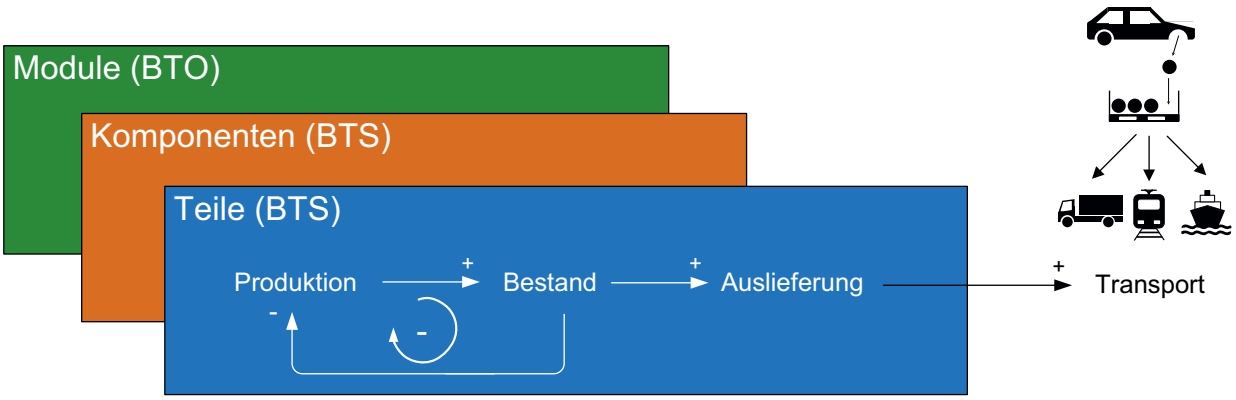
Ökologische und ökonomische Effekte einer Regionalisierung der Automobilzulieferer – Ein systemdynamisches Wirkungsmodell

André Kühn



Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI

ISI-Schriftenreihe »Innovationspotenziale«

André Kühn

Ökologische und ökonomische Effekte einer Regionalisierung der Automobilzulieferer – Ein systemdynamisches Wirkungsmodell

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon 0721 6809-0
Telefax 0721 689152
E-Mail info@isi.fraunhofer.de
URL www.isi.fraunhofer.de

D 830

Zugl.: Hamburg-Harburg, TU, Diss., 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISSN: 1612-7455
ISBN: 978-3-8396-1116-6

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2016
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen

Ökologische und ökonomische Effekte einer Regionalisierung der Automobilzulieferer - Ein systemdynamisches Wirkungsmodell

Vom Promotionsausschuss der

Technischen Universität Hamburg-Harburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

André Kühn

aus

Karlsruhe

2016

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig
Institut für Verkehrsplanung und Logistik
Technische Universität Hamburg-Harburg

Prof. Dr. rer. pol. Wolfgang Kersten
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Technische Universität Hamburg-Harburg

Tag der mündlichen Prüfung: 05.09.2016

Danksagung

Der größte Dank für den Abschluss meiner Dissertation gilt meiner Doktormutter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) für die hervorragende Betreuung sowie die umfassenden Diskussionen und Anregungen während der gesamten Dissertation. Ebenfalls danke ich meinem Zweitgutachter Prof. Dr. Wolfgang Kersten.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Mentor Michael Krail, meinen Kollegen Claus Doll, Simon Glöser, Till Gnann, Frank Marscheider-Weidemann und Marcel Soulier für die zahlreichen und wertvollen Diskussionen.

Großer Dank gebührt meiner Frau Isabell, die mich über die gesamte Zeit mental unterstützt hat und stets für inhaltliche Diskussionen zur Verfügung stand.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern Angelika und Wolfgang, die mich während meiner gesamten Laufbahn weit über das zu erwartende Maß unterstützt haben.

Abschließend möchte ich mich bei Joachim Dörich für das stets offene Ohr, das große Interesse an meiner Arbeit und die langjährige Unterstützung bedanken.

Karlsruhe, 05.09.2016

Inhaltsübersicht

1 Einleitung 1

1.1 Problemstellung 1

1.2 Zielsetzung, Forschungsfrage und Forschungsgegenstand 7

1.3 Vorgehen und Struktur der Arbeit 8

2 Ein systemdynamischer Ansatz zur Ableitung eines Gestaltungsmodells 11

2.1 Systemtheoretische Grundlagen - Zusammenhang zwischen Systemstruktur, Systemzustand und Systemverhalten 11

2.2 Modellbasierte Simulation von Zustandsänderungen in Systemen 17

2.3 Wirkungsanalyse nach Bossel 19

2.4 Modellierungsmethoden zur Überführung von Wirkungsgraphen in Gestaltungsmodelle 21

2.5 Simulation von komplexem Systemverhalten mit System Dynamics 23

3 State of the Art der Modellierung transportbedingter Wirkungen auf Deutschland 25

3.1 TREMOD: Ein Rechenmodell zur Bestimmung von verkehrsbedingten Schadstoffemissionen 25

3.2 VALIDATE: Ein netzbasiertes Verkehrsprognosemodell 27

3.3 ASTRA: Ein systemdynamisches Modell zur Bewertung von Verkehrs-, Technologie- und Klimaschutzpolitiken 30

3.4 GLOMO: Das Global Mobility Model 32

3.5 Schlussfolgerungen für die eigene Modellierung 34

4 Abgrenzung und Beschreibung des Systems „Automobilindustrie“ 35

4.1 Sachliche, räumliche und zeitliche Systemgrenzen – Ein Beschreibungsmodell 35

4.2 Wirkungszusammenhänge im System „Automobilindustrie“ – Ein erklärendes Wortmodell 36

4.3 Schlussfolgerung aus der Systembeschreibung 47

5 Wirkungsanalyse und Ableitung eines Wirkungsmodells für das System „Automobilindustrie“ 49

5.1 Analyse der Wirkungsbeziehungen innerhalb der Subsysteme 49

5.2 Ein systemdynamisches Gestaltungsmodell zur Simulation von Zustandsänderungen im System „Automobilindustrie“ 88

5.3 Modellvalidierung und –kalibrierung 141

6 Erkenntnisse über das Systemverhalten zur Definition von Regionalisierungsszenarien 147

6.1 Entwicklung des Transportaufkommens in der Beschaffungslogistik bis zum Jahr 2030 147

6.2 Fahrleistungsintensität und Verkehrsmenge in der Beschaffungslogistik 154

6.3 CO_2-Emissionen in der Beschaffungslogistik 159

6.4 Transportkosten in der Beschaffungslogistik 161

6.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse über das Systemverhalten 163

7 Szenarien der Regionalisierung und Ergebnisse der Simulation 165

7.1 Szenarien für regionale Zulieferstrukturen 165

7.2 Auswirkungen der Regionalisierung auf Verkehrskennziffern 174

7.3 Auswirkungen der Regionalisierung auf CO_2-Emissionen und Transportkosten 187

7.4 Auswirkungen der Regionalisierung auf Luftschadstoff- und Geräuschemissionen sowie die Schädigungen des Straßenoberbaus 201

7.5 Auswirkungen der Regionalisierung auf Logistikkosten und Supply-Chain-Risiken 207

7.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Umsetzungswahrscheinlichkeit einer regionalen Zulieferstruktur 221

7.7 Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Förderung von regionalen Zulieferstrukturen 226

8 Zusammenfassung der Arbeit und Beantwortung der Forschungsfrage 231

9 Zukünftige Entwicklungen in der Automobil-industrie und weiterer Forschungsbedarf 237

9.1 Veränderungen in der Automobilindustrie ab dem Jahr 2025 237

9.2 Weiterer Forschungsbedarf 241

Literaturverzeichnis 247

Anhang 273

Inhaltsverzeichnis

Danksagung ..... **I**

Inhaltsübersicht ..... **III**

Inhaltsverzeichnis ..... **V**

Abbildungsverzeichnis ..... **XI**

Tabellenverzeichnis ..... **XVI**

Abkürzungsverzeichnis ..... **XIX**

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung 1

1.1.1 Der Güterverkehrssektor als Verursacher von Umweltnutzung und Ressourcenverbrauch 1

1.1.2 Gründe für wachsende Güterbeförderungs- und Fahrleistungen 2

1.1.3 Handlungsspielräume zur Reduzierung von güterverkehrsbedingter Umweltnutzung und Ressourcenverbrauch 5

1.1.4 Vereinbarkeit von Umweltschutz und betriebswirtschaftlichen Zielsetzungen 6

1.2 Zielsetzung, Forschungsfrage und Forschungsgegenstand 7

1.3 Vorgehen und Struktur der Arbeit 8

2 Ein systemdynamischer Ansatz zur Ableitung eines Gestaltungsmodells **11**

2.1 Systemtheoretische Grundlagen - Zusammenhang zwischen Systemstruktur, Systemzustand und Systemverhalten 11

2.1.1 Abgrenzung von Systemen 12

2.1.2 Systemstruktur 13

2.1.3 Systemzustände 14

2.1.4 Systemverhalten 15

2.2 Modellbasierte Simulation von Zustandsänderungen in Systemen 17

2.3 Wirkungsanalyse nach Bossel 19

2.4 Modellierungsmethoden zur Überführung von Wirkungsgraphen in Gestaltungsmodelle 21

2.5 Simulation von komplexem Systemverhalten mit System Dynamics 23

3 State of the Art der Modellierung transportbedingter Wirkungen auf Deutschland 25

3.1 TREMOD: Ein Rechenmodell zur Bestimmung von verkehrsbedingten Schadstoffemissionen 25

3.2 VALIDATE: Ein netzbasiertes Verkehrsprognosemodell 27

3.3 ASTRA: Ein systemdynamisches Modell zur Bewertung von Verkehrs-, Technologie- und Klimaschutzpolitiken 30

3.4 GLOMO: Das Global Mobility Model 32

3.5 Schlussfolgerungen für die eigene Modellierung 34

4 Abgrenzung und Beschreibung des Systems „Automobilindustrie“ 35

4.1 Sachliche, räumliche und zeitliche Systemgrenzen – Ein Beschreibungsmodell 35

4.2 Wirkungszusammenhänge im System „Automobilindustrie“ – Ein erklärendes Wortmodell 36

4.2.1 Wortmodell des Subsystems NACHFRAGE 38

4.2.2 Wortmodell des Subsystems PRODUKTION 39

4.2.3 Wortmodell des Subsystems BESCHAFFUNG 40

4.2.4 Wortmodell des Subsystems TRANSPORT 43

4.2.5 Wortmodell des Subsystems NUTZFAHRZEUGFLOTTE 46

4.3 Schlussfolgerung aus der Systembeschreibung 47

5 Wirkungsanalyse und Ableitung eines Wirkungsmodells für das System „Automobilindustrie“ 49

5.1 Analyse der Wirkungsbeziehungen innerhalb der Subsysteme 49

5.1.1 Subsystem NACHFRAGE 50

5.1.2 Subsystem PRODUKTION 55

5.1.3 Subsystem BESCHAFFUNG 62

5.1.4 Subsystem TRANSPORT 73

5.1.4.1 Verkehrsmittelwahl 73

5.1.4.2 Fahrzeugbedarf 76

5.1.5 Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE 84

5.2 Ein systemdynamisches Gestaltungsmodell zur Simulation von Zustandsänderungen im System „Automobilindustrie“ 88

5.2.1 Modellstruktur 89

5.2.2 Wirkungsmodell zur Abschätzung transportbedingter ökologischer Effekte 90

5.2.2.1 Treibhausgasemissionen 91
5.2.2.2 Luftschadstoffe 96
5.2.2.3 Geräuschemissionen 101
5.2.2.4 Abnutzung der Infrastruktur 108
5.2.2.5 Zusammenhang zwischen exogenen und endogenen Steuerungsgrößen im ökologischen Wirkungsmodell 111
5.2.3 Wirkungsmodell zur Abschätzung transportbedingter betriebswirtschaftlicher Effekte 111
5.2.3.1 Logistikkosten 112
5.2.3.1.1 Transportkosten 113
5.2.3.1.2 Bestands- und Lagerkosten 123
5.2.3.1.3 Behälterkosten 126
5.2.3.2 Schadenskosten durch Risiken in der Lieferkette 128
5.2.3.2.1 Lieferverzug als bedeutendstes Geschäftsrisiko 130
5.2.3.2.2 Ursache von Lieferverzügen 130
5.2.3.2.3 Wirkungen von Lieferverzügen 134
5.2.3.3 Zusammenhang zwischen exogenen und endogenen Steuerungsgrößen im betriebswirtschaftlichen Wirkungsmodell 140
5.3 Modellvalidierung und –kalibrierung 141

6 Erkenntnisse über das Systemverhalten zur Definition von Regionalisierungsszenarien 147

6.1 Entwicklung des Transportaufkommens in der Beschaffungslogistik bis zum Jahr 2030 147
6.1.1 Entwicklung der Pkw-Produktion an deutschen Standorten 147
6.1.2 Entwicklung der Produktionsmenge im Beschaffungsnetzwerk 150
6.1.3 Entwicklung des Transportaufkommens in der Beschaffungslogistik 152
6.2 Fahrleistungsintensität und Verkehrsmenge in der Beschaffungslogistik 154
6.3 CO_2-Emissionen in der Beschaffungslogistik 159
6.4 Transportkosten in der Beschaffungslogistik 161
6.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse über das Systemverhalten 163

7 Szenarien der Regionalisierung und Ergebnisse der Simulation 165

7.1 Szenarien für regionale Zulieferstrukturen 165
7.1.1 Regionalisierungsszenario R1: Verlagerung der Tier-1-Zulieferer in lokale Zulieferparks 166
7.1.2 Regionalisierungsszenario R2: Verlagerung der Tier-2-Produktion nach Europa 169
7.1.3 Regionalisierungsszenario R3: Verlagerung der Tier-3-Produktion nach Europa 170
7.1.4 Vergleich der Regionalisierungsszenarien 171
7.2 Auswirkungen der Regionalisierung auf Verkehrskennziffern 174
7.2.1 Veränderungen der Güterbeförderungsleistung 174
7.2.2 Verlagerungen zwischen den Verkehrsmitteln 178
7.2.3 Einfluss veränderter Güterbeförderungsleistungen im Straßengüterverkehr auf Fahrleistung und Nutzfahrzeugflotte 180
7.2.3.1 Nutzfahrzeugbedarf nach Größenklassen 182
7.2.3.2 Nutzfahrzeugbedarf nach Fahrleistungsklassen 183
7.2.3.3 Nutzfahrzeugbestand nach Emissionsklassen 186
7.3 Auswirkungen der Regionalisierung auf CO_2-Emissionen und Transportkosten 187
7.3.1 Regionalisierungsbedingte Veränderungen der CO_2-Emissionen 187
7.3.2 Regionalisierungsbedingte Veränderungen der Transportkosten 192
7.3.3 Vereinbarkeit ökologischer und betriebswirtschaftlicher Ziele bei einer Regionalisierung - Break-Even-Transportentfernungen 194
7.3.4 Sensitivitäten der Ergebnisse durch Unsicherheiten bei der Entwicklung von CO_2-Emissionen und Transportkosten 198
7.3.4.1 Auswirkung einer Variation der Kraftstoffverbrauchsreduktion auf die CO_2-Emissionen 198
7.3.4.2 Auswirkungen einer Variation des Rohölpreises auf die Transportkosten 200
7.3.4.3 Auswirkungen einer Variation der Fahrpersonalkosten auf die Transportkosten 200
7.3.4.4 Zusammenfassung der Sensitivitäten 201
7.4 Auswirkungen der Regionalisierung auf Luftschadstoff- und Geräuschemissionen sowie die Schädigungen des Straßenoberbaus 201
7.4.1 Luftschadstoffe 201

7.4.2 Geräuschemissionen 203
7.4.3 Schädigung des Straßenoberbaus 206
7.5 Auswirkungen der Regionalisierung auf Logistikkosten und Supply-Chain-Risiken 207
7.5.1 Behälterkosten 208
7.5.2 Lagerkosten 209
7.5.3 Supply-Chain-Risiken 211
7.5.3.1 Auswirkungen regionalisierter Zuliefernetzwerke auf den Sicherheitsbestand 212
7.5.3.2 Auswirkungen regionalisierter Zuliefernetzwerke auf Schadens- und Vermeidungskosten 216
7.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Umsetzungswahrscheinlichkeit einer regionalen Zulieferstruktur 221
7.7 Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Förderung von regionalen Zulieferstrukturen 226

8 Zusammenfassung der Arbeit und Beantwortung der Forschungsfrage 231

9 Zukünftige Entwicklungen in der Automobil-industrie und weiterer Forschungsbedarf 237

9.1 Veränderungen in der Automobilindustrie ab dem Jahr 2025 237
9.1.1 Einfluss einer wachsenden Nachfrage nach alternativen Antriebskonzepten auf die Beschaffungsstrukturen 237
9.1.2 Veränderung der Standortwahl durch Digitalisierung und Automatisierung der Produktion (Industrie 4.0) 239
9.2 Weiterer Forschungsbedarf 241
9.2.1 Durch Veränderungen in der Automobilindustrie implizierter Forschungsbedarf 242
9.2.2 Weitere Detaillierung der Systemanalyse 242
9.2.3 Forschungsbedarf außerhalb der räumlichen Systemgrenzen 244
9.2.4 Forschungsbedarf außerhalb der sachlichen Systemgrenzen 244

Literaturverzeichnis 247

Anhang 273

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Güterverkehrsentwicklung in Deutschland ... 3

Abbildung 1-2: Einflussfaktoren der Logistik auf Umwelt- und Ressourcennutzung ... 5

Abbildung 1-3: Struktur der Arbeit ... 10

Abbildung 2-1: Darstellung eines Systems ... 13

Abbildung 2-2: Ausgewählte Muster von komplexem Systemverhalten ... 16

Abbildung 2-3: Systematische Darstellung der Wirkungsanalyse ... 20

Abbildung 3-1: TREMOD-Berechnungsschema ... 26

Abbildung 3-2: Vierstufiger Algorithmus zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage ... 29

Abbildung 3-3: Teilmodelle von ASTRA und deren Interaktionen ... 30

Abbildung 3-4: Modellstruktur des Modells GLOMO ... 33

Abbildung 4-1: Subsystemstruktur des Systems Automobilindustrie ... 37

Abbildung 4-2: Pyramidale Zulieferkette ... 41

Abbildung 4-3: Wirkung einer Modularisierung der Produktion auf die Transportlogistik ... 45

Abbildung 5-1: Anteile der Hersteller Audi, BMW und Daimler am gesamten Pkw-Bestand im Jahr 2012 ... 52

Abbildung 5-2: Aufteilung des Gesamtumsatzes der deutschen Automobilhersteller nach Märkten im Jahr 2014 ... 53

Abbildung 5-3: Wirkungsgraphen des Subsystems NACHFRAGE ... 54

Abbildung 5-4: Produktionszahlen in den Jahren 2012, 2013 und 2014 und produzierte Fahrzeugsegmente der Hersteller an den jeweiligen Standorten ... 55

Abbildung 5-5: Wirkungsgraphen des Subsystems PRODUKTION ... 56

Abbildung 5-6: Modulzusammensetzung eines Pkw ... 58

Abbildung 5-7: Kumulierter Anteil der Module am Gesamtgewicht eines Fahrzeuges ... 61

Abbildung 5-8: Wirkungsgraphen des Subsystems BESCHAFFUNG ... 63

Abbildung 5-9: Systemdynamischer Zusammenhang zwischen Bestand und Produktion ... 65

Abbildung 5-10: Algorithmus zur Bestimmung der Entfernungen zwischen OEM und Tier-1-Zulieferer ... 67

Abbildung 5-11: Produktionssystem für Motoren und zentrale Fahrwerkskomponente ... 68

Abbildung 5-12: Durchschnittliche Entfernung zwischen Motorenproduktion und Endmontage 69

Abbildung 5-13: Verteilung der Entfernungen zwischen Tier-1 und OEM 70

Abbildung 5-14: Beschaffung von Komponenten, Teilen und Rohstoffen nach Regionen 71

Abbildung 5-15: Importe der Warengruppe Kfz-Teile aus Europa nach Herkunftsländern 72

Abbildung 5-16: Verkehrsträgeraffinitäten von Zulieferbeziehungen 75

Abbildung 5-17: Werkstoffdichten und Materialzusammensetzung des Gesamtfahrzeuges und der Module 78

Abbildung 5-18: Verteilung der Anteile der Ladungsträger am Gesamtgewicht der Ladeeinheit für Module und Zulieferstufen 79

Abbildung 5-19: Wirkungsgraphen des Subsystems TRANSPORT 83

Abbildung 5-20: Wirkungsgraphen des Subsystems NUTZFAHRZEUGFLOTTE 84

Abbildung 5-21: Aging-Chain des Bestandes an Nutzfahrzeugen 85

Abbildung 5-22: Struktur eines systemdynamischen Modells zur Abschätzung regionalisierungs-bedingter ökologischer und betriebswirtschaftlicher Effekte 90

Abbildung 5-23: Schadstoffkonzentration im Abgas eines Dieselmotors bei Variation des Luftverhältnisses 100

Abbildung 5-24: Abhängigkeit zwischen Mittelungspegel und durchschnittlicher täglicher Verkehrsstärke (DTV) bei unterschiedlichen Lkw-Anteilen 104

Abbildung 5-25: Kostenkomponenten des Lkw-Transports 115

Abbildung 5-26: Entwicklung und Zusammensetzung des nominalen Netto-Dieselpreises 116

Abbildung 5-27: Entwicklung der nominalen Transportkosten für Sattelzüge abhängig vom Dieselpreis und der Jahresfahrleistung 119

Abbildung 5-28: Aufteilung und absolute Entwicklung der Gesamtkosten (2014), abhängig von ausgewählten jährlichen Fahrleistungen für die Gewichtsklasse SZM 123

Abbildung 5-29: Ishikawa-Diagramm zur Darstellung der Kausalitätsbeziehungen für Lieferverzüge in der Supply Chain 131

Abbildung 5-30: Ablaufdiagramm der Modellkalibrierung 142

Abbildung 5-31: Modellvalidierung NACHFRAGE und PRODUKTION 143

Abbildung 5-32: Boxplot der Jahresfahrleistungsverteilung einer Stichprobe von Gebrauchtfahrzeugen (Sattelzugmaschinen) und Median der Jahresfahrleistungsverteilung im Modell ... 144

Abbildung 6-1: Entwicklung des kumulierten jährlichen Pkw-Produktion aller deutschen Produktionsstandorte (Modellergebnisse) ... 148

Abbildung 6-2: Zusammenhang zwischen Modulen und Modul-Äquivalenten ... 150

Abbildung 6-3: Entwicklung der Produktionsmengen in den Zulieferstufen der Beschaffungslogistik (Modellergebnisse) ... 151

Abbildung 6-4: Sicherheitsbestandsentwicklung in den Zulieferstufen der Beschaffungslogistik (Modellergebnisse) ... 152

Abbildung 6-5: Jährliches Transportaufkommen im Jahr 2014 und 2030 (Modellergebnisse) ... 154

Abbildung 6-6: Maximale Auslastung der Nutzlast beim Transport von Modulen und Komponenten am Beispiel des Sattelzuges (Modellergebnisse) ... 155

Abbildung 6-7: Maximale Auslastung der Nutzlast in den Zulieferstufen am Beispiel des Sattelzuges (Modellergebnisse) ... 156

Abbildung 6-8: Fahrleistungsintensitäten in den Zulieferstufen (Modellergebnisse) ... 157

Abbildung 6-9: Anzahl täglicher Lkw-Fahrten der Beschaffungslogistik im Zielverkehr zu den Produktionsstandorten der OEM (Modellergebnisse) ... 158

Abbildung 6-10: CO_2-Emissionen in den Zulieferstufen (Modellergebnisse) ... 160

Abbildung 6-11: CO_2-Emissionen des Transports in der Tier-1- und Tier-2-Zulieferstufe (Modellergebnisse) ... 161

Abbildung 6-12: Transportkosten in den Zulieferstufen (Modellergebnisse für das Jahr 2030 und bei einem Rohölpreis von 112 US-Dollar/Barrel) ... 162

Abbildung 6-13: Transportkosten für Modul-Äquivalente in den Zulieferstufen Tier-1 und Tier-2 (Modellergebnisse für das Jahr 2030) ... 163

Abbildung 7-1: Modellzyklen der OEM-Produktionsstandorte ... 168

Abbildung 7-2: Veränderung der Entfernungen in Szenario R1 ... 169

Abbildung 7-3: Vergleich der Regionalisierungsszenarien ... 173

Abbildung 7-4: Entwicklung der Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse) ... 176

Abbildung 7-5: Entwicklung der Fahrleistung des Verkehrsträgers Straße im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse) ... 180

Abbildung 7-6: Lkw-Fahrleistung nach Zulieferstufen in den Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030) ... 181

Abbildung 7-7: Fahrzeugbedarf in der Beschaffungslogistik nach Gewichtsklassen für die Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 183

Abbildung 7-8: Verteilung des Nutzfahrzeugbestandes nach Jahresfahrleistungsklassen (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 184

Abbildung 7-9: Zusammensetzung der Nutzfahrzeugflotte nach Schadstoffnormen (Modellergebnisse) 186

Abbildung 7-10: CO_2-Emissionen der gesamten Lieferkette (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – 10 % effizientere Lkw) 189

Abbildung 7-11: Transportbedingte CO_2-Emissionen der gesamten Lieferkette nach OEM-Produktionsstandorten (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – 10 % effizientere Fahrzeuge) 190

Abbildung 7-12: Entwicklung der transportbedingten CO_2-Emissionen in den Szenarien im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse) 191

Abbildung 7-13: Entwicklung der kumulierten transportbedingten CO_2-Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse) 192

Abbildung 7-14: Transportkosten der gesamten Lieferkette (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – Ölpreis 112 US-Dollar/Barrel; 10 % effizientere Lkw) 193

Abbildung 7-15: Transportkosten der gesamten Lieferkette nach OEM-Produktionsstandorten (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – Ölpreis 112 US-Dollar/Barrel; 10 % effizientere Fahrzeuge) 193

Abbildung 7-16: Unterschiede der Emissionen (EM) und Transportkosten (C_T) (Tier-2) zwischen außereuropäischer und innereuropäischer Beschaffung (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 195

Abbildung 7-17: Sensitivitäten des CO_2-Ausstoßes bezüglich der Kraftstoffverbrauchsreduktion (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 199

Abbildung 7-18: Sensitivitäten der Transportkosten bezüglich des Rohölpreises (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 200

Abbildung 7-19: Jährliche Emission von Luftschadstoffen in den Szenarien (Modellergebnisse) 202

Abbildung 7-20: Vergleich der Anzahl täglicher Lkw-Fahrten im Zielverkehr zu den Produktionsstandorten der OEM in den Szenarien Basis und R1 (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 204

Abbildung 7-21: Straßengüterverkehrsbedingte Betriebsstunden von Sattelzügen in den Szenarien Basis, R1, R2 und R3 (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 205

Abbildung 7-22: Schädigungsindex für den Straßenoberbau (Modellergebnisse) 207

Abbildung 7-23: Anzahl der zum Transport benötigten Ladungsträger und deren Behälterwert im Jahr 2030 (Modellergebnisse) 208

Abbildung 7-24: Entwicklung der Gesamtbestände aller Zulieferstufen und der benötigten Lagerfläche (Modellergebnisse)..... 210

Abbildung 7-25: Mittlere Logistikkosten in den Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 211

Abbildung 7-26: Entwicklung des Sicherheitsbestandes im Basisszenario mit und ohne Berücksichtigung von Transportrisiken (Modellergebnisse) 213

Abbildung 7-27: Anzahl der Unfälle je Zeitperiode in den Szenarien Basis und R1 (Modellergebnisse) 214

Abbildung 7-28: Differenz (Szenario R_n – Basis) der Bestände (Modellergebnisse) 215

Abbildung 7-29: Schadensausmaß mit und ohne Einsatz von Kleintransportern im Basisszenario auf der Relation Tier-1 - OEM (Modellergebnisse für das Jahr 2030)..... 217

Abbildung 7-30: Fahrzeiten zwischen Tier-1-Zulieferer und den OEM Produktionsstandorten (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 218

Abbildung 7-31: Schadenskosten im Basisszenario und in Szenario R1 (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 219

Abbildung 7-32: Schadensausmaß in den OEM-Produktionswerken in den Szenarien Basis und R1 (Modellergebnisse für das Jahr 2030)..... 220

Abbildung 7-33: Benötigte und vorhandene Hallenfläche in den Lieferantenparks 229

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich unterschiedlicher Modellierungsumgebungen 21

Tabelle 5-1: Ausgewählte theoretische und empirische Grundlagen zur Erstellung der Wirkungsgraphen für die Subsysteme..... 49

Tabelle 5-2: Kapazitäten der Gewichtsklassenvon Nutzfahrzeugen 81

Tabelle 5-3: CO_2 – Emissionen ausgewählter Energieträger bei vollständiger Verbrennung..... 94

Tabelle 5-4: Entwicklung der spezifischen CO_2 – Emissionen [g/km] 1985 bis 2014 (Tank-to-wheel (TTW)) 95

Tabelle 5-5: Emissionsfaktoren unterschiedlicher Verkehrsträger im Verhältnis zur eingesetzten Arbeit..... 98

Tabelle 5-6: Schadstoffgrenzwerte der EURO-Abgasnormen..... 100

Tabelle 5-7: Schalldruckpegel L_{max} unterschiedlicher Aktivitäten im Straßengüterverkehr im Vergleich..... 106

Tabelle 5-8: Maximales Schädigungspotential unterschiedlicher Gewichtsklassen 110

Tabelle 5-9: Ausgewählte Preisprognosen der International Energy Agency (IEA)..... 117

Tabelle 5-10: Sonstige spezifische Komponenten der Transportkosten je Gewichtsklasse bei einer Fahrleistung von 95.000 km/a..... 122

Tabelle 5-11: Kennzahlen ausgewählter Behälter und Ladungsträger der Automobillogistik..... 127

Tabelle 5-12: Unfallraten im Straßengüterverkehr nach Gewichtsklassen..... 133

Tabelle 5-13: Vergleich der Transportkosten unterschiedlicher Transportmittel abhängig von der Transportgeschwindigkeit 136

Tabelle 5-14: Spezifische Deckungsbeiträge ausgewählter Produktionsstandorte deutscher Automobilhersteller 138

Tabelle 6-1: Produktionsmenge der OEM-Produktionsstandorte (Modellergebnisse für das Jahr 2014 und 2030)..... 149

Tabelle 7-1: Anteil der Verkehrsmittel an der Güterbeförderungsleistung ohne Seeschiffe (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 178

Tabelle 7-2: Veränderungen der Güterbeförderungsleistung im Vergleich zum Basisszenario (Modellergebnisse für das Jahr 2030)..... 179

Tabelle 7-3: Durchschnittliche CO_2-Emissionen und Transportkosten in den Zulieferstufen (Modellergebnisse für das Jahr 2014) 194

Tabelle 7-4: Break-Even-Transportentfernungen bei der Verlagerung der Produktion nach Europa (Modellergebnisse für das Jahr 2030)..... 197

Tabelle 7-5: Überblick über ausgewählte Kennzahlen in den Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030) 224

Abkürzungsverzeichnis

AASHO	American Association of State Highway Officials (bis 1972)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (seit 1973)
ABS	Anti-Blockier-System
Abs.	Absatz
ASR	Anti-Schlupf-Regelung
ASTRA	Assessment of Transport Strategies (Modell)
B	Breite
BFStrMG	Bundesfernstraßenmautgesetz
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMW	Bayerische Motorenwerke
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BTF	Build-to-Forecast
BTO	Build-to-Order
BVWP	Bundesverkehrswegeplanung
CH_4	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
DB	Distanzband
dB(A)	Dezibel nach A-Bewertung
Destatis	Deutsches Statistisches Bundesamt
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EF	Emissionsfaktor
ETIS	European Transport Information System
EU	Europäische Union
EU-27	EU-Mitgliedsstaaten vor dem 01.07.2014 (ohne Kroatien)
FL	Fahrleistung
FLK	Fahrleistungsklasse
Fzg	Fahrzeug
g	Gramm
GBL	Güterbeförderungsleistung
GK	Gewichtsklasse (Nutzfahrzeuge)
GLOMO	Global Mobility Model
H	Höhe
HC	flüchtige Kohlenwasserstoffe
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change

JiS	Just-in-Sequence
JiT	Just-in-Time
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KLT	Kleinladungsträger
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
km	Kilometer
L	Länge
Lkw	Lastkraftwagen
mm	Millimeter
nm	Nanometer
NAPE	Nationale Plattform Energieeffizienz
NO_X	Stickoxide
NST	Nomenclature uniforme des marchandises pour les statistiques de transport, (Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik der EU)
NUTS	Nomenclatura des unités territoriales statistique (Einheitliches Regionalverzeichnis der EU)
OEM	Original Equipment Manufacturer
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Partikelmasse
ppm	Parts per Million
RdW	Rest der Welt (Länder außerhalb Europas)
t	Tonnen
tkm	Tonnenkilometer
UBA	Umweltbundesamt
UN	Vereinte Nationen
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
VDA	Verband der Automobilindustrie
VW	Volkswagen

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

1.1.1 Der Güterverkehrssektor als Verursacher von Umweltnutzung und Ressourcenverbrauch

Mit der Verankerung von Umweltschutz im Grundgesetz (Art. 20a GG) im Jahr 1994 wird der Staat zum Schutz der „natürlichen Lebensgrundlagen“ (vgl. Art. 20a GG) verpflichtet. Heute besteht in Deutschland ein breiter gesellschaftlicher Konsens darüber, dass zum Erhalt des Lebensstandards heutiger und zukünftiger Generationen der Umweltschutz als Staatsziel anerkannt werden muss. Dies spiegelt sich auch in der aktuellen Umwelt- und Klimapolitik der Bundesregierung wider. Dazu zählen auf nationaler Ebene neben dem Energiekonzept der Bundesregierung zum Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG), der Nationale Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE), das im Dezember 2014 durch das Bundeskabinett beschlossene Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 sowie der sich momentan (Stand 10/2015) in der Abstimmung befindende Klimaschutzplan 2050 (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2015). Zusätzlich zu den nationalen Bemühungen regulieren die Verordnungen EG Nr. 443/2009 und EG Nr. 510/2011 der Europäischen Kommission CO_2-Emissionen von neuen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen.

