastische Fahrzeugpopulationen ergeben. Hierbei konnte festgestellt werden, dass dadurch, da je nach Fahrzeugtopologie unterschiedliche energieeffiziente Routen gegeben sind, eine zusätzliche Energieeinsparung von 3,7 % erreicht werden kann.

Da die analytische Lösung des Single-Shortest-Path-Problems in großen Graphen sehr zeitintensiv ist, wurde untersucht, ob Ameisenalgorithmen, welche zu den Vertretern der generischen Algorithmen gehören, hierfür geeignet sind und welche Rechenzeiteinsparungen möglich sind. Durch die Einführung einer fahrtrichtungsabhängigen Heuristik sowie einem variablen Botenstoffupdate konnte eine deutliche Beschleunigung bei der Routensuche erreicht werden. So ergaben Analysen, dass die Berechnungszeit einer Route von durchschnittlich 10-15 ms beim Dijkstra-Algorithmus auf 3,6-5,8 ms gesenkt werden konnte. Außerdem konnte festgestellt werden, dass Ameisenalgorithmen sehr gut auf die Suche der kürzesten Route anwendbar sind. Für das Auffinden der zeit- bzw. energieeffizienten Route, hängt die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Ameisenstraße auf der optimalen Route ausbildet, stark von der Anzahl und der Qualität der Alternativrouten ab.

Durch die Entwicklung eines Kommunikationsprotokolls sowie eines Modells zur Beurteilung des Datenvolumens und der notwendigen Datenübertragungsrate konnte der Datenverkehr zwischen den einzelnen Fahrzeugen sowie dem Zentralnavigationsgerät abgebildet werden. Analysen ergaben, dass sowohl das Datenvolumen als auch die Datenübertragungsrate für die Realisierung des zentralen Verkehrsmanagements für die heutigen Mobilfunknetze kein Problem in punkto Leistungsfähigkeit darstellen. Abschließend wurde durch die Entwicklung einer mobilen Smartphone Applikation (App) eine mögliche Benutzerschnittstelle für den Endverbraucher vorgestellt.

Im Rahmen dieser Dissertation konnte gezeigt werden, dass ein zentrales Verkehrsmanagementsystem erheblich zur Reduzierung der Fahrzeit, des Energieverbrauchs und zur Verbesserung des Verkehrsflusses beiträgt. Auch haben die Analysen der notwendigen Anzahl von Fahrzeugen, welche gezielt in ihrer Routenwahl beeinflusst werden, ergeben, dass bereits mit Durchdringungen von 8 % bis 30 % erhebliche Verbesserungen erzielt werden können. Im Jahr 2010 lag laut dem Statistischen Landesamt Baden-Württemberg die Gesamtfahrleistung im Stadtkreis Ulm bei insgesamt 904,1 Millionen Kilometer. Geht man von vorsichtigen Schätzungen aus, dass 30 % der Verkehrsteilnehmer ihre Routenwahl durch ein zentrales Verkehrsmanagement beeinflussen lassen sowie einer durchschnittlichen Kraftstoffeinsparung von 0,6 Liter pro 100 Kilometer, so bedeutet dies, eine Einsparung von 1,6 Millionen Liter Dieselkraftstoff pro Jahr. Des Weiteren führt diese Einsparung an Kraftstoff zu 4 280 Tonnen weniger Kohlendioxidausstoß pro Jahr. Die Größenordnung dieser Zahlen zeigt auf, welches Potenzial ein zentrales Verkehrsnavigationskonzept zur energie- und zeitoptimalen Verkehrsflusslenkung sowohl für die Umwelt als auch für jeden einzelnen Verkehrsteilnehmer bietet.

Der nächste Entwicklungsschritt wäre, die gewonnenen Erkenntnisse aus den Simulationen durch die Umsetzung des Routingkonzeptes in einem Pilotprojekt unter realen Bedingungen zu verifizieren. Im Rahmen der Arbeit konnte bereits durch die Entwicklung einer Benutzerschnittstelle gezeigt werden, wie die Kommunikation zwischen dem zentralen Verkehrsmanagement und den Endverbrauchern realisiert werden könnte. Hierzu wäre zunächst die Implementierung eines Serversystems notwendig, welches die Routinganfragen der Verkehrsteilnehmer unter der Einhaltung aktueller Datenschutzrichtlinien verwaltet. Des Weiteren könnten in der Zukunft zusätzliche Erweiterungen entwickelt werden, welche es ermöglichen, den Schwerlastverkehr sowie Sonderfahrzeuge bei der optimierten Routenplanung zu berücksichtigen. Auch sind Erweiterungen denkbar, bei denen ausgehend vom zentralen Verkehrsmanagement aktiv auf die Schaltperioden von Lichtsignalanlagen Einfluss genommen wird, so dass eine weitere Optimierung des Verkehrsflusses ermöglicht werden kann. Außerdem kann eine Aufgabe in der Zukunft sein, detaillierte Studien hinsichtlich der Nutzerakzeptanz eines zentralen Verkehrsmanagements durchzuführen. Auch die Verkehrssimulationssoftware ULTraSim bietet durch ihren modularen Aufbau viel Entwicklungspotenzial. So ist es z. B. möglich, die Fahrzeuge um eine Querdynamik zu ergänzen und die Simulationssoftware um einen virtuellen Fahrsimulator zu erweitern, so dass neben Routingkonzepten auch Fahrerassistenzsysteme im Verkehrsfluss erprobt und erforscht werden können. Zudem bietet ULTraSim durch seine submikroskopischen Fahrzeugmodelle viel Potenzial dahin gehend, dass die Interaktion der Betriebsstrategie unterschiedlicher Fahrzeuge im Flottenverband sowie im Verkehrsfluss analysiert und weiter optimiert werden kann.

# Literaturverzeichnis


[1] AIMSUN: *TSS - Transport Simulation Systems*. – URL http://www.aimsun.com/wp/. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[2] AKTIV (ADAPTIVE UND KOOPERATIVE TECHNOLOGIEN FÜR DEN INTELLIGENTEN VERKEHR: *Ergebnisbericht*. 2010. – URL http://www.aktiv-online.org/deutsch/Downloads/Broschueren/Ergebnisbuch_aktiv_gesamt.pdf. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[3] ALLGEMEINE DEUTSCHE AUTOMOBIL-CLUB E. V. (ADAC): *Staubilanz 2011 auf Autobahnen*. Februar 2012. – URL http://www.adac.de/_mmm/pdf/statistik_staubilanz_2011_0212_68897.pdf

[4] ALLGEMEINE DEUTSCHE AUTOMOBIL-CLUB E. V. (ADAC): ADAC Motorwelt, Heft 3. Adac Mitgliederzeitschrift Heft 3, März 2012

[5] AMBER WIRELESS: *Amber Wireless Handbuch AMB8355, Version 2.1*. – URL http://amber-wireless.de/files/amb8355_hb.pdf. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[6] AMMOSER, Hendrik ; HOPPE:, Mirko: *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften*. Erschienen in der Reihe Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Dresden 2006. – ISBN 1433-626x

[7] AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *Richtlinien des Radtes zur Angleichung der Rechtsvorschrfiten der Mitgliedsstaten über Maßnahme gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung*. März 1970. – URL http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1970:076:0001:0022:DE:PDF. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[8] AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE)*. 2010. – URL http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/44904/publicationFile/59055/r-101-messung-co2-und-kraftstoffverbrauch-pdf.pdf. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[9] ANDRÉ, Michel: *Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions*. Juni 2004. – URL http://www.inrets.fr/ur/lte/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/road3/method31/Artemis_cycles_report_LTE0411.pdf. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[10] ANGURTEN.DE, Autoportal: *Audi A3 1.6 TDI (66 kW) - Technische Daten & Abmessungen*. kA,. – URL http://www.angurten.de/index.php?m2_id=1162&_B=infosystem&modus=motoren&modell_id=1&modell=A3&motor_id=1161. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[11] ANGURTEN.DE, Autoportal: *Renault Twingo*. kA,. – URL http://www.angurten.de/is/abmessungen/1013-Twingo. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[12] ARON, S. ; GOSSAND, S. ; DENEUBOURG, J. L. ; PASTEELS, J.M.: Self-organized shortcuts in the Argentine ant. Naturwissenschaften 76, Nr. 12, S. 579– 581, 1989

[13] AUDI: *Technische Daten Audi A8 3.0 TDI quattro*. März 2004. – URL http://www.audi.de/etc/medialib/ngw/product/used_cars/a8/pdf/a8d2.Par.0053.File.pdf/2004_03_a8_d3_30tdiquattro.pdf. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[14] BACK, Michael: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2005

[15] BALL, Philip: *critical mass, how one thing leads to another*. arrow books, 2004

[16] BANDO, M. ; HASEBE, H. ; NAKAYAMA, A. ; SHIBATA, A. ; SUGIYAMA, Y.: *Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation*. 1995

[17] BANDO, M. ; HASEBE, K. ; NAKANISHI, K. ; NAKAYAMA, A.: *Analysis of optimal velocity model with explicit delay*. 1998

[18] BARTH, Matthew ; BORIBOONSOMSIN, Kanok ; VU, Alex: Environmentally-Friendly Navigation. Intelligent Transportation Systems Conference, September 2007

[19] BELLMAN, R. E.: On a routing problem. Quarterly of Applied mathematic, Brown Unversity, 16(1)/1958

[20] BELLMAN, R. E.: Dynamic Programming. Princeton Unversity Press, 1957

[21] BEN-HAIM, Noam: *Live traffic information for 13 European countries*. Juli 2011. – URL http://googlemobile.blogspot.de/2011/07/live-traffic-information-for-13.html. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[22] BITKOM – BUNDESVERBAND INFORMATIONSWIRTSCHAFT, TELEKOMMUNIKATION UND NEUE MEDIEN E.V.: *Bestand Pkw am 1. Januar 2012/2011 nach Herstellern und Typen*. 2011. – URL http://de.statista.com/statistik/daten/studie/3902/umfrage/entwicklung-der-verkaufszahlen-von-navigationsgeraeten-seit-2005/. – Zugriffsdatum: 09.02.13

[23] BITKOM – BUNDESVERBAND INFORMATIONSWIRTSCHAFT, TELEKOMMUNIKATION UND NEUE MEDIEN E.V.: *ITK im Auto - Elektromobilität, Internet und Multimedia*. September 2011

[24] BODEN, M. ; TREIBER, M.: Nutzergleichgewicht oder Systemoptimum- Die systemoptimale Verkehrsumlegung in makroskopischen Verkehrsnetzen. Vortrag zu den 22. Verkehrswissenschaftlichen Tagen, Technische Universität Dresden, 2009

[25] BRAESS, Hans-Hermann ; SEIFFERT, Ulrich: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg-Verlag, 2005

[26] BRENDLE, Bernhard: *Vermessung, Klassifizierung und Model elektrischer Kfz-Bordnetzlasten in unterschiedlichen Lastszenarien*. Univeristät Ulm, Studienarbeit: , 2008

[27] BULLNHEIMER, Bernd ; HARTL, Richard F. ; STRAUSS, Christine: Applying the Ant System to the Vehicle Routing Problem. 2ND International Conference on Metaheuristics, 1997

[28] BUSACKER, Torsten: *Steigerung der Flughafen-Kapazität durch Modellierung und Optimierung von Flughafen-Boden-Rollverkehr - Ein Beitrag zu einem künftigen Rollführungssystem (A-SMGCS)*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2004

[29] CAR2GO DEUTSCHLAND GMBH: *Rundum preiswerte Mobilität*. 2013. – URL `https://www.car2go.com/de/berlin/#pid=46020`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[30] CASCETTA, E. ; NUZZOLA, A. ; RUSSO, F. ; VITETTA, A.: A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: Specification and some calibration results for interurban networks. J.B.Lesort (Hrsg.) Proceedings of the International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 697-711, Lyon, 1996

