

Inhaltsverzeichnis (Übersicht)

Inhaltsverzeichnis (Übersicht)	I
Inhaltsverzeichnis (Detailansicht).....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XXIII
1 Klimaschutz als Herausforderung für den deutschen Straßengüterverkehr	1
2 Grundlagen und Entwicklungsstand der Verkehrs- und Fahrzeugmodellierung	7
3 Physikbasierte Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs eines Nutzfahrzeugs (SNF-Fahrdynamikmodell)	41
4 Statistikbasierte Modellierung von fahrzeugtypischen Fahrtenketten (SNF-Fahrtenkettenmodell).....	149
5 Schlussbetrachtungen	205
Literaturverzeichnis	213
Anhang	228

Inhaltsverzeichnis (Detailansicht)

Inhaltsverzeichnis (Übersicht)	I
Inhaltsverzeichnis (Detailansicht).....	II
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XXIII
1 Klimaschutz als Herausforderung für den deutschen Straßengüterverkehr ..	1
1.1 Situation der Treibhausgasemissionen im Straßengüterverkehr	1
1.2 Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen	2
1.3 Problem- und Zielstellung der Arbeit.....	3
2 Grundlagen und Entwicklungsstand der Verkehrs- und Fahrzeugmodellierung.....	7
2.1 Verkehrs- und Fahrzeugmodelle	7
2.1.1 Verkehrsflussmodelle.....	8
2.1.1.1 Mikroskopische Verkehrsflussmodelle	8
2.1.1.2 Makroskopische Verkehrsflussmodelle.....	9
2.1.1.3 Mesoskopische Verkehrsflussmodelle	10
2.1.1.4 Zwischenfazit.....	10
2.1.2 Verkehrsplanungsmodelle	11
2.1.2.1 Güter- und fahrtenbezogene Modellierungsansätze	11
2.1.2.2 Wirtschaftsverkehrsmodelle	13
2.1.2.3 Fahrtenkettenmodelle	15
2.1.2.4 Zwischenfazit.....	17
2.1.3 Fahrzeugmodelle	19
2.1.3.1 Theoretische und experimentelle Modellierungsansätze.....	20
2.1.3.2 Räumliche Beschreibung	21
2.1.3.3 Gesamt- und Teilmodelle eines Fahrzeugs.....	22
2.1.3.4 Anwendung von allgemeingültigen, kommerziellen Fahrzeugmodellen	25
2.1.3.5 Zwischenfazit.....	26
2.2 Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsmodelle des Verkehrs	26
2.2.1 Makroskopische Modelle	27
2.2.1.1 Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA).	27
2.2.1.2 Transport Emission Model (TREMOD).....	28
2.2.2 Mikroskopische Modelle	30
2.2.2.1 Passenger car and Heavy duty Emission Model (PHEM).....	31
2.2.2.2 Vehicle Energy Consumption Calculation Tool (VECTO)	32