Die Emission von Treibhausgasen und der damit verbundene Klimawandel stellt derzeit die stärkste Beeinflussung der Umwelt durch den Menschen dar. Die internationale Staatengemeinschaft erkannte dies mit der Unterzeichnung des Kyoto-Protokolls im Jahr 1997 offiziell an. Darin sind auf Initiative der Vereinten Nationen völkerrechtlich verbindliche Werte zur Reduktion von Treibhausgasen festgelegt (vgl. Laurency 2013, S. 145f.). Trotz jüngsten Berichten des IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) über die negativen Auswirkungen der Treibhausgasemissionen auf das Weltklima (vgl. Pachauri und Meyer 2015, S. 40ff.), haben die führenden emittierenden Länder von Treibhausgasen (USA, China und Russland) bis heute das Kyoto-Protokoll nicht ratifiziert (vgl. Pachauri und Meyer 2015, S. 119). Bei der UN-Klimakonferenz im Dezember 2015 einigte sich die Internationale Gemeinschaft jüngst erstmalig auf einen Weltklimavertrag, der nach dem Jahr 2020 in Kraft treten soll und die Erderwärmung auf 1,5°C im Vergleich zum Jahr 1990 begrenzen soll (vgl. Frankfurter Allgemeine Zeitung 2015).

Im Wesentlichen setzen sich Treibhausgasemissionen aus Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) zusammen (vgl., Förstner 2004, S. 103) Während Methan primär bei

landwirtschaftlichen Aktivitäten entsteht (z. B. Viehzucht, Ackerbau), haben etwa 91 % der CO_2-Emissionen in Deutschland ihren Ursprung bei der Verbrennung fossiler Energieträger (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015b). Von diesen 91 % entfallen etwa zwei Drittel auf den Energiesektor und die industrielle Produktion, 21 % werden durch den Verkehrssektor und 19 % durch die privaten Haushalte emittiert (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015b).

Erfolge hinsichtlich Treibhausgasreduktionen in den Sektoren Industrie und private Haushalte (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015e) erhöhen mit Blick auf die Einhaltung von Klimaschutzzielen (z.B. Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE)) den Druck auf den Verkehrssektor. Der Anteil des Verkehrssektors an den Gesamtemissionen steigt trotz gesetzlicher Vorgaben zur Senkung von Emissionsgrenzwerten im Straßenverkehr seit dem Jahr 1990 kontinuierlich an (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015b).

Innerhalb des Verkehrssektors lassen sich mehr als 80 % der Treibhausgasemissionen dem Straßenverkehr zuordnen (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015b). Während die Personenverkehrsleistung zukünftig voraussichtlich stagniert (vgl. Schubert et al. 2014, S. 5), wird laut einem aktuellen Gutachten als Grundlage für die Bundesverkehrswegeplanung (BVWP) im Straßengüterverkehr bis zum Jahr 2030 mit einem Wachstum der Güterbeförderungsleistung von knapp 40 % gerechnet (vgl. Schubert et al. 2014, S. 8). Der Anteil des (Straßen-) Güterverkehrs wird zukünftig weiter ansteigen und somit zunehmend in den Fokus der Reduktionsmaßnahmen rücken.

Neben Treibhausgasemissionen ist der Verkehrssektor eine Quelle für weitere Umweltwirkungen: Der durch den Transport von Gütern erzeugte Verkehr verursacht Luftschadstoffe (z. B. Rußpartikel oder NO_x): Etwa die Hälfte aller NO_x-Emissionen in Deutschland können dem Verkehrssektor zugeordnet werden (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015a). Darüber hinaus ist der Verkehrssektor verantwortlich für Unfälle und Geräuschemissionen. Zusätzlich schädigt der Güterverkehr die bestehende Straßen- und Schieneninfrastruktur. Durch Instandhaltungs- und Ausbaumaßnahmen vergrößern sich die Flächenversiegelung sowie der Ressourcen- und Flächenverbrauch.

1.1.2 Gründe für wachsende Güterbeförderungs- und Fahrleistungen

Der Transport als physische Grundfunktion der Logistik führt immer zu Ressourcenverzehr und Umweltnutzung (vgl. Flämig 2015b, S. 33). Die Notwendigkeit der Überbrückung von Entfernungen entstand ursprünglich durch die unterschiedliche geografische Verortung von Rohstoffvorkommen und Rohstoffverwendung. So wurden bereits vor

mehreren tausend Jahren Rohstoffe auf der Seidenstraße zwischen Asien und Europa transportiert (vgl. Jahns und Schüffler 2008, S. 20). Ab dem 19. Jahrhundert entwickelten Länder und Regionen „komparative Kostenvorteile“ (Ricardo 1891) bei der Produktion von Gütern. Ricardos Theorie besagt, dass bestimmte Regionen und Länder Güter günstiger produzieren können als andere (z. B. Tuche in Großbritannien und Wein in Frankreich) (vgl. Mankiw 2004, S. 51ff.). Diese Entwicklung führte dazu, dass Regionen und Ländern untereinander Handel betrieben (vgl. Mankiw 2004, S. 52f.).

Im Zuge der Industrialisierung und der damit einhergehenden horizontalen Arbeitsteilung (vgl. Bücher 1898, S. 306ff.) wurden die Produkte nicht mehr dezentral in geografischer Nähe zur Nachfrage, sondern zentral produziert. Die dadurch entstehenden Mengendegressionseffekte (vgl. Varian 2003, S. 328f.) senkten die Produktionskosten und beschleunigten die Arbeitsteilung in der Produktion. Neben der Beschaffung von Rohstoffen erweiterte sich damit der Aufgabenbereich der Logistik um die Distribution der produzierten Waren an die Endkunden. Eine steigende Spezialisierung und Diversifizierung der produzierenden Unternehmen führte im Laufe des 20. Jahrhunderts zu einer Zunahme der vertikalen Arbeitsteilung (vgl. Bücher 1898, S. 309ff.). In der Folge entstand ein stetig wachsendes Zuliefernetzwerk zur Produktion von Halbfertigteilen. Die Beschaffungslogistik wurde durch diese Entwicklungen immer bedeutender. Diese inhaltliche und räumliche Arbeitsteilung ist der Ursprung von Transportaufkommen (gemessen in Tonnen) und Güterbeförderungsleistung (gemessen in Tonnen-Kilometer).

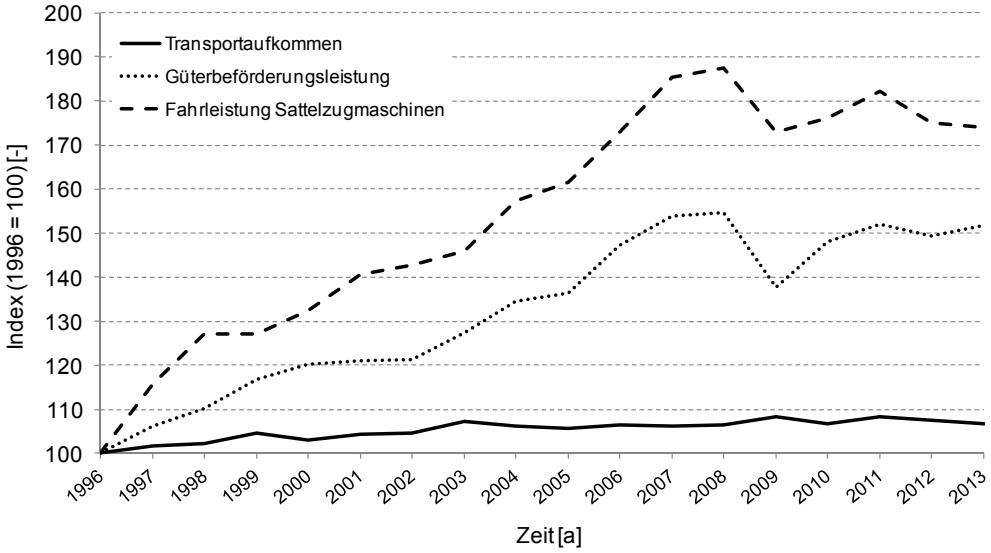


Abbildung 1-1: Güterverkehrsentwicklung in Deutschland (eigene Berechnungen basierend auf Radke 2014, S. 152 ff.)

Bedingt durch eine wachsende Arbeitsteilung stieg in Deutschland die Gütertransportintensität, als Verhältnis zwischen Güterbeförderungsleistung und preisbereinigtem Bruttoinlandsprodukt (BIP), in den letzten Jahren deutlich an (vgl. Flämig 2015b, S. 27). Dies bedeutet, dass die Güterbeförderungsleistung in den letzten Jahren stärker gewachsen ist als die wirtschaftliche Leistung Deutschlands. Bei Betrachtung der in Abbildung 1-1 dargestellten Entwicklung der drei Kernindikatoren des Güterverkehrs (Transportaufkommen, Güterbeförderungsleistung und Fahrleistung der Sattelzugmaschinen) wird deutlich, dass das Transportaufkommen in den letzten Jahren im Vergleich zum Jahr 1996 lediglich um 8 % angestiegen ist. Gleichzeitig wuchs die Güterbeförderungsleistung im selben Zeitraum um 50 %. Mit etwa 75 % fiel der Anstieg der kumulierten jährlichen Fahrleistung aller in Deutschland zugelassenen Fahrzeugen bei den Sattelzugmaschinen noch stärker aus.

Die Entwicklung der drei Indikatoren lässt sich durch zwei für den Güterverkehr relevanten Effekte erklären: Dislozierungs- und Güterstruktureffekte. Der Dislozierungseffekt beschreibt den Anstieg der Transportentfernungen durch eine räumliche Verteilung wirtschaftlicher Aktivitäten, hervorgerufen durch eine steigende Arbeitsteilung (vgl. Klaus 2008, S. 337). Dieser Effekt erklärt den Anstieg der Güterbeförderungsleistung. Der Güterstruktureffekt entsteht durch einen steigenden Anteil von hochwertigen Konsum- und Investitionsgütern am Transportaufkommen (vgl. Aberle 2000, S. 86ff.). Die Ursache ist die wachsende Arbeitsteilung und die damit verbundene steigende Anzahl an Halb- und Fertigwaren, die transportiert werden. Im Vergleich zu den klassischen Schüttgütern (z. B. Steine, Erden) ergeben sich für Halb- und Fertigwaren höhere Anforderungen an den Transport: Die transportierten Waren müssen vor Transportschäden geschützt werden. Im Gegensatz zu Schüttgütern müssen deshalb abhängig von der Beschaffenheit des Transportgutes Behälter oder Ladungsträger eingesetzt werden. Der Einsatz dieser Transportbehälter führt dazu, dass sich die Netto-Ladekapazität der Transportgefäße aller Verkehrsträger reduziert. Die Folge dieser Entwicklung zeigt sich im Indikator Fahrleistung der Sattelzugmaschinen, der dadurch stärker als die Güterbeförderungsleistung ansteigt.

Dislozierungs- und Güterstruktureffekte führten in der Vergangenheit dazu, dass, aggregiert betrachtet, in Deutschland sowohl die Güterbeförderungs- als auch die Fahrleistung stärker anstiegen als das Wirtschaftswachstum. Die Stärke der genannten Effekte variiert zwischen den unterschiedlichen Güterabteilungen. Während die Transportentfernungen in der Güterabteilung "Steine und Erden" über die letzten Jahre konstant blieb, ist die Beschaffungslogistik der deutschen Automobilindustrie durch die andauernde Verschiebung der Wertschöpfung zu den Zulieferern (vgl. Wyman 2012, S. 43) und die steigende Modularisierung der Produktion (vgl. Schneider 2011, S. 35) im besonderen Maße von Dislozierungs- und Güterstruktureffekten betroffen.

1.1.3 Handlungsspielräume zur Reduzierung von güterverkehrsbedingter Umweltnutzung und Ressourcenverbrauch

Die dynamische Entwicklung des Güterverkehrs führt zu wachsender Umwelt- und Ressourcennutzung und erfordert damit das Handeln von Politik und Wirtschaft, um die festgelegten Umweltziele zu erreichen. Die Steuerungsgrößen der Umweltwirkungen sind nach Abbildung 1-2 das Transportaufkommen, die Transportentfernungen, die Wahl des Verkehrsmittels sowie dessen Auslastung. Zusammen mit den technischen Spezifika der Fahrzeuge und den Charakteristika des Betriebs ergeben sich der Ressourcenverbrauch und die Emissionen des Transports (vgl. Flämig 2015b, S. 33f.).

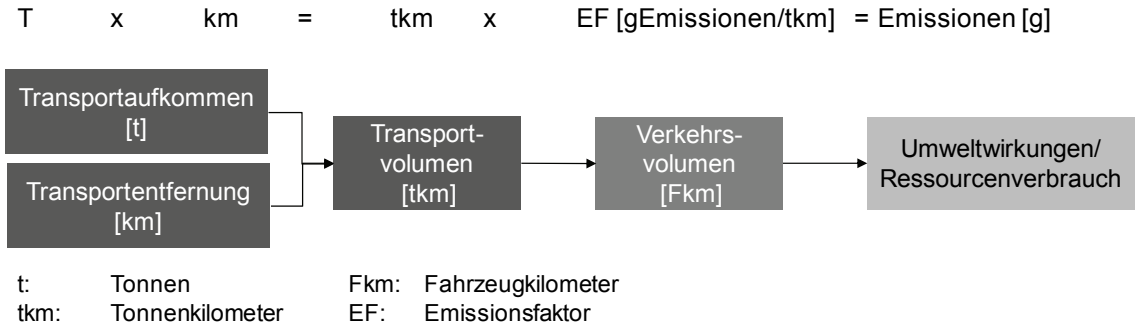


Abbildung 1-2: Einflussfaktoren der Logistik auf Umwelt- und Ressourcennutzung (leicht angepasste Darstellung basierend auf Flämig 2015b, S. 35)

Der Handlungsspielraum zur Senkung transportbedingter Umweltwirkungen besteht bei Logistikdienstleistern überwiegend in der Optimierung der Transporte und der Verlagerung auf ressourceneffizientere Verkehrsmittel (vgl. Flämig 2015b, S. 35). Fortschritte bei der Optimierung der Routenwahl sowie die Vermeidung von Leerfahrten können wichtige Impulse zur Reduktion der Fahrzeugkilometer liefern. Durch eine solche Systemoptimierung gelang es in den letzten 20 Jahren der stetigen Steigerung der Güterbeförderungsleistung entgegenzuwirken (vgl. Jung 2012, S. 455).

Die bisherigen Bemühungen der Politik zur Reduzierung der Umweltwirkungen fokussierten sich stark auf die sogenannten End-of-Pipe-Maßnahmen zur Beeinflussung der fahrzeugseitigen Emissionsquellen oder der Ausbreitung von Emissionen (z. B. Emissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe, Lärmschutzwände). Einer der Nachteile dieser „Nachbesserungsphilosophie“ (vgl. Förstner 2004, S. 1) liegt in den Wechselwirkungen zwischen den Reduktionsmaßnahmen: Beispielsweise kann eine Verminderung der Geräuschemissionen durch Elektroantriebe zu einer erhöhten Unfallgefahr führen, da heranfahrende Fahrzeuge nicht rechtzeitig akustisch wahrgenommen werden können (vgl. Peters et al. 2013, S. 239).

Für die Handlungsspielräume zur Reduzierung der transportbedingten Umweltnutzung gilt: Je früher eine Maßnahmen in den Prozess der Entstehung von Umweltwirkungen (vgl. Abbildung 1-2) eingreift, desto höher ist der Grad der Wirksamkeit und desto geringer die Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen. Obwohl entsprechende Maßnahmen zur Regionalisierung der Zulieferstrukturen derzeit weder von der Politik noch von der Industrie vorangetrieben werden, lassen sich neben Globalisierungstendenzen der Beschaffung (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 160ff.) in der deutschen Automobilindustrie bereits seit den 1990er-Jahren (z. B. SMART-Produktion in Hambach) gebündelte, regionale Zulieferbeziehungen in Form von Lieferantenparks erkennen (vgl. Schraft und Westkämper 2005, S. 104).

Durch die Einrichtung von Lieferantenparks werden die Transportentfernung zwischen den im Park angesiedelten Zulieferern und den Pkw-Produktionsstätten reduziert (vgl. Friede 2012, S.15f.). Dieser Zusammenhang legt die Hypothese nahe, dass die Verlagerung von Zulieferunternehmen in Zulieferparks sich in der gesamten Wertschöpfungskette transportreduzierend auswirken und somit die transportbedingten Umweltwirkungen gesenkt werden.

1.1.4 Vereinbarkeit von Umweltschutz und betriebswirtschaftlichen Zielsetzungen

Trotz offensichtlicher ökologischer Vorteile einer Reduzierung der Transportentfernungen lassen sich in der Praxis bis auf wenige Zulieferparks derzeit keine Tendenzen der Regionalisierung erkennen (vgl. Zanker et al. 2013, S. 6). Die Gründe dafür scheinen vielschichtig zu sein. Die mangelnden Impulse seitens der Automobilindustrie können einerseits an den nicht vorhandenen oder schwach ausgeprägten betriebswirtschaftlichen Vorteilen regionaler Zulieferstrukturen liegen. Andererseits kann eine fehlende Kostentransparenz und die damit verbundende fehlerhafte oder ausbleibende Erfassung der Logistikkosten darin resultieren, dass die betriebswirtschaftlichen Vorteile bei den Unternehmen nicht erkannt werden (vgl. Weber und Wallenburg 2010, S. 64).

Das Ausbleiben der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls durch die USA und der Widerstand der Industrie gegen die Verschärfung der Umweltgesetzgebung (z. B. Emissionsgrenzwerte für Pkw) führen zu der Vermutung, dass wirtschaftliche und klimapolitische Ziele für unvereinbar gehalten werden. Dies zeigte sich besonders während der Finanz- und Wirtschaftskrise ab dem Jahr 2008 in der Abkehr einiger Staaten von der Klimaschutzpolitik (vgl. Laurency 2013, S. 267). Zusätzlich dazu nehmen die Herausforderungen durch den globalen Wettbewerb und der damit verbundene wachsende Effizienzdruck auf die produzierende Wirtschaft zu. Die Einhal-

tung von Klimaschutzzielen wird in diesem Zusammenhang als Wettbewerbsnachteil wahrgenommen.

1.2 Zielsetzung, Forschungsfrage und Forschungsgegenstand

Ziel der Arbeit ist die Identifizierung von Potenzialen der Regionalisierung innerhalb der Zulieferstrukturen der deutschen Automobilindustrie, welche sowohl zu ökologisch als auch zu betriebswirtschaftlich positiven Effekten führen.

Aus dieser Zielsetzung lässt sich die zentrale Forschungsfrage der Arbeit ableiten:

Stellt eine Regionalisierung der Zulieferstruktur in der deutschen Automobilindustrie einen zukünftigen Entwicklungspfad zur Vereinbarkeit von ökologischen und ökonomischen Zielsetzungen dar?

Der Begriff „Regionalisierung“ bezeichnet den Prozess der Reduzierung von Transportentfernungen durch Standortverlagerungen der Zulieferer im Beschaffungsnetzwerk. Die ökologischen Wirkungen beziehen sich auf die Umweltnutzung und den Ressourcenverbrauch. Unter den ökonomischen Wirkungen werden transportlogistikrelevante Ströme finanzieller Art im gesamten Beschaffungsnetzwerk verstanden.

Durch Beantwortung der Forschungsfrage soll gezeigt werden, ob die Regionalisierung der Zulieferstruktur tatsächlich zu einer Reduzierung von ökologischen Wirkungen und zu geringeren Kosten für die produzierenden Unternehmen der Automobilindustrie führen kann. Im Falle erkennbarer positiver Effekte sollen durch die Ergebnisse zudem den beteiligten Akteuren die entsprechenden Handlungsfelder aufgezeigt werden. Diese können je nach Akteur eine Umstrukturierung der Zulieferkette oder das Setzen regulatorischer Rahmenbedingungen zur Förderung von regionalen Beschaffungsnetzwerken beinhalten. Um die Identifikation der Handlungsfelder zu präzisieren, sollen ökologische und betriebswirtschaftliche Wirkungen für vier Stufen des Zuliefernetzwerkes und alle Module der Fahrzeugproduktion getrennt bestimmt werden.

Forschungsgegenstand dieser Arbeit ist das Produktions- und Beschaffungsnetzwerk der deutschen Automobilindustrie. Unter dem Begriff „deutsche Automobilindustrie“ werden alle in Deutschland produzierenden Erstausrüstungshersteller (OEM - Original Equipment Manufacturer) und weltweit produzierende Automobilzulieferunternehmen, die sich der Wirtschaftszweigklassifikation „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ (WZ 29) des Statistischen Bundesamtes zuordnen lassen, verstanden. Das Produktionsnetzwerk von Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche und Volkswagen besteht in Deutschland derzeit (Stand 2014) aus 21 Produktionsstandor-

ten (vgl. AUDI AG 2015, BMW AG 2015e, Daimler AG 2015a, Adam Opel AG 2015, Porsche AG 2015, Volkswagen AG 2015 sowie Handke und Glückler 2010, S. 79) zur Endmontage von Personenkraftwagen (Pkw). Das Beschaffungsnetzwerk zur Materialversorgung dieser Endmontagewerke umfasst unterschiedliche Wertschöpfungsstufen, die den Rang (engl. = tier) des Zulieferers bestimmen. Die pyramidale Struktur der Zulieferindustrie reicht von den ranghöchsten Modulproduzenten (Tier-1) bis zu den Tier-n-Zulieferern in der untersten Hierarchieebene, welche Rohstoffe liefern (vgl. Fraß 2012, S. 18ff.).

1.3 Vorgehen und Struktur der Arbeit

Eine Regionalisierung der Zulieferstruktur stellt eine Gestaltung des Systems "Automobilindustrie" dar. Die Beantwortung der Forschungsfrage erfordert deshalb die Beschreibung des zu gestaltenden Systems. Um den Forschungsgegenstand gut verstehen zu können, wird aus der Struktur des Systems ein Wirkungsgraph abgeleitet. Dieser bildet die Grundlage zur Erstellung eines Gestaltungsmodells. Dieses Modell soll in der Lage sein, die Auswirkungen der Regionalisierung auf das Systemverhalten und die damit verbundenen ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen zu simulieren.

Im ersten Kapitel wird neben einer thematischen Einführung die Notwendigkeit der Untersuchung einer Regionalisierung in der Zulieferstruktur dargelegt. Daraus abgeleitet ergeben sich die Abgrenzung des Forschungsgegenstands sowie die Formulierung der Forschungsfrage. Die erläuterte Zielsetzung bestimmt abschließend die in Abbildung 1-3 dargestellte Struktur der Arbeit.

Zur Erstellung eines theoretisch konzeptionellen Rahmens für die Abhandlung wird im zweiten Kapitel ein systemdynamischer Ansatz zur Ableitung eines Gestaltungsmodells vorgestellt. Dabei werden Systeme abgegrenzt und mögliche Ausprägungen der Struktur und des Verhaltensmusters beschrieben. Die Beobachtung von Zustandsänderungen komplexer Systeme ist mit Modellsimulationen möglich. Daher werden im zweiten Kapitel drei Modellklassen und vier Modellierungsmethodiken vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Simulation von Systemzustandsänderungen bewertet.

In Kapitel 3 wird der State of the Art der Wissenschaft zur Modellierung transportbedingter Wirkungen anhand von vier ausgewählten Simulationsmodellen beschrieben, um daraus Schlussfolgerungen für die eigene Modellierung abzuleiten.

In Kapitel 4 wird aufgezeigt, dass es sich bei der deutschen Automobilindustrie um ein kompliziertes System mit komplexem Verhalten handelt und eine Regionalisierung der Zulieferstruktur eine Zustandsänderung dieses Systems darstellt. Das Beschreibungs-

modell wird durch ein erklärendes Wortmodell des Systems „Automobilindustrie“ ergänzt.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wird in Kapitel 5 durch die Analyse des Systems Automobilindustrie ein Erklärungsmodell abgeleitet. Diese dient als Grundlage zur Erstellung eines Gestaltungsmodells. Die Struktur des aus den Wirkungsgraphen abgeleiteten systemdynamischen Modells wird dargestellt und die Kategorien im ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungsmodell im Detail beschrieben. Abschließend wird durch eine Validierung die Güte des Modells überprüft.

In Kapitel 6 wird mit dem im Laufe dieser Arbeit erstellten Gestaltungsmodell das Verhalten des Systems „Automobilindustrie“ simuliert und anschließend analysiert.

Basierend auf den aus Kapitel 6 gewonnenen Erkenntnissen über das Verhalten des Systems werden in Kapitel 7 drei Szenarien der Regionalisierung definiert. Durch modellbasierte Simulationen lassen sich die ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen der Szenarien darstellen und analysieren. Auf Grundlage der Ergebnisse werden Umsetzungspotentiale für die Szenarien bestimmt und Handlungsempfehlungen für Akteure aus Politik und Wirtschaft abgeleitet.

Kapitel 8 dient der Zusammenfassung der Arbeit und der Beantwortung der in Kapitel 1 hergeleiteten Forschungsfrage.

In Kapitel 9 wird aus der Abgrenzung und der Detaillierungstiefe der Systembetrachtung der weitere Forschungsbedarf abgeleitet und in einem Ausblick mögliche zukünftige Entwicklungen in der Automobilindustrie diskutiert.