[31] CHANDLER, Robert E. ; HERMAN, Robert ; MONTROLL, Elliott W.: *Traffic dynamics: studies in car following*. 1958

[32] CITROEN: *Herstellerangaben Citroen*. 2012. – URL `http://www.citroen.de/citroen-c-zero/#/citroen-c-zero/leistung/`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[33] COLORNI, A. ; DORIGO, M ; MANIEZZO, V: Distributed optimization by ant colonies. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, 1992

[34] COMMERCE URBAN PLANNING DIVISION, U. S. D. of: Bureau of Public Roads. Traffic Assignment Manual. Washington D.C., 1964

[35] CORSIM: *Microscopic Traffic Simulation Model*. – URL `http://www-mctrans.ce.ufl.edu/featured/TSIS/Version5/corsim.htm`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[36] CVIS (COOPERATIVE VEHICLE-INFRASTRUCTURE SYSTEMS): *Kooperative Mobilität in der Stadt*. 2010. – URL `http://www.cvisproject.org/`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[37] DAIMLER AG: *Herstellerangaben Daimler, Informationsbroschüre*. 2012

[38] DAMRATH, Pahl: *Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik*. Springer Verlag, 2000

[39] DHAOU, I. B.: Fuel Estimation Model for ECO-Driving and ECO-Routing. IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV), Germany 2011

[40] DIJKSTRA, E.W.: A Note on Two Problem on Connexion with Graphs. Numerische Mathematik 1, S. 269-271, Springer Berlin, 1959

[41] DORIGO, Marco ; GAMBARDELLA, Luca M.: Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 1, NO. 1, 1997

[42] ERLEMANN, Kai: *Objektorientierte mikroskopische Verkehrsflusssimulation*, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2007

[43] EUROPE, Host: *Root Server – die neue Performance Dimension*. 2013. – URL `https://www.hosteurope.de/Server/Root-Server/`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[44] FEHRENBACHER, Daniel: *Implementierung eines Ameisenalgorithmus zum Fahrzeugrouting in Verkehrsnetzen*. Univeristät Ulm, Studienarbeit: , 2012

[45] FISCHER, R. ; BUTZ, T. ; EHMANN, M. ; IRMSCHER, M.: Fahrermodellierung für Fahrdynamik und Verbrauchsberechnungen. TESIS DYNAware GmbH, München, k.A.

[46] FOLLMANN, Jürgen ; BOSSERHOFF, Dietmar: *Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen*. Kap. 4.5. In: *Handbuch für Verkehrssicherheit und Verkehrstechnik der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung*, Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen

[47] FORD, L. R.: Network flow theory. Paper P-923, Rand Corp., Santa Monica, Cal., 1956

[48] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT KRAFTFAHRWESEN AACHEN: *PELOPS White Paper*. o. J.

[49] FRÖBERG, Andreas: Inverse Dynamic Simulation of Non-Quadratic MIMO Powertrain Models -Application to Hybrid Vehicles. IEEE Vehicle Power and Propulsion Converence, 2006

[50] GEISBERGER, Robert ; SANDERS, Peter ; SCHULTES, Dominik ; DELLING, Daniel: Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008

[51] GEISBERGER, Robert ; VETTER, Christian: Effcient Routing in Road Networks with Turn Costs. Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA'11), 2011

[52] GIPPS, P.: *Behavioral Car-Following Model for Computer Simulation*. 1981

[53] GOOGLE INC.: *Android Developer Website*. – URL `http://developer.android.com/about/versions/jelly-bean.html`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[54] GRADINESCU, Victor ; GORGORIN, Cristian ; DIACONESCU, Raluca ; CRISTEA, Valentin ; IFTODE, Liviu: Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication. Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th, 2007

[55] GRAMS, Harald: *Modellierung und Simulation von Testautomaten für Integrierte Schaltungen*, Universität Erlange-Nürnberg, Dissertation, 2004

[56] GUSIKHIN, O. ; MACNEILLE, P. ; COHN, A.: Vehicle Routing to Minimize Mixed-Fleet Fuel Consumption and Environmental Impact. Proceedings of 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Juni 2010

[57] HAMBERGER, Werner: *Verfahren zur Ermittlung und Anwendung von prädiktiven Streckendaten für Assistenzsysteme in der Fahrzeugführung*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1999

[58] HANS-THOMAS FRITZSCHE ; ENGINEERING, Traffic (Hrsg.) ; CONTROL (Hrsg.): *A Model for Traffic Simulation*. May 1994

[59] HANSMANN, Karl-Werner: *Ameisenalgorithmus*. 2004. – URL `http://www.ameisenalgorithmus.de/`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[60] HEISE ONLINE: *EU vergibt Frequenzen für Car-to-Car-Communication*. 2008. – URL `http://www.heise.de/newsticker/meldung/EU-vergibt-Frequenzen-fuer-Car-to-Car-Communication-193382.html`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[61] HELBING, Dirk: *Verkehrsdynamik, Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Springer-Verlag, 1997

[62] HÖFLER, Frank: *Verkehrswesen-Praxis, Band 2: Verkehrstechnik*. Bauwerk Verlag, Berlin 2006. – ISBN 3-934369-53-7

[63] HILLENBRAND, Martin ; MÜLLER-GLASER, K.D.: An approach to supply simulations of the functional environment of ECUs for hardware-in-the-loop test systems based on. IEEE International Symposium on Rapid System Prototyping, 2009

[64] HILLIGES, Martin: *Ein phänomenologisches Modell des dynamischen Verkehrsflusses in Schnellstraßennetzen*. Shaker Verlag, 1995

[65] HONDA: *Honda the Power of Dreams, Insight*. 2012. – URL `http://www.honda.de/globalimages/pdf/de/car/de_car_br_Insight_2012.pdf`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[66] HOPPE, Johannes: *Untersuchung des Datenaufkommens V2V, V2I bei unterschiedlichen Verkehrsroutingstrategien*, Univeristät Ulm, Diplomarbeit, 2012

[67] (HRSG.), Eckehard S.: *Verkehrsleittechnik, Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs*. Springer-Verlag, 2007

[68] INFOWARE GMBH: *Zukunft der Navigation*. Mai 2008. – URL `http://www.landscape.de/infoware-Presseservice/download/texte/BG_3_08_Seite_13.pdf`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[69] JIANG, Daniel ; DELGROSSI, Luca: IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE, 2008

[70] JOHNSON, Donald B.: Efficient Algorithms for Shortest Paths in Sparse Networks. J. Assoc. Comput. Mach. 24 (1977), 1-13., 1977

[71] KEARNEY, A.T.: Autoabsatz nach Antriebsarten in Europa. Handelsblatt Nr.204, Seite 42, 22.10.2012

[72] KEMPER, Carsten: *Dynamische Simulation des Verkehrsablaufs unter Verwendung statischer Verflechtungsmatrizen*, Universität Hannover, Dissertation, 2006

[73] KÜHNE, Reinhart: *FGSV Merkblatt (Entwurf) Das Fundamentaldiagramm- Grundlagen und Anwendungen*. Oktober 2004

[74] KIENCKE, Uwe ; NIELSEN, Lars: *Automotive Control Systems: For Engine, Driveline, and Vehicle*. Springer-Verlag, 2005

[75] KIM, Seongmoon ; LEWIS, Mark E. ; CHELSEA C. WHITE, III: Optimal Vehicle Routing With Real-Time Traffic Information. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6 No. 2, 2005

[76] KLOETZL, Johannes ; GERLING, Dieter: An Interleaved Buck-Boost-Converter Combined with a Supercapacitor-Storage for the Stabilization of Automotive Power Nets. IEEE VPPC 2011, Chicago, September 2011

[77] KOHLER, Tom P. ; KIENER, Georg A. ; FROESCHL, Joachim ; THANHEISER, Andreas ; BEUCHERL, Dominik ; HERZOG, Hans-Georg: Voltage Stabilization in Vehicle Power Nets by Power Distribution Management. Electric Vehicle Symposium (EVS) 26, Los Angeles, 2012

[78] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2012 nach Bundesländern und ausgewählten Kraftstoffarten absolut*. Januar 2012. – URL http://www.kba.de/cln_030/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2012__b__emi__eckdaten__absolut.html. – Zugriffsdatum: 09.02.13

[79] KRAMER, Ulrich: *Kraftfahrzeugführung, Modelle-Simualiton-Regelung*. Hanser Verlag, 2008

[80] KRÜGER, Guido ; STARK, Thomas: *Handbuch der Java Programmierung*. 6. Addison-Wesley, 2009

[81] KRUMKE, Sven O. ; NOLTEMEIER, Hartmut: *Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen*. Vieweg Teubner, 2009

[82] LANGE, Stephan ; SCHIMASNKI, Michaell: *Energiemanagement in Fahrzeuge mit alternativen Antriebe*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2007

[83] LECHNER, G. ; NAUNHEIMER, H.: *Fahrzeuggetriebe, Grundlage, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Springer-Verlag, 1994

[84] LEUTZBACH, W. ; BUSCH, F.: Spurwechselvorgänge auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1984

[85] LIGHTHILL, M.J. ; WHITHAM, G.B.: On Kinematic Waves. I: Flood Movement in Long Rivers. Proceedings of the Royal Society of London, 229, 1955

[86] LINDENMAIER, Jochen: *Untersuchung eines von Doppelschichtkondensatoren unterstuetzten Zweispannungsbordnetzes für Mikro-Hybrid-Fahrzeuge*, Universität Ulm, Dissertation, 2010

[87] LÄMMER, Stefan: *Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007

[88] MATSCHKE, Irina: *Einfluss dynamischer Navigation auf das Verkehrsgeschehen in städtischen Straßennetzen*, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2007

[89] MAYINGER, Prof. Dr. F.: *Mobility and traffic in the 21st century*. Springer, Berlin, 2001

[90] MAYR, R.: *Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung, Längs- und Querreglung; Spurwechsel- und Überholmanöver*. Springer Verlag, 2001

[91] MÖDINGER, Johannes: *Aufbau und Inbetriebnahme eines Verkehrsmesssystems mit Mikrocontroller*, Univeristät Ulm, Diplomarbeit, 2012

[92] MEIER, Retro: *Professional Android 4 Application Development*. John Wiley & Sons, Inc., 2012

[93] MINETT, C.F. ; SALOMONS, A.M. ; DAAMEN, W. ; AREM, B. ; KUIJPERS, S.: Eco-routing: comparing the fuel consumption of different routes between an origin and destination using field test speed profiles and synthetic speed profiles. IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, Vienna 2011

[94] MINISTERIUM FÜR BAUEN, WOHNEN, STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: *Verkehrslage in NRW Hochrechnung für Bundesautobahnen*. – URL http://www.autobahn.nrw.de/. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[95] MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, Berlin, 2004. – ISBN 3540420118

[96] NUHN, Helmut ; HESSE, Markus: *Verkehrsgeographie*. Schöningh-Paderborn, 2001

[97] NUTZERGERECHTE TECHNIK), INVENT (Intelligenter V. und: *Verkehrsleistungsassistenz VLA, Schlussbericht*. Februar 2006. – URL `http://www.invent-online.de/de/projekte.html`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[98] PARAMICS, Quadstone: *Applications Overview*. – URL `http://www.paramics-online.com/paramics-application-areas.php`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[99] PFEFFER, Peter ; HARRER, Manfred: *Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. Vieweg+Teubner-Verlag, 2011

[100] PIPES, L.A.: *An operation analysis of trac dynamics*. 1953

[101] POLENOV, Dieter ; PRÖBSTLE, Hartmut ; BRÖSSE, Andreas ; DOMORAZEK, Gottfried ; LUTZ, Josef: Integration of Supercapacitors as Transient Energy Buffer in Automotive Power Nets. Power Electronics and Applications, 2007