2.2.2.3 DYNA4 (kommerzielles Modell)	33
2.2.2.4 PKW-Flottenverbrauchsmodell (industrielles Modell).....	35
2.2.3 Kombiniertes Verbrauchs- und Fahrtenkettenmodell.....	37
2.3 Zusammenfassung und Fazit.....	40
3 Physikbasierte Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs eines Nutzfahrzeugs (SNF-Fahrdynamikmodell)	41
3.1 Mathematisches Modell des physikalisch-technischen Systems	42
3.1.1 Fahrzeuglängsdynamik	42
3.1.1.1 Gesamtfahrwiderstand 1 (ohne Beschleunigungswiderstand) ..	42
3.1.1.2 Gesamtfahrwiderstand 2 (mit Beschleunigungswiderstand)....	48
3.1.1.3 Geschwindigkeit und zurückgelegte Entfernung	51
3.1.2 Antriebsstrang (einschließlich Bremsen und Nebenaggregate).....	52
3.1.2.1 Verbrennungsmotor.....	52
3.1.2.2 Nebenaggregate.....	55
3.1.2.3 Kupplung.....	57
3.1.2.4 Schalt- und Achsgetriebe	59
3.1.2.5 Antriebsräder und Bremsen.....	62
3.1.3 Ergebnisgrößen	65
3.1.3.1 Berechnung der mechanischen Leistung und Arbeit	66
3.1.3.2 Berechnung des Kraftstoffverbrauchs.....	71
3.1.3.3 Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen	76
3.2 Simulationsdatenbasis.....	79
3.2.1 Fahrzeuge	79
3.2.1.1 Klassifikation und Auswahl von schweren Nutzfahrzeugen ...	79
3.2.1.2 Recherche und Auswahl von realen Fahrzeugen als Repräsentanten.....	81
3.2.1.3 Bestimmung der Parameterwerte der Repräsentanzfahrzeuge..	83
3.2.2 Fahrzyklen.....	88
3.2.2.1 Unterscheidung von Verkehrssituationen	88
3.2.2.2 Gewichtung der Verkehrssituationen/Fahrzyklen durch Fahrleistungsanteile in jeder Fahrzeugklasse	90
3.2.2.3 Bildung des ungewichteten Gesamtfahrzyklus aus Einzelfahrzyklen	90
3.2.2.4 Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeiten	92
3.3 Modellformalisierung und -implementierung in MATLAB/Simulink	93
3.3.1 Übersicht und Aufbau des Simulink-Modells (ausführbares Modell)...	94
3.3.2 Gangwechselsteuerung durch drehzahlbezogene Schaltpunkte (ausgewähltes Beispiel zur Modellformalisierung)	96
3.3.2.1 Allgemeine Funktionsweise	96

3.3.2.2 Drehzahlbereich eines verbrauchssparenden Hochschaltpunkts	97
3.3.2.3 Bestimmung des verbrauchssparenden Hochschaltpunkts	98
3.3.2.4 Bestimmung des beschleunigungsoptimalen Hochschaltpunkts	105
3.3.2.5 Bestimmung der Runterschaltpunkte	107
3.3.2.6 Schaltpunktmatrizen als Simulationseingangsdaten.....	108
3.4 Kalibrierung des Simulationsmodells über Verbrauchskennfeld.....	109
3.4.1 Parameter des Kalibrierungsverfahrens	109
3.4.2 Analyse der Nutzmassen-Abhängigkeit des Durchschnittsverbrauchs	110
3.4.3 Berechnung der expliziten Parameter	111
3.4.4 Berechnung der impliziten Parameter	113
3.4.5 Korrekturfaktoren der Parameter und Kenngrößen.....	115
3.4.6 Optionale Kalibrierung mit veränderten Fahrwiderstandsparametern	117
3.4.7 Programmablauf und Berechnungen einer Kalibrierungsrunde.....	119
3.4.7.1 Teil 1: Simulationsexperimente mit Parameterstartwerten	119
3.4.7.2 Teil 2: Berechnung der Durchschnittslage für den Punkt des minimalen spezifischen Verbrauchs	120
3.4.7.3 Teil 3: Optimierung der impliziten Parameterwerte.....	121
3.4.7.4 Teil 4: Ermittlung der expliziten Parameterwerte	134
3.4.7.5 Teil 5: Verifikation und Validierung der Kalibrierungslösungen	135
3.4.8 Kalibrierungsergebnisse der untersuchten Fahrzeuge.....	136
3.4.8.1 Verbrauchskennfelder.....	137
3.4.8.2 Funktionen des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs.....	142
3.4.8.3 Funktionen der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit	144
3.4.9 Sensitivitätsanalyse und Ergebnisvergleich zur Validierung	146
3.5 Zusammenfassung und Fazit.....	148
4 Statistikbasierte Modellierung von fahrzeugtypischen Fahrtenketten (SNF-Fahrtenkettenmodell)	149
4.1 Vorgehensweise zur Modellentwicklung	149
4.2 Konzeptionelles Modell	151
4.3 Erfassung und Aufbereitung der Straßengüterverkehrsstatistik.....	153
4.3.1 Fahrzeugbestand und Inlandsfahrleistung aus HBEFA/TREMOT	153
4.3.2 Inländerverkehrsdaten aus KBA-VD3	155
4.3.3 Fahrzeugbezogene Inländerverkehrsdaten je Fahrzeugklasse	156
4.3.3.1 Fahrleistung nach Straßenkategorien	156
4.3.3.2 Potentielle Transportleistung	157
4.3.3.3 Transportleistung	159
4.3.3.4 Fahrtenanzahl.....	160
4.3.3.5 Potentielles Transportaufkommen	160