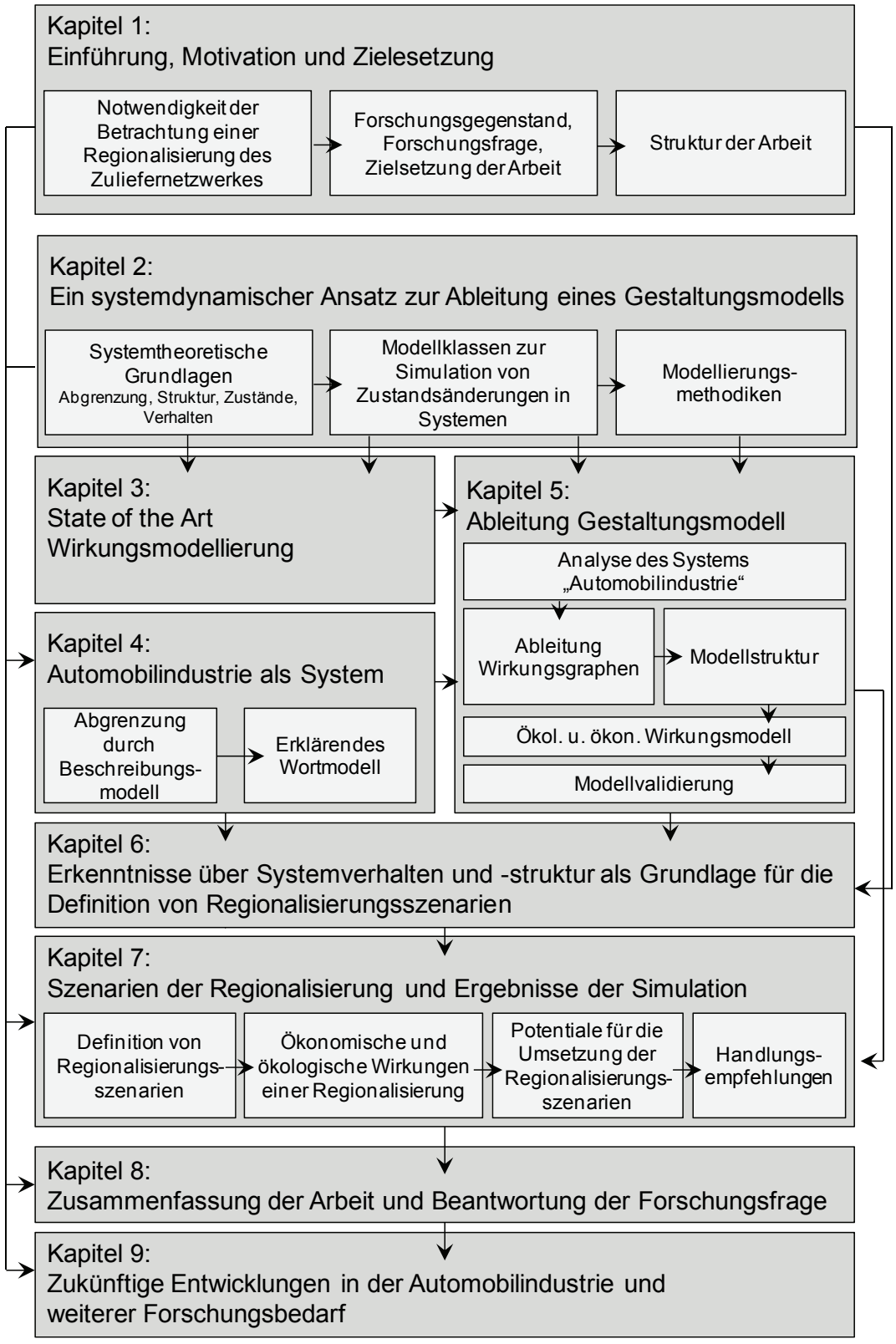


Abbildung 1-3: Struktur der Arbeit (eigene Darstellung)

2 Ein systemdynamischer Ansatz zur Ableitung eines Gestaltungsmodells

Den analytisch konzeptionellen Rahmen dieser Arbeit bildet die Systemtheorie. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wesentlichen theoretischen Grundlagen der Systemtheorie und Kybernetik abgegrenzt. Die darauf aufbauende Charakterisierung von Systemen bildet die Basis für die Beschreibung von Systemverhalten. Um das Verhalten von realen Systemen beobachten zu können, wird zudem die Modellbildung beschrieben und Modellierungsmethoden vorgestellt.

2.1 Systemtheoretische Grundlagen - Zusammenhang zwischen Systemstruktur, Systemzustand und Systemverhalten

Die Forschung auf dem Gebiet der Systemtheorie beschäftigt sich mit der Beschreibung und Analyse von Systemstrukturen und Systemverhalten (vgl. Bertalanffy 1968, S. 19ff.). Die ersten Ansätze zur Analyse von Systemverhalten wurden im Forschungsfeld der Regelungstechnik dokumentiert (vgl. Fischer 1936, S. 103ff.). Mit Einsetzen der Industriellen Revolution wuchs der Umfang der technischen Anlagen. Um diese Anlagen kontrolliert zu betreiben, mussten Steuer- und Regeleinheiten eingesetzt werden. Die Regeleinheit misst die Zustände der Anlage an unterschiedlichen Stellen und liefert diese Messwerte an die Steuereinheit. Diese ändert abhängig von den übermittelten Informationen der Regeleinheit die Betriebsparameter der Anlage, um einen durch den Bediener der Anlage vorgegebenen Zustand zu erreichen. Durch das Zusammenspiel von Steuer- und Regeleinheit lassen sich jeder Parameteränderung messbare Wirkungen in der Anlage zuordnen (z. B.: dynamische Drehzahlregelung von Gleichstrommotoren - vgl. Leonhard 1940, S. 80ff).

Der US-amerikanische Mathematiker Norbert Wiener identifizierte und beschrieb diese aus der Regelungstechnik bekannten Wirkungszusammenhänge in Themenfeldern der Technik, Gesellschaft, Biologie und Politik (vgl. Wiener 1952, S. 196ff.). Die daraus abgeleitete Theorie der „Kybernetik“ umschreibt Wiener als „Kunst des Piloten / Steuermanns“ (Wiener 1952, S. 20). Aufbauend auf Wieners Ausführungen entwickelte der Biologe von Bertalanffy die Erkenntnis, dass ein Organismus nicht durch die Beschreibung seiner Elemente, sondern erst durch Einbezug von Wirkungszusammenhängen zwischen diesen Elementen hinreichend charakterisiert werden kann (vgl. Bertalanffy 1968, S. 12). Diese Kombination aus Elementen und Wirkungszusammenhängen wird von Bertalanffy als System bezeichnet (vgl. Bertalanffy 1968, S. 38).

Auf Grundlage der allgemeinen Systemtheorie beschrieben in den frühen 1970er Jahren die Autoren von „The Limits to Growth“ (Meadows et al. 1972) die globalen Wirkungszusammenhänge zwischen Bevölkerung, industrieller Entwicklung, Ressourcenverbrauch und Nahrungsmittelkonsum (vgl. Meadows et al. 1972, S. 162ff.). Durch die vorangegangenen Entwicklungen von Jay W. Forrester in „Industrial Dynamics“ (Forrester 1961) war es zum ersten Mal möglich, eine computerbasierte Simulation von Systemverhalten durchzuführen. Die daraus gewonnene Empirie über das Verhalten von Systemen trug in erheblichem Umfang zur Weiterentwicklung der Systemtheorie bei, da sich die Auswirkungen der aus der Kybernetik bekannten Rückkopplungen innerhalb von Regelkreisen als elementarer Bestandteil des vernetzten Denkens (vgl. Vester 1974, S. 11) in Simulationen zur Nachbildung von Systemverhalten integrieren ließen.

2.1.1 Abgrenzung von Systemen

Bevor Untersuchungen zur Systemanalyse durchgeführt werden können, muss das System identifiziert und dessen Grenzen zum Umfeld festgelegt werden. Nach Luhmann ist „Alles, was vorkommt, (...) immer zugleich zugehörig zu einem System (oder zu mehreren Systemen) und zugehörig zur Umwelt anderer Systeme“ (Luhmann 1984, S. 243). Da der Begriff „Umwelt“ in dieser Arbeit bereits im Zusammenhang mit Umweltwirkungen verwendet wird, soll im Folgenden der Begriff „Umfeld“ synonym für die von Luhmann (1984, S. 243) bezeichnete „Umwelt“ verwendet werden. Die Voraussetzung für die Systemidentität ist gegeben, sobald sich System und Umfeld voneinander differenzieren lassen (vgl., Luhmann 1984, S. 243).

Der Systemumfang wird durch den Systemzweck bestimmt. Demnach lässt sich das System (endogener Bereich) sachlich von dem Systemumfeld (exogener Bereich) abgrenzen. Die Verbindung zwischen exogenem und endogenem Bereich bildet der Systemein- und -ausgang. Mit dieser Schnittstelle zwischen System und Systemumfeld können exogene Parameter auf Systemelemente einwirken und deren Zustände beeinflussen sowie Ausgangsparameter an das Systemumfeld übergeben werden und dieses beeinflussen (vgl. Bossel 2004, S. 37). Die Beziehung zu seinem Umfeld unterscheidet ein offenes von einem geschlossenen System (vgl. Forrester 1961, S. 51). Können Bereiche des Systems eigenständigen Systemzwecken zugeordnet werden, lassen sich diese als Subsysteme abgrenzen (vgl. Schade 2005, S. 6). Neben einer sachlichen Abgrenzung können Systeme und Subsysteme räumliche und zeitliche Beschränkungen aufweisen (vgl. Flämig 2004, S. 39ff.).

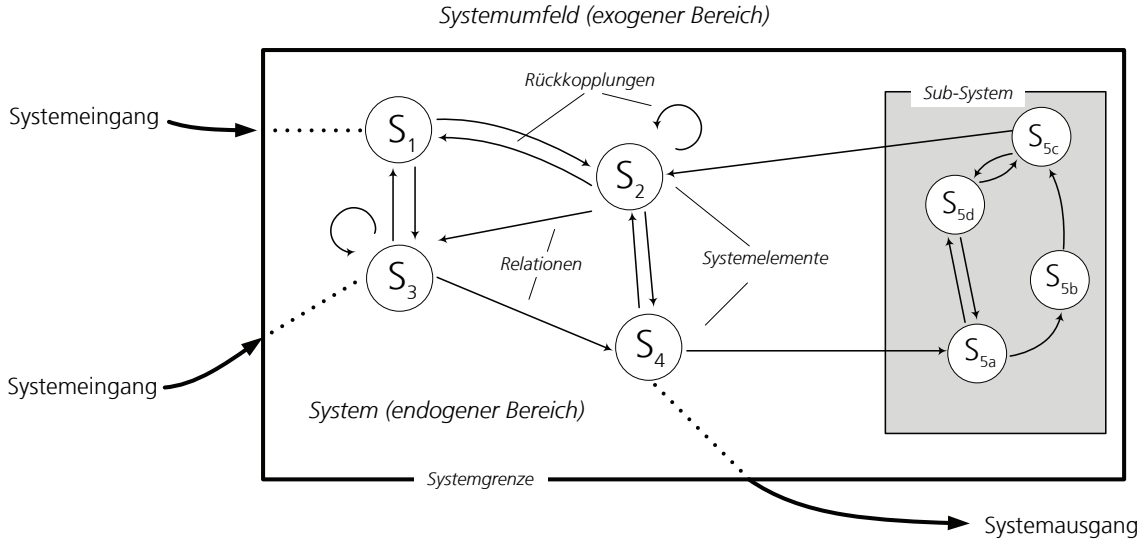


Abbildung 2-1: Darstellung eines Systems (erweiterte, eigene Darstellung basierend auf Bossel 1992b, S. 11)

2.1.2 Systemstruktur

Nach Bossel (2004) lässt sich jedem System eine eindeutige Funktion (Systemzweck) zuordnen. Dieser Systemzweck entsteht durch eine Struktur aus Systemelementen und Wirkungsverknüpfung (Relationen). Die damit verbundene Systemidentität geht verloren, wenn die Struktur des Systems verändert wird. Dies impliziert eine Nichtteilbarkeit von Systemen, da durch das Herauslösen von Elementen und Relationen der ursprüngliche Systemzweck verändert wird (vgl. Bossel 1992a, S. 16f.).

Auf Basis dieser Merkmale ergibt sich nach Klir (1991, S. 5) folgende formale Beschreibung eines Systems:

$$S = (T, R) \tag{2.1}$$

mit

S: *System*

T: *Menge an Elementen im System*

R: *Relationen zwischen den Elementen*

Ein System definiert sich als eine Menge aus Systemelementen (T) und deren Wirkungsbeziehungen (Relationen, R) (vgl. Bertalanffy 1968, S. 38). Die Systemelemente fungieren im System als „nicht weiter auflösbare Einheiten“ (Luhmann 1984, S. 43). Die Menge R der Relationen innerhalb einer Systemstruktur bilden Wirkungsketten. Eine offene Wirkungskette bezeichnet eine lineare Verkettung von Relationen und mehr als zwei Elementen, deren Anfang und Ende nicht direkt in Beziehung zueinander stehen (vgl. Strohhecker und Fischer 2008, S. 80ff.). Wirkungsketten können als geschlossen bezeichnet werden, falls die Elemente am Anfang und am Ende einer Wirkungskette miteinander durch eine Relation verbunden sind (vgl. Strohhecker und Fischer 2008, S. 80ff.). Dieser Fall wird als direkte Rückkopplung bezeichnet (vgl. Kratky 1991, S. 11). Rückkopplungen können allerdings auch indirekt über mehrere Wirkungsketten vermittelt werden. Treten innerhalb der Systemstruktur Rückkopplungen auf, so beinhalten die Systeme nach Luhmann (1984, S. 31) eine „Selbstreferenz“. Die Art der Selbstreferenz wird durch die Polarität bestimmt. Positive Rückkopplungen wirken verstärkend, negative wirken abschwächend (vgl. Sterman 2000, S. 13). Liegen selbstreferentielle Systeme vor, so lassen sich deren Beziehungen zu sich selbst klar von den Beziehungen zum Umfeld differenzieren (vgl. Luhmann 1984, S. 31ff.).

Systeme lassen sich anhand der strukturellen Eigenschaften charakterisieren. Einfache Systeme zeichnen sich durch eine geringe Anzahl an Elementen und Relationen aus. Die Wirkungsketten im System sind kurz und offen. Die Kompliziertheit eines Systems steigt mit wachsender Anzahl der Wirkungsbeziehungen und Elementen sowie der Länge der Wirkungsketten (vgl. Möller 1992 S. 10). Treten zusätzlich dazu geschlossene Wirkungsketten auf, so führen strukturell komplizierte Systemen zu komplexen Systemverhalten (vgl. Kratky 1991, S. 11).

2.1.3 Systemzustände

Elemente, welche den Zustand eines Systems zum Zeitpunkt t hinreichend beschreiben, werden als Zustandsgrößen bezeichnet (vgl. Bossel 2004, S. 39). Die Ausprägungen der im System vorhandenen Elemente beeinflussen den Systemzustand (vgl. Rothengatter und Schaffer 2008, S. 189). Die Veränderung von nur einem Systemelement kann ausreichen, um Zustandsgrößen zu verändern und damit den gesamten Systemzustand neu zu gestalten. Neben den im System enthaltenen Elementen wird der Systemzustand vom Systemzweck und der Systemstruktur beeinflusst (vgl. Bossel 2004, S. 45ff.). Der Zustand eines Systems zum Zeitpunkt h definiert sich nach Klir (1991, S. 393) wie folgt:

$$q_h = \delta(q_0, h) \qquad (2.2)$$

mit

q_0:	*initialer Systemzustand zum Zeitpunkt $t = 0$*
q_h:	*Systemzustand zum Zeitpunkt h*
h:	*Zeitpunkt*

Damit hängt der Systemzustand zum Zeitpunkt h immer vom Initialzustand des Systems (t =0) und dem Zeitpunkt h ab. Systemzustände können sich demnach über die Zeit verändern. Entspricht der Systemzustand zu jedem beliebigen Zeitpunkt h dem Initialzustand, so wird das System als statisch bezeichnet. Die Möglichkeit Systemzustände anzupassen, grenzt dynamische Systeme von statischen ab (vgl. Forrester 1961, S. 50).

2.1.4 Systemverhalten

Die Entwicklung der Systemzustandsgrößen über die Zeit wird als Systemverhalten bezeichnet (vgl. Bossel 1992b, S. 32ff.). Analog zur Unterscheidung zwischen dynamischen und statischen Systemen, lässt sich das Systemverhalten als statisch beschreiben, falls alle Zustandsgrößen über die Zeit konstant bleiben. Im Gegensatz dazu führt eine Änderung des Systemzustandes zu dynamischem Systemverhalten (vgl. Sterman 2000, S. 107ff.).

Neben der Charakterisierung von Systemstrukturen und -zuständen lassen sich dynamische Systeme bezüglich ihrer Verhaltensweise unterscheiden (vgl. Bossel 1992b, S. 36). Entscheidend dafür, ob diese als einfach oder komplex bezeichnet werden kann, sind die Eigenschaften der Systemstruktur. Komplexe Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass mindestens eine rückkoppelnde Wirkungsbeziehung in der Systemstruktur enthalten ist (vgl. Kratky 1991, S. 11). Die daraus entstehende Zirkularität führt zu unvorhersehbarem Systemverhalten, welches auch durch strukturiertes Vorgehen nicht prognostizierbar wird (vgl. Kratky 1991, S. 11). Komplizierte Systemstrukturen mit einer Vielzahl von Elementen und Relationen stellen jedoch keine Voraussetzung für komplexes Systemverhalten dar. Einfache Systemstrukturen können komplexes Verhalten aufweisen und vice versa.

Beim Verhalten dynamischer Systeme lassen sich gemäß Sterman (2000, S. 107ff.) unterschiedliche Muster erkennen: Je nach Anzahl und Polarität der Rückkopplungen kann beispielsweise exponentielles, zielsuchendes oder oszillierendes Systemverhal-

ten auftreten (vgl. Sterman 2000, S. 108). In Abbildung 2-2 sind ausgewählte Muster von komplexem Systemverhalten dargestellt.

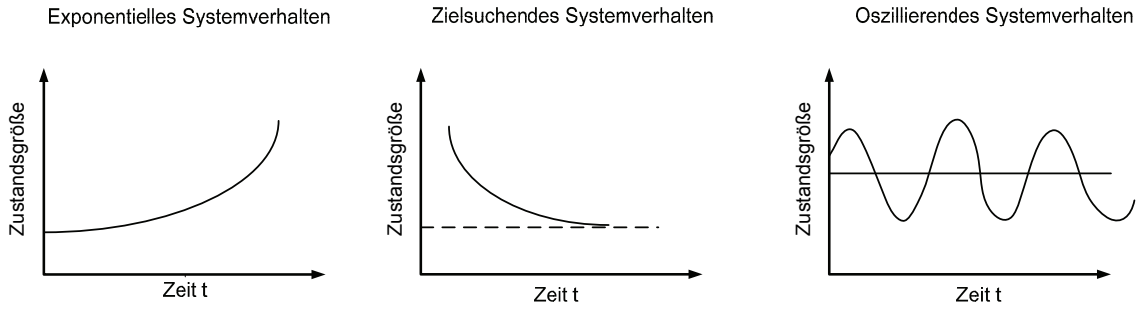


Abbildung 2-2: Ausgewählte Muster von komplexem Systemverhalten (eigene Darstellung basierend auf Strohhecker 2008, S. 28)

Rückkopplungen mit positiver Polarität wirken verstärkend und führen zu exponentiellem Systemverhalten (vgl. Meadows et al. 1972, S. 34ff.). Eine negative Rückkopplung impliziert hingegen ein zielsuchendes Verhalten des Systems. Dies hat eine Annäherung der Zustandsgröße an einen Grenzwert zur Folge, welcher durch die Systemstruktur und die Ausprägungen der Systemelemente bestimmt wird (vgl. Sterman 2000, S. 111f.). Oszillierendes Systemverhalten entsteht, sobald innerhalb einer negativen Rückkopplung eine Verzögerung auftritt (vgl. Sterman 2000, S. 114ff.). Die Dauer der Verzögerung hängt von der Länge der Wirkungskette ab: Je größer die Anzahl von Elementen und Relationen innerhalb einer geschlossenen Wirkungskette ist, desto länger dauert eine Verzögerung (vgl. Strohhecker 2008, S. 28ff.). Darüber hinaus können Systeme auch Mischformen des dargestellten Systemverhaltens aufweisen. Sterman (2000, S. 108) beschreibt Übergänge zwischen exponentiellen und oszillierenden bzw. zielsuchenden Verläufen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass eine Ansammlung von durch Wirkungsbeziehungen verknüpften Elementen, die einen bestimmten Zweck erfüllen, als System bezeichnet werden kann. Die Struktur eines Systems kann abhängig von der Anzahl an Elementen und Relationen einfach oder kompliziert sein. Ist ein System in der Lage, seinen Zustand über die Zeit zu ändern, so ist dieses System dynamisch. Das Verhalten von Systemen lässt sich beobachten und abhängig von unterschiedlichen Systemzuständen vergleichen. Das Verhalten des Systems wird komplex, falls die Wirkungsbeziehungen Rückkopplungen enthalten. Je nach Kompliziertheit der Sys-

temstruktur und Komplexitätsgrad des Systemverhaltens, lässt sich dies durch Experimente am Realsystem oder durch Modellsimulationen untersuchen.

2.2 Modellbasierte Simulation von Zustandsänderungen in Systemen

Die verbale Beschreibung von Systemen und den dazugehörigen Subsystemen sowie deren Wirkungsbeziehungen vermittelt ein Verständnis über die Systemstruktur und das Wirkungsgeflecht. Dieses Strukturverständnis reicht in der Regel nicht aus, um das Verhalten eines Systems aufgrund von Zustandsänderungen zu verstehen. Diese Auswirkungen lassen sich nicht vollständig durch verbale Beschreibungen analysieren (vgl. Forrester 1961, S. 17ff.). Reale Systeme können in Modelle abgebildet werden, um das Systemverhalten simulieren zu können. Die modellbasierte Simulation stellt ein wichtiges methodologisches Element der modernen Systemforschung dar (vgl. Dahme 2015, S. 6).

Laut Baetge (1974, S. 14) lässt sich ein Modell als eine „…widerspruchsfreie Sammlung von allgemeinen Aussagen über ein reales dynamisches System“ definieren. Dieses „Verkürzungsmerkmal“ (Stachowiak 1973, S. 132) des Realsystems, impliziert eine Strukturähnlichkeit zwischen Modell und Realsystem. Dem Modell wird damit eine „Stellvertreterfunktion“ (Dahme 2015, S. 6) des Realsystems zugewiesen. Diese Funktion ermöglicht es, Zustandsänderungen des Realsystems und deren Auswirkungen auf das Systemverhalten zu simulieren. Um das Systemverhalten ohne den Einsatz von Modellen beobachten zu können, müssten Experimente am Realsystem durchgeführt werden. Dies entspricht dem Vorgehen in physikalischen oder chemischen Laboren. Mit der Größe des Systems (Anzahl der Elemente und Wirkungsbeziehungen) steigt auch der Aufwand zur Durchführung von Beobachtungen am Systemverhalten. Neben ökonomischen Gründen können humanistische oder ethische Gründe dafür sprechen, Experimente am Realsystem zu unterlassen. Zudem können mangelnde Erreichbarkeit oder Zerstörungsanfälligkeit Experimente am Realsystem unmöglich machen (vgl. Dahme 2015, S. 7). Aus diesem Grund setzte sich für Systemen mit komplizierter Struktur der Einsatz von Modellen durch, die das Experiment am Realsystem verzichtbar machen (vgl. Bossel 2004, S. 50).

Die Erstellung und Veränderung eines Modells wird als Modellierung bezeichnet. Die Modellierung verfolgt die Zielsetzung, Kenntnisse über den Untersuchungsgegenstand zu erweitern (Erkenntnisaspekt) und Entscheidungen für menschliches Handeln vorzubereiten (Gestaltungsaspekt) (vgl. Dahme 2015, S. 7). Um sowohl dem Gestaltungs- als auch dem Erkenntnisaspekt gerecht zu werden, muss eine Strukturähnlichkeit zwischen Realsystem und Modell vorliegen. Homomorphe (strukturähnliche)

Modelle (vgl. Adam 1993, S. 45) lassen sich in eine Vielzahl unterschiedlicher Modelltypen unterteilen, deren Überschneidungsfreiheit nicht voraussetzungsvoll ist (vgl. Adam 1993, S. 64). Abhängig vom Informationsgrad der Modellergebnisse kann zwischen qualitativen und quantitativen Modellen unterschieden werden (vgl. Arnold et al. 2008 S. 36). Unabhängig vom Modelltyp lassen sich Modelle nach Lehner (1995, S. 64) entsprechend ihres Modellziels in drei Klassen einteilen:

- Beschreibungsmodelle,
- Erklärungsmodelle und
- Gestaltungsmodelle.

Beschreibungsmodelle (deskriptive Modelle) dienen dazu, einfache bis komplizierte Wirkungszusammenhänge in eine verständliche Darstellungsform zu überführen. Innerhalb der Modellklasse können strukturell-deskriptive von verhaltens-deskriptiven Modellen unterschieden werden. Mögliche Ausprägungsformen dieser Modellklasse stellen beispielsweise Landkarten oder Diagramme dar (vgl. Lehner 1995, S. 64).

Erklärungsmodelle basieren auf Beschreibungsmodellen. Sie dienen zunächst der „…inhaltliche(n) Deutung der zu erklärenden Sachverhalte…“ (Kieser und Kubicek 1978, S. 21) und den sich daraus ergebenden logischen Ableitungen zur Interpretation (vgl. Lehner 1995, S. 65). Im Gegensatz zu struktur- und verhaltens-deskriptiven Modellen können Erklärungsmodelle Erkenntnisse über die Ursachen des Systemverhaltens liefern (vgl. Pfohl und Stölzle 1997, S. 53). Die Anwendung von Erklärungsmodellen verfolgt die Zielsetzung, eine Einsicht in die Systemzusammenhänge zu gewähren, um das Verständnis für das reale System zu erhöhen (vgl. Lehner 1995, S. 65).

Die Gestaltungsmodelle als dritte zu differenzierende Modellklasse bauen auf den Erkenntnissen der Erklärungsmodelle auf. Diese Modellklasse erlaubt manipulierende Eingriffe in das System, um ein verändertes Systemverhalten beobachten zu können (vgl. Lehner 1995, S. 65). Somit lässt sich das Verhalten eines Systems unter bisher nicht beobachtbaren Bedingungen simulieren. Eine Voraussetzung zum Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Systemzustände auf das Systemverhalten ist, dass sich die Systemstruktur als Kombination aus Systemelementen und Wirkungsbeziehungen nicht ändert. Die manipulierenden Eingriffe beziehen sich deshalb nicht auf die Wirkungsbeziehungen, sondern auf die Ausprägung der Elemente.

Innerhalb der Klasse der Gestaltungsmodelle lassen sich Simulationsmodelle und Optimierungsmodelle voneinander abgrenzen (vgl. Adam 1993, S. 65). Neben der Abbildung von komplexem Systemverhalten (vgl. Arnold et al. 2008, S. 36) enthalten Optimierungsmodelle Zielfunktionen zur Bewertung unterschiedlicher Handlungsmög-

lichkeiten (vgl. Neumann und Morlock 2004, S. 35ff., S. 536). Im Gegensatz zu Simulationsmodellen können bei Optimierungsmodellen Zielkonflikte auftreten, die eine Bewertung der Ergebnisse erschweren können (vgl. Arnold et al. 2008, S. 40).

Modelle bieten die Möglichkeit, Systeme mit komplizierten Strukturen zu beschreiben, deren Wirkungszusammenhänge zu erklären und das Systemverhalten zu simulieren. Sie finden immer dann Anwendung, wenn Beobachtungen am Realsystem ausscheiden und der Komplexitätsgrad des Systemverhaltens strukturiertes Vorgehen zur Analyse des Verhaltens ausschließt. Beschreibungs- und Erklärungsmodelle liefern keine Erkenntnisse über die Auswirkungen von Zustandsänderungen im System. Die Anpassung von Systemzuständen und die Simulation von Systemverhalten ist Gestaltungsmodellen vorbehalten.

2.3 Wirkungsanalyse nach Bossel

Die Wirkungsanalyse ist ein Instrument, um ein reales System in eine Modellumgebung zu überführen. Sie beinhaltet eine Zerlegung des bestehenden Wirkungsbeziehungsgeflechts in isolierte Relationen. Durch die Aneinanderreihung von Kombinationen aus Systemelementen und Relationen entstehen Wirkungsketten. Lassen sich Anfang und Ende dieser Wirkungsketten kausal miteinander verbinden, entstehen geschlossene Wirkungskreise (vgl. Bossel 2004, S. 73).

Die verbale Beschreibung des Wirkungsbeziehungsgeflechts wird als Wortmodell bezeichnet (vgl. Forrester 1961, S. 44). Entsprechend der Modellklassen nach Lehner (1995, S. 64) können somit sowohl Beschreibungs- als auch Erklärungsmodelle als Wortmodelle bezeichnet werden. Die Beschreibung im Wortmodell kann auf Beobachtungen des realen Systems beruhen oder durch Expertenbefragungen und Diskussionsrunden entstehen (vgl. Sterman 2000, S. 157). Auf Basis des Wortmodells lässt sich das Relationsgeflecht mit Hilfe des Wirkungsgraphen formalisieren und präzisieren (vgl. Forrester 1961, S. 44). Dazu ist zunächst zu klären, welche der im Wortmodell beschriebenen Relationen und Elemente zwingend in den Wirkungsgraphen übernommen werden müssen, um den Systemzweck des Realsystems unverfälscht abbilden zu können. Dieser Minimalumfang gewährleistet die „…Reduktion komplexer Zusammenhänge auf ein relativ einfaches Denkmuster…“ (Bossel 2004, S. 66) als eine Anforderung an den Wirkungsgraphen. Durch eine logische Deduktion (vgl. Bossel 2004, S. 68) lässt sich mit den isolierten Wirkungsbeziehungen das Aussagensystem des Wortmodells nachbilden. Die daraus gewonnenen Wirkungszusammenhänge können in einen Wirkungsgraphen überführt werden.

Die Wirkungsgraphen als Ergebnis der in Abbildung 2-3 systematisch dargestellten Wirkungsanalyse beinhalten alle relevanten Systemgrößen (Elemente, Relationen), die zum Abbilden des Systemzwecks benötigt werden. Diese Systemgrößen werden als Knoten bezeichnet und in den Wirkungsgraphen übertragen. Gerichtete Wirkungspfeile (Graphen) zwischen den Knoten stellen die Wirkungsbeziehungen dar. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass es sich um eine gleichgerichtete Wirkung handelt, während ein negatives Vorzeichen eine gegengerichtete Wirkung ausdrückt. Tritt bei einer Wirkungskette eine ungerade Anzahl von negativen Vorzeichen auf, handelt es sich um eine gegengerichtete Gesamtwirkung der Kette. Bei einer geraden Anzahl von negativen Vorzeichen entsteht eine gleichgerichtete Gesamtwirkung (vgl. Bossel 2004, S. 70ff.).