[102] PTV PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG: *Applications Overview*. – URL `http://www.ptv-vision.com/de/`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[103] QUADSTONE PARAMICS, Gordon D.: *Paramics Technical Report Car-Following, Lane-Changing and Junction Modelling*

[104] RAKHA, H. ; KAMALANATHSHARMA, R. K.: Eco-driving at signalized intersections using V2I communication. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Oktober 2011

[105] REIF, Konrad: *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik, Bordnetze, Sensoren und elektronsiche Systeme, 6. Auflage*. Vieweg+Teubner-Verlag, 2011

[106] REUSCHEL, A.: *Fahrzeugbewegung in der Kolonne bei gleichförmig beschleunigtem oder verzögertem Leitfahrzeug*. 1950

[107] RICHTER, Michael: *Entwurf eines energieoptimierten Fahrermodells für ein dynamisches Fahrzeugmodell - mit Modellierung eines Verkehrsflusssimulators*, Univeristät Ulm, Diplomarbeit, 2010

[108] RICHTER, Michael ; STIEGELER, Markus ; KABZA, Herbert: Power-Split Operation Strategy for Series Hybrid Electric Buses Based on a Cost Function. Electric Vehicle Symposium (EVS) 26, Los Angeles, 2012

[109] RICHTER, Michael ; THIERAUF, Daniel ; KABZA, Herbert: ULTraSim, a Traffic Simulator Incorporating Submicroscopic BEV, HEV, ICEV Models. Electric Vehicle Symposium (EVS) 26, Los Angeles, 2012

[110] RICHTER, Michael ; WALTER, Stefan ; STIEGELER, Markus ; MENDES, Marijo ; KABZA, Herbert: Route-Dependent Power-Adapted Operation Strategies in Range Extender Hybrid Vehicles. EPE 2011, Birmingham, August 2011

[111] RICHTER, Michael ; ZINSER, Sebastian ; KABZA, Herbert: Comparison of Eco and Time Efficient Routing of ICEVs, BEVs and PHEVs in Inner City Traffic. IEEE VPPC 2012, Seoul, Oktober 2012

[112] RICHTER, Michael ; ZINSER, Sebastian ; STIEGELER, Markus ; MENDES, Marijo ; KABZA, Herbert: Energy Management for Range Enlargement of a Hybrid Battery Vehicle with Battery and Double Layer Capacitors. EPE 2011, Birmingham, August 2011

[113] ROHDE, Jannis: Bildung von Gleichgewichtszuständen in Verkehrsnetzen nach Nutzer- oder Systemoptimum. http://www.ivh.uni-hannover.de/optiv/Fallbsp/04-Umlegung/04-umlegung/, 2006

[114] SAIHENG, Wang ; KEJUN, Long: Vehicle Routing Algorithm Based on Real-time Information. Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2009

[115] SAUER, Alexander: *Implementierung einer webbasierten Benutzerschnittstelle zur dynamischen Routenbereitstellung*. Univeristät Ulm, Bachelorarbeit: , 2012

[116] SCHOONDERWOERD, Ruud ; HOLLAND, Owen ; BRUTEN, Janet ; ROTHKRANTZ, Leon: Ant-Based Load Balancing in Telecommunications Networks. Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. 2003, IEEE, 1996

[117] SCHOONDERWOERD, Ruud ; HOLLAND, Owen E. ; BRUTEN, Janet L. ; ROTHKRANTZ, Leon J. M.: The Self-Organizing Exploratory Pattern of the Argentine Ant. Adaptive Behavior, No. 2. (1996), pp. 169-207, 1996

[118] SCHRECKENBERG, M. ; NAGEL, K.: A cellular automaton model for freeway traffic. In: *j. Phys. I France 2* (1992), S. 2221–2229

[119] SCHRECKENBERG, M. ; SCHADSCHNEIDER, A. ; NAGEL, K.: Zellularautomaten simulieren Straßenverkehr. In: *Physikalische Blätter 52* 5 (1996), S. 460–462

[120] SCHUMACHER, Henrik ; PRIEMER, Christian ; SLOTTKE, Eric N.: A Simulation Study of Traffic Efficiency Improvement Based on Car-to-X Communication. VANET '09 Proceedings of the sixth ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking, 2009

[121] SERWILL, D.: DRUM – Modellkonzept zur dynamischen Routensuche und Umlegung. In Stadt, Region, Land. Heft 49, Lehrstuhl und Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr RWTH Aachen, Aachen, 1994

[122] SOH, Azura C. ; MARHABAN, Mohammad H. ; KHALID, Marzuki ; YUSOF, Rubiyah: Modelling and Optimisation of a Traffic Intersection Based on Queue Theory and Markov Decision Control Methods. Proceedings of the First Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS'07), 2007

[123] SPARMANN, U.: *Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*. 1978

[124] STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG: *Jahresfahrleistungen im Straßenverkehr 1990, 2005 und 2010, Stadtkreis Ulm*. Februar 2012. – URL `http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/SRDB/Tabelle.asp?H=UmweltVerkehr&U=03&T=10026015&E=GE&K=421&R=GE421000`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[125] STIEGELER, Markus: *Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge*, Universität Ulm, Dissertation, 2008

[126] STIEGELER, Markus ; JOCHMANN, Lars ; LINDENMAIER, Jochen ; KABZA, Herbert: 3-stufige Entscheidungsstrategie für die Gangwahl bei einem parallelen hybriden Antriebsstrang. In: *5. VDI-Tagung Innovative Fahrzeugantriebe*. Dresden, Germany, nov 2006

[127] SUN MICROSYSTEMS: *Java 3D*. 2012. – URL `http://java3d.java.net/`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[128] SUSANNE, Breitenberger ; NEUHERZ MARTINA, Grüber B. and;: Extended Floating Car Data - Potenziale für die Verkehrsinformation und notwendige Durchdringungsraten. Straßenverkehrstechnik, Seite 522-531, 2004

[129] THIERAUF, Daniel: *Entwurf und Realisierung eines objektorientierten mikroskopischen Verkehrssimulators mit Integration detaillierter Fahrzeugmodelle*, Univeristät Ulm, Diplomarbeit, 2011

[130] TIAN, Yan: Dynamic vehicle routing problem using hybrid ant system. Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. 2003, IEEE, 2003

[131] TOMTOM: Stauauffälligste Städte Deutschland (Erhebungszeitraum: April-Juni 2012). Motor-Talk.de, Oktober 2012

[132] TREIBER, Martin ; HELBING, Dirk: Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell. Rostock, September 2002, 16th Symposium Simulationstechnik ASIM

[133] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: *Verkehrsdynamik und -simulation*. Springer, Berlin, 2010

[134] TREPTE, Andreas: *Per Mausclick am Stau vorbei*. 2003. – URL `http://www.innovations-report.de/html/berichte/verkehr_logistik/bericht-23513.html`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[135] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS): *SRTM-3-Data*. 2012. – URL `http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[136] VDA (VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE): *Agenda Mobilität 2020, Beiträge der Automobilindustrie zu einer nachhaltigen Verkehrspolitik*. November 2008

[137] VDI-FACHBEREICH FABRIKPLANUNG UND -BETRIEB: *VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen Grundlagen*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2010

[138] VERBAND DER INTERNATIONALEN KRAFTFAHRZEUGHERSTELLER E.V.: *Bestand Pkw am 1. Januar 2012/2011 nach Herstellern und Typen*. 2012

[139] VERBAND DER INTERNATIONALEN KRAFTFAHRZEUGHERSTELLER E.V.: *Statistik Pkw-Neuzulassungen Pkw-Bestand Archiv Pkw-Neuzulassungen Nfz-Neuzulassungen Nfz-Bestand Archiv Nfz-Neuzulassungen*. 2012

[140] VMZ BERLIN BETREIBERGESELLSCHAFT MBH: *FCD Pilotversuch in Berlin*. – URL `http://www.vmzberlin.de/web/guest/home`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[141] VOLKER, Lars: Route Planning in Road Networks with Turn Costs. Universität Karlsruhe, Institut für theoretische Informatik, 2008

[142] VOLKSWAGEN: *Volkswagen Studie: Golf blue-e-motion*. 2010. – URL `http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/themes/2010/11/Volkswagen_Concept_Car__Golf_blue-e-motion.html`. – Zugriffsdatum: 09.02.2013

[143] VRTIC, Milenko: *Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2003

[144] WALLENTOWITZ, R.: *Handbuch der Kraftfahrzeugelektronik - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Vieweg+Teubner-Verlag, 2006

[145] WARDROP, J.G.: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Institute of Civil Engineers, Part II (1), pp. 325-378, 1952

[146] WEBASTO FEEL THE DRIVE: *$CO_2$-neutrale Fahrheizung für E-Fahrzeuge*. 2011. – URL `http://www.webasto.com/presse-und-events/graphics/WEBASTO-COM_Company_Webasto_Bioethanolheizung_fuer_E-Fahrzeuge_Sept2011.pdf`. – Zugriffsdatum: 23.10.2012

[147] WIEDEMANN, Rainer: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Institut für Verkehrswesen Universität (TH) Karlsruhe, Habitilation: , 1974

[148] WILSON, Tim: *KML 2.2 – An OGC Best Practice*. 2007

[149] WIPKE, Keith B. ; CUDDY, Matthew R. ; BURCH, Steven D.: ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 48, NO. 6, NOVEMBER 1999

[150] ZEMEN, T. ; CZINK, N ; BERNADÓ, L. ; VOGEL, C.: Funkkommunikation für intelligente Verkehrssysteme - Status und Ausblick. Elektrotechnik & Informationstechnik Heft 7 : Springer-Verlag, Juli/August 2011

[151] ZINSER, Sebastian: *Planung einer energieeffizienten Route mit adaptiver Geschwindigkeitsempfehlung für Hybrid-, Elektrofahrzeugtopologien*, Univeristät Ulm, Diplomarbeit, 2012

# Veröffentlichungen


[V1] RICHTER, Michael; KABZA, Herbert: *Strategic Dynamic Traffic Routing Algorithm for Globally Optimized Urban Traffic, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Gold Coast, Juni 2013

[V2] RICHTER, Michael: *ULTraSim traffic simulator, SMMT INNOVATION AND TECHNOLOGY (Society of Motor Manufacturers and Traders)*, United Kingdom, Autumn Newsletter 2012

[V3] RICHTER, Michael; ZINSER, Sebastian; KABZA, Herbert: *Comparison of Eco and Time Efficient Routing of ICEVs, BEVs and PHEVs in Inner City Traffic, Vehicle IEEE Power and Propulsion Conference (VPPC) 2012*, Seoul, Oktober 2012

[V4] RICHTER, Michael; THIERAUF, Daniel; KABZA, Herbert: *ULTraSim, a Traffic Simulator Incorporating Submicroscopic BEV, HEV, ICEV Models, EVS 26*, Los Angeles, Mai 2012

[V5] RICHTER, Michael; STIEGELER, Markus; KABZA, Herbert: *Power-Split Operation Strategy for Series Hybrid Electric Buses Based on a Cost Function, EVS 26*, Los Angeles, Mai 2012

[V6] RICHTER, Michael; STIEGELER, Markus; MENDES, Marijo; KABZA, Herbert: *A Optimization Method for the Braking Process of Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011 IEEE, Chicago, September 2011

[V7] RICHTER, Michael; BRENDLE, Bernhard; STIEGELER, Markus; MENDES, Marijo; KABZA, Herbert: *Flux Maps for an Efficiency-Optimal Operation of Asynchronous Machines in Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011 IEEE, Chicago, September 2011

[V8] RICHTER, Michael; ZINSER, Sebastian; STIEGELER, Markus; MENDES, Marijo; KABZA, Herbert: *Energy Management for Range Enlargement of a Hybrid Battery Vehicle with Battery and Double Layer Capacitors*, EPE 2011, Birmingham, August 2011

[V9] RICHTER, Michael; WALTER, Stefan; STIEGELER, Markus; MENDES, Marijo; KABZA, Herbert: *Route-Dependent Power-Adapted Operation Strategies in Range Extender Hybrid Vehicles*, EPE 2011, Birmingham, August 2011

[V10] STIEGELER, Markus; RICHTER, Michael; LINDENMAIER, Jochen; KABZA, Herbert: *Influence of Battery Size on Predictive Control for Hybrid Cars IEEE Melecon* 2010, Valletta, April 2010

# 10 Anhang

## 10.1 Fahrzeugdaten

Tabelle 10.1.1-10.1.4 listet die Fahrzeugdaten der in den Simualtionen verwendeten Fahrzeugmodelle auf.