4.3.3.6 Transportaufkommen	160
4.3.4 Fahrtenbezogene Inländerverkehrsdaten je Fahrtenklasse	161
4.3.4.1 Inländerverkehrsdaten nach Entfernungsstufen der Fahrten...	162
4.3.4.2 Inländerverkehrsdaten nach Fahrtenarten	164
4.3.5 Angleichung der fahrzeug- und fahrtenbezogenen Verkehrsdaten	165
4.4 Disaggregation der Verkehrsdaten mittels Optimierungsverfahren	166
4.4.1 Logische Verknüpfung der fahrzeug- und fahrtenbezogenen Verkehrsdaten durch Tabellen und Gleichungen.....	166
4.4.2 Verknüpfung der Verkehrsdatentabellen durch ein Gleichungssystem	167
4.4.3 Definition einer Optimierungsaufgabe zum Gleichungssystem	169
4.4.3.1 Zielfunktion	169
4.4.3.2 Restriktionen	170
4.4.4 Lösung der Optimierungsaufgabe durch ein iterativ-sequentielles Optimierungsverfahren (ISOV)	171
4.4.4.1 Auswahl eines Solvers für das Optimierungsverfahren	171
4.4.4.2 Sequentielle Optimierung der Entscheidungsvariablen (je Iteration).....	172
4.4.4.3 Iterativ-sequentielle Optimierung der Entscheidungsvariablen (Gesamtdurchlauf von ISOV).....	175
4.5 Konstruktion einer Fahrtenkette durch gleichverteilte Anordnung	179
4.5.1 Berechnung der durchschnittlichen Fahrtenanzahl je Fahrzeug	179
4.5.2 Bildung der chronologischen Fahrtenreihenfolge.....	180
4.6 Modellierung und Simulation einer Fahrtenkette über die Zeit.....	183
4.6.1 Zuordnung der Fahrten auf die verfügbaren Fahrzeugeinsatztage	183
4.6.1.1 Verfügbare Einsatztage eines Fahrzeugs im Jahr 2010	183
4.6.1.2 Gesamtdauer einer Fahrt inklusive Umschlag	184
4.6.1.3 Begrenzung der Gesamtdauer einer überlangen Fahrt	186
4.6.1.4 Verteilung der Fahrten auf verfügbare Einsatztage	187
4.6.2 Fahrereinsatzplanungsmodell	188
4.6.2.1 Rahmenbedingungen.....	188
4.6.2.2 Verfahren.....	190
4.6.3 Visualisierung und Verifikation des Simulationsmodells	191
4.7 Simulationsexperimente und -ergebnisse	193
4.7.1 Reduktionsmaßnahmen (Planung der Simulationsexperimente).....	193
4.7.2 Durchführung der Simulationsexperimente	194
4.7.3 Simulationsergebnisse.....	195
4.7.3.1 Kraftstoffverbrauch	195
4.7.3.2 Fahrtenverspätungsdauer und Fahrzeugeinsatzzeit.....	196
4.7.3.3 Fahrpersonalaufwand	198
4.7.3.4 Kosten des Kraftstoffverbrauchs und Fahrpersonalaufwands	199