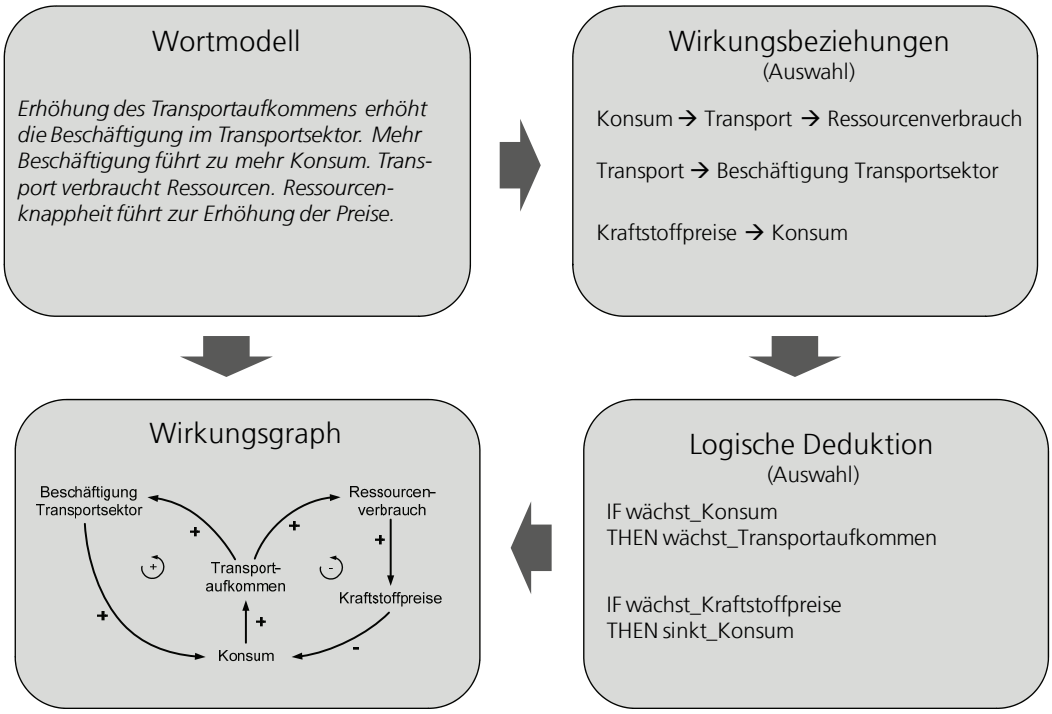


Abbildung 2-3: Systematische Darstellung der Wirkungsanalyse (eigene Darstellung; Notation basierend auf Bossel 2004, S. 69ff.)

Die im Wirkungsgraph von Abbildung 2-3 dargestellten Rückkopplungen zeigen auf der linken Seite ein positives und auf der rechten Seite ein negatives Rückkopplungsverhalten. Für das durch Rückkopplungen entstehende komplexe Systemverhalten gilt: Positive Rückkopplungen destabilisieren das System, negative Rückkopplungen führen zu stabilen Systemverhalten (vgl. Meadows et al. 1972, S. 31ff. und Sterman 2000, S. 133). Die Identifikation von zentralen Rückkopplungen, die zu komplexem Systemverhalten führen, ist ein wichtiges Element der Wirkungsanalyse.

Der Wirkungsgraph stellt neben der Vermittlung eines Verständnisses über Systemstruktur und -verhalten eine Voraussetzung zur Erstellung eines Modells dar. Liegt eine Quantifizierung der Wirkungen vor, so lässt sich die formalisierte Darstellung ohne weiteres Aufbereiten in eine Modellstruktur überführen.

2.4 Modellierungsmethoden zur Überführung von Wirkungsgraphen in Gestaltungsmodelle

Die Simulation von Systemzuständen setzt den Aufbau eines auf den Wirkungsgraphen basierenden Gestaltungsmodells voraus. Gestaltungsmodelle lassen sich in unterschiedlichen Modellierungsumgebungen umsetzen. Die Modellierungsumgebung legt die Modelliersprache und die Modellierungsmethodik fest. Neben der Möglichkeit, komplexes Systemverhalten abbilden zu können, stellt die Bildung von Szenarien und Sensitivitätsanalysen eine weitere Anforderung an die Modellierungsmethodik zur Flexibilisierung der Betrachtung dar. Weitere Kriterien sind die Praktikabilität sowie ein hoher Grad der standardisierten Modellerstellung. Im Folgenden werden ausschließlich Modellierungsmethodiken zur Erstellung von Gestaltungsmodellen diskutiert. Eine Übersicht der Bewertungen hinsichtlich der Zielerreichung für die genannten Kriterien stellt Tabelle 2-1 dar.

Tabelle 2-1: Vergleich unterschiedlicher Modellierungsumgebungen (eigene, erweiterte Darstellung basierend auf Wienholdt 2011, S. 57)

Kriterien der Eignung	*Methoden zur Modellierung*			
	Petri-Netze	*(Materialfluss-) Simulation*	*Agentenbasierte Modellierung*	*System Dynamics*
Beitrag zum Systemverständnis	●	●	◐	●
Abbildung von systeminhärenter Dynamik	◐	●	●	●
Anwendung bei einer Vielzahl abhängiger Variablen	◐	◐	◐	●
Berücksichtigung von Interdependenzen und Rückkopplungen	◐	◐	◐	●
Eignung für komplexe Fragestellungen	●	●	◐	●
Praktikabilität, einfache Anwendung	◐	◐	◐	●
Standardisierte Modellerstellung	●	◐	●	◐
Möglichkeiten zur Szenarienbildung	●	●	●	●
Möglichkeiten zur Sensitivitätsanalyse	◐	●	●	●
Abbildung qualitativer Zusammenhänge	○	○	◐	●

● voll geeignet ◐ teilweise geeignet ○ nicht geeignet

Die durch Carl Adam Petri in den 1960er Jahren entwickelten und beschriebenen Petri-Netze basieren auf Erkenntnissen aus der Automaten-Technik. In Automaten überführen Zustandsänderungen einzelner Elemente das Netzwerk aus Transistoren in einen neuen Zustand. Petri-Netze erlauben die Modellierung paralleler Prozesse, wie sie beispielsweise oft bei Produktionsabläufen vorkommen (vgl. Beedgen 1993, S. 154). Dabei handelt es sich um einen graphentheoretischen Ansatz, bestehend aus gerichteten Kanten, Plätzen oder Stellen und Transitionen (vgl. Reisig 2010, S. 22). Um das System in neue Zustände zu überführen, finden Aktionen in den Transitionen statt. Diese Aktionen können nur eintreten, falls bestimmte Bedingungen, welche im System als Stellen definiert werden, erfüllt sind (vgl. Cap 1993, S. 114). Diese Eigenschaften erlauben den Einsatz von Petri-Netz-basierten Modellen bei Simulationen von Produktions- und Supply-Chain-Netzwerken (vgl. Clausen et al. 2007, S. 13). Diese Modellierungsmethodik stößt bei systeminhärenter Dynamik und der Berücksichtigung von Rückkopplungen an ihre Grenzen. Es lassen sich daher, ähnlich wie bei der Graphentheorie, nicht alle Systeme auf Petri-Netze zurückführen.

Materialflusssimulationen werden mit der Zielsetzung der Identifikation von Optimierungspotentialen im Spannungsfeld von Auftragseingang und Disposition eingesetzt (vgl. Noche 1990, S. 18). Wichtige Elemente von Materialflusssimulationen sind die Steuerung, Planung und Überwachung von Material- und Informationsflüssen (vgl. Wienholdt 2011, S. 56). Eine Grundlage dafür bilden qualitative Flussdiagramme, die dann sukzessive in Graphen und Matrizen quantifiziert werden (vgl. Arnold und Furmans 2007, S. 48) Der Fokus liegt bei dieser Modellierungsmethodik auf der Simulation von örtlich begrenzten Logistik- oder Produktionssystemen und den damit verbundenen Prozessen (vgl. Arnold et al. 2008, S. 73). Durch die quantitative Ausrichtung der Methodik lassen sich qualitative Zusammenhänge nicht in die Modelle integrieren. Die bis dato aus der Literatur bekannten Anwendungsfälle beziehen sich vorwiegend auf die Simulation abgeschlossener Subsysteme, da das Abbilden von Systemen mit komplexem Verhalten zu hohem Rechen- und Modellierungsaufwand führt.

Frühe Ansätze zur agentenbasierten Modellierung lassen sich in den ersten Verkehrsflussmodellen aus dem Jahr 1977 identifizieren (vgl. Wiedemann et al. 1977, S. 22f.). In diesen Modellen agieren Fahrzeuge als Agenten miteinander im Verkehr. Die Erkenntnisse aus diesen ersten Modellierungsansätzen mündeten dann Anfang der 1980er Jahre in die Mikro-Verkehrssimulationssoftware VISSIM der PTV AG (vgl. Wiedemann und Schwerdtfeger 1987, S. 3ff.). Als eine weitere bedeutende Entwicklung im verkehrswissenschaftlichen Bereich können die Arbeiten zum Fundamentaldiagramm (Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte) von Nagel und Schreckenberg (vgl. Nagel und Schreckenberg 1992) genannt werden. Die mikro-

skopische Betrachtungsebene eines agentenbasierten Modells eignet sich besonders für spezielle Fragestellungen abgeschlossener Subsysteme und weniger zur Abbildung von komplexen und umfangreichen Fragestellungen (vgl. Jann und Hevenstone 2014, S. 213ff.)

System Dynamics als vierte betrachtete Modellierungsmethodik weist nach Tabelle 2-1 den höchsten Eignungsgrad zur Erstellung eines Gestaltungsmodells zur Analyse von komplexem Systemverhalten auf. Aufgrund der großen Eignung soll diese Methode detailliert im nächsten Unterkapitel beschrieben werden.

2.5 Simulation von komplexem Systemverhalten mit System Dynamics

Im Unterschied zu den anderen genannten Modellierungsmethoden, die auf der klassischen, normativen Entscheidungstheorie beruhen, basiert System Dynamics auf der deskriptiven Entscheidungstheorie (vgl. Schröter 2006, S. 128). Dies bedeutet, dass bei der Modellierung das tatsächliche Entscheidungsverhalten der Menschen im Vordergrund steht. Die Integration mentaler Problemlösungstechniken und Experten-Ratings erlaubt das Konstruieren von fehlenden Bausteinen zur Komplettierung des Modells, falls statistische Belege nicht in ausreichender Form vorliegen (vgl. Rothengatter und Schaffer 2008, S. 184). Eine System Dynamics Modellierung erfordert keine Linearisierung der Wirkungszusammenhänge und ist folglich in der Lage, komplexes Systemverhalten abzubilden (vgl. Witzig 2011, S. 44).

Eine Voraussetzung zur systemdynamischen Modellierung ist die Erstellung eines Kausaldiagramms (Causal Loops). Dies entspricht dem in Kapitel 2.3 dargestellten Wirkungsgraphen. Die Modellstruktur leitet sich direkt aus dem Kausaldiagramm ab. Ein systemdynamisches Modell beinhaltet immer fünf unterschiedliche Elemente: Stock-Variablen (Bestände), Flow-Variablen (Zu-/Abflussraten), Parameter, exogene Faktoren sowie Hilfsvariablen. Die Kombination aus Stock- und Flow-Variablen führt bei Modellsimulationen zu dynamischem Verhalten (vgl. Schade 2005, S. 11). Aus den Variablen und den zugehörigen Wirkungsbeziehungen ergibt sich ein Gleichungssystem, welches alle Abhängigkeiten enthält und somit das im Modell abgebildete System hinreichend beschreibt. Durch die periodische Berechnung der Gleichungssysteme kann eine durch veränderte Systemzustände herbeigeführte Anpassung des Systemverhaltens simuliert werden (vgl. Forrester 1961, S. 65).

Der mathematische Kern der Gleichungssysteme besteht in der Integration der Zu- und Abflüsse der Bestandsvariablen über die Zeit. Durch diese Differentialgleichungssysteme lässt sich komplexes Systemverhalten simulieren. Die durch Integration bedingte

zeitliche Diskrepanz zwischen Zu- bzw. Abfluss und dessen Wirksamkeit im Bestand erlaubt eine direkte Rückkopplung zwischen Bestand und Zu- bzw. Abflüssen und allen davon abhängigen Variablen, ohne einen Zirkelbezug herzustellen (vgl. Forrester 1961, S. 67ff. und Möller 1992, S. 24). Der Initialwert der Bestandsvariable zum Zeitpunkt t=0 determiniert den Wert ebenso wie die Differenz zwischen Zu- und Abfluss über die Zeit (vgl. Krail 2009, S. 36) (vgl. Gleichung 2.3).

$$L(t) = L_0 + \int_0^t [IR(\tau) - OR(\tau)]\ d\tau \qquad (2.3)$$

mit

L_0:	*Initialwert der Stock-Variable*
$IR(\tau)$:	*Zufluss zur Stock-Variable zum Zeitpunkt* τ
$OR(\tau)$:	*Abfluss aus der Stock-Variable zum Zeitpunkt* τ
τ:	*Integralvariable, in diesem Fall die Zeitperiode*

Die Bestandsvariablen lassen sich bildlich mit Reservoirs vergleichen, welche Flüsse akkumulieren. Diese Reservoirs können sich abhängig vom Vorzeichen der Differenz zwischen den Zu- und Abflüssen füllen oder leeren. Die Bestandsvariable gibt folglich den Füllstand des Speichers zum Zeitpunkt t an. Die Füllstände aller im System vorhandener Bestandsvariablen beschreiben den Systemzustand zum Zeitpunkt t (vgl. Rothengatter und Schaffer 2008, S. 189).

Eine computerbasierte, systemdynamische Simulation der Auswirkungen unterschiedlicher Systemzustände auf das Systemverhalten erfordert eine geeignete Softwareumgebung. Derzeit existieren neben der ursprünglich durch Forrester entwickelten Programmiersprache DYNAMO einige Softwarelösungen, die grafische Oberflächen als Nutzerinterface einsetzen und die Bedienung erleichtern. Dazu gehören STELLA, ITHINK, POWERSIM und VENSIM, deren Funktionalität sich nur unerheblich unterscheidet (vgl. Schröter 2006, S. 129). Die für diese Arbeit verwendete Software VENSIM wendet das Eulerische Verfahren zur numerischen Lösung von Differenzialgleichungen an. Das Ziel des eingesetzten Algorithmus ist es, die Abweichung zur exakten Lösung der Differentialgleichung durch eine iterative, numerische Lösung auf Basis von Differenzengleichungen zu minimieren.

3 State of the Art der Modellierung transportbedingter Wirkungen auf Deutschland

Gestaltungsmodelle lassen sich als Simulations- oder Optimierungsmodelle realisieren (vgl. Arnold et al. 2008, S. 36). Simulationsmodelle können einfaches bis komplexes Systemverhalten nachahmen. Die Anwendung von Optimierungsmodellen erlaubt die Identifikation optimaler Konstellationen für eine Zielerreichung. Dazu wird eine Zielfunktion definiert, die im Zuge der Optimierung minimiert oder maximiert wird. Als Ergebnis wird ein optimales Set an Parametern geliefert, welches in konkreten Handlungsempfehlungen münden kann (vgl. Neumann und Morlock 2004, S. 35ff., S. 536). Da diese Arbeit die Vereinbarkeit von ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungsdimensionen bei einer Regionalisierung untersucht, weisen Simulationsmodelle eine höhere Passgenauigkeit zur Abbildung des zu betrachtenden Systems auf als Optimierungsmodelle.

Die im Folgenden dargestellten Simulationsmodelle stellen eine Auswahl der derzeit in der Verkehrsforschung angewandten Ansätze dar. Da der räumliche Fokus der Arbeit auf Deutschland liegt, scheiden kleinräumige Modelle aus. Ebenso wurden keine Optimierungsmodelle betrachtet.

3.1 TREMOD: Ein Rechenmodell zur Bestimmung von verkehrsbedingten Schadstoffemissionen

Mit dem Rechenmodell TREMOD lassen sich die Auswirkungen verbesserter technischer Parameter von Nutzfahrzeugen auf die Umweltwirkungen bestimmen. Es handelt sich um einen End-of-Pipe-Ansatz, der technologische Entwicklungen in den Fahrzeugflotten mit einbezieht, aber keine Veränderungen der Güterbeförderungs- oder Fahrleistung vorsieht (vgl. Knörr et al. 2012, S. 23ff.). Es werden Luftschadstoffemissionen (CO, HC, NO_x und Rußapartikel), Treibhausgasemissionen in CO_2-Äquivalenten und der Ressourcenverbrauch in Form von Primärenergie bestimmt. Dazu werden detaillierte Simulationen von Verkehrssituationen durchgeführt, um die Nutzung unterschiedlicher Straßenkategorien und „zusätzliche Emissionen nach dem Start mit nicht warmem Motor (Kaltstart)“ (Knörr et al. 2012, S. 23) berücksichtigen zu können. Die detaillierte Betrachtung der (Nutz-) Fahrzeugflotten und den dazugehörigen Verkehrssituationen ermöglicht es, die Umweltwirkungen bei Diffusion neuer Antriebstechnologien oder Abgasnormen zu simulieren (vgl. Abbildung 3-1).

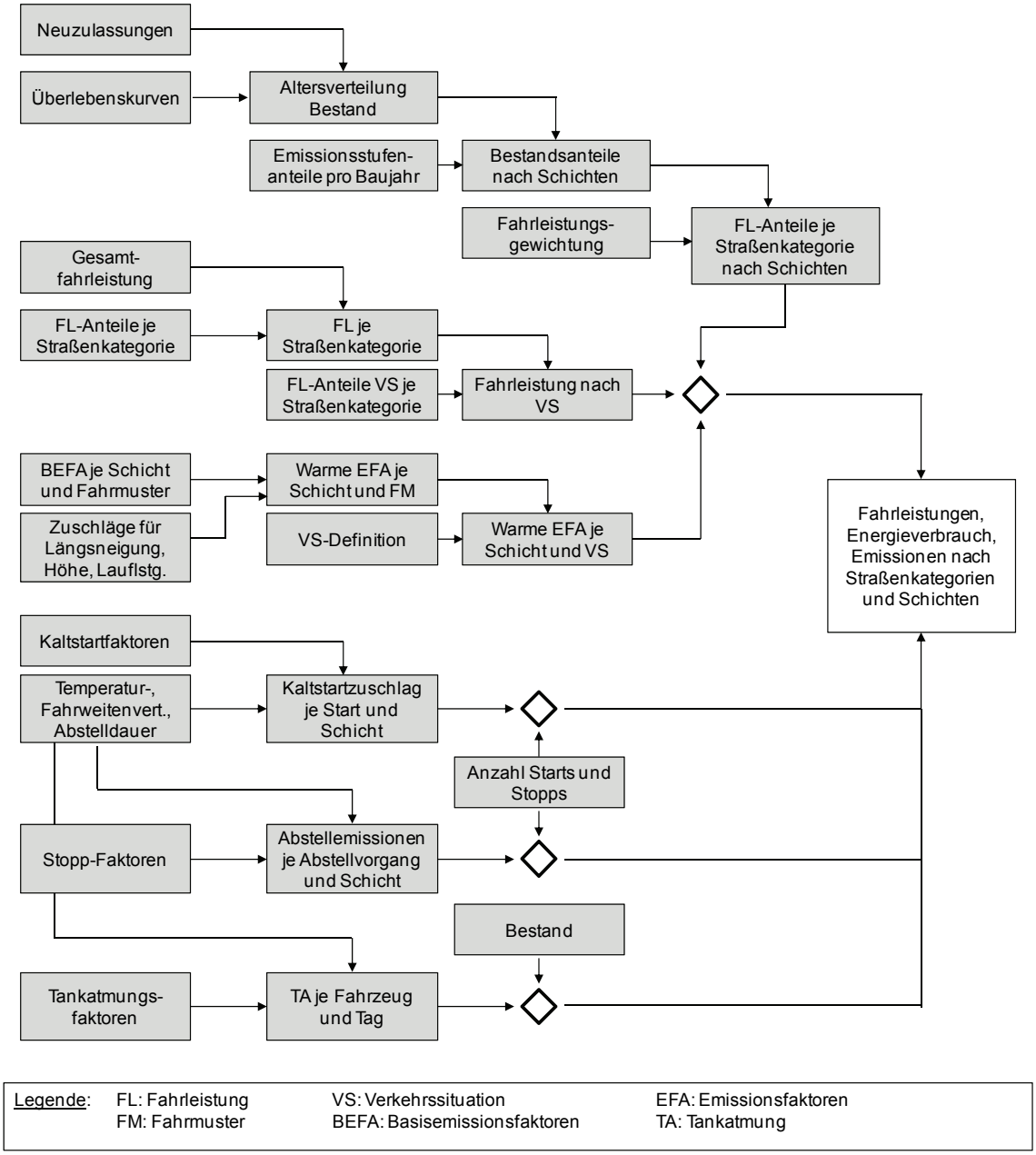


Abbildung 3-1: TREMOD-Berechnungsschema (eigene Darstellung basierend auf Schmidt et al. 1998, S. 287)

Das in Abbildung 3-1 dargestellte Berechnungsschema zeigt die Detaillierung der Emissionsbestimmung. Die Fahrzeugbestände werden hinsichtlich ihres Zulassungsjahres in unterschiedliche Altersschichten eingeteilt. Dies ermöglicht eine Zuordnung von Emissionsfaktoren je nach Baujahr und Emissionsstufe (EU-Abgasnorm). Zusammen mit der gesamten Fahrleistung je Straßenkategorie lassen sich so die Emissionen und der Energieverbrauch je Straßenkategorie, Emissionsstufe und Altersschicht bestimmen (vgl. Knörr et al. 2012; S. 23). Neben Emissionen, die durch den Betrieb

von Fahrzeugen entstehen, werden auch Emissionen, die im Zusammenhang mit der Abstellung der Fahrzeuge und der Tankatmung stehen, erfasst.

Zusätzlich zum Straßenverkehr werden in TREMOD auch die durch Binnenschiffe und Bahnen verursachten Emissionen berechnet. Im Gegensatz zum Straßenverkehr stehen hierbei keine Informationen zur Flottenzusammensetzung und zu unterschiedlichen Verkehrssituationen zur Verfügung. Es wird daher auf Daten des Statistischen Bundesamtes zum Kraftstoffverbrauch und zu Fahrleistungen zurückgegriffen (vgl. Knörr et al. 2012, S. 35).

Die für die Berechnung der Emissionen zugrunde gelegten Fahrleistungen sind in TREMOD externe Bestimmungsgrößen. TREMOD bildet damit weder die Entstehung des Transportaufkommens noch die Produktions- oder Beschaffungsnetze ab. Damit besteht keine Möglichkeit durch Veränderung der Transportentfernungen gestaltend in die Verkehrsverteilung einzugreifen. TREMOD wird deshalb auch als „Rechenmodell“ (Knörr et al. 2012) zur Ermittlung von Energieverbrauch und Schadstoffemissionen bezeichnet.

Der Betrachtungshorizont von TREMOD reicht bis zum Jahr 2030. Die Ex-post-Analyse geht bis ins Jahr 1960 zurück. Die Menge der Emissionen wird jährlich ausgewiesen (vgl. Knörr et al. 2012). Die räumliche Abgrenzung des in TREMOD abgebildeten Systems entspricht dem deutschen Hoheitsgebiet.

3.2 VALIDATE: Ein netzbasiertes Verkehrsprognosemodell

Im Gegensatz zum „End-of-Pipe“ Fokus von TREMOD bildet das Verkehrsprognosemodell VALIDATE die Entstehung, Verteilung, Verkehrsmittelwahl und die netzseitige Umlegung des Verkehrs ab. Die Zielsetzung des Modells besteht neben der Erzeugung von Quelle-Ziel-Nachfragematrizen in der Bestimmung von Belastungen einzelner Teilstrecken in den Netzen der jeweiligen Verkehrsträger (vgl. Schulz 2012, S. 63). Räumlich beschränkt sich das in VALIDATE abgebildete System auf Deutschland und die direkt angrenzenden Nachbarländer (vgl. Schulz 2012, S. 63). Der Betrachtungsraum ist in etwa 10.000 Verkehrszellen unterteilt, denen jeweils etwa 8.500 Einwohner zugeordnet werden können (vgl. Schulz 2012, S. 63). Damit ist die Gliederung deutlich feiner als die Gebietsflächen der Landkreise. Dem Modell liegt ein Straßen- und Schienennetz zu Grunde, welches in Deutschland mit 3,5 Millionen Einzelstrecken sämtliche Kreis-, Landes-, Bundestraßen und Autobahnen enthält (vgl. PTV Group 2015, S. 6).

Die zeitlichen Systemgrenzen von VALIDATE sind nicht final festgelegt. Diese richten sich nach dem Betrachtungshorizont, welcher durch die Fragestellungen an das

Systemverhalten bestimmt und durch die verfügbaren Rahmenbedingungen (z. B. Veränderungen im Netz) limitiert wird (vgl. PTV Group 2015, S. 7ff.).

Das in VALIDATE abgebildete System umfasst das aus den Verkehrswissenschaften bekannte „klassische vierstufige Transportmodell“ (Ortúzar und Willumsen 2001, S. 23) für Personen- und Güterverkehr (vgl. Schulz 2012, S. 63). Die in Abbildung 3-2 dargestellten Stufen umfassen die Verkehrsentstehung (1), die Verkehrsverteilung (2), die Verkehrsmittelwahl (3) sowie die Verkehrsumlegung im Netz (4).

Innerhalb der ersten Stufe wird für jede Verkehrszelle das Transportaufkommen in Tonnen bzw. Personen ermittelt. Für den Güterverkehr leitet sich das Aufkommen aus den Strukturgrößen (z. B. Bruttoinlandsprodukt) in den Verkehrszellen ab (vgl. Lohse et al. 1997, S. 34ff.). Das ermittelte Transportaufkommen setzt sich aus Versand und Empfang der Güter zusammen (vgl. Lohse et al. 1997, S. 35).

Der Gravitationsansatz, durch dessen Anwendung Güter und Personen abhängig von Attraktivitäten der Zielzellen und Widerständen zwischen Quelle und Ziel auf Relationen verteilt werden, bildet die Grundlage für die Berechnungen in der zweiten Stufe (Verkehrsverteilung) (vgl. Lohse et al. 1997, S. 41ff.). Es gilt, dass mit steigender Attraktivität einer Verkehrszelle die Anziehungskraft für den Zielverkehr in diese Zelle zunimmt. Für die Widerstände ergibt sich eine umgekehrte Proportionalität: Wachsende Widerstände zwischen den Verkehrszellen führen zu sinkenden Verkehrsströmen. Das Ergebnis der zweiten Stufe des vierstufigen Vorgehens ist eine Quelle-Ziel-Matrix mit Güter- und Personenströmen zwischen allen Verkehrszellen.

Um die Quelle-Ziel-Nachfragematrizen auf die Verkehrsträger Straße und Schiene zu verteilen, findet in der dritten Stufe die Discrete-Choice-Theorie[1] Anwendung (vgl. Schulz 2012, S. 63). Dabei werden auf Basis des Logit-Ansatzes (vgl. Ortúzar und Willumsen 2001, S. 225ff.) die Nutzen der Verkehrsträger Schiene und Straße miteinander verglichen und abhängig von der Differenz die Wahlwahrscheinlichkeit für beide Alternativen bestimmt. Der Nutzen wird in diesem Fall durch die anfallenden Kosten bei Nutzung der Verkehrsmittel sowie der Transportdauer bestimmt (vgl. Lohse et al. 1997, S. 67).

1 Das Entscheidungsverhalten von Personen bei der Wahl einer Option aus einer endlichen (diskreten) Menge an Alternativen wird in der Discrete-Choice-Theorie beschrieben. (vgl. Papula 2003, S. 372).

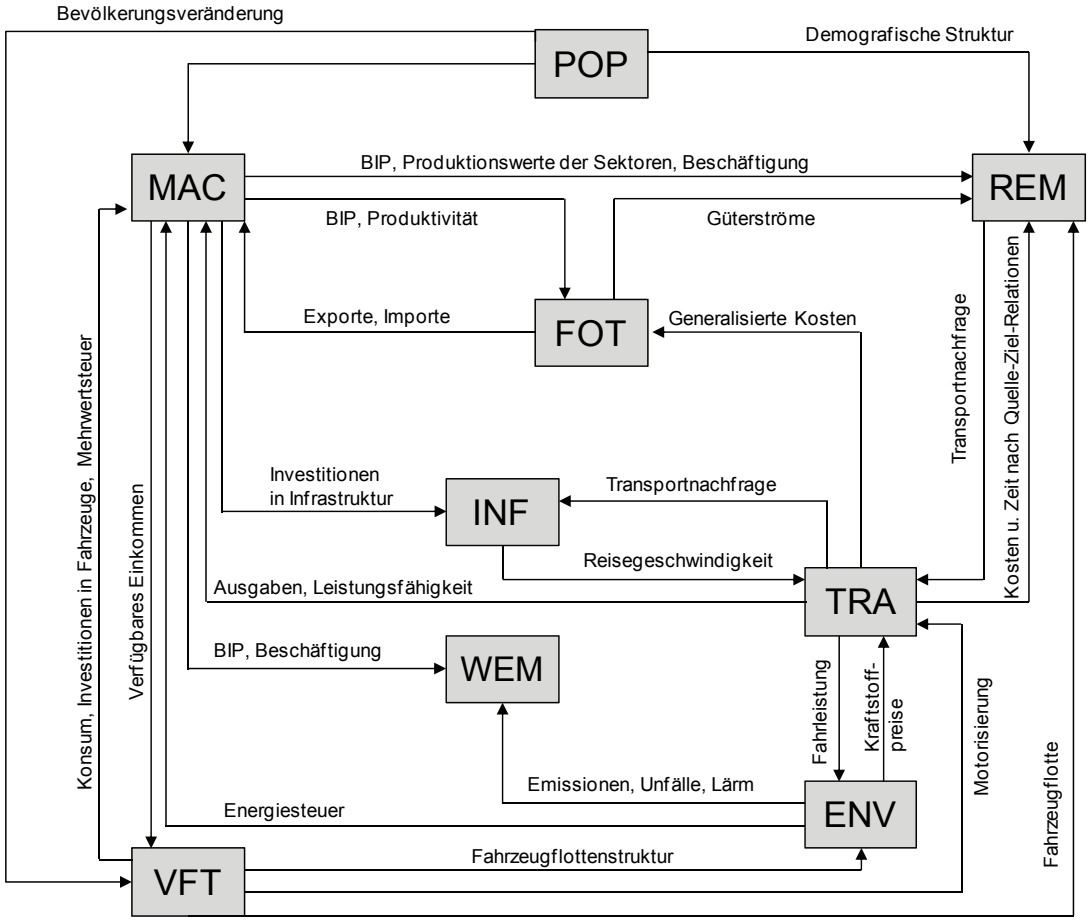
Abbildung 3-2: Vierstufiger Algorithmus zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage (eigene Darstellung angelehnt an Ortúzar und Willumsen 2001, S. 23)

Die Nachfragematrizen werden entsprechend der Dimensionen Quelle, Ziel und Verkehrsmittel im vierten Schritt auf das Verkehrsnetz umgelegt. Zur Routenwahl der Verkehrsbeziehungen werden ebenfalls Discrete-Choice-Ansätze verwendet (vgl. Schulz 2012, S. 63).