**Tabelle 10.1.1:** *Fahrzeugdaten: Fahrzeug mit konventionellem Antrieb*

| Typ | Dieselfahrzeug |
|---|---|
| Antriebsart | Verbrennungsmotor |
| Leistung | 66/90 kW/Ps |
| max. Leistung bei | 3920 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehmoment | 210 Nm bei 1900 $\frac{1}{min}$ |
| min. Drehzahl | 800 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehzahl | 4500 $\frac{1}{min}$ |
| Getriebe | 5-Gang-Getriebe |
| Übersetzung 1. Gang | 3,78 |
| Übersetzung 2. Gang | 2,12 |
| Übersetzung 3. Gang | 1,36 |
| Übersetzung 4. Gang | 0,97 |
| Übersetzung 5. Gang | 0,76 |
| Achsübersetzung | 3,78 |
| Gesamtgewicht | 1335 kg |

**Tabelle 10.1.2:** *Fahrzeugdaten: Elektrofahrzeug*

| Typ | Elektrofahrzeug |
|---|---|
| Antriebsart | Permanenterregte Synchronmaschine |
| max. mech. Motorleistung | 100 kW bei 3000 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehzahl | 5990 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehmoment | 570 Nm |
| Getriebe | feste Übersetzung |
| Achsübersetzung | 4,0 |
| Energiespeicher | Nickel-Metallhybrid-Batterie, Start-SOC bei 70 % |
| Kapazität | 28 kWh |
| Gesamtgewicht | 1350 kg |

**Tabelle 10.1.3:** *Fahrzeugdaten: Hybridfahrzeug*

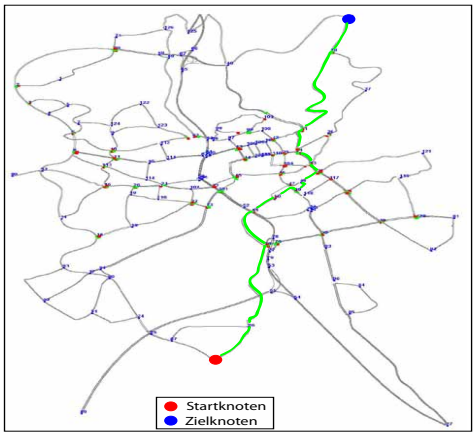
| Typ | Hybridfahrzeug |
|---|---|
| Antriebsart | Parallelhybrid |
| Leistung Verbrennungsmotor | 66/90 kW/Ps |
| max. Leistung bei | 3920 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehmoment | 210 Nm bei 1900 $\frac{1}{min}$ |
| min. Drehzahl | 800 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehzahl | 4500 $\frac{1}{min}$ |
| Elektromotor Typ | Permanenterregte Synchronmaschine |
| max. mech. Motorleistung | 30 kW bei 3000 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehzahl | 140 $\frac{1}{min}$ |
| max. Drehmoment | 5990 Nm |
| Energiespeicher | Nickel-Metallhybrid-Batterie, Start-SOC bei 70 % |
| Kapazität | 750 Wh |
| Getriebe | 5-Gang-Getriebe |
| Übersetzung 1. Gang | 3,78 |
| Übersetzung 2. Gang | 2,12 |
| Übersetzung 3. Gang | 1,36 |
| Übersetzung 4. Gang | 0,97 |
| Übersetzung 5. Gang | 0,76 |
| Achsübersetzung | 3,39 |
| Gesamtgewicht | 1355 kg |

**Tabelle 10.1.4:** *Übersicht über die modellierten Fahrzeugkonfigurationen*

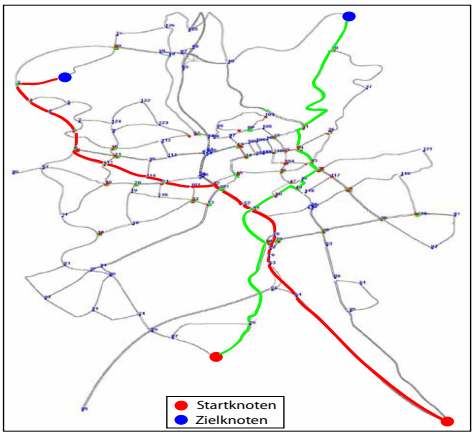
| Fahrzeugtopologie | Motorleistung [kW] | Max. Drehmoment [Nm] | Masse [t] | Länge [m] |
|---|---|---|---|---|
| BEV | 37 | 207 | 1,2 | 4 |
| BEV | 50 | 270 | 1,3 | 4 |
| BEV | 80 | 451 | 1,3 | 5 |
| BEV | 100 | 570 | 1,3 | 5 |
| ICEV | 40 | 128 | 1,3 | 4 |
| ICEV | 66 | 210 | 1,3 | 5 |
| ICEV | 164 | 535 | 2,2 | 5 |
| ICEV (LKW) | 220 | 1250 | 20 | 9 |
| ICEV (Bus) | 220 | 1250 | 16-26 | 18 |
| PHEV | 66 + 30 | 210 + 140 | 1,3 | 5 |
| PHEV | 66 + 6 | 210 + 199 | 1,3 | 5 |

## 10.2 Übersicht Szenarien

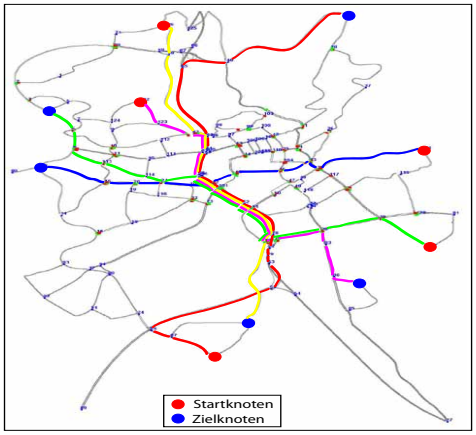
Szenario Nr. 1:



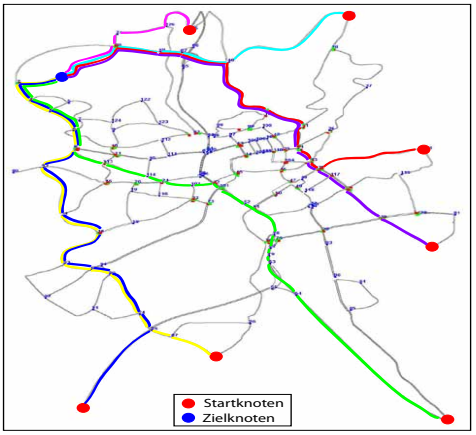

Szenario Nr. 2:



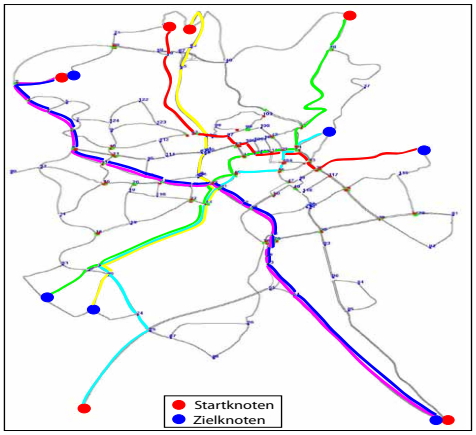

Szenario Nr. 3:




Szenario Nr. 4:




Szenario Nr. 5:




Szenario Nr. 6:

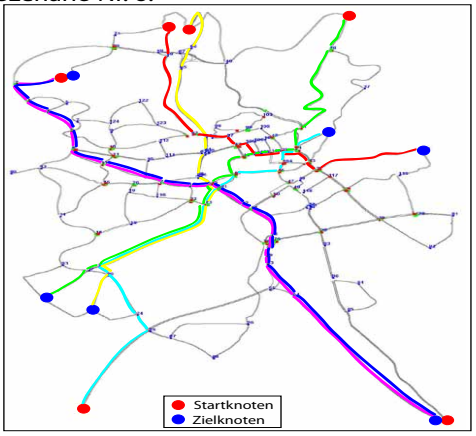



**Abbildung 10.2.1:** *Übersicht über Start-Ziel-Knoten der analysierten Szenarien, mit eingezeichneten kürzesten Routen*

