

**Entwicklung eines integrierten
Kraftstoffverbrauchs- und Fahrtenkettenmodells
des Straßengüterverkehrs
am Beispiel schwerer Nutzfahrzeuge**

Zur Analyse und Bewertung von zeitlich wirksamen
Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen
wie reduzierten Höchstgeschwindigkeiten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Alexander Kaiser
geb. am 11.08.1984 in Magdeburg
genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Zadek

Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Promotionskolloquium am 19. Juni 2018 in Magdeburg

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 (TREMODO).....	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/TREMOD	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

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: Volllastkennlinien	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