4.7.3.5 Vermeidungskosten der Treibhausgasemissionen.....	201
4.7.3.6 Wirtschaftliche Einsparmengen der Treibhausgasemissionen	202
5 Schlussbetrachtungen.....	205
5.1 Zusammenfassung und Fazit der theoretischen Ergebnisse	205
5.2 Zusammenfassung und Fazit der praxisbezogenen Ergebnisse	208
5.3 Gesamtfazit und Ausblick	211
Literaturverzeichnis	213
Anhang 1: Erläuterungen zur Relevanz der Treibhausgasemissionen.....	228
A1.1 Treibhauseffekt der Erde (physikalische Grundlagen)	228
A1.2 Entstehung von Treibhausgasemissionen bei der Kraftstoffverbrennung (stöchiometrische Grundlagen)	235
Anhang 2: Grundlagen zur Modellierung und Simulation des Straßengüterverkehrs.....	239
A2.1 Begriffsbestimmungen	239
A2.1.1 System, Modell und Simulation.....	239
A2.1.2 Straßengüterverkehr und Nutzfahrzeug	241
A2.2 Beschreibung des Straßengüterverkehrssystems der BRD	243
A2.2.1 Transportsysteme	243
A2.2.1.1 Transportgüter und Ladungen	244
A2.2.1.2 Transportketten.....	245
A2.2.1.3 Transportnetzstrukturen.....	245
A2.2.1.4 Typische Transportsysteme von Unternehmen	247
A2.2.1.5 Fazit	248
A2.2.2 Nutzfahrzeugsysteme	249
A2.2.2.1 Typologie von einzelnen und kombinierten Nutzfahrzeugen	249
A2.2.2.2 Höchstzulässige Abmessungen und Gewichte	250
A2.2.2.3 Einsatzspezifische Aufbauten.....	252
A2.2.2.4 Fahrgestell	255
A2.2.2.5 Motorisierung	258
A2.2.2.6 Zusammenfassung und Fazit	260
A2.2.3 Infrastruktursysteme.....	261
A2.2.3.1 Klassifikation des Straßennetzes (Straßenkategorien)	262
A2.2.3.2 Ausdehnung und Funktionalität des Straßennetzes.....	265
A2.2.3.3 Transportstationen	266
A2.2.3.4 Zusammenfassung und Fazit	268
A2.3 Modellierung und Simulation	269
A2.3.1 Allgemeine Beschreibung von mathematischen Modellen	270
A2.3.2 Klassifikation von Simulationsmodellen	270
A2.3.3 Simulationsmethoden.....	273
A2.3.3.1 Kontinuierliche Simulation	273

A2.3.3.2 Diskrete bzw. ereignisdiskrete Simulation	274
A2.3.3.3 Kombination von Simulationsmethoden.....	278
A2.3.3.4 Zusammenfassung und Fazit.....	281
A2.3.4 Modellierungskonzepte	283
A2.3.4.1 Klassifikation nach Beschreibungsart.....	283
A2.3.4.2 Klassifikation nach Abbildungsgenauigkeit	284
A2.3.4.3 Zusammenfassung und Fazit.....	290
A2.3.5 Ablauf einer Simulationsstudie	290
A2.3.5.1 Vergleich der unterschiedlichen Vorgehensweisen.....	291
A2.3.5.2 Beschreibung der Phasen und Schritte.....	295
A2.3.6 Zusammenfassung und Fazit	304
Anhang 3: Vollastkennlinien	308
Anhang 4: HBEFA-Fahrzyklen	310
Anhang 5: Verfahren zur Anpassung der Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzyklus	321
Anhang 6: Simulationslaufdaten des SNF-FDM	323
Anhang 7: Reale Verbrauchskennfelder von Dieselmotoren (u. a. für Nutzfahrzeuge).....	328
Anhang 8: Kalibrierungsergebnisse (synthetische Verbrauchskennfelder)	330
Anhang 9: Verkehrsdaten deutscher SNF 2010.....	340
Anhang 10: Zwischenergebnisse zum SNF-Fahrtenkettenmodell	346
A10.1 Iterativ-sequentielles Optimierungsverfahren (ISOV)	346
A10.2 Fahrtenkettenkonstruktion	348
A10.3 Visualisierung des Simulationsmodells.....	355
Anhang 11: Simulationsergebnisse aus Phase 1.....	357
Anhang 12: Simulationsergebnisse aus Phase 2.....	359
Anhang 13: Fahrpersonalkosten	367