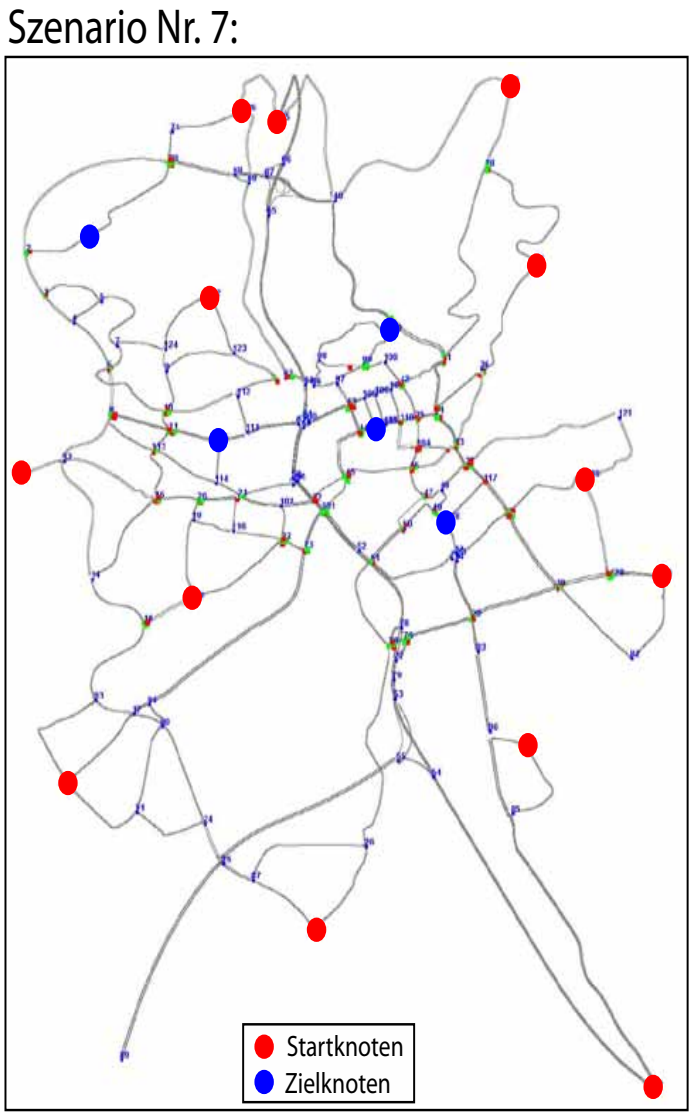



**Abbildung 10.2.2:** *Übersicht über Start-Ziel-Knoten Szenario sieben*

## 10.3 Geschwindigkeitstrajektorie Fahrermodell / Messfahrt

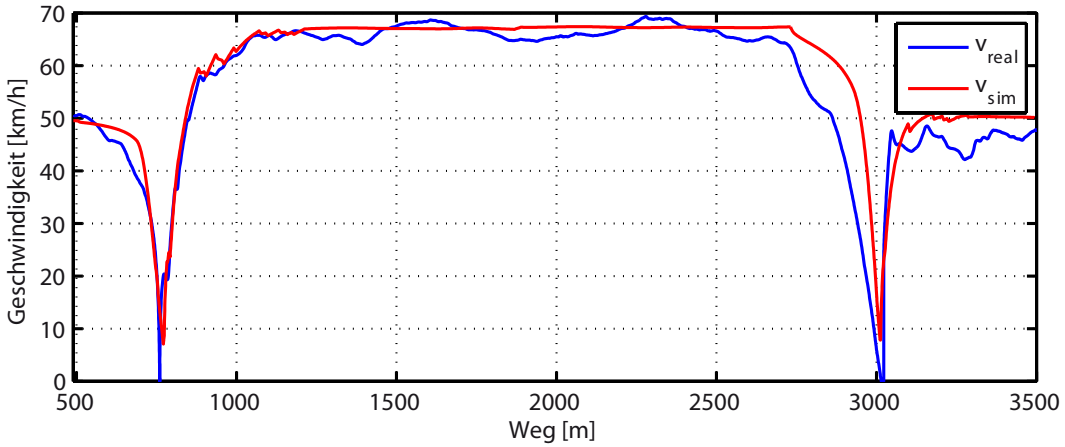



**Abbildung 10.3.1:** *Vergleich Messfahrt reale Geschwindigkeitstrajektorie, Fahrermodell*

## 10.4 Streckennetzgenerator

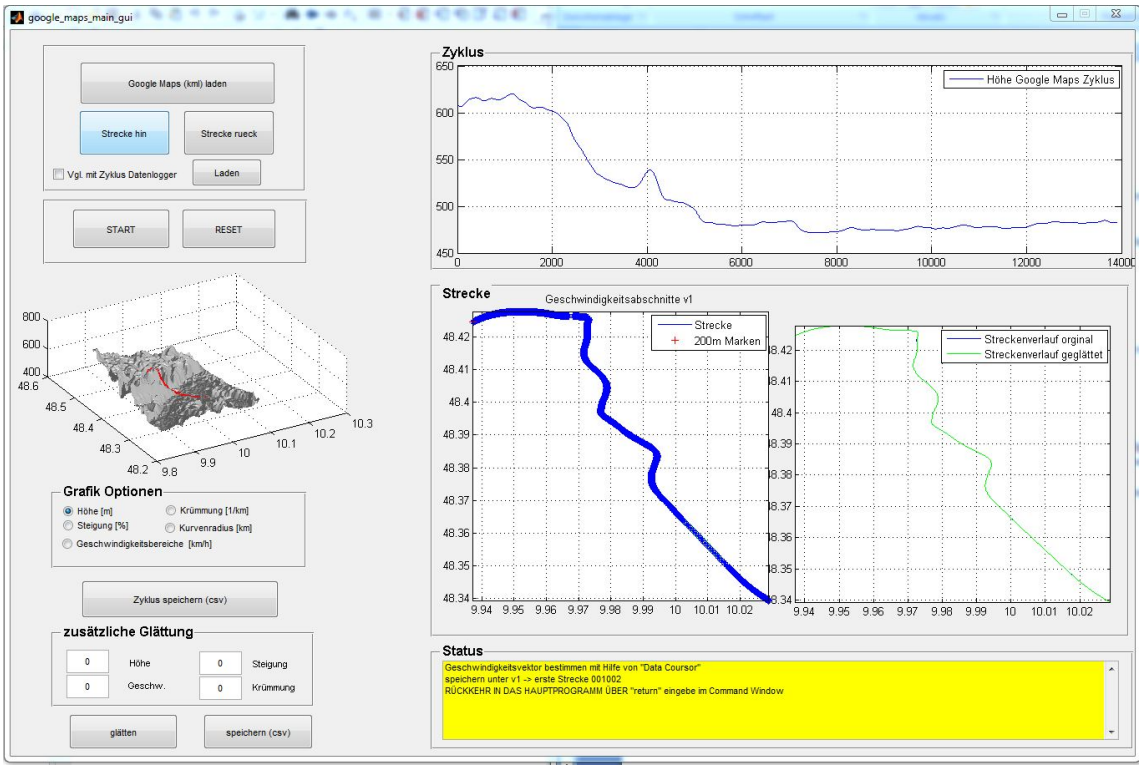



**Abbildung 10.4.1:** *Netzgenerator*

## 10.5 ULTraSim

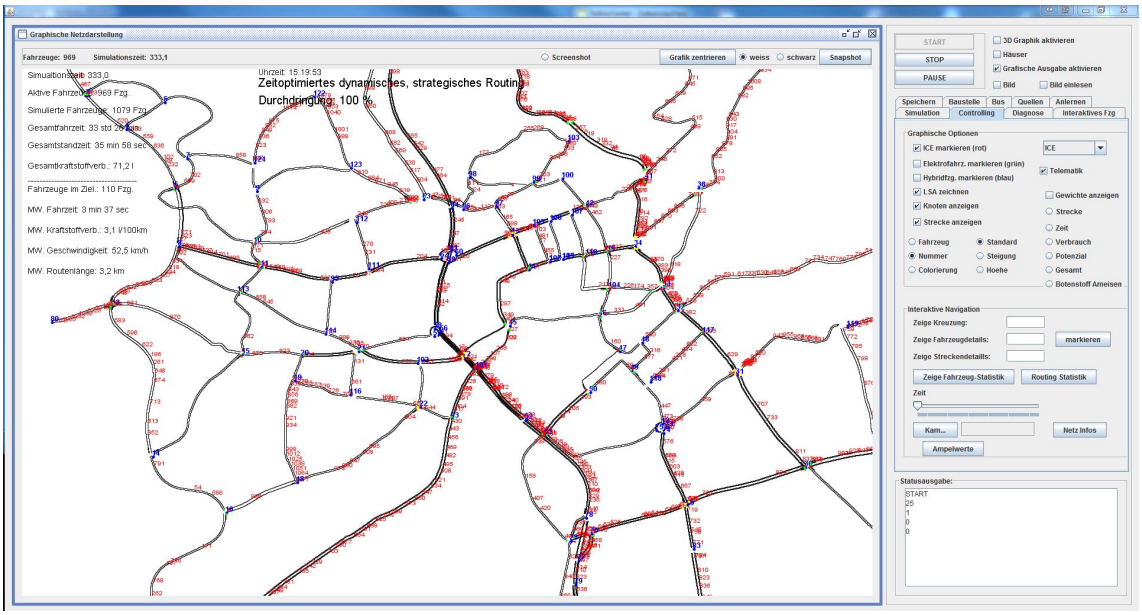



**Abbildung 10.5.1:** *Simulationsoberfläche ULTraSim*

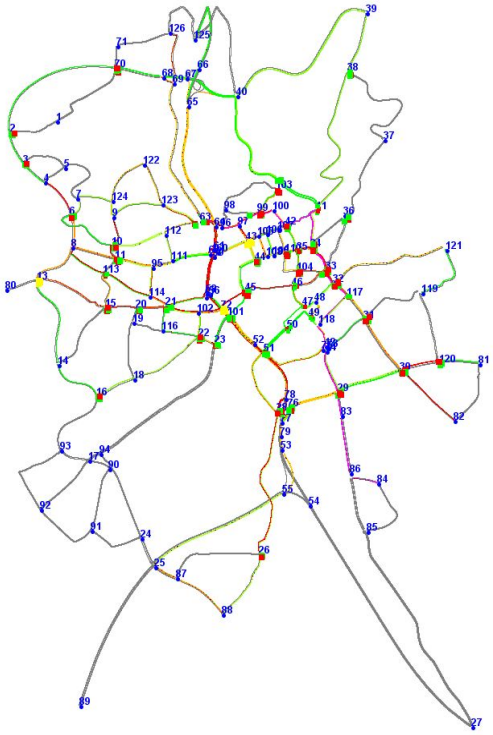


**Abbildung 10.5.2:** *Streckennetz mit Informationen über den aktuellen Streckenpotenzialwert einzelner Strecken*

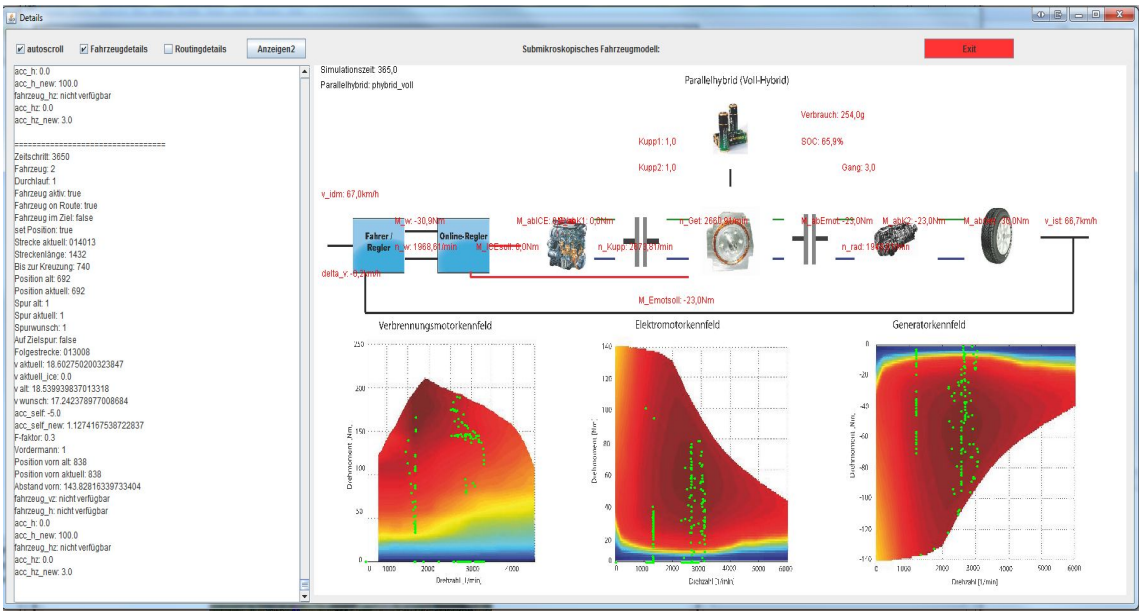



**Abbildung 10.5.3:** *Oberfläche zur detaillierten Darstellung der Längsdynamikparameter eines parallel hybrid Antriebsstranges*

## 10.6 Fahrzyklus

### 10.6.1 Elektrofahrzeug

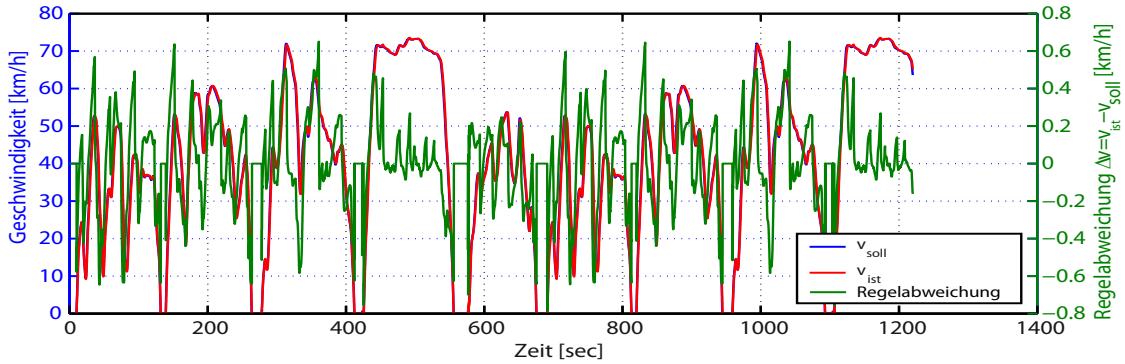



**Abbildung 10.6.1:** *Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsverlauf (rot) sowie Regelabweichung des Elektrofahrzeuges beim realen-Zyklus*