Das VALIDATE-Modell bildet somit den kompletten Prozess von der Verkehrsentstehung bis zur Verkehrsverteilung im Netz ab. Es werden zwar beim Transportaufkommen Gütergruppen unterschieden (vgl. Schulz 2012, S. 63), diese lassen sich aber nicht nach Aufkommen in Produktion, Distribution und Beschaffung differenzieren. Die Struktur des Modells erlaubt es, Anpassungen bei der Verkehrsentstehung und Verkehrsverteilung umzusetzen. Der Fokus der Modellanwendung von VALIDATE liegt allerdings darin, Anpassungsprozesse bei Streckenbelastungen in der vierten Stufe des Algorithmus (Verkehrsumlegung) als Folge von Veränderungen in der Netzstruktur (z. B. Umgehungsstraßen) beobachten zu können (vgl. PTV Group 2015, S. 8).

3.3 ASTRA: Ein systemdynamisches Modell zur Bewertung von Verkehrs-, Technologie- und Klimaschutzpolitiken

Das ASTRA-Modell (ASsessment of TRAnsport strategies) ist ein systemdynamisches Modell zur Bewertung von europäischen (Verkehrs-) Politiken (vgl. Schade 2005). Das im Modell abgebildete System umfasst die 27 Länder der Europäischen Union (EU27) sowie Norwegen und die Schweiz (vgl. Krail 2009, S. 40). Der Betrachtungszeitraum des Systems reicht vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2050 (vgl. Krail 2009, S. 40). Sachlich lässt sich das modellierte System wie in Abbildung 3-3 dargestellt abgrenzen.



Legende für die Teilmodelle:

POP:	Bevölkerung	FOT:	Außenhandel	ENV:	Umwelt
MAC:	Makroökonomie	TRA:	Transport	INF:	Infrastruktur
REM:	Regionalökonomie	VFT:	Fahrzeugflotte	WEM:	Wohlfahrt

Abbildung 3-3: Teilmodelle von ASTRA und deren Interaktionen (eigene Darstellung basierend auf Krail 2009, S. 42)

Die Teilmodelle Bevölkerung (POP), Makroökonomie (MAC), Regionalökonomie (REM), Außenhandel (FOT), Transport (TRA), Fahrzeugflotte (VFT), Umwelt (ENV), Infrastruktur (INF) und Wohlfahrt (WEM) beinhalten neben Wirkungsbeziehungen zur Bestimmung der Verkehrsentstehung, Verkehrsverteilung und Verkehrsmittelwahl auch makroökonomische und soziale Zusammenhänge (vgl. Schade 2005, S. 14ff.). Diese umfassen die Bevölkerungsentwicklung, die wirtschaftliche Leistung der Volkswirtschaft sowie die Haushaltseinkommen (vgl. Krail 2009, S. 40ff.). Aus dem Bruttoproduktionswert von 15 Sektoren und den Im- und Exporten wird durch Multiplikation mit Wertdichten (vgl. Meersman und Van de Voorde 2008, S. 70ff.) das physische Transportaufkommen ermittelt. Dieses wird nach den Gütergruppen Schüttgüter, Einheitsladungen sowie sonstige Güter differenziert und anhand des Gravitationsansatzes (vgl. Ortúzar und Willumsen 2001, S. 170ff.) auf Quelle-Ziel-Relationen verteilt (vgl. Schade 2005, S.102ff.). Die geografische Erzeugungs- und Verteilungsebene entspricht den NUTS-2-Zonen (vgl. Schade 2005, S. 19ff.). Für Schüttgüter, Einheitsladungen und sonstige Güter beinhaltet ASTRA Faktoren zur Abbildung möglicher Güterstruktureffekte, um von der im Teilmodell REM bestimmten Transportnachfrage (Güterbeförderungsleistung) die Fahrleistungen der Nutzfahrzeuge abzuleiten (vgl. Schade 2005, S. 116). Die Fahrleistung bestimmt im Teilmodell VFT die Anzahl der benötigten Nutzfahrzeuge, um die Transportnachfrage zu befriedigen. Aus dem Abgleich zwischen Fahrzeugbedarf und Fahrzeugflotte lässt sich die Anzahl der Neuzulassungen ableiten. Im Teilmodell VFT wird zwischen leichten (zulässiges Gesamtgewicht kleiner gleich 7,5 Tonnen) und schweren Nutzfahrzeugen (zulässiges Gesamtgewicht größer 7,5 Tonnen) unterschieden (vgl. Krail 2009, S. 57f.). Aus der Kombination aus der Anzahl der Fahrzeuge, deren Fahrleistung und den Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe und CO_2-Emissionen lassen sich im Teilmodell ENV die Umweltwirkungen ableiten (vgl. Krail 2009, S. 59f.). Neben Luftschadstoffen, wie Stickstoffoxid (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und Rußpartikeln (PM), werden in diesem Teilmodell verkehrsbedingte Unfälle und Geräuschemissionen bestimmt (vgl. Schade 2005, S. 122ff.).

Die Struktur von ASTRA kann bedingt durch die hohe Anzahl an Wirkungsbeziehungen als kompliziert bezeichnet werden. Rückkopplungen innerhalb und zwischen den in Abbildung 3-3 dargestellten Teilmodellen lassen zudem auf komplexes Systemverhalten schließen (vgl. Schade 2005, S. 29ff.). Die Mehrzahl der in ASTRA implementierten Rückkopplungen beziehen sich auf die Wirkungen zwischen den Modulen Transport (TRA) und Makroökonomie (MAC) (vgl. Schade 2005, S. 32ff.). Da in ASTRA keine detaillierten Zusammenhänge der Produktion nachgebildet sind, beschränken sich diese Rückkopplungen auf volkswirtschaftliche Zusammenhänge (vgl. Schade 2005, S. 37). Die volkswirtschaftliche Betrachtung der 15 Wirtschaftssektoren unterscheidet

nicht zwischen Produktion und Beschaffung. Es lassen sich jedoch aus der Input-Output-Tabelle aggregierte Lieferbeziehungen zwischen und innerhalb der Sektoren ableiten (vgl. Schade 2005, S. 65ff.).

3.4 GLOMO: Das Global Mobility Model

Auf Basis der Struktur des ASTRA-Modells wurde das Global Mobility Model (GLOMO) mit dem Ziel entwickelt, Aussagen über die zukünftige Entwicklung der weltweiten Pkw-Absatzmärkte zu treffen (vgl. Schade et al. 2014, S. 166ff.). Bedingt durch diese Zielsetzung ergibt sich - verglichen mit dem ASTRA-Modell - eine engere sachliche Abgrenzung: Das in GLOMO modellierte System beinhaltet Wirkungsbeziehungen, welche im Zusammenhang mit der Nachfrage nach Pkw stehen. Dazu zählen neben dem Entscheidungsverhalten der Endkunden bezüglich des Fahrzeugsegmentes (Kleinwagen, Kompakt-, Mittel- und Oberklasse) auch Wirkungsbeziehungen im Zusammenhang mit der Wahl der Antriebstechnologie wie konventionell angetriebene Pkw, Hybride, Plug-In-Hybride, batterieelektrische Pkw sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (vgl. Kühn et al. 2014, S. 8ff.). Weder die Beschaffungsstrukturen der deutschen Automobilindustrie noch die Produktion der Pkw sind Teil des in GLOMO abgebildeten Systems und sind demzufolge dem Systemumfeld zuzuordnen. Die räumliche Systemgrenze schließt die Pkw-Nachfragemärkte in Europa, den USA, Japan, Brasilien, Russland, Indien, Südkorea und Südafrika ein. Die summierte Nachfrage nach neuen Pkw auf diesen Märkten entsprach im Jahr 2011 etwa 88 % der gesamten weltweiten Nachfrage (vgl. Schade et al. 2014, S. 169). Zeitlich ist das in GLOMO modellierte System wie folgt abgegrenzt: Die ex-post Analyse erstreckt sich über den Zeitraum zwischen den Jahren 2000 und 2013. Der Betrachtungshorizont des Modells reicht bis zum Jahr 2030 (vgl. Kühn et al. 2014, S. 16).

GLOMO ist analog zu ASTRA in Teilmodelle gegliedert (vgl. Kühn und Glöser 2012, S. 6). Diese fünf Teilmodelle beinhalten Wirkungsbeziehungen zur Bestimmung der demografischen Struktur im Teilmodell „population“ und zur Ableitung des verfügbaren Einkommens im Teilmodell „economy“. Durch diese beiden Teilmodelle werden die Rahmenbedingungen zur Bestimmung der Anzahl von Neufahrzeugen in den Teilmodellen „new cars“ und „fleet“ sowie der Segment- und Technologiewahl im Teilmodell „segment and technology choice“ festgelegt (vgl. Kühn und Glöser 2012, S. 6).

Abbildung 3-4 beinhaltet eine vereinfachte Darstellung der Modellstruktur mit dem Fokus auf die Teilmodelle „new cars“ und „segment and technology choice“. Auf Basis der Einflussfaktoren Demografie aus dem Teilmodell „population“, dem verfügbaren Einkommen aus dem Teilmodell „economy“ und externen Steuerungsgrößen wie dem

Kaufpreis der Fahrzeuge und dem Kraftstoffpreis lässt sich die Nachfrage nach Neuwagen für alle betrachteten Länder ableiten (vgl. Schade et al. 2014, S. 166f.).

Die Stufen zwei und drei beinhalten die Segmentwahl und die Wahl der Antriebstechnologie. Die in GLOMO verwendete Aufteilung der Nachfrage nach Pkw-Segmenten basiert auf den Status-Quo-Anteilen der Segmente im Pkw-Bestand der betrachteten Länder. Diese sind als Bestandsvariablen in der System Dynamics-Logik realisiert. Ein wachsender Wohlstand als Kombination aus verfügbarem Einkommen und Anteil der Bevölkerung über der Armutsgrenze verstärkt die Wanderungen von den kleinen Fahrzeugsegmenten hin zur Oberklasse. Gleiches gilt vice versa (vgl. Kühn et al. 2014, S. 8).

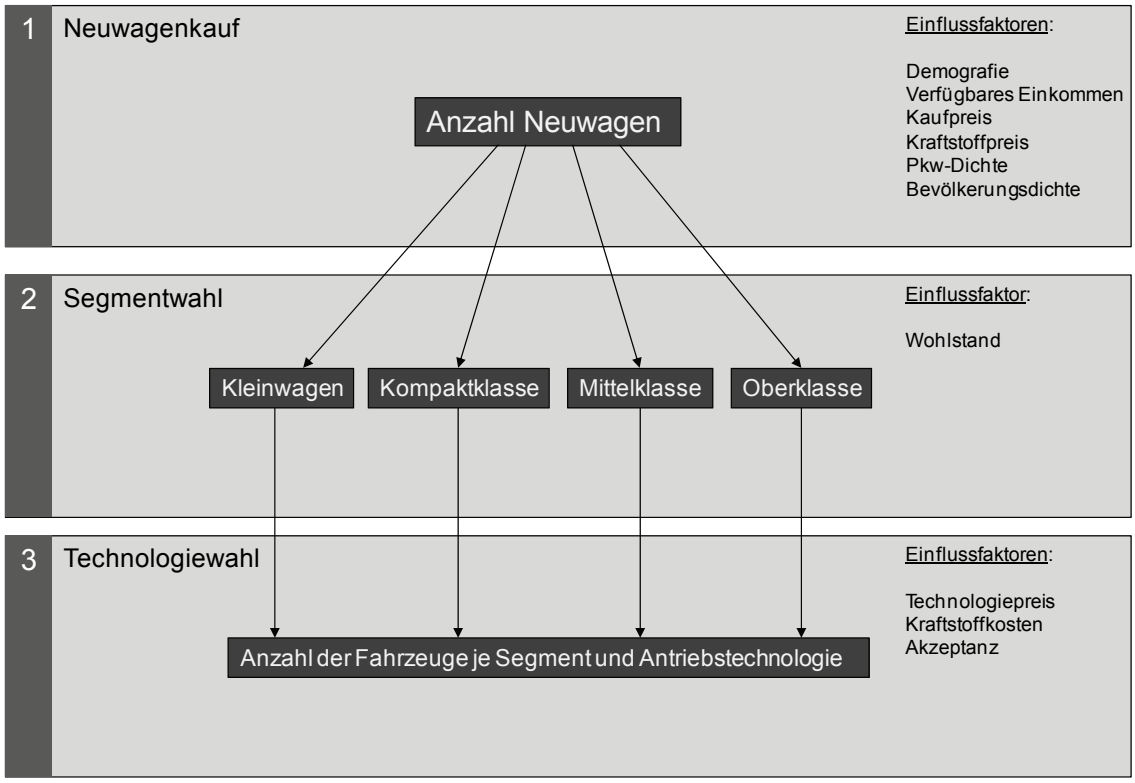


Abbildung 3-4: Modellstruktur des Modells GLOMO (eigene Darstellung basierend auf Schade et al. 2014, S.166)

Die Grundlage für die Wahl der Antriebstechnologie wird durch die Discrete-Choice-Theorie gebildet. Dabei werden die Kosten für den Kauf und Betrieb von Pkw aller Antriebstechnologien auf Basis der Ausführungen von Varian (2003, S. 54ff.) in Nutzenfunktionen mit negativen Vorzeichen überführt. Der Logit-Ansatz (vgl. Ortúzar und Willumsen 2001, S. 225ff.) stellt die Nutzenfunktionen der zur Wahl stehenden Antriebstechnologien vergleichend gegenüber und ermittelt auf Basis der Nutzendifferenz

zwischen den Wahlmöglichkeiten die Kaufwahrscheinlichkeit für die Antriebstechnologien (vgl. Kühn und Glöser 2012, S. 9ff.).

In GLOMO wird somit die weltweite Nachfrage nach neuen Pkw in vier Fahrzeugsegmenten und für fünf Antriebstechnologien in Berechnungsschritten von einem Viertel Jahr bis zum Jahr 2030 ermittelt (vgl. Kühn et al. 2014, S. 15ff.). Aus den Modellergebnissen sind keine Aussagen über die Wirkungen veränderter Nachfrage auf das Beschaffungsnetzwerk oder die deutschen Produktionsstandorte ableitbar.

3.5 Schlussfolgerungen für die eigene Modellierung

Es existieren derzeit eine Reihe von Modellen, die in der Lage sind, die Auswirkungen veränderter Systemzustände auf die transportbedingten Umweltwirkungen zu simulieren. Die vorgestellten Modelle grenzen sich dadurch ab, dass nur bestimmte Teile der in Abbildung 1-2 (vgl. Kapitel 1) dargestellten Wirkungskette von der Entstehung der Güterbeförderungsleistung bis zu den Umweltwirkungen abgebildet werden.

Die vier vorgestellten Modelle liefern Ansatzpunkte zur Ableitung eines Gestaltungsmodells. Für die eigene Modellierung sind folgende Aspekte als besonders relevant hervorzuheben:

- Die kohorten-basierte Betrachtung der Fahrzeugflotten des TREMOD-Modells zur exakten Bestimmung der Emissionen,
- die Differenzierung zwischen Güterbeförderungsleistung und Fahrleistung in ASTRA,
- die Unterscheidung zwischen Gütergruppen und die Berücksichtigung von Güterstruktureffekten in ASTRA,
- die segmentierte Betrachtung der Nachfrage aus GLOMO und
- die Bestimmung von Verkehrsmengen aus VALIDATE.

Keines der vorgestellten Modelle ist in der Lage die Forschungsfrage hinreichend zu beantworten. Daher wird ergänzend und basierend auf den beschriebenen Modellen im folgenden Kapitel ein Gestaltungsmodell entwickelt, welches die genannten relevanten Aspekte aufnimmt und diese zu einem Modell erweitert, welches in der Lage ist die ökologischen und betriebswirtschaftlichen Effekte einer Regionalisierung zu simulieren. Es werden sowohl die Ergebnisse der Modelle verwendet (z. B. Nachfrage nach Pkw aus GLOMO und ASTRA) als auch Wirkungsbeziehungen der Modelle übernommen und erweitert.

4 Abgrenzung und Beschreibung des Systems „Automobilindustrie“

Um die Anforderungen an ein Gestaltungsmodell zur Simulation des Systems „Automobilindustrie“ als Forschungsgegenstand dieser Arbeit festzulegen, wird in diesem Kapitel zunächst das System zeitlich, räumlich und sachlich durch ein Beschreibungsmodell abgegrenzt. Der Festlegung der Systemgrenzen folgt die Beschreibung der Wirkungszusammenhänge innerhalb und mit dem Umfeld des Systems in einem Erklärungsmodell. Dieses wird als Wortmodell realisiert und bildet die Grundlage zur Erstellung der Wirkungsgraphen und der Ableitung eines Gestaltungsmodells nach Bossel (2004).

4.1 Sachliche, räumliche und zeitliche Systemgrenzen – Ein Beschreibungsmodell

Die Automobilindustrie beinhaltet Elemente, die sich nur diesem und keinem anderen Industriezweig zuordnen lassen. Es ist somit möglich, die Automobilindustrie von anderen Industriezweigen (z. B. chemische Industrie) abzugrenzen. Es lassen sich sowohl Elemente innerhalb der Automobilindustrie identifizieren als auch Relationen unter diesen Elementen erkennen. Durch die Verknüpfung von Elementen und Relationen ergibt sich ein Systemzweck, der es ermöglicht, die Automobilindustrie als ein spezialisierter Industriezweig in die Menge der durch Forrester (1961) beschriebenen industriellen Systeme (vgl. Forrester 1961, S. 21ff.) einzuordnen. Insofern eignet sich die Systemtheorie zur Beschreibung und Analyse der Vorgänge in der Automobilindustrie.

Sachlicher Gegenstand des Systems „Automobilindustrie“ ist das Produktions- und Beschaffungsnetzwerk der deutschen Automobilindustrie. Dazu zählen alle produzierenden OEM und Automobilzulieferunternehmen, die sich der Wirtschaftszweigklassifikation „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ (WZ 29) des Statistischen Bundesamtes zuordnen lassen (vgl. Bratzel et al. 2015, S. 29f.).

Innerhalb der räumlichen Systemgrenzen liegen alle deutschen Produktionsstandorte der OEM (vgl. Handke und Glückler 2010, S. 79) und Zulieferer jeglichen Ranges. Ausländische Standorte werden berücksichtigt, sofern diese direkt an in Deutschland geografisch verorteten Produktionsstandorte liefern. Lieferbeziehungen zwischen zwei ausländischen Produktionsstandorten werden aufgrund fehlender Datenverfügbarkeit nicht betrachtet. Die räumliche Systemgrenze lässt sich sachlich dadurch begründen, dass die Wirkungsebene die deutschen Automobilhersteller adressiert.

Die zeitliche Abgrenzung des Systems ergibt sich einerseits aus den verfügbaren Daten und Informationen für die Ex-post-Analyse und andererseits aus dem Zielhorizont der Ex-ante-Gestaltung des Systems.

Ab dem Jahr 2000 beschleunigten sich die Globalisierung, Modularisierung und Variantenbildung in der Automobilproduktion (vgl. Wyman 2012, S. 16ff.). Diese Trends wurden in einer Reihe von Studien, Befragungen und Analysen im Zeitraum ab dem Jahr 1995 bis zum Jahr 2012 untersucht und dokumentiert (vgl. beispielsweise Wyman 2012, Göpfert und Grünert 2012). Der Verband der Automobilindustrie (VDA) stellt zudem ab dem Jahr 2000 konsistente Statistiken zur Produktion und zum Absatz von Pkw zur Verfügung. Für die Ex-post-Analyse des Systems „Automobilindustrie“ wurde aus Gründen der Datenverfügbarkeit und dem Zeitpunkt der auftretenden Änderung im Produktions- und Beschaffungsprozess der Zeitraum vom Jahr 1995 bis zum Jahr 2014 gewählt.

Pkw-Modelle, die im Jahr 2015 auf den Markt gekommen sind, werden voraussichtlich erst nach dem Jahr 2020 durch neue Modelle ersetzt (vgl. Niederländer 2000, S. 196). Somit lässt sich auch erst nach dem Jahr 2020 das System durch Regionalisierung der Zulieferstruktur gestalten. Zusätzlich zur zeitlich restringierten Gestaltungsmöglichkeit des Systems richten sich die zeitliche Abgrenzung nach den Klimaschutzzielen auf nationaler und internationaler Ebene wie dem sich momentan in der Abstimmung befindenden Klimaschutzplan 2050 (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) 2015). Da sich sowohl die Gestaltungsmöglichkeit als auch die politische Zielsetzung auf den Zeitraum nach dem Jahr 2020 fokussiert, wurden für die Ex-ante-Gestaltung des Systems der Zeitraum vom Jahr 2015 bis zum Jahr 2030 festgelegt.

4.2 Wirkungszusammenhänge im System „Automobilindustrie“ – Ein erklärendes Wortmodell

Um die Wirkungszusammenhänge zwischen Elementen und Subsystemen innerhalb des sachlich, räumlich und zeitlich abgegrenzten Systems „Automobilindustrie“ charakterisieren zu können, müssen diese Subsysteme und Elemente identifiziert werden. Gemäß der formalen Abgrenzung in Abbildung 2-1 ist die Anzahl der Elemente stets größer als die Anzahl der Subsysteme. Aus diesem Grund werden im weiteren Verlauf zunächst die Subsysteme und deren Wirkungsbeziehungen verbal beschrieben, um im Anschluss die relationale Struktur zwischen den Elementen in den Subsystemen analysieren zu können.

Aus Forresters Ausführungen zur Beschreibung von industriellen Systemen lassen sich vier Subsysteme ableiten: Nachfrage, Produktion, Beschaffung und Distribution (vgl. Forrester 1961, S. 212ff.). Da sich diese Arbeit mit Fragestellungen bezüglich der Transportlogistik beschäftigt, wurde die Betrachtung um die Subsysteme Transport und Nutzfahrzeugflotte erweitert (siehe Abbildung 4-1).

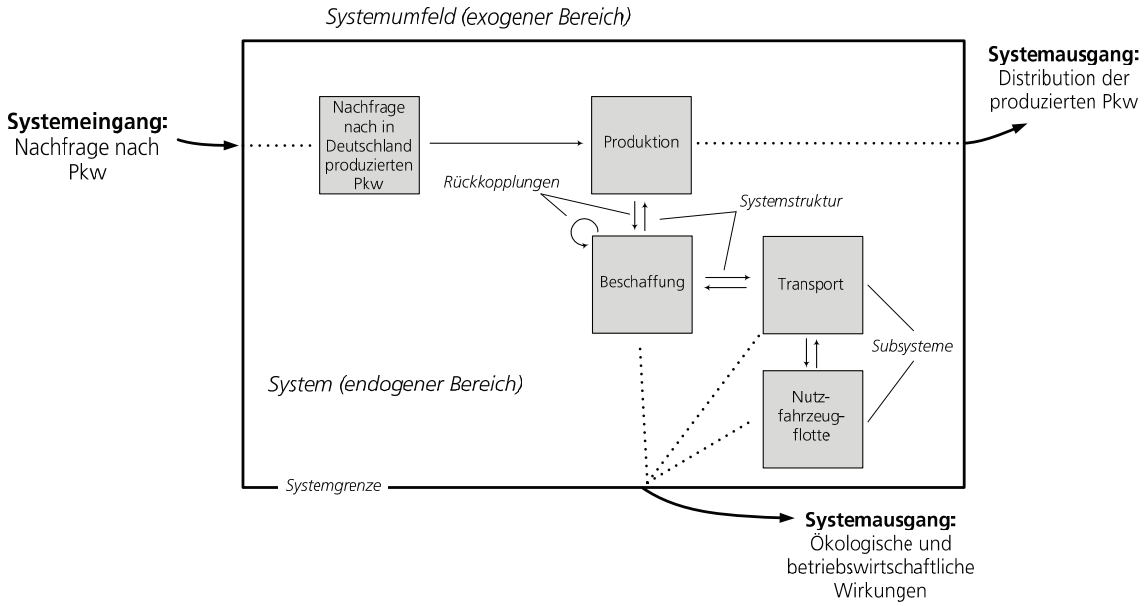


Abbildung 4-1: Subsystemstruktur des Systems Automobilindustrie (eigene Darstellung, Notation basierend auf Bossel 1992b, S.11)

Im System „Automobilindustrie“ werden in dieser Arbeit sechs Subsysteme unterschieden: Das Subsystem Nachfrage bildet die Nachfrage nach Neufahrzeugen von in Deutschland produzierenden Herstellern auf dem weltweiten Pkw-Markt ab. Produktion und Beschaffung bilden zusammen den Kern des Systems. In diesen Subsystemen findet die Endfertigung der Pkw und die Produktion der Zulieferer Berücksichtigung. Abhängig von der geografischen Verteilung der Nachfrage werden die Pkw an den Endverbraucher ausgeliefert. Die entstehenden Warenströme werden im Subsystem Transport bewegt. Die dazu benötigten Transportgefäße stellt das Subsystem Nutzfahrzeugflotte zur Verfügung.

Die beschriebenen Subsysteme sind nicht unabhängig voneinander. Jedes der Subsysteme benötigt zur Erfüllung des Systemzwecks den Input mindestens eines weiteren Subsystems. Die dadurch entstehenden Wirkungszusammenhänge prägen die Systemstruktur. Eine Durchdringung des Systemverhaltens setzt sowohl ein Verständ-

nis über die Struktur des Systems als Ganzes als auch der Wirkungsbeziehungen im Einzelnen voraus.

Dem System „Automobilindustrie“ lassen sich folgende Merkmale zuweisen:

- Produktion auf Basis eines verzweigten Netzwerks aus Automobilhersteller (OEM) und deren Zulieferer,
- hoher Grad an Individualisierung der gefertigten Produkte,
- Modularisierung der Produktion,
- Exportorientierung,
- hoher Anteil der Zulieferer an der Wertschöpfung sowie
- zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges.

Diese sechs charakteristischen Merkmale beschränken sich nicht auf die Automobilindustrie, jedoch weißt dieser Industriezweig eine besonders starke Ausprägung dieser Attribute auf (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 141 f.).

Eine Regionalisierung des Zuliefernetzwerkes führt zu einer Anpassung der Systemparameter im Subsystem Beschaffung und kann den Systemzustand beeinflussen. Diese kontinuierliche Parameterveränderung in Form der Reduzierung von Transportentfernungen können als „Regelung des Systems“ (Bossel 2004, S. 48) verstanden werden. Die Struktur sämtlicher Subsysteme und demnach des gesamten Systems „Automobilindustrie“ bleibt unverändert. Dies bedeutet, dass sowohl die Elemente als auch die Wirkungsbeziehungen ihre ursprüngliche Anordnung, Wirkungsstärke und -richtung beibehalten.

4.2.1 Wortmodell des Subsystems NACHFRAGE

Die deutsche Automobilindustrie zeichnet sich, verglichen mit anderen Industriezweigen, durch eine starke Exportorientierung aus (vgl. Statistisches Bundesamt 2013b, S. 410). Die aggregiert ausgewiesene Exportquote von etwa 77 %, bezogen auf die Gesamtproduktion in Deutschland im Jahr 2014 (vgl. VDA 2015), variiert zwischen den Herstellern: Während Volkswagen etwa 69 % der produzierten Pkw ins Ausland liefert, erreichen die Hersteller Porsche und Audi Anteile von über 80 % (vgl. Schade et al. 2014, S. 74). Mehr als die Hälfte aller Exporte wurden im Jahr 2014 in die Absatzmärkte nach Großbritannien (19 %), die USA (14 %), China (6,3 %), Frankreich (6,1 %), Italien (5,5 %) und Spanien (4,4 %) geliefert (vgl. VDA 2015). Impulse der Nachfragesteigerung in den jeweiligen Märkten können das Subsystem Produktion beeinflussen, wie sich u. a. durch den Aufbau von Produktionskapazitäten und Kooperationen deutscher Hersteller auf dem chinesischen Markt zeigt (vgl. Bratzel et al. 2015, S. 11ff.).

Die Tendenzen zur Produktionsverlagerung der OEM in räumliche Nähe zu den Absatzmärkten beschränken sich derzeit auf die Produktion von Pkw der Kompakt- und Mittelklasse. Fahrzeuge der oberen Mittel- und Oberklasse werden auf Grund hoher Qualitätsanforderungen an die Fertigung ausnahmslos in deutschen Werken produziert (vgl. Schade et al. 2014, S. 200).