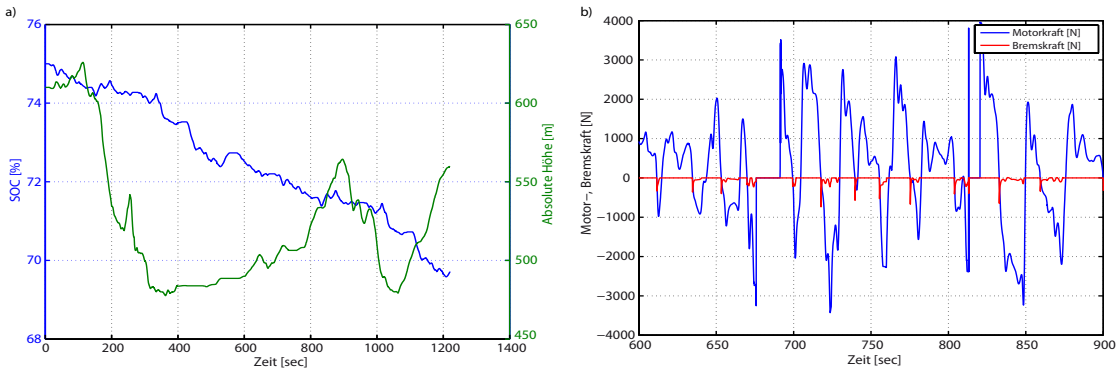



**Abbildung 10.6.2:** *(a) Batterieladezustandsverlauf (SOC), Batteriestrom, (b) generatorische und mechanische Bremskraft beim realen-Zyklus*

### 10.6.2 Parallelhybrid

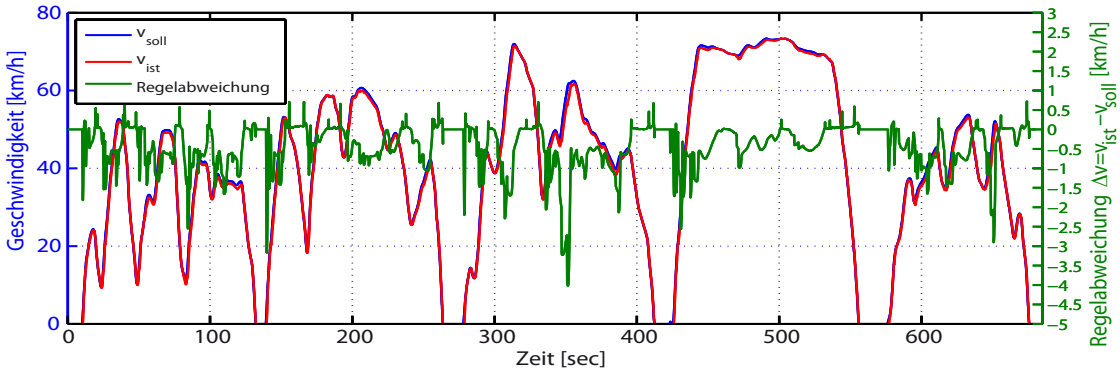



**Abbildung 10.6.3:** *Wunschgeschwindigkeit (blau), Ist-Geschwindigkeitsvergleich (rot) sowie Regelabweichung des PHEV beim realen-Zyklus*

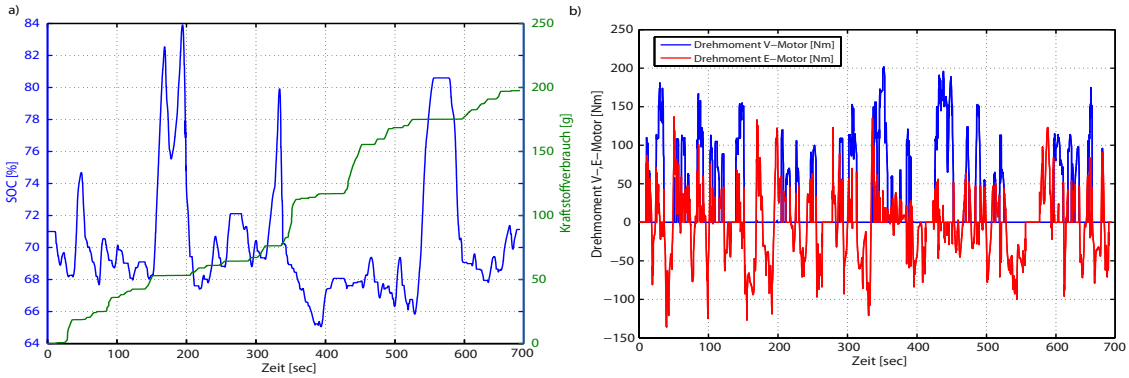



**Abbildung 10.6.4:** *(a) Batterieladezustandsverlauf (SOC), Batteriestrom, (b) Aufteilung des angeforderten Drehmoments zwischen V-Motor und E-Motor*

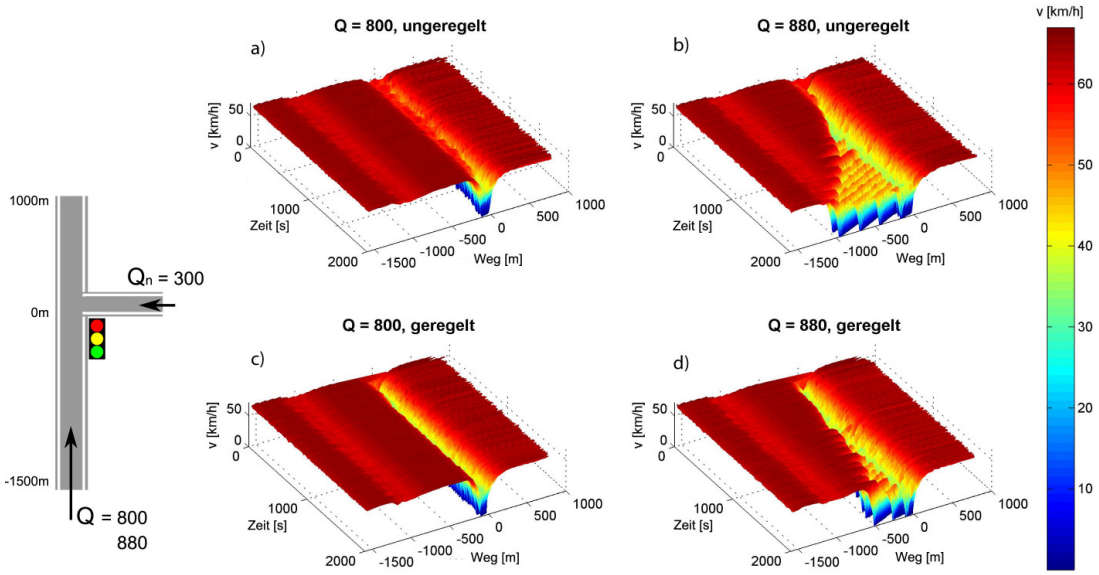



**Abbildung 10.6.5:** *Einfluss einer geregelten, ungeregelten Lichtsignalanlage auf den Geschwindigkeitsverlauf und Auswirkungen auf die Entwicklung von Stauwellen [129]*

### 10.6.3 Batteriemodell

Beim Batteriemodell wurde auf ein Modell einer früheren Arbeit [125] zurückgegriffen, in der ein Industrieakkumulator modelliert und verifiziert wurde.

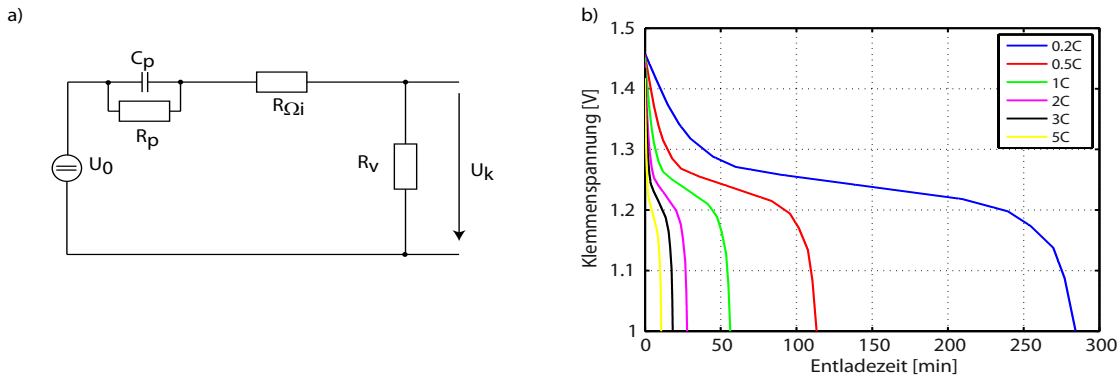



**Abbildung 10.6.6:** *Klemmenspannungsmodell (a) [125], Batterieentladekennlinie (b)*

## 10.7 Bordnetzlastszenario

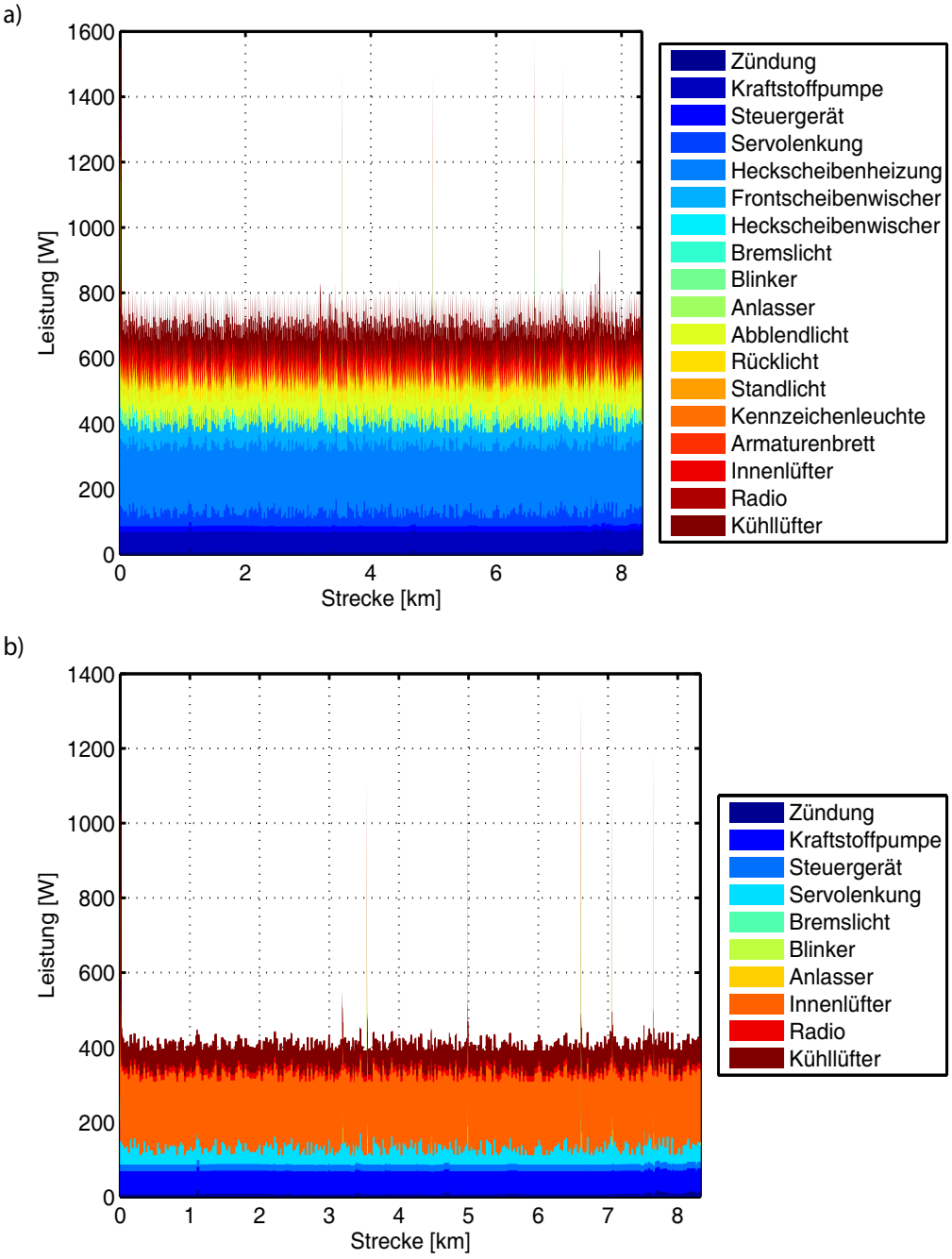



**Abbildung 10.7.1:** *Bordnetzlastszenario bei freier Fahrt, (a) Winter, (b) Sommer*

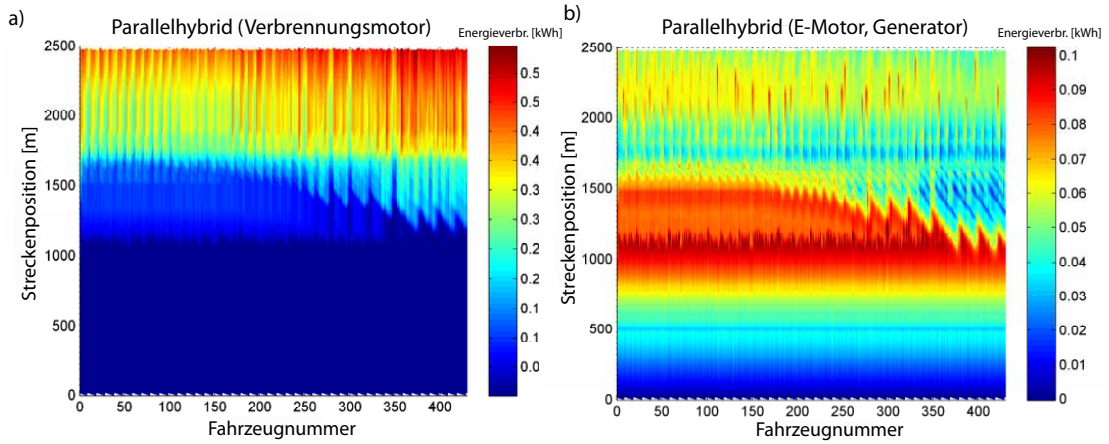



**Abbildung 10.7.2:** *Energieverbrauch [kWh] einer Fahrzeugflotte bei Annäherung an eine Ampel, dargestellt ist der Energieverbrauch aller 430 Fahrzeuge in der Flotte über der Streckenposition, (a) Energieverbrauch des Verbrennungsmotors eines Parallelhybrids, (b) Energieverbrauch Elektromotor*

## 10.8 Range-Extender leistungsangepasste MGU-Unterstützung

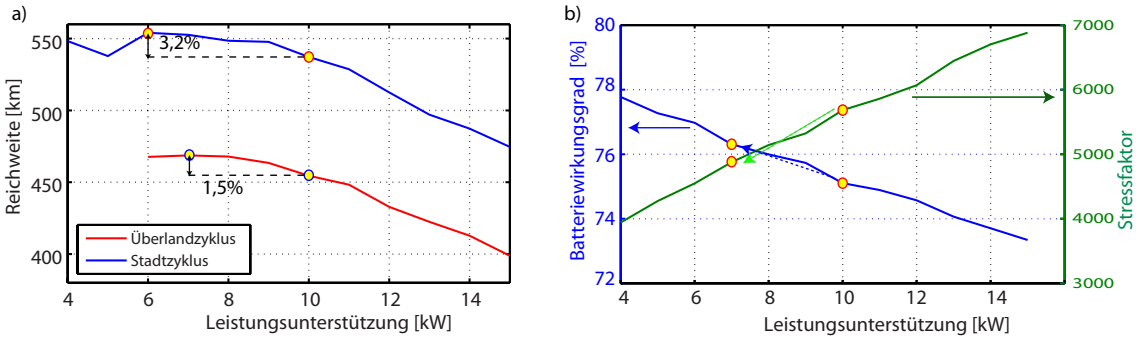



**Abbildung 10.8.1:** *Fahrzeug mit einem 15 kW ICE, 15 kW Range-Extender Generator, 45 kW Elektromotor, (a) Reichweite bei konstanter Leistungseinspeisung, (b) Stressfaktorreduktion und Wirkungsgradsteigerung bei einem Stadtzyklus*

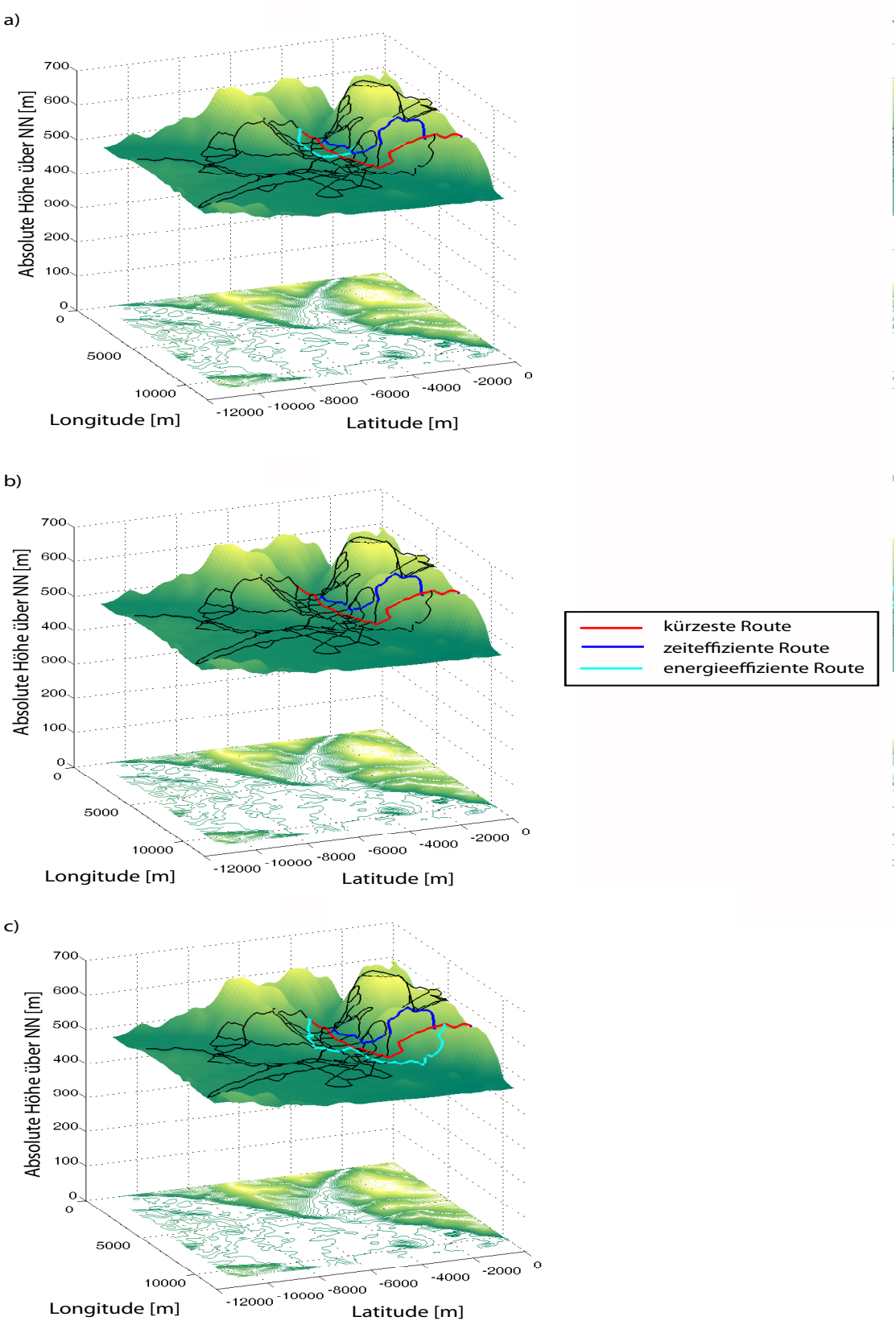



**Abbildung 10.8.2:** *3D-Topologievergleich der kürzesten, energieeffizienten und zeiteffizienten Route 80-39 (a) ICEV, (b) BEV, (c) PHEV*

## 10.9 Vergleich des völlig kontrollierten Verkehrsflusses $VKV_Z$ mit den Ergebnissen des Gleichgewichtsverfahrens für Umlegungsprobleme

Das Gleichgewichtsverfahren wie es in VISIM angewendet werden kann, dient dazu, ein Nutzergleichgewicht in einem Verkehrsnetz zu erzeugen. Zur Berechnung des Systemoptimums ist das Gleichgewichtsverfahren nicht in der Lage. Zur Beurteilung des Routingkonzeptes, wie es in Kapitel 5 vorgestellt wurde, wurde das Gleichgewichtsverfahren, wie es in [113], [121] dargestellt ist, implementiert Abb. 10.9.1 und die Ergebnisse für die betrachteten Szenarien (Abschnitt 6.2) mit dem zeiteffizienten völlig kontrollierten Verkehrsfluss verglichen.