Neben der Exportorientierung prägen auch individuelle Wünsche der Endkunden an die Konfiguration der Fahrzeuge die Produktion. Spätestens seit Anfang der 2000er Jahre hat sich der Automobilmarkt vom Verkäufer- zum endkundenorientierten Käufermarkt gewandelt (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 142). Während sich in den vergangenen Jahren die Anzahl der Segmente als sehr übersichtlich darstellte, kommt es seit Anfang der 2000er Jahre zu einer „Atomisierung der Modellpalette“ (Becker 2007, S. 27), die neue Subsegmenten und Nischen hervorbringt. So verdoppelte sich die Anzahl der verfügbaren Fahrzeugsegmente zwischen den Jahren 1980 und 2010, und die Anzahl der in Deutschland verfügbaren Modellreihen stieg von 227 Modellen im Jahr 1995 auf 367 Modelle im Jahr 2010 an (vgl. Schade et al. 2014, S. 139f.). Neben der Steigerung der Modellanzahl nahmen auch die Varianten je Modell zu. Mittlerweile entstehen durch die Individualisierung je nach Fahrzeughersteller zwischen 10^{16} bis 10^{31} unterschiedliche Varianten je Fahrzeugtyp (vgl. Mößmer et al. 2007, S. 4). Diese Ausdifferenzierung der Nachfragestruktur führt zu einer Steigerung der Variantenvielfalt (vgl. Kersten 2001, S. 37).

4.2.2 Wortmodell des Subsystems PRODUKTION

Die Variantenvielfalt der Nachfrage kann die Kosten für die Pkw-Fertigung erhöhen. Um dieser Kostensteigerung entgegenzuwirken, werden im Zuge des Vielfaltsmanagements Baukastensysteme in modularer Bauweise verwendet (vgl. Kersten 2001, S. 43). Somit werden zentrale Bauteile des Fahrzeuges standardisiert und durch einheitliche Schnittstellen für den Einsatz in mehreren Modellreihen vorbereitet (vgl. Schulz 2014, S. 42f.). Durch die Verwendung der Module in mehreren Modellreihen können Skalenerträge und damit sinkende Grenzkosten erreicht werden (vgl. Wildemann 2013, S. 149). Die Zerlegung der Fahrzeuge in Module stellt seit Anfang der 1990er- Jahre eine Strategie der OEM zur Reduktion der Produktionskomplexität dar (vgl. Piller und Waringer 1999, S. 37ff.). Im Wesentlichen setzte sich die Unterscheidung in folgende sieben Hauptmodule (inklusive beispielhafte Submodule) durch (vgl. Stockmar 2001, S. 428):

- Fahrwerk (z. B. Räder, Radaufhängung, Lenkung)
- Antriebsstrang (z. B. Getriebe, Antriebswelle)
- Motor und Aggregate (z. B. Motor, Abgasanlage, Kraftstoffversorgung)

- Karosseriestruktur (z. B. Fahrgastzelle, Vorderwagen)
- Body (z. B. Dach, Kotflügel, Stoßfänger, Türen)
- Interieur (z. B. Sitze, Dachhimmel, Cockpit)
- Elektrik und Elektronik (z. B. Stromversorgung, Bordnetz, Motormanagement)

Die Aufteilung des Fahrzeuges in diese sieben Hauptmodule hat sich in den letzten beiden Jahrzehnten nicht geändert. Um die Produktion weiter zu standardisieren und damit Kosten zu senken, werden die Submodule innerhalb der sieben Hauptmodule weiter ausdifferenziert (vgl. Wyman 2012, S. 45ff. verglichen mit Stockmar 2001, S. 428). Vordefinierte Module reduzieren den Aufwand bei der Vergabe der Produktion an Zulieferer.

4.2.3 Wortmodell des Subsystems BESCHAFFUNG

Das Produktionsnetzwerk in der deutschen Automobilindustrie setzt sich aus „Volumen- und Premiumhersteller“ (Reichhuber 2010, S. 17f.) und deren Zulieferern zusammen. Die Unterteilung der OEM in Volumen- und Premiumhersteller beruht auf deren Marktausrichtung. Während Volumenhersteller hohe Stückzahlen im niedrigen bis mittleren Preissegment produzieren, zeichnen sich die Premiumhersteller durch geringere Produktionszahlen von hochpreisigen Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse aus (vgl. Schade et al. 2014, S. 40). Die Zulieferer als zentrale Gruppe von Akteuren im Subsystem Beschaffung lassen sich gemäß ihrer Position in der Hierarchiepyramide (vgl. Abbildung 4-2) in unterschiedliche Ränge (engl. = tier) einteilen. Es gilt: Je höher die Hierarchiestufe, desto niedriger der Rang. Die Einordnung der Zulieferer in die entsprechenden Ränge orientiert sich am Anteil des Produktionsoutputs an der gesamten Wertschöpfung und am Verarbeitungsgrad (vgl. Schneider 2011, S. 44ff.). Bei den Produktionsoutputs wird zwischen Modulen, Komponenten, Einzelteilen und Rohstoffen unterschieden. Als Modul wird ein aus mehreren Komponenten und Einzelteilen bestehendes Bauteil mit einer bestimmten Funktion bezeichnet, welches durch eine definierte Schnittstelle in ein Fahrzeug eingebaut werden kann (vgl. Schulz 2014, S. 42f.). Komponenten sind Bauteile, welche aus Einzelteilen bestehen.

Während die dem ersten Rang zugehörigen Tier-1-Zulieferer Module produzieren und diese direkt an den OEM liefern, unterhält der komponentenproduzierende Tier-2-Zulieferer sowohl Lieferbeziehungen zu den OEM als auch zu den Zulieferern ersten Ranges. Einzelteile und Rohmaterialien werden im Produktionsnetzwerk durch Tier-3- und Tier-n-Zulieferer bereitgestellt (vgl. Fraß 2012, S. 18-20). Die Rangbildung unter den Zulieferern führt zu einer pyramidalen Struktur innerhalb der Zulieferkette (siehe Abbildung 4-2).

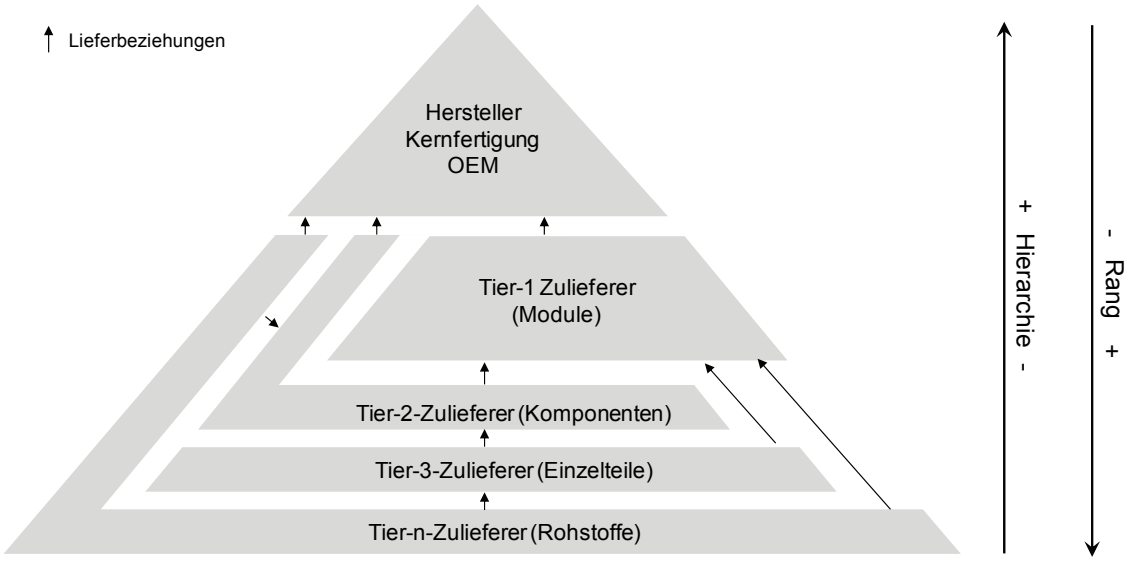


Abbildung 4-2: Pyramidale Zulieferkette (eigene Darstellung basierend auf Piller und Waringer 1999, S. 116)

Da sich hohe Fertigungstiefen bei den OEMs als finanziell und personell aufwendig darstellten und die Flexibilität einschränkten, setzten sich in den vergangenen Jahren Outsourcing-Strategien (Fremdvergabe) durch. Dabei werden sowohl Produktions- als auch Entwicklungsrisiken an die Zulieferer übertragen (vgl. Schneider 2011, S. 40). Während das Outsourcing bei Einzelteilen und Komponenten schon seit Jahrzehnten die Beschaffungsstrategien der OEM dominiert, setzten sich in den letzten zwanzig Jahren auch Sourcing-Strategien für die Beschaffung von Modulen durch (vgl. Schneider 2011 ,S. 38). Diese Outsourcing-Variante wird im Gegensatz zum als traditionelle Beschaffungsstrategie bekannten Unit-Sourcing als „Modular Sourcing“ (Piontek 1997, S. 12) bezeichnet. Als Folge des Modular Sourcings reduzierte sich der Anteil der OEM an der Gesamtwertschöpfung zwischen den Jahren 1985 und 2008 von 43 % auf etwa 29 % (vgl. Koch 2006, S. 78 und Göpfert und Grünert 2012, S. 148). Diese Verlagerung zu Modullieferanten könnte sich aktuellen Studien zur Folge in den Submodulen weiter fortsetzen (vgl. Wyman 2012, S. 43). Allerdings wird das durch die Fremdvergabe abfließende Know-how und die damit verbundenen eingeschränkten Möglichkeiten der Differenzierung gegenüber der Konkurrenz durch die OEM zunehmend kritisch betrachtet. Mittelfristig könnte dies dazu führen, dass versucht wird, etwa 30 % der Wertschöpfung bei den OEM zu halten (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 147). Die Wertschöpfungsanteile der OEM variieren zwischen den Modulen: Die Produktion von Verbrennungsmotoren, Karosserien und Antriebsstränge wird von den OEM dominiert.

Die Fertigung von Interieur (z. B. Sitze, Cockpit) und Elektronik (z. B. Kommunikation, Sicherheitselektronik) ist hingegen stark von den Zulieferern geprägt (vgl. Wyman 2012, S. 45ff.).

Die Outsourcing-Strategien können sich auf die Anzahl der Lieferanten (Single-Sourcing und Multiple- Sourcing) oder auf deren Standorte (Local- und Global- Sourcing) beziehen. Im Gegensatz zu Multiple-Sourcing bedeutet Single-Sourcing die Fremdvergabe einer Leistungsart an nur einen Lieferanten. Gründe dafür sind einerseits die begrenzte Anzahl der Unternehmen, die in der Lage sind, komplexe Module zu entwickeln und zu produzieren und andererseits die geringeren Transaktionskosten bei der Auftragsvergabe und im Lieferantenmanagement (vgl. Kinkel und Zanker 2007, S. 41). Eine Befragung zur Hersteller-Zulieferer-Beziehung von 28 Produktionsstandorten der Automobilindustrie (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 145) ergab bei der Beschaffung von Modulen (Tier-1) eine Dominanz des Single-Sourcings, das etwa 90 % des gesamten Beschaffungswertes bestimmt. Bei Befragungen zum Anteil der Fremdvergabe bei Komponenten (Tier-2), Einzelteilen (Tier-3) und Rohstoffen (Tier-n) ergaben sich geringere Single-Sourcing-Anteile zwischen 55 % und 70 % des Beschaffungswertes (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 157).

Bei standortrelevanten Ausprägungen der Fremdvergabe kann ebenfalls zwischen der Tier-1-Zulieferstufe und den Vorstufen (Tier-2 bis Tier-n) unterschieden werden. Während etwa 80 % des Beschaffungswertes in der Tier-1-Zulieferstufe inländischer Herkunft ist (Local Sourcing), werden Einzelteile und Komponenten mehrheitlich im Ausland beschafft (Global Sourcing) (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 161).

Die aus der Individualisierung der Produkte entstehende Variantenvielfalt der Modellreihen im Subsystem Produktion erfordert eine Flexibilität der Produktion, die mit der klassischen Build-to-Forecast (BTF) Produktionsstrategie nicht zu erreichen ist. Aus diesem Grund wird bei Tier-1-Zulieferbeziehungen fast ausschließlich Build-to-Order (BTO) als Produktionsstrategie angewendet (vgl. Saatmann 2007,S. 139). So produzieren Zulieferer die Module erst auf Basis von konkreten und individuellen Kundenaufträgen (vgl. Klug 2010, S. 101).

Die Beschaffungsstrategien im Subsystem Beschaffung beeinflussen das Subsystem Transport vielfältig: Die Art der zu transportierenden Güter (Module, Komponenten, Einzelteile, Rohstoffe) führt zu unterschiedlichen Nachfragekapazitäten im Transportsystem. Local- und Global- Sourcing legen die Transportentfernungen fest, und die Anzahl der Zulieferer pro Modul, Komponente, Einzelteil und Rohstoff beeinflusst die Anzahl der Transportrelationen und die Bündelungsmöglichkeiten.

4.2.4 Wortmodell des Subsystems TRANSPORT

Der Transport wird durch die Maßgrößen Transportaufkommen und Güterbeförderungsleistung beschrieben. Das Transportaufkommen gibt die physische Menge der zu transportierenden Güter in Tonnen an. Die Güterbeförderungsleistung ist das Produkt aus Transportaufkommen und Transportentfernungen zwischen Quelle und Ziel der zu transportierenden Güter. Diese Maßgröße wird in Tonnenkilometer angegeben (vgl. Aberle 2000, S. 25f.).

Der Begriff Logistik umfasst die „Gestaltung logistischer Systeme sowie die Steuerung der darin ablaufenden logistischen Prozesse“ (Arnold et al. 2008, S. 3). Die logistischen Prozesse umfassen den Umschlag, den Transport, die Kommissionierung, die Verpackung sowie die Lagerung von Gütern (vgl. Arnold et al. 2008, S. 6f.) mit dem Ziel, das Produktionsnetzwerk und die Endkunden zur richtigen Zeit und am richtigen Ort mit den richtigen Gütern zu versorgen (vgl. Weber 2012, S. 170). Sowohl Beschaffungs- als auch Distributionslogistik sind demnach direkt und indirekt abhängig von den Charakteristika der Subsysteme Nachfrage, Produktion und Beschaffung.

Distributionslogistik

Die Distributionslogistik kann in drei Räume unterteilt werden: Distribution im Inland, Distribution nach Europa und weltweite Distribution. Bei den Auslieferungen an deutsche Kunden lassen sich einheitlich für alle deutschen Produktionswerke folgende Distributionsformen unterscheiden: Die einstufige Auslieferung in regionaler Nähe zur Produktion mit dem Lkw, die zweistufige Auslieferung bei weiter Distanz zur Produktion mit Bahn bzw. Binnenschiff und Lkw im Nachlauf sowie die Selbstabholung der Endkunden ab Werk (vgl. Klug 2010, S. 430-434). Neben der Einsparung von Überführungskosten, versuchen die Hersteller mit der Einrichtung von Besuchererlebnisparks, wie die Autostadt in Wolfsburg oder die BMW-Welt in München, den Autokauf zum Erlebnis zu machen und damit die Markenbindung zu stärken (vgl. Klug 2010, S. 430). In der Folge nehmen die Auslieferungen der Pkw an die lokalen Verkaufsstellen ab. Die Selbstabholung der Endkunden führt zu einer Verlagerung vom Güterverkehr hin zum motorisierten Individualverkehr und findet in der Güterverkehrsstatistik keine Berücksichtigung mehr. Im Jahr 2012 lag der Anteil der Selbstabholungen in Deutschland bei etwa 35 % aller Bestellungen (vgl. Diez 2012, S. 304) und reduzierte das Transportaufkommen innerhalb der Distributionslogistik deutlich.

Innereuropäische Auslieferungen (ohne Großbritannien, Schweden, Norwegen und Finnland) werden vorwiegend mit den Verkehrsträgern Schiene oder Binnenschiff durchgeführt (vgl. Herold 2004, S. 65). Für den außereuropäischen Export bestehen Direktzugverkehre und Binnenschiffverbindungen von den Produktionswerken zu den

Seehäfen Bremerhaven, Emden, Cuxhaven und Hamburg, wo die Fahrzeuge dann nach Afrika, Amerika, Asien und Nordeuropa verschifft werden. Über die genannten Autohäfen werden derzeit etwa 3,3 Millionen Fahrzeuge (Stand: 2013) versendet, was dem gesamten Export der deutschen OEM nach Afrika, Amerika, Asien und Nordeuropa entspricht (eigene Berechnungen basierend auf VDA 2015 und Holocher 2014, S. 58). Über Bremerhaven und Emden werden etwa 83 % der exportierten Fahrzeuge verschifft, die restlichen 17 % verteilen sich in etwa gleichen Anteilen auf Hamburg und Cuxhaven (vgl. Holocher 2014, S. 58).

Beschaffungslogistik

Die Anzahl der produzierten Pkw und der daraus abgeleitete Beschaffungsbedarf an Modulen, Komponenten, Einzelteilen und Rohstoffen im Subsystem Beschaffung legt die Höhe des Transportaufkommens auf dieser Zulieferstufe fest. Zusammen mit den aus der Beschaffungsstrategie resultierenden Transportentfernungen ergibt sich die Güterbeförderungsleistung. Dieses Produkt aus Transportaufkommen und Transportentfernungen bestimmt die Anforderungen an die Transportlogistik bezüglich Transportkapazität und Lagerflächenbedarf.

Neben der Güterbeförderungsleistung wird der Bedarf an Transport- und Lagerkapazitäten durch die Beschaffenheit der zu transportierenden Güter bestimmt (vgl. Kummer 2006, 178ff.). Hohe Werkstoffdichten und ein geringes Beschädigungspotential der Transportgüter erlauben eine hohe Auslastung der Nutzlast und des Nutzvolumens der Transportgefäße. Diese Eigenschaften gelten besonders für die Gütergruppen mit einem geringen Verarbeitungsgrad (z. B. Eisen, Stahl). Mit wachsendem Grad der Verarbeitung steigen die Anforderungen an Sicherheit und Handhabbarkeit der Güter (vgl. Kummer 2006, S. 174ff.). Um Güter vor Beschädigungen während des Transports zu schützen und die Be- und Abladevorgänge mit Hilfe von Lademitteln (z. B. Hubstapler) zu vereinfachen, werden zum Transport der Güter Ladungsträger eingesetzt. Die Volumen und Massen dieser Ladungsträger richten sich nach der Schutzbedürftigkeit des zu transportierenden Gutes. Die Beschaffenheit der als Ladeneinheiten bezeichneten Kombination aus Ladungsträger und Ladegut bestimmt die Auslastung von Nutzlast und Nutzvolumen der Transportgefäße (vgl. Abbildung 4-3). Unter dieser Annahme führt eine geringe Auslastung der Nutzlast zu einem hohen Verhältnis von Güterbeförderungsleistung zur Fahrleistung der Transportmittel (Fahrleistungsintensität) (vgl. Kühn 2015). Damit ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Transportkapazität und Fahrleistungsintensität (vgl. Aberle 2000, S. 26):

$$FLI = \frac{1}{K^T} \qquad (4.1)$$

mit

FLI: *Fahrleistungsintensität*
K^T*:* *Transportkapazität*

Unter der Annahme, dass die Fahrleistungsintensität mit zunehmender Hierarchie des Zulieferers steigt, führt die Modularisierung der Produktion bei steigender Güterbeförderungsleistung zu einem überproportionalen Wachstum der Fahrleistung (vgl. Abbildung 4-3).

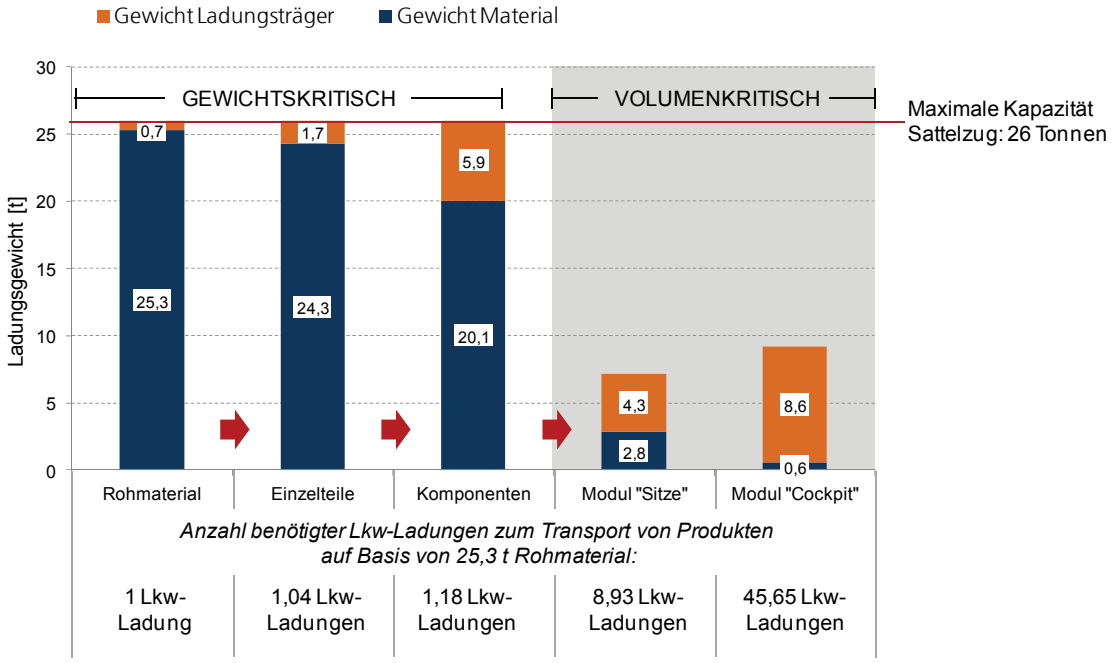


Abbildung 4-3: Wirkung einer Modularisierung der Produktion auf die Transportlogistik[2] (eigene Berechnungen)

Die geringe Packdichte der Module kann zusätzlich zu einem hohen Platzbedarf im Falle der Lagerung führen. Zusammen mit dem hohen Teilwert, der bei längerer Lagerung die Kapitalbindungskosten steigert, ergibt sich ein ökonomischer Nutzen für

2 Die Berechnung der Ladungsträgergewichte und der dazugehörigen Volumina basiert auf folgenden Annahmen: Rohmaterial auf EURO-Paletten, Kleinteile in Standard-KLT auf EURO-Paletten, Komponenten in Gitterboxen sowie Module in Spezialladungsträgern (vgl. Klug 2010, S. 150ff.; MTU 2014, S. 1; Transpofix 2014).

eine Just-in-Time-Anlieferung (vgl. Ihme 2006, S. 296). Da sich bei großen Modulen die Veränderung der Reihenfolge der produzierten Fahrzeugmodelle (Resequenzierung) und die damit verbundene Zwischenlagerung einzelner Module am Montageband platzaufwändig gestaltet, findet hauptsächlich eine Spezialform der Just-in-Time Anlieferung statt: Die Just-in-Sequence-Anlieferung (JiS) berücksichtigt zusätzlich die Abfolge der Module (vgl. Klug 2010, S. 421).

Der Kostensteigerungen durch eine wachsende Variantenvielfalt wird versucht durch eine Modularisierung entgegenzuwirken. Diese ermöglicht eine vermehrte Fremdvergabe der Produktionsleistung und senkt die Fertigungstiefe der OEM (Subsystem Produktion). Modular- und Global-Sourcing als Beschaffungsstrategien bestimmen die Transportentfernungen und Fahrleistungsintensität in der Transportlogistik (Subsystem Beschaffung). Die Lieferkette kann durch die forcierten Outsourcing-Strategien und der steigenden Modularisierung nicht nur umfangreicher, sondern durch die Verringerung der Massendichte und Erhöhung der Transportentfernungen auch fahrleistungsintensiver werden. Dabei erhöht das Global Sourcing die Transportentfernungen bei Komponenten und Einzelteilen und die Modularisierung kann zu einem Anstieg der Fahrzeugkilometer beim Transport von Modulen beitragen (Subsystem Transport).

4.2.5 Wortmodell des Subsystems NUTZFAHRZEUGFLOTTE

Nutzfahrzeuge werden zum Transport von Gütern auf dem Verkehrsträger Straße eingesetzt. Daher wird das Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE vom Subsystem TRANSPORT beeinflusst. Die Nutzfahrzeugflotte besteht aus Straßenfahrzeugen unterschiedlicher Größe, welche sich nach ihrer Nutzlast und dem zulässigen Gesamtgewicht differenzieren lassen (vgl. Wittenbrink 2011, S. 8). Die Nutzlast bei Nutzfahrzeugen variiert zwischen ca. 1.400 kg und ca. 26.000 kg (vgl. Brähler 2013, S. 119ff.) und ist durch das in Deutschland maximal zulässige Gesamtgewicht von 40 Tonnen begrenzt (vgl. Straßenverkehr-Zulassungs-Ordnung (StVZO) § 32). Die im Subsystem TRANSPORT aus der Güterbeförderungsleistung abgeleitete Fahrleistung beeinflusst den Nutzfahrzeugbestand: Je höher die Fahrleistung, desto mehr Nutzfahrzeuge werden zum Transport benötigt. Unter der Annahme, dass Speditionen das Ziel verfolgen, die verfügbaren Fahrzeuge so einzusetzen, dass die Betriebskosten minimiert werden, hängt die Aufteilung des Bestandes nach Größenklassen von der Güterbeförderungsleistung und Bedienungsfrequenz ab: Bei geringer Güterbeförderungsleistung und hoher Bedienfrequenz einer Quelle-Ziel-Relation sinkt mit steigender Kapazität der Fahrzeuge der Auslastungsgrad (vgl. Bretzke 2010, S. 159). Daher ist zu vermuten, dass auf Relationen mit häufigen Fahrten und geringem Transportaufkommen Fahrzeuge mit geringer Nutzlast eingesetzt werden.

Abhängig von der Größenklasse verursacht der Betrieb von Nutzfahrzeugen Transportkosten. Der Kraftstoffverbrauch und die Abgasnachbehandlung bestimmen die CO_2- und Luftschadstoffemissionen der Nutzfahrzeuge. Somit entstehen ausgehend vom Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE ökologische und betriebswirtschaftliche Wirkungen auf das Systemumfeld.

4.3 Schlussfolgerung aus der Systembeschreibung

Unter Einbezug der systemtheoretischen Grundlagen aus Kapitel 2 kann das System „Automobilindustrie“ auf Grund der hohen Anzahl an Elementen und Wirkungsbeziehungen als kompliziert bezeichnet werden. Bei detaillierter Betrachtung der beschriebenen Subsysteme und deren Relationen lassen sich Zusammenhänge erkennen, die ein komplexes Systemverhalten vermuten lassen. Zu diesen Relationen gehören beispielsweise die Rückkopplungen zwischen Produktionsplanung und Bestandsmanagement als Bestandteile der dynamischen Produktionsstrategien der Zulieferer.

Die Regionalisierung des Zuliefernetzwerkes verändert den Systemzustand im Subsystem BESCHAFFUNG. Veränderte Systemzustände können das Systemverhalten beeinflussen. Dynamisches Systemverhalten kann am Realsystem oder im Modell beobachtet werden. Die Automobilindustrie kann als ein kompliziertes Realsystem bezeichnet werden. Die Zugänglichkeit zu internen Informationen der OEM und der Zulieferer ist nicht durchgängig gegeben. Beobachtungen am Realsystem scheiden daher aus. Die durch eine Regionalisierung hervorgerufene Änderung des Systemzustandes schränkt die Auswahl der Modellklasse ein. Die Beantwortung der Forschungsfrage impliziert damit die Erstellung eines Gestaltungsmodells zur Abbildung der Wirkungszusammenhänge im System „Automobilindustrie“. Die Wirkungsanalyse innerhalb der Struktur aus Systemelementen und Relationen als Voraussetzung zur Modellierung wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

5 Wirkungsanalyse und Ableitung eines Wirkungsmodells für das System „Automobilindustrie“

Um die durch eine Regionalisierung des Zuliefernetzwerkes bedingte Änderung des Systemzustandes modellbasiert simulieren zu können, müssen die Subsysteme des Systems „Automobilindustrie“ in eine systemdynamische Modellstruktur überführt werden. Dazu werden in diesem Kapitel die Wirkungsbeziehungen innerhalb der in Kapitel 4.2 abgegrenzten Subsysteme analysiert und auf Basis von Bossel (2004) in Wirkungsgraphen überführt. Die abgeleiteten Wirkungsgraphen lassen sich in ein systemdynamisches Gestaltungsmodell transferieren, dessen Modellstruktur in Unterkapitel 5.2 erläutert wird. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung des ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungsmodells.

5.1 Analyse der Wirkungsbeziehungen innerhalb der Subsysteme

Nachdem die Wirkungen zwischen den Subsystemen im erklärenden Wortmodell in Kapitel 4 identifiziert und beschrieben wurden, folgt nun eine Analyse der Relationen zwischen den Elementen innerhalb der Subsysteme. Ausgewählte theoretische und empirische Grundlagen zur Entwicklung der Wirkungsgraphen sind in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Ausgewählte theoretische und empirische Grundlagen zur Erstellung der Wirkungsgraphen für die Subsysteme (eigene Darstellung)

Subsystem	*Empirie*	*Theorie*
NACHFRAGE	Umsatzanteile in den einzelnen Märken *(Quelle: Geschäftsberichte der Unternehmen sowie VDA 2013, S.27ff.)*	Markenattraktivität *(Müller und de Haan 2006)*
PRODUKTION	Output einzelner OEM-Produktionsstandorte *(Quelle: Geschäftsberichte der Unternehmen)* Gewichte einzelner Module *(Quelle: o. V. 2015)*	Modularisierung der Produktion *(Stockmar 2001, Wyman 2012)*
BESCHAFFUNG	Geografischen Standortinformationen Tier-1-Zulieferer *(Quelle: eigene Erhebung)* Durchschnittliche Transportentfernungen *(Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt)* Physische Importe von Automobilteilen *(Quelle: UN-Comtrade; Warengruppen 870710 bis 870899)*	Bull-Whip-Effekt *(Forrester 1961)* Produktionsstrategien *(Vahrenkamp und Kotzab 2012)*
TRANSPORT	Werkstoffdichten, Materialzusammensetzung und Zuladungskapazitäten der Ladungsträger *(Quelle: Hamm et al. 2013, S.1043 ff. u.a.)* Kapazitäten der Nutzfahrzeug-Gewichtsklassen *(Quelle: KBA Nutzfahrzeugbestand)*	Grundlagen der Transportlogistik *(Kummer 2006, u.a.)* Verkehrsträgeraffinitäten *(Voigt 1953)*
NUTZFAHRZEUGFLOTTE	Verschrottungsraten *(Quelle: KBA Nutzfahrzeugbestand)*	Aging-Chain *(Meadows 1972)*

5.1.1 Subsystem NACHFRAGE

Das Subsystem NACHFRAGE erfüllt den Systemzweck, das Kaufverhalten von Pkw-Endkunden nachzubilden. Um die Wirkungszusammenhänge innerhalb des Subsystems darstellen zu können, wurde auf theoretische und empirische Grundlagen zurückgegriffen: Die Theorie zur Markentreue (vgl. Müller und Haan 2006) wird durch statistische Auswertungen zu Pkw-Neukäufen des Kraftfahrt-Bundesamtes, Exportstatistiken des Verbands der deutschen Automobilindustrie (VDA) sowie Angaben der Pkw-Hersteller ergänzt.

Teile der Systemgrenze des Subsystems NACHFRAGE sind deckungsgleich mit der Grenze des Systems „Automobilindustrie“. Alle nicht der Automobilindustrie zuordenbaren Elemente und Wirkungsbeziehungen werden dem Systemumfeld zugeschlagen. Dazu zählen die Entscheidungen der Endkunden bezüglich des Pkw-Kaufs, die nicht die Marke betreffen. Als Input für das Subsystem NACHFRAGE ergibt sich dem Systemzweck folgend die Anzahl der weltweit neu zugelassenen Pkw. Da für die exportorientierte deutsche Automobilindustrie neben dem gesättigten deutschen Markt die Entwicklungen im Ausland von Bedeutung sind (vgl. Diez 2012, S. 42ff.), werden neben der Pkw-Nachfrage aus dem Modell ASTRA weitere Modellergebnisse als Input verwendet, welche die Systemumgebung hinreichend abbilden. Dazu zählen einerseits Pkw-Neuzulassungen im europäischen Ausland (vgl. Krail 2009, S. 127 ff.), aber auch die Entwicklungen in weltweit wichtigen Absatzmärkten wie den USA, Brasilien, China, Japan, Russland und Indien, welche Simulationsergebnisse des Global Mobility Model (GLOMO) darstellen. Diese Verknüpfung von Modellen ermöglicht die Verwendung einer detaillierten Nachfrageentwicklung nach Pkw-Neufahrzeugen, welche etwa 88 % des Weltmarktes abdeckt (vgl. Kühn et al. 2014).

Derzeit produzieren die deutschen Automobilhersteller an inländischen Standorten etwa 5,6 Millionen Fahrzeuge jährlich (Stand: 2015; vgl. VDA 2015). Von dieser Gesamtproduktion wird etwa 76 % ins Ausland exportiert (vgl. VDA 2015). Somit wird die Hälfte der etwa 3 Millionen in Deutschland jährlich neu zugelassenen Fahrzeuge in Deutschland produziert (vgl. Schade et al. 2014, S. 43). Die Exportquoten unter den Herstellern variieren: Während Ford, Porsche, Opel, Audi und BMW jeweils etwa 80 % der in Deutschland produzierten Fahrzeuge exportieren, liegen die Exportquoten bei Daimler und Volkswagen bei etwa 70 % (vgl. Schade et al. 2014, S. 74). Darüber hinaus gilt für alle in Deutschland produzierenden Hersteller mit Ausnahme von Opel und Ford: Je größer die produzierte Fahrzeugklasse, desto höher der Exportanteil (vgl. Abbildung 5-4). Dies lässt sich dadurch erklären, dass die deutschen Hersteller zunehmend Produktionskapazitäten für Fahrzeuge der Kompakt- und Mittelklasse in den Zielmärkten aufbauen, Fahrzeuge der oberen Mittelklasse und Oberklasse aus Quali-

tätsgründen jedoch weiterhin in Deutschland gefertigt werden (vgl. Schade et al. 2014, S. 196).

Um auf Basis dieser Informationen die Nachfrage nach in Deutschland gefertigten Pkw als Grundlage der Pkw-Produktion bestimmen zu können, liefern die Modelle GLOMO und ASTRA neben Informationen zur Entwicklung der Neuzulassungen eine Aufteilung in unterschiedliche Fahrzeuggrößen. Die Aufteilung in Segmente orientiert sich an der offiziellen Einteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) in 14 Fahrzeugsegmente (siehe Anhang A1.1). Die Segmentaufteilung der Modelle GLOMO und ASTRA weist einen höheren Aggregationsgrad auf und bildet sieben aggregierte Segmente (Mini, Kleinwagen, Kompaktklasse, Mittelklasse, obere Mittel- und Oberklasse, Geländewagen sowie Utilities) ab. Diese vereinfachte Segmentierung wurde für das erstellte Modell übernommen, da der Aggregationsgrad für eine Aufteilung der Nachfrage auf die Produktionsstandorte ausreicht. Während für die inländische Nachfrage die Segmentaufteilung durch die Statistiken des KBA verifiziert werden kann, werden die Exporte den Segmenten anhand von verfügbaren statistischen Werten für das Jahr 2012 (vgl. VDA 2013, S. 44-115) zugeteilt.

Zur exakten Ermittlung der Produktionszahlen an unterschiedlichen Standorten ist eine markenscharfe Aufteilung der Nachfrage in die Segmente notwendig. Zur Berechnung der Anteile wird unterstellt, dass sich Pkw-Käufer bei der Wahl der Marke am Vorbesitz orientieren. Dieses als „Markentreue“ (Müller und Haan 2006, S. 17) beschriebene Phänomen tritt bei nahezu allen Pkw-Herstellern in ähnlicher Größenordnung auf. Besonders, wenn kein Segmentwechsel bei der Pkw-Anschaffung ansteht, fällt diese Markentreue mit im Durchschnitt über 70 %[3] stark aus (vgl. Müller und Haan 2006, S. 28). Unter Berücksichtigung der Markentreue lässt sich die Aufteilung der Pkw-Nachfrage anhand der bisherigen Anteile der Marken am Bestand berechnen. Während innerhalb Deutschlands eine statistische Grundlage vorhanden ist, muss zur Bestimmung der Attraktivität auf ausländischen Absatzmärkten auf die Umsatzverteilung der Hersteller zurückgegriffen werden.

Da die Markentreue vom Vorbesitz abhängt, lässt die Attraktivität einer Marke innerhalb eines Absatzmarktes Rückschlüsse auf die zukünftige Stärke dieser Marke in der Region zu. Dabei gilt: je sichtbarer eine Marke in einer Region ist, desto höher ist der Anteil an den Neuzulassungen. Die Attraktivität eines Herstellers innerhalb eines Absatzmarktes, wie sie in dieser Arbeit verwendet wird, definiert sich vereinfacht als

3 Die Untersuchung bezieht sich auf Pkw-Käufer in der Schweiz.

Anteil des betreffenden Herstellers an der Summe aller zugelassenen Fahrzeuge im Bestand:

$$A_{h,r,s} = \frac{N_{h,r,s}}{\sum_0^h N_{h,r,s}} \qquad (5.1)$$

mit

$A_{h,r}$:	*Attraktivität einer Marke*
$N_{h,r}$:	*Bestand*
$h=1,...i$:	*Marken*
$r=1,...m$:	*NUTS-3 Regionen in Deutschland*
$s=1,...6$:	*Pkw-Segmente*

Abbildung 5-1 stellt beispielhaft die berechnete Attraktivität für Modelle der Hersteller Audi, BMW und Daimler in den NUTS-3-Regionen Deutschlands (siehe Anhang A1.2), basierend auf dem Pkw-Bestand zum 31.12.2012 dar.

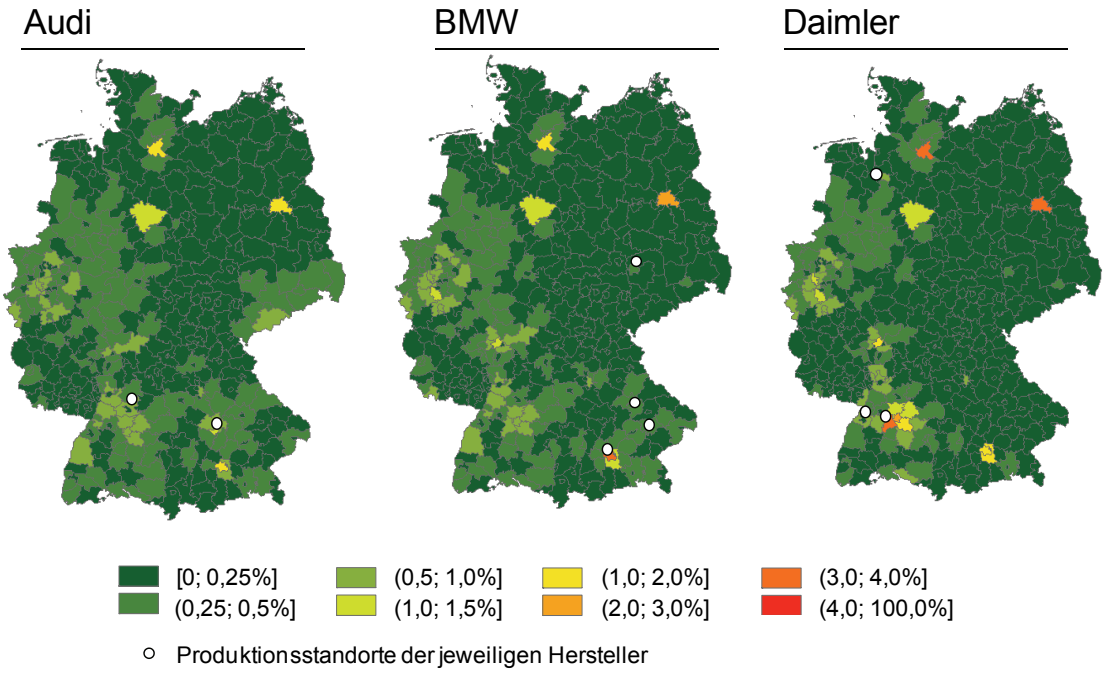


Abbildung 5-1: Anteile der Hersteller Audi, BMW und Daimler am gesamten Pkw-Bestand im Jahr 2012 (eigene Darstellung basierend auf dem Pkw-Bestand des KBA 2012)

Besonders die großstädtischen Ballungsgebiete, wie Berlin, Hamburg, München, Hannover und Stuttgart, weisen einen überdurchschnittlichen Anteil von Modellen deutscher Hersteller am Gesamtbestand auf. Diese hohe Attraktivität von in Deutschland produzierten Marken findet sich auch im unmittelbaren Umkreis der entsprechenden Produktionswerke wieder. So weist der Landkreis Böblingen mit dem Daimler-Werk in Sindelfingen beispielsweise mit etwa 4 % einen der deutschlandweit höchsten Anteile von Pkw der Marke Daimler im Gesamtbestand aus.

Dieses regional differenzierte Bild des Absatzmarktes innerhalb Deutschlands findet sich im weltweiten Pkw-Absatz wieder. Abgesehen von Opel, dessen Absatzmarkt auf Europa beschränkt ist, erzeugen alle Hersteller mindestens 30 % ihres Gesamtumsatzes auf den asiatischen Absatzmärkten (vgl. Abbildung 5-2). Daneben stellt der europäische Markt mit im Durchschnitt 25 % des Gesamtumsatzes für alle Hersteller eine Zielregion mit hoher Bedeutung dar. Während sich bei Europa und Asien ein relativ einheitliches Bild darstellt, variieren die Anteile des Umsatzes auf dem amerikanischen Markt zwischen den Herstellern. Porsche, Daimler und BMW erzielen dort etwa 25 % des Umsatzes. Bei Volkswagen und Audi entfallen nur 10 % des Umsatzes auf den amerikanischen Markt. Für Opel und Ford, deren Mutterkonzerne in den USA produzieren, ist dieser Markt ohne Bedeutung.

Analog zur Bestimmung der Markenattraktivität innerhalb Deutschlands (vgl. Gleichung 5.1), lässt sich, basierend auf den Umsatzanteilen, eine Attraktivität der Marken für die weltweiten Absatzmärkte ableiten. Zusammen mit der Nachfrage aus den deutschen Regionen ergeben sich damit die eingehenden Bestellungen bei den deutschen Herstellern.

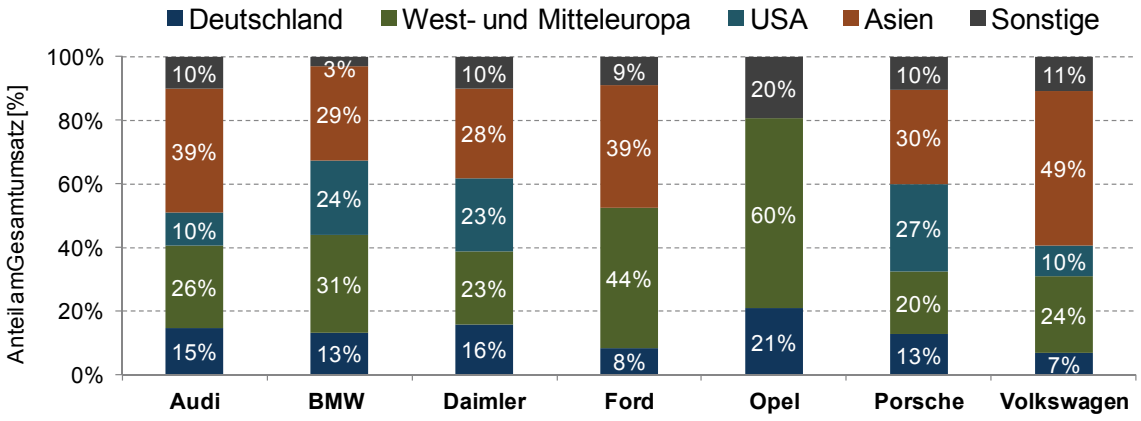


Abbildung 5-2: Aufteilung des Gesamtumsatzes der deutschen Automobilhersteller nach Märkten im Jahr 2014 (eigene Darstellung auf Basis von AUDI AG 2015, BMW AG 2015e, Daimler AG 2015a, Ford Motor Company 2015, Adam Opel AG 2015, Porsche AG 2015 und Volkswagen AG 2015)

Auf Basis der vorangegangenen Ausführungen liefert Abbildung 5-3 zusammenfassend einen Überblick über die Wirkungszusammenhänge im Subsystem NACHFRAGE. Als Grundlage für die Distributionslogistik wurde ein Schlüssel zur Verteilung der Nachfrage auf die NUTS-3-Ebenen - basierend auf dem derzeitigen Pkw-Bestand - in den entsprechenden Regionen bestimmt. Durch die Zuordnung von Attraktivtäten zu den Marken lässt sich die Gesamtnachfrage den Herstellern zuordnen. Während die Inlandsnachfrage eine Aufteilung auf NUTS-3-Ebene erfordert, reicht für die Exporte aus Sicht der Distributionslogistik die Unterteilung in Exporte nach Süd-, West- und Osteuropa sowie in den Rest der Welt aus. So entsteht als Output des Subsystems NACHFRAGE der Gesamtbedarf an neuen Pkw nach Fahrzeugsegmenten und Automobilherstellern. Dieser Output wirkt auf das Subsystem PRODUKTION.

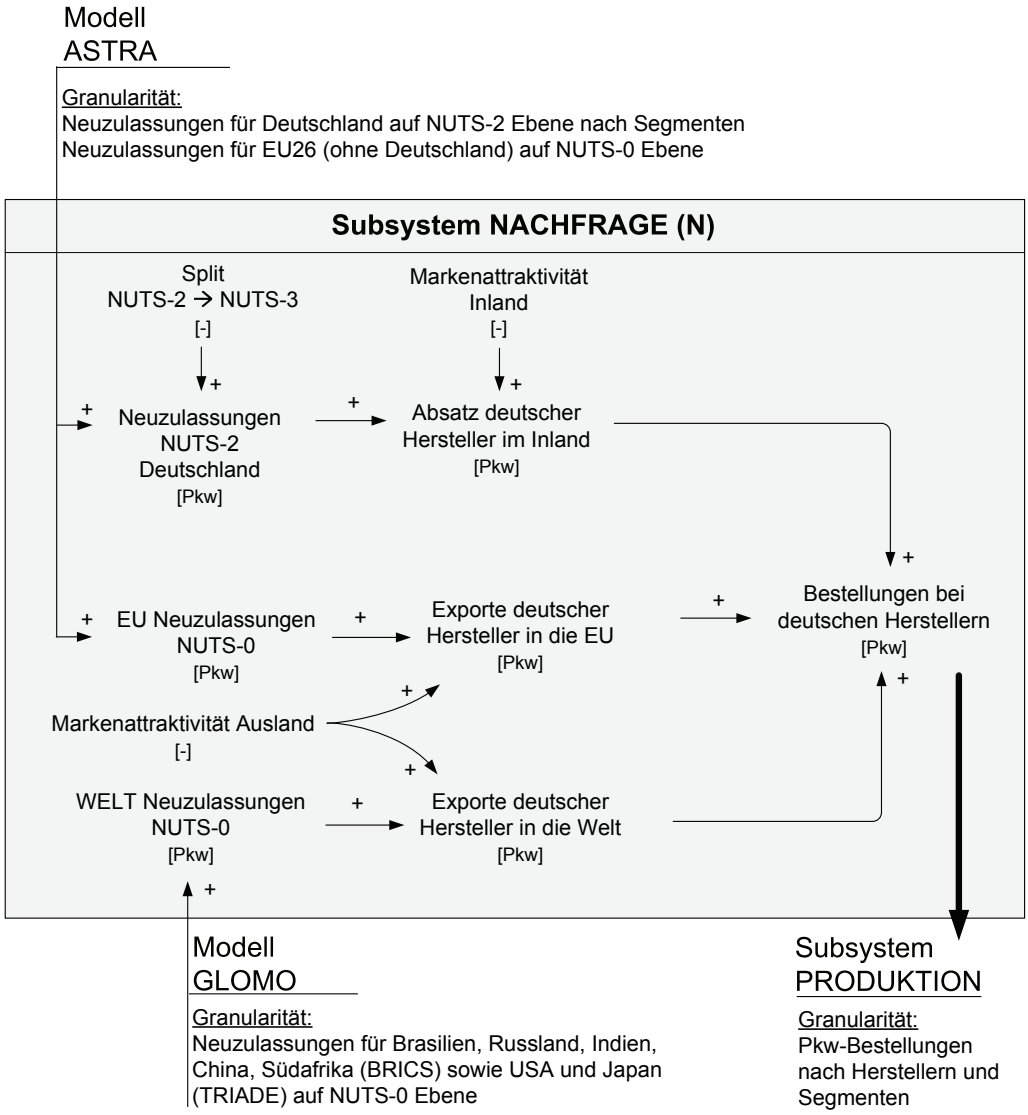


Abbildung 5-3: Wirkungsgraphen des Subsystems NACHFRAGE (eigene Darstellung)

5.1.2 Subsystem PRODUKTION

Der aus dem Subsystem NACHFRAGE abgeleitete Bedarf an neuen Pkw in den Größenklassen und Marken verteilt sich im Subsystem PRODUKTION auf die Produktionswerke der Hersteller in Deutschland. Dies beeinflusst die Bedarfsplanung für die produktionsrelevanten Bauteile (Module). Dazu wird das Fahrzeug in Module zerlegt und die Anzahl der benötigten Module als Vorbereitung für die Berechnungen im Subsystem BESCHAFFUNG bestimmt.

Die betrachteten Automobilhersteller produzieren an 21 deutschen Produktionsstandorten. Jeder dieser Standorte ist auf bestimmte Modellreihen spezialisiert. Da die Nachfrage lediglich auf einer Ebene von Segmenten vorhanden ist, werden die Produktionswerke der Hersteller, wie in Abbildung 5-4 ersichtlich, den entsprechend aggregierten Pkw-Segmenten zugeordnet.

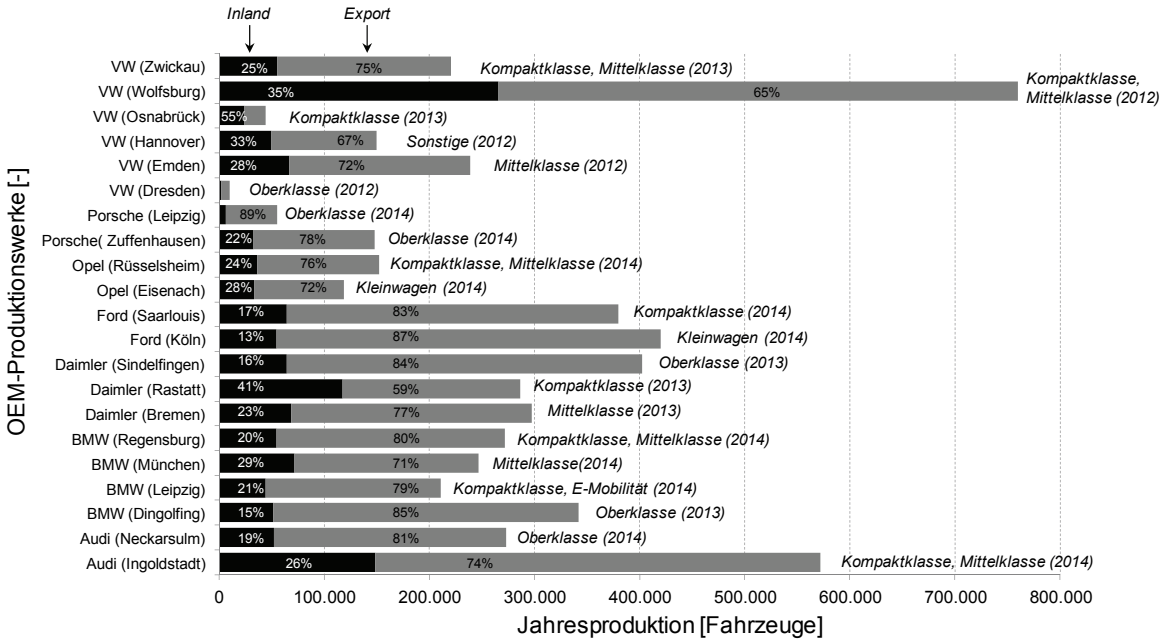


Abbildung 5-4: Produktionszahlen in den Jahren 2012, 2013 und 2014 und produzierte Fahrzeugsegmente der Hersteller an den jeweiligen Standorten[4]

4 Eigene Darstellung basierend auf Adam Opel AG 2015, S. 32, AUDI AG 2015, BMW AG 2015d; BMW AG 2015c; BMW AG 2015a; BMW AG 2015b, Daimler AG 2015c, Ford-Werke GmbH 2015, Porsche AG 2015, S. 50, Volkswagen Sachsen GmbH 2014, S. 28 ff., Volkswagen AG 2013a, S. 21, Volkswagen AG 2013b, S. 19, Volkswagen AG 2013c, S. 26, Volkswagen AG 2014, S. 25 und VDA 2013, S. 27ff..

Die Produktionsstandorte unterscheiden sich hinsichtlich der Produktionsmenge und der Exportorientierung. Die Größe variiert von etwa 10.000 Pkw pro Jahr in der sogenannten Gläsernen Manufaktur von Volkswagen in Dresden bis knapp 800.000 produzierten Pkw pro Jahr am Volkswagen Produktionsstandort in Wolfsburg. Trotz ähnlich hoher Gesamtproduktion variiert die Anzahl der Produktionsstätten bei den OEM: Während BMW bei der Produktion beispielsweise auf vier mittelgroße Werke setzt, produziert Audi eine ähnlich hohe Anzahl an Fahrzeugen in nur zwei Werken.

Anhand der Informationen zu Marke und Segment lässt sich die Nachfrage mit Hilfe von Abbildung 5-4 den entsprechenden Produktionsstandorten zuordnen. Dabei handelt es sich um Bestellungen, die aufgrund der hohen Individualisierung der Modelle (vgl. Bratzel et al. 2015, S. 65 f.) erst nach Eingang des Auftrags gefertigt werden. Dieses Build-to-Order-Verfahren (BTO) (vgl. Klug 2010, S. 361) führt zwangsläufig zu einer Differenz zwischen Bestell- und Auslieferungszeitpunkt (vgl. Diez und Reindl 2012, S. 30), die im Wirkungsgraphen des Subsystems durch einen Versatz („delay“) von zwei Zeitperioden (t = 0,0625 Jahre) widergespiegelt wird.

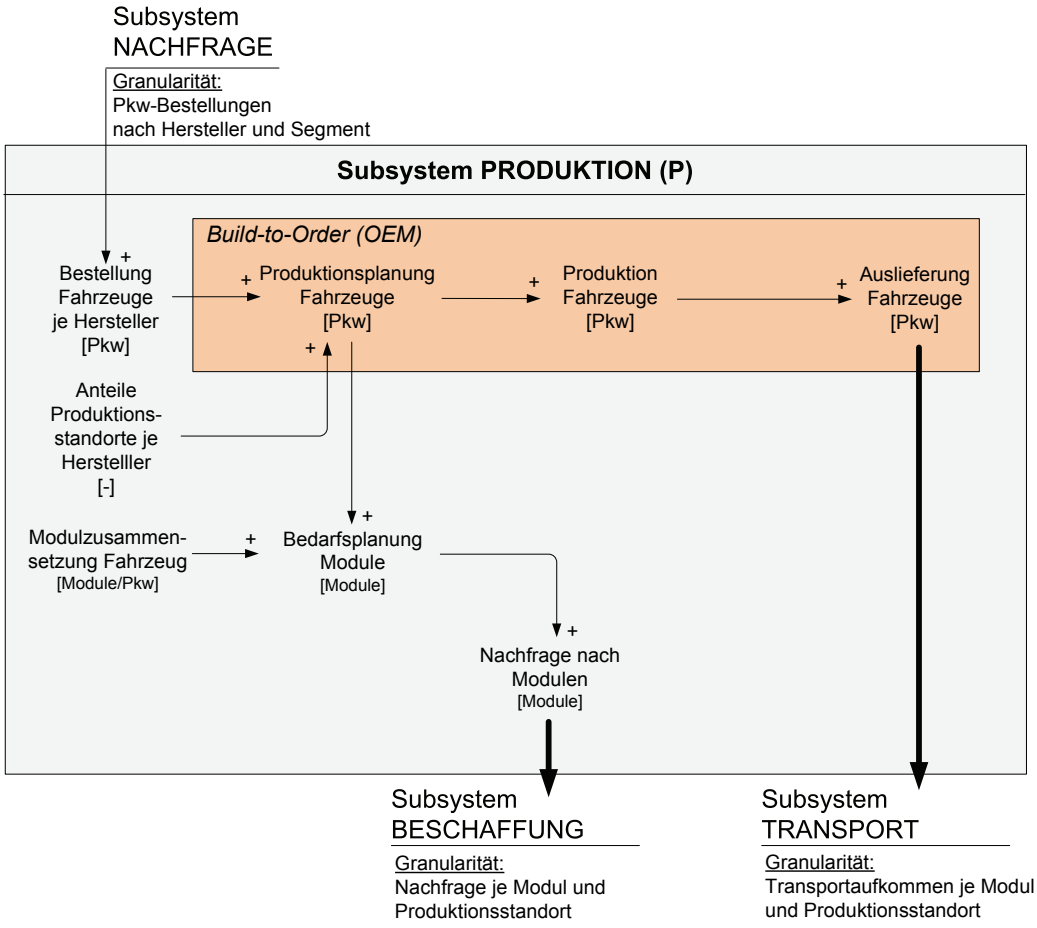


Abbildung 5-5: Wirkungsgraphen des Subsystems PRODUKTION (eigene Darstellung)

Die in Abbildung 5-5 illustrierte Struktur des Subsystems PRODUKTION beinhaltet neben dem vereinfachten Build-to-Order Produktionsprozess als zweites Element die Bedarfsplanung für die Module.

Die Unterteilung des Pkw in Baugruppen bzw. Module wird häufig aus produktionstechnischer Sicht durchgeführt. Aus diesem Grund findet sich in der Literatur überwiegend eine grobe Einteilung in Karosserie, Antrieb und Fahrwerk (vgl. Haken 2011, S. 14). Diese drei Baugruppen prägen aus Sicht der Automobilhersteller Fahrdynamik und Design der Fahrzeuge und tragen mehrheitlich zur Wahrnehmung der Marke im öffentlichen Raum bei (vgl. Gottschalk 2005, S. 18 ff.). Die steigenden Ansprüche der Kunden an individuell konfigurierbare Produktangebote, die auch die Pluralität der Lebensstile wiederspiegeln (vgl. Wallentowitz et al. 2009, S. 15), erfordert, dass sich die angebotenen Fahrzeugmodelle nicht nur über den Antrieb und die Fahrdynamik differenzieren lassen. Als Antwort auf diese geänderten Kundenanforderungen erhöhte sich die Anzahl der verfügbaren Varianten der Fahrzeugmodelle stark. Dabei wird nicht nur nach Motorisierung und Außenfarbe sondern auch nach Sonderausstattungsvarianten im Innenraum unterschieden (vgl. Göpfert et al. 2013, S. 16). Besonders Sitze, Armaturenträger (Cockpit) und Mittelkonsole bieten eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten (vgl. Lang 2011, S. 37ff.).