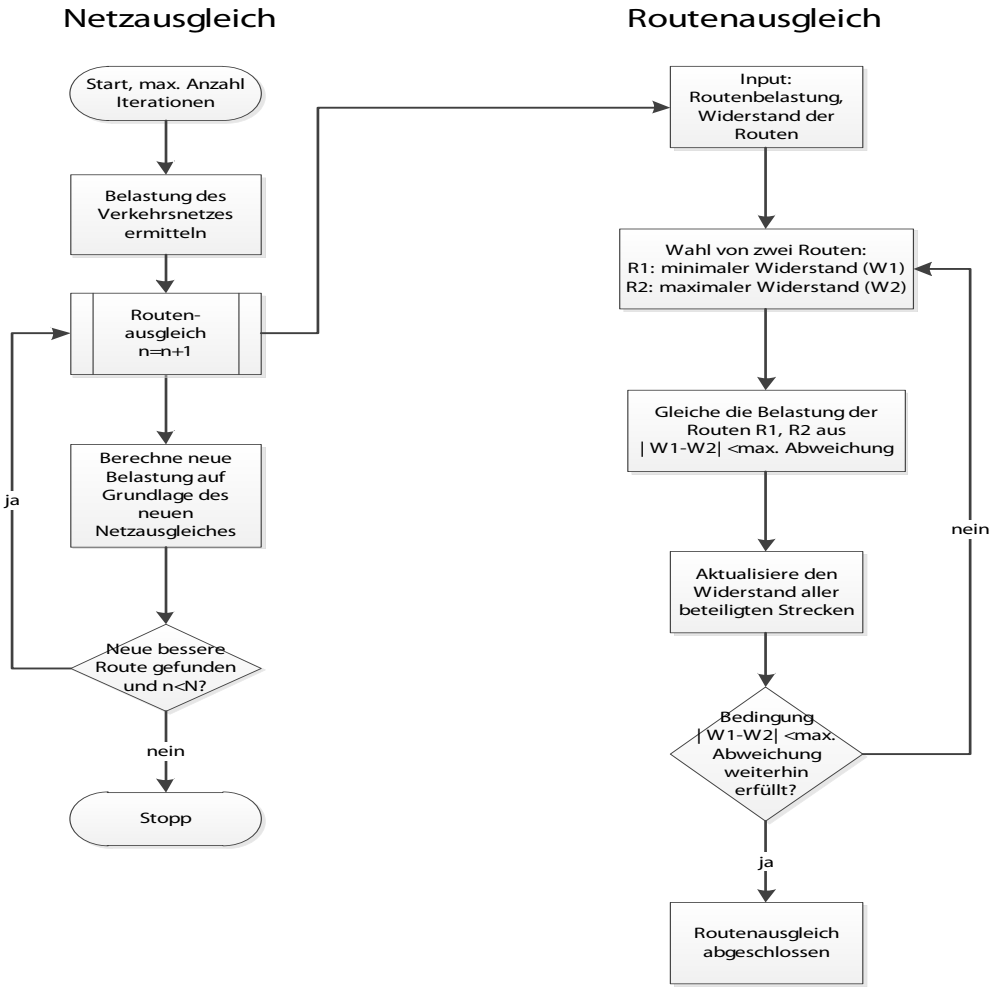



**Abbildung 10.9.1:** *Berechnung des Netzausgleichs beim Gleichgewichtsverfahren [121]*

### 10.9.1 Auswertung / Vergleich

Wie in den Ergebnissen in Tab. 10.9.1 zu erkennen ist, erzielt das Gleichgewichtsverfahren bei sehr einfachen Szenarien, wie dem Szenario Nr. 1 und Nr. 2, geringfügig bessere Ergebnisse. Mit zunehmender Komplexität der Szenarien werden hingegen schnell die Schwächen des Gleichgewichtsverfahrens sichtbar. Hierbei sind Einsparungen in der Fahrzeit von bis zu 40 % bei einem völlig kontrolliertem Verkehrfluss möglich. Diese Einsparungen sind dadurch bedingt, da beim Gleichgewichtsverfahren die Verkehrsflüsse zwar gleichmäßig auf die Routen verteilt werden, es wird jedoch nicht berücksichtigt, welche Kreuzungspunkte der Routen dadurch in der Zukunft entstehen. Außerdem findet keine Überprüfung statt, ob die einzelnen Kreuzungen und Lichtsignalanlagen den Zufluss an Fahrzeugen abfertigen können.

**Tabelle 10.9.1:** *Durchschnittliche Fahrzeit-, Energieeinsparung $VKV_Z$-Routing im Vergleich zum Gleichgewichtsverfahren*

| Szenario Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fahrzeit Gleichgewichtsverfahren bzgl. $VKV_Z$ [%] | -1,3 | -1,6 | 30,5 | 1,6 | 23,3 | 40,0 |
| Standzeit Gleichgewichtsverfahren bzgl. $VKV_Z$ [%] | -87,8 | -61,5 | 769 | 3,0 | 609,1 | 391,5 |

## 10.10 Energieeffizientes Routing, Durchdringung

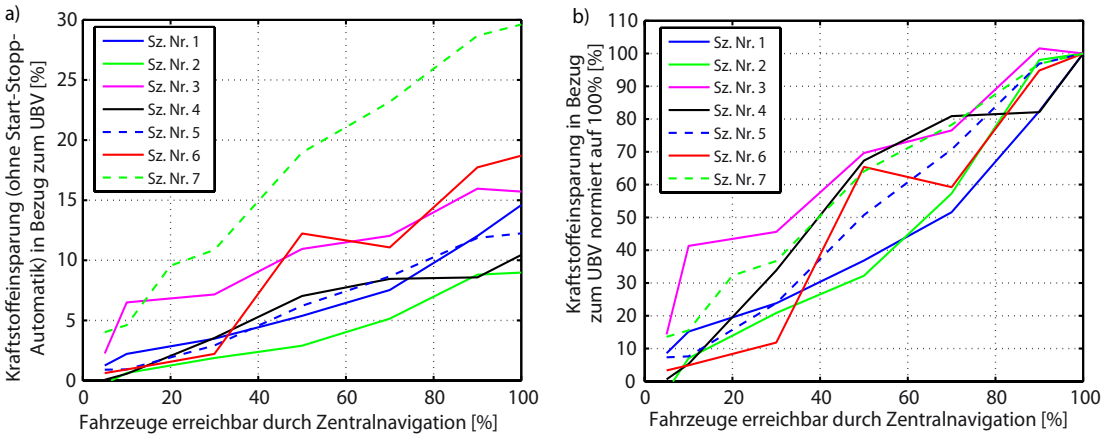



**Abbildung 10.10.1:** *(a) Kraftstoffeinsparung von konventionellen Fahrzeugen ohne Start-Stopp-Automatik als Funktion der prozentual beeinflussbaren Fahrzeuge durch eine Zentralnavigation, (b) Kraftstoffeinsparung normiert auf 100 % Durchdringung*

## 10.11 Kommunikationsprotokoll

**Tabelle 10.11.1:** *Typ 1: Routinganfrage*

| Typ | Zeit | Fahrzeugnr. | Position | Zielknoten |
|---|---|---|---|---|
| 5 bit | 17 bit | 17 bit | 55 bit | 14 bit |

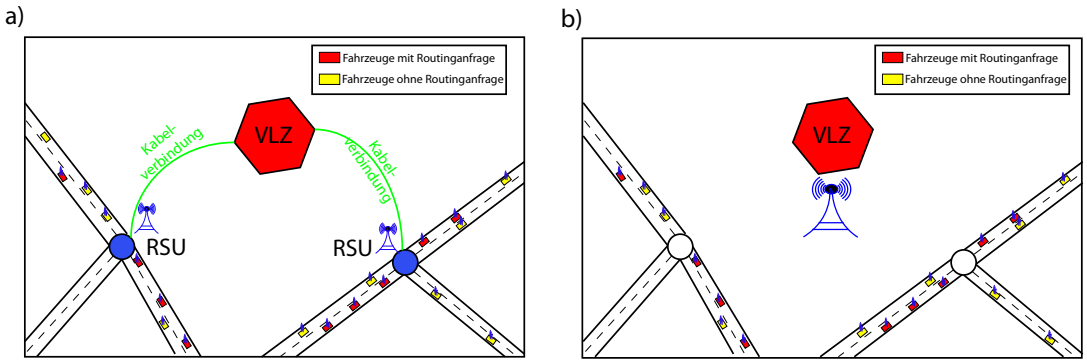



**Abbildung 10.11.1:** *(a) Dezentrale Datenkommunikation über OBU-RSU-VLZ-Kommunikation, (b) zentralisierte Kommunikation über das Mobilfunknetz*

**Tabelle 10.11.2:** *Typ 3: Empfangsbestätigung*

| Typ | Zeit | Fahrzeugnr. | Position |
|---|---|---|---|
| 5 bit | 17 bit | 17 bit | 55 bit |

**Tabelle 10.11.3:** *Typ 5: alte Route*

| Typ | Zeit | Fahrzeugnr. | Zeit neu | Verbrauch neu | Nutzdaten |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 bit | 17 bit | 17 bit | 17 bit | 14 bit | 28 bit |

**Tabelle 10.11.4:** *Fahrzeugposition in GPS-Koordinaten*

| **Breitengrad** | Grad | Minuten | Sekunden |
|---|---|---|---|
| N/S | 0°-90° | 0-59 | 0-5999 |
| 1 bit | 7 bit | 6 bit | 13 bit |
| **Längengrad** | Grad | Minuten | Sekunden |
| O/W | 0°-90° | 0-59 | 0-5999 |
| 1 bit | 7 bit | 6 bit | 13 bit |

**Tabelle 10.11.5:** *Vergleich der Datenübertragungsrate und Latenzzeit*

| | GSM | UMTS | LTE | IEEE 802.11p | Ethernet |
|---|---|---|---|---|---|
| Downlink | 53,6 kBit/s | 384 kBit/s - 42,2 MBit/s | 100 MBit/s | 27 MBit/s | 10 GBit/s |
| Uplink | 13,4 kBit/s | 128 kBit/s - 5,8 MBit/s | 50 MBit/s | 27 MBit/s | 10 GBit/s |
| Latenzzeit | 500 ms | 60-200 ms | 20 ms | 40 ms | 50 $\mu$s |

## 10.12 Kostenübersicht

**Tabelle 10.12.1:** *Kostenübersicht / Abrechnungsmodelle*

| Randbedingungen: |
|---|
| Stadtgebiet Ulm |
| 905 Mio. Kilometer jährlich |
| 60 000 zugelassene Kraftfahrzeuge |
| durchschnittliche Routenlänge 15 km |
| durchschnittliche Fahrzeit 25 min |
| ⇒ 5 Mio. Fahrten monatlich |
| ⇒ 75,4 Mio. Kilometer monatlich |
| ⇒ 125 Mio. Fahrminuten monatlich |
| **Annahme: 30 % der Fahrten werden durch das zentrale Verkehrsnavigationsmanagement verwaltet** |
| ⇒ 1,5 Mio. zu routende Fahrten monatlich |
| ⇒ 22,5 Mio. Kilometer monatlich |
| ⇒ 37,5 Mio. Fahrminuten monatlich |

| **Ausgaben** | | | monatlich |
|---|---|---|---|
| Serversystem | | | **400 € [43]** |

| **Einnahmen** | | | monatlich |
|---|---|---|---|
| **Pauschalkostenmodelle** | | | |
| Flatrate: | monatlich 5 € | 18 000 Nutzer | **90 000 €** |
| Routenspezifisch: | 5 Ct pro Fahrt | 1,5 Mio. Fahrten | **75 000 €** |
| **Erfolgsbeteiligungsmodelle** | | | |
| Energiespezifisch: | durchsch. Einsparung: 0,65 l/100 km | 22,5 Mio. Kilometer | 146 000 Liter |
| | Gesamtersparnis: | 1,50 €/Liter | 220 500 € |
| | **Erfolgsbeteiligung**: | **15 %** | **33 000 €** |
| Fahrzeitspezifisch: | durchsch. Einsparung: 31,8 % | 37,5 Mio. Fahrminuten | 11,9 Mio. Minuten |
| | Gesamtersparnis: | Wert einer Minute 29 Ct | 3,5 Mio. € |
| | **Erfolgsbeteiligung:** | **1 Ct pro Min.** | **119 000 €** |

## 10.13 Lebenslauf

| | |
|---|---|
| **Persönliche Daten:** | |
| Name,Vorname | Richter, Michael |
| Geburtsdatum/-ort | 30. Januar 1986, Ulm |
| Staatsangehörigkeit | deutsch |
| **Schulbildung:** | |
| 08/2002 - 06/2005 | Robert-Bosch Gymnasium Ulm |
| 08/1996 - 06/2002 | Realschule Erbach |
| 08/1992 - 06/1996 | Grundschule Ulm-Gögglingen/Donaustetten |
| **Hochschulbildung:** | |
| 10/2005 - 08/2010 | Studium der Elektrotechnik an der Universität Ulm Fachrichtung Automatisierungs- und Energietechnik<br>Abschluss des Studiums mit der Verleihung des Titels Dipl.-Ing. mit Auszeichnung |
| **Praktika:** | |
| 09/2009 - 12/2009 | Industriepraktikum Bosch Rexroth AG, Elchingen |
| **Berufstätigkeit:** | |
| 09/2010 - aktuell | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiewandlung und -speicherung der Universität Ulm |