Da detaillierte Aussagen zur Wirkung regionalisierter Zuliefernetzwerke nur bei entsprechend disaggregierter Betrachtung von Produktion und Beschaffung möglich sind, wird im Folgenden die Produktion der Pkw in Module unterteilt. Die Verwendung von standardisierten Bauteilen ermöglicht die Realisierung einer hohen Variantenvielfalt durch die Kombination einer begrenzten Menge an Modulen. Durch diesen „Kombinatorikeffekt“ (Kersten 2001, S. 46) lassen sich individuelle Kundenwünsche bei der Produktion der Pkw berücksichtigen und gleichzeitig standardisierungsbedingte Skalenerträge realisieren (vgl. Becker 2007, S. 28ff.). Die Variation der Kundenanforderungen zwischen den Herstellern (vgl. Becker 2007, S. 108f.), führt im Zuge des Vielfaltmanagements zu einem permanenten herstellerspezifischen Anpassungsprozess der Pkw-Modulstruktur (vgl. Kersten 2001, S. 47ff.). Es lässt sich daher keine Modulstruktur identifizieren, die für alle OEM und Baureihen gleichermaßen Gültigkeit besitzt. Allerdings ist bei einer aggregierten Betrachtung der Beschaffung und Produktion aller OEM eine Systematik bei der Definition der Module erkennbar: Wyman (2012) unterscheidet in der Studie „FAST 2025“ für die Produktion in der deutschen Automobilindustrie zwischen 44 Modulen. Die der Studie zugrundegelegte Modulstruktur ist ausführlich dokumentiert und weist für die Betrachtungsebene dieser Arbeit einen ausreichenden Detaillierungsgrad auf. Angelehnt an Wyman (2012) wird auf Basis der Darstellung in Abbildung 5-6 daher im Subsystem PRODUKTION das zu produzieren-

de Fahrzeug in die Modulgruppen M 1 bis M 8 und die folgenden zugehörigen Module zerlegt (vgl. Wyman 2012, S. 47):

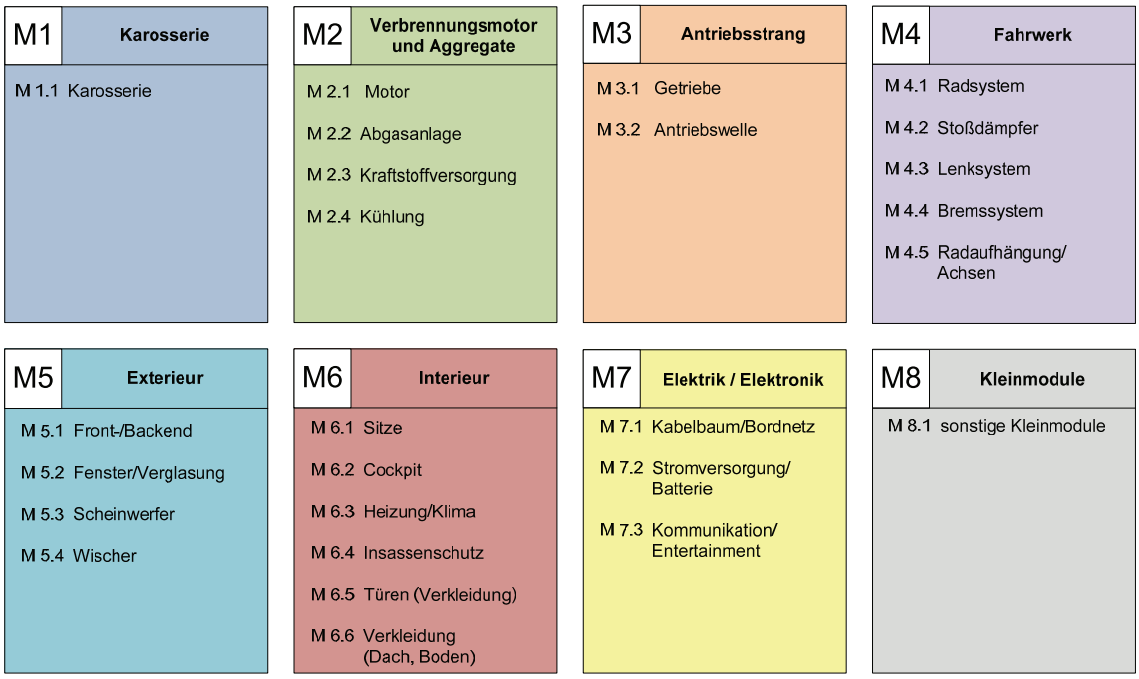


Abbildung 5-6: Modulzusammensetzung eines Pkw (eigene Darstellung; Modulstruktur angelehnt an Wyman 2012, S. 47)

Die zur Produktion der Module verwendeten Materialien und die sich daraus abgeleiteten physikalischen Eigenschaften (Masse und Volumen) können die Beschaffungslogistik beeinflussen. Die Masse und das Volumen der Module bestimmen die Anzahl der benötigten Fahrzeuge, die Nutzfahrzeuggrößen, die Auslastung sowie die Größe der Lagerfläche. Neben der physikalischen Beschaffenheit der Module spielt aus Sicht der Beschaffungslogistik der Standort des Zulieferers eine wichtige Rolle. Entscheidend ist hierbei nur, ob die Module durch den OEM selbst oder durch einen Zulieferer produziert werden. Aus diesem Grund wird in den folgenden Abschnitten für jede Modulgruppe sowohl die Materialbeschaffenheit als auch der Grad des Outsourcings kurz beschrieben.

Die in Modulgruppe M1 repräsentierte Karosseriestruktur bildet das Grundgerüst eines jeden Automobils. Die dadurch entstehenden hohen Anforderungen an Festigkeit und Stabilität bestimmen die Eigenschaften der verwendeten Materialien. Trotz Bestrebungen des Leichtbaus besteht die Karosserie heute überwiegend aus gestanztem Stahlblech mit einer hohen Materialdichte (vgl. Lang 2011, S. 18). Mit einem Wertschöpfungsanteil von über 90 % des OEM verfügt diese Modulgruppe über den geringsten Grad des Outsourcings (vgl. Wyman 2012, S. 45).

Die Modulgruppe M2 beinhaltet neben dem Motorblock die Abgasanlage, die Kraftstoffversorgung sowie die Motorkühlung. Bis heute stellt die Fertigung des Motors eine Kernkompetenz der OEM dar (vgl. Wyman 2012, S. 45). Dieses je nach Bauart als Diesel- oder Ottovariante konzipierte Aggregat beinhaltet eine Vielzahl von mechanischen Bauteilen mit hohen Anforderungen an Präzision und Haltbarkeit (vgl. Braess und Seiffert 2011, S. 158 ff.). Unmittelbar an den Motor schließen sich die Kraftstoffversorgung und die Abgasanlage an. Während der Umfang der Abgasanlage durch die gesetzlich vorgeschriebene Verwendung von Katalysatoren und Filtern an Umfang zugenommen hat (vgl. Braess und Seiffert 2011, S. 338), besteht die Herausforderung bei modernen Kraftstoffversorgungssystemen darin, den beschränkten Platz im Fahrzeug möglichst optimal auszunutzen (vgl. Lang 2011, S. 86). Bis auf den aus Kunststoff produzierten Tank dominieren bei der Fertigung von Antriebsaggregaten die Werkstoffe Stahl, Aluminium und Magnesium (vgl. Becker und Gebauer-Teichmann 2012, S. 67 f.).

Der Antriebsstrang (M3) bestehend aus dem Getriebe und der Antriebswelle sichert die Kraftübertragung zwischen Motorblock und Fahrwerk. Sowohl für Getriebe als auch für die Antriebswelle gelten ähnliche Anforderungen hinsichtlich Präzision und Belastbarkeit wie für das Antriebsaggregat, so dass auch hier vorwiegend hochfeste Werkstoffe zum Einsatz kommen (vgl. Lang 2011, S. 117 ff.). Bereits heute wird ein Großteil der Getriebe durch externe Zulieferer produziert. Die wachsende Nachfrage nach automatisierten Getrieben und die damit steigenden Anforderungen an die Produktion könnte diese Entwicklung zukünftig weiter vorantreiben (vgl. Wyman 2012, S. 54).

Zur Übertragung der durch den Antriebsstrang und den Motor zur Verfügung gestellten Kraft auf die Straße dient ein auf die Modulgruppen M2 und M3 abgestimmtes Fahrwerk. Dazu zählen neben Achsen und Rädern Stoßdämpfer, Lenkung und Bremssysteme. Im Vergleich zum Motor und dem Antriebsstrang weist das Fahrwerk den höchsten Outsourcing-Grad aus (vgl. Wyman 2012, S. 45). Die Module innerhalb der Modulgruppe M 4 unterscheiden sich hinsichtlich der Materialverwendung: Während das Lenk- und Bremssystem, die Stoßdämpfer sowie die Achsen ebenfalls die Verwendung von hochfesten Materialien erfordern, bestehen die Radsysteme (Reifen und Felgen) zu einem erheblichen Anteil aus Elastomeren (vgl. Lang 2011, S. 102 ff.). Geringe Materialdichten bei Elastomeren lassen vermuten, dass die Auslastung der Zuladungskapazität bei den Nutzfahrzeugen gering ist. Gleiches gilt vice versa für den Transport von Achsen und Stoßdämpfer.

Neben der Karosserie ist auch die Modulgruppe M5, das Exterieur, für das äußere Gesamterscheinungsbild der Fahrzeuge verantwortlich. Front-, Heck- und Seitenscheiben zählen ebenso dazu wie Front- und Backend, welche jeweils das Design der Front-

und Heckpartie bestimmen (vgl. Morello et al. 2011, S. 211). Wenngleich das Erscheinungsbild der Fahrzeuge elementar durch das Exterieur beeinflusst wird, nahm der Outsourcing-Anteil dieser Module in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zu (vgl. Wyman 2012, S. 45). Neben der Verwendung von Glas als Werkstoff ist die Produktion dieser Modulgruppe durch den Einsatz von Kunststoffen und Elastomeren geprägt (vgl. Morello et al. 2011, S. 220). Die damit einhergehende geringere Materialdichte erhöht das Volumen der zu transportierenden Module.

Während die Modulgruppen M1 bis M5 Fahrzeugantrieb und -außendesign beeinflussen, beinhaltet die Modulgruppe M6 ausschließlich Module, welche den Innenraum (Interieur) eines Fahrzeuges prägen. Neben Sitzen und Cockpit gehören dazu sämtliche Boden-, Türen- und Deckenverkleidungen, die Klimatisierung des Innenraums sowie der Insassenschutz. M6 weist unter allen Modulgruppen die höchste Outsourcings-Rate auf (vgl. Wyman 2012, S. 45). Neben der Klimatisierung gelten aus Sicht des Komforts die Sitze als wichtigstes Bauteil im Innenraum (vgl. Morello et al. 2011, S. 560f.). Durch eine steigende Individualisierung des Innenraums erhöht sich die Anzahl der Produktionsvarianten für diese beiden Module. Die Verwendung eines weiten Spektrums an Hilfsmotoren zur Höhenverstellung bis hin zu Massagefunktionen macht die Sitzproduktion kompliziert (vgl. Lang 2011, S. 47f.). Gleichzeitig dient das Cockpit immer mehr als multimediale Schnittstelle zwischen Fahrer und Bordelektronik (vgl. Lang 2011, S. 155f.). Bis auf die Klimatisierung und das Sitzgestell, welches häufig aus Stahlblech produziert wird, dominieren im Innenraum unterschiedliche Kunststoffe und Leder. Zwar weisen die Module eine geringe Materialdichte auf, jedoch nehmen diese bauartbedingt oftmals ausladende Formen an (vgl. Morello et al. 2011, 563 sowie Lang 2011,S. 37ff.). Die Verwendung von Pyrotechnik beim Bau von Insassenschutzsystemen (Airbags) stellt eine besondere Herausforderung für die Transportsicherheit dar (vgl. Lang 2011, S. 174). Unter der Annahme, dass die geringen Materialdichten der zu M6 gehörenden Module zu vergleichsweise leichten Ladeeinheiten führen, kann infolgedessen der Transport dieser Module hohe Kapazitäten erfordern.

Die Modulgruppe M7 umfasst alle Module, welche die Elektrik oder Elektronik des Fahrzeugs betreffen. Das Batteriesystem als Grundlage für die Stromversorgung der Bordelektronik wird durch das Bordnetz, welches im Wesentlichen aus dem Kabelbaum besteht, ergänzt. Desweiteren zählen zu dieser Modulgruppe sämtliche Bauteile, die für die Kommunikation und zur multimedialen Anwendungen benötigt werden. Ähnlich wie bei der Modulgruppe Interieur werden diese Module nahezu komplett von externen Zulieferern produziert (vgl. Wyman 2012, S. 45). Während sich in der Vergangenheit die Elektronik in einem Fahrzeug auf die Steuerung und Versorgung der Fahrzeugbeleuchtung und Zündanlage des Motors beschränkte, steigt der Umfang des

Bordnetzes durch Integration neuer Hilfsmotoren, elektronischer Schnittstellen sowie elektronischen Fahrstabilitätsprogrammen (z. B. Anti-Schlupf-Regelung (ASR), Anti-Blockier-System (ABS)) derzeit deutlich an (vgl. Haken 2011, S. 133f.). Neben der Bleibatterie bestehen die Komponenten des Bordnetzes überwiegend aus Metallen, Thermo- und Duroplasten (vgl. Braess und Seiffert 2011, S. 655; Haken 2011, S. 133). Die großen Anteile an Kupfer und anderen Metallen und der damit verbundenen hohen Materialdichte können zu kompakten Ladeeinheiten führen. Besonders die kubische Bauform der Batterie kann eine hohe Auslastung des Laderaums der Transportgefäße ermöglichen.

Wie bereits oben ausgeführt, unterscheiden sich die Module hinsichtlich Materialeinsatz und Komplexität der Produktion. Aus Sicht des Transports und der Logistik ist der Anteil der Module am Gesamtgewicht des Fahrzeuges – wie in Abbildung 5-7 dargestellt – von Interesse. Die Karosserie stellt mit knapp 28 % des Gesamtgewichtes das mit Abstand schwerste Modul dar. Die Module Karosserie, Motor, Radsystem und Achsen erreichen in Summe etwa die Hälfte des gesamten Fahrzeuggewichtes eines Pkw (vgl. o. V. 2015). Wie sich Gewicht und Volumen auf den Transport der Module auswirken, soll in der Beschreibung zum Teilmodell TRANSPORT (vgl. Abschnitt 5.2.4) erörtert werden.

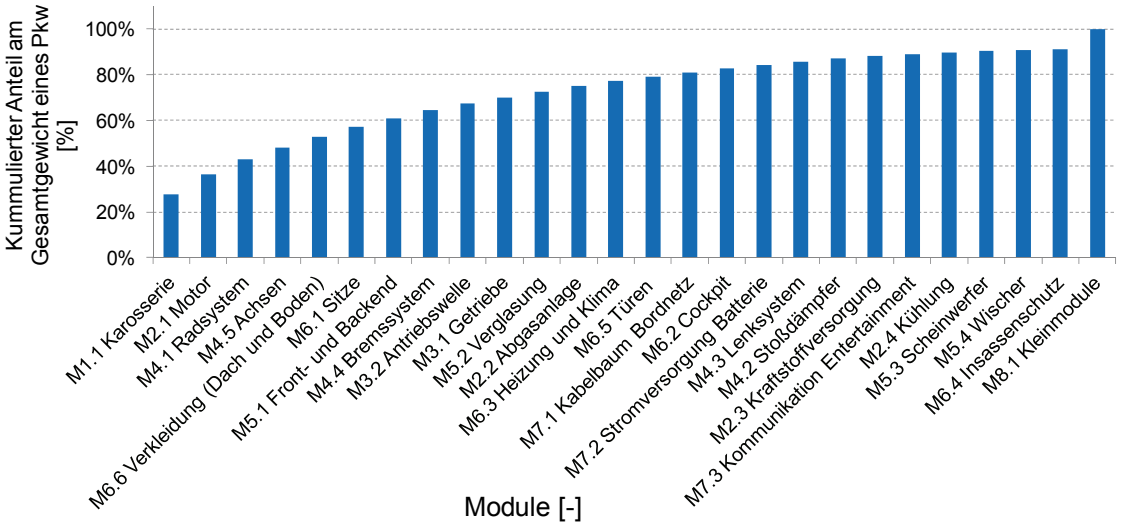


Abbildung 5-7: Kumulierter Anteil der Module am Gesamtgewicht eines Fahrzeuges (eigene Darstellung basierend auf o. V. 2015)

Neben der Verteilung der Neufahrzeugbestellungen auf die Produktionsstandorte und der darauf folgenden Produktion nach BTO steht beim Subsystem PRODUKTION die Zerlegung des zu produzierenden Fahrzeuges in Module im Mittelpunkt. Im Subsystem PRODUKTION wird der Input für die Subsysteme BESCHAFFUNG (Nachfrage nach

den Modulen) und TRANSPORT (Modulgewichte) berechnet und an die entsprechenden Subsysteme übergeben.

5.1.3 Subsystem BESCHAFFUNG

Die Ausgestaltung der Produktion der Zulieferer im Wirkungsgraphen des Subsystems BESCHAFFUNG basiert auf den systemtheoretischen Ausführungen in „Industrial Dynamics“ von Forrester (vgl. Forrester 1961). Die theoretischen Grundlagen werden durch empirische Untersuchungen zu Produktionsstandorten der Zulieferer und der daraus ableitbaren Transportentfernungen ergänzt.

Der Wirkungsgraph des Subsystems BESCHAFFUNG beinhaltet die Abbildung des Zuliefernetzwerkes und die beiden Produktionsstrategien BTO und BTF der Zulieferer. Analog zur Zulieferpyramide (siehe Abbildung 4-2) werden die Zulieferstufen Tier-1, Tier-2, Tier-3 und Tier-n abgebildet. Die Anzahl der benötigten Module zur Produktion der bestellten Pkw stellt den zentralen Input aus dem Subsystem PRODUKTION dar. Das daraus bestimmte Transportaufkommen und die Entfernungen zwischen den entsprechenden Zuliefer- und OEM-Produktionswerken wirken auf das Subsystem TRANSPORT.

Der in Abbildung 5-8 dargestellte Wirkungsgraph zeigt die Differenzierung zwischen unterschiedlichen Produktionsstrategien. Entscheidend für die Wahl der Produktionsstrategie in den Zulieferstufen ist die Frage, an welcher Stelle der Supply-Chain die Variantenbildung einsetzt. Da diese aus Kostengründen möglichst spät einsetzen sollte (vgl. Stich et al. 2013, S. 52 f.), wurde zur Festlegung des Order Penetration Point, also der Übergang zwischen einer weitestgehend variantenunspezifischen zu einer variantenspezifischen Produktion (vgl. Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 33), im Modell die Tier-1-Zulieferstufe gewählt. Dies bedeutet, dass die ranghöheren Zulieferstufen variantenunspezifisch produzieren und erst ab der Produktion des Tier-1-Zulieferers die variantentypischen Ausprägungen der Module entstehen. In der Folge müssen die Produktionsstrategien entsprechend angepasst werden: Während die variantenunspezifische Produktion der Komponenten (Tier-2), Einzelteile (Tier-3) und Rohstoffe (Tier-n) ohne Bezug zu vorhandenen Kundenaufträgen gesteuert werden muss (vgl. Arnold et al. 2008, S. 11), beginnt die Fertigung der variantenreichen Module erst nach Eingang des Kundenauftrags. Die in diesem Zusammenhang angestrebte BTO-Strategie minimiert sowohl das Risiko von Überproduktionen als auch die Bestands- und Lagerkosten (vgl. Stich et al. 2013, S. 54). Im Gegensatz zu der BTO-Produktionsstrategie kann sich die Produktion auf Basis von Absatzprognosen (BTF) für die Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n deutlich volatiler gestalten (vgl. Forrester 1961, S. 24). Durch den hohen Grad an Variantenunabhängigkeit können zwar Komponenten, Einzelteile und

Rohstoffe weitestgehend auftragsunabhängig produziert und bereitgestellt werden, jedoch stellt die Festlegung der passenden Produktionsmenge die entscheidende Herausforderung dar. Die Minimierung der Abweichung zwischen Absatzprognose und tatsächlichem Absatz und die damit verbundenen Lager- und Bestandskosten bildet ein zentrales Element der Produktionsprogrammplanung und führt zu einem permanenten Anpassungsprozess (vgl. Forrester 1961, S. 28ff.).

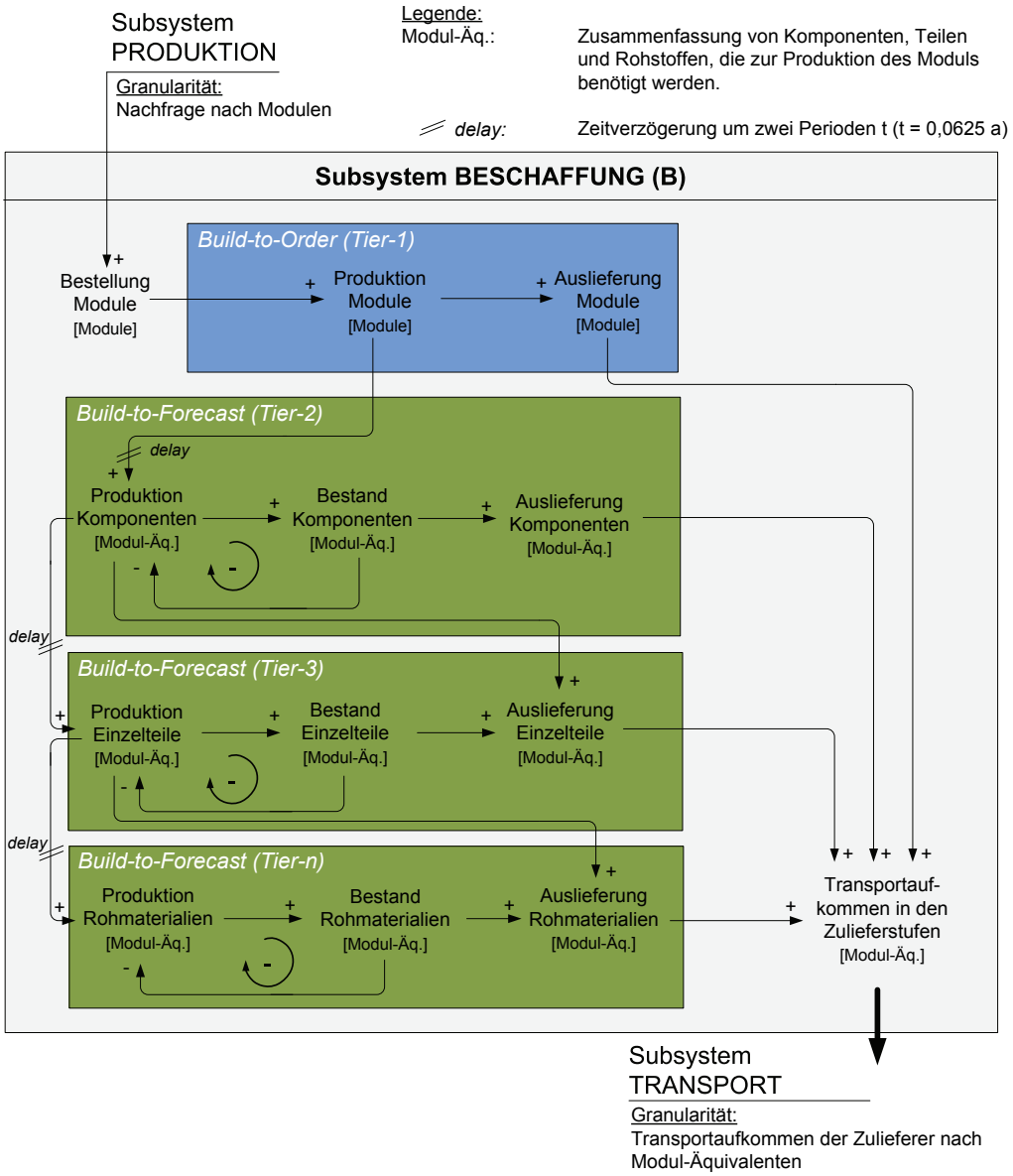


Abbildung 5-8: Wirkungsgraphen des Subsystems BESCHAFFUNG(eigene Darstellung)

Die Produktionsstrategien wirken sich auf den Sicherheitsbestand aus: Durch das BTO-Verfahren entfällt der Sicherheitsbestand. Es besteht daher lediglich eine Abweichung zwischen produzierter und abgenommener Menge, falls Bestellungen seitens

des OEM storniert werden. Die Schwankungen der Lagerbestände sind folglich zunächst minimal. Gleichung 5.2 stellt den Zusammenhang zwischen Bestand und Produktion dar (vgl. Stadtler 1988, S. 330).

$$B_{m,z,gesamt}(T) = \int_{t=0}^{T} (Prod_{m,z}(t) - Al_{m,z}(t))\, dt \qquad (5.2)$$

mit

B (T):	*Bestand am Ende der Periode t*
Prod (t):	*Produktion in der Periode t*
Al (t):	*Auslieferung in der Periode t*
m=1,...27:	*Art des Moduls*
z= 1,2,3,n:	*Stufe der Zulieferer*

Der Bestand zum Zeitpunkt t berechnet sich aus dem Integral der Differenz von Produktion abzüglich der Auslieferungen über die Zeit. Dieser Zusammenhang gilt für alle Produktionsstrategien, unabhängig ob nach Auftragseingang oder auf Basis einer Absatzprognose produziert wird. Der Unterschied besteht darin, dass sich die Festlegung der Produktionsmenge verändert. Während beim BTO-Verfahren die Produktion durch die Anzahl der Bestellungen vorgegeben wird, basiert beim BTF-Verfahren die Menge der produzierten Komponenten, Teile und Rohstoffe auf einer Absatzprognose (vgl. Günther und Tempelmeier 2012, S. 148f.). Als Prognoseverfahren stehen unterschiedliche Ansätze zur Verfügung. Je nach Verfügbarkeit der Informationen innerhalb der Supply-Chain können diese Prognoseverfahren auf gleitenden Mittelwerten, einer exponentiellen Glättung oder Zyklusverfahren zur Berücksichtigung jahreszeitlicher Besonderheiten beruhen (vgl. Gudehus 2012, S. 255 ff.). Da detaillierte Informationen zum zyklischen Verhalten der Absatzmärkte für diese Arbeit nicht vorliegen, wurde für die modellseitige Umsetzung eine Modifikation des gleitenden Mittelwertes gewählt. Der in Gleichung 5.3 dargestellte Zusammenhang ergänzt den gleitenden Mittelwert der vorangegangenen zwei Produktionsperioden durch eine Multiplikation mit der Wachstumsrate der Vorperiode. Somit wird einerseits das Produktionsniveau durch die Vorperioden bestimmt und gleichzeitig der Entwicklung in der Vergangenheit Rechnung getragen. Die dadurch ermittelte Produktionsmenge wird durch einen Sicherheitsaufschlag erhöht. Dieser soll unvorhergesehene Entwicklungen abfedern und beträgt im Allgemeinen zwischen 5 % und 10 % des durchschnittlichen Lagerbestandes (vgl. Wannenwetsch 2010, S. 31). Auf Basis dieser Erkenntnisse ergibt sich für die

Bestimmung der Produktionsmenge folgende Gleichung 5.3 (vgl. Günther und Tempelmeier 2012, S. 148ff.):

$$Prod_{m,z}(t) = \left(\left(\frac{Prod_{m,z}(t-1)}{Prod_{m,z}(t-2)}\right) * Prod_{m,z}(t-1) * (1+k_B)\right) - B_{m,z,gesamt}\,(t-1) \qquad (5.3)$$

mit

Prod (t):	*Produktion in der Periode t*
B (t):	*Bestand in der Periode t*
k_B*:*	*Sicherheitsfaktor*
m=1,...27:	*Art des Moduls*
z= 1,2,3,n:	*Stufe der Zulieferer*

Da die Bedarfsprognose den exakten Absatz aufgrund von Informationsdefiziten nicht vorhersagen kann, kommt es in den Folgeperioden zu einem dynamischen Anpassungsprozess der Produktionsmenge. Der Zusammenhang zwischen Vorperiodenbestand und Produktion der aktuellen Periode entspricht einer negativen Rückkopplung (vgl. Forrester 1961, S. 22). Die Darstellung in Abbildung 5-9 stellt diesen klassischen systemdynamischen Zusammenhang in der Vensim-Notation dar.

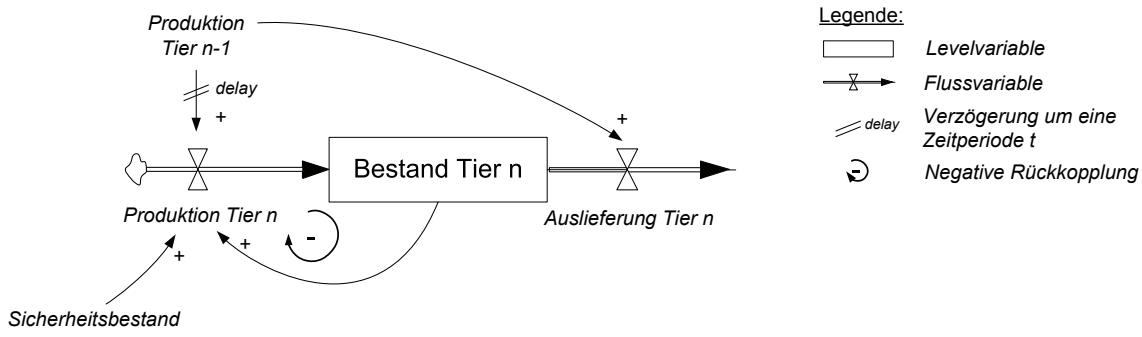


Abbildung 5-9: Systemdynamischer Zusammenhang zwischen Bestand und Produktion (eigene Darstellung - Modellausschnitt)

Dieses Zusammenspiel zwischen einer BTO-Produktion von OEM und Tier-1-Zulieferer und der BTF-Produktion der nachgeordneten Zulieferer bestimmt die Dynamik des Teilmodells BESCHAFFUNG. Die durch Produktionsmengenänderungen hervorgerufenen Anpassungsprozesse in den Zulieferstufen können mit der beschriebenen Modellstruktur berücksichtigt werden.

Neben dem Produktionsprozess und dem daraus entstehenden Transportaufkommen beinhaltet das Subsystem BESCHAFFUNG die Transportentfernungen für die Lieferantenbeziehungen als Grundlage der Verkehrsverteilung. Die Anwendung eines Gravitationsmodells als gängiges Vorgehen zur Ermittlung der Entfernungen zwischen den Zulieferstufen (vgl. Ortúzar und Willumsen 2001, S. 174 ff.) stellte sich bei dem hohen Disaggregationsgrad im Modell (Module, Zulieferstufen) als zu ungenau heraus. Aus diesem Grund wurde eine umfassende empirische Untersuchung hinsichtlich der realen Zulieferstandorte durchgeführt. Der formalisiert in Abbildung 5-10 dargestellte Algorithmus lässt sich wie folgt beschreiben:

Als Basis für die Untersuchung wird eine Kombination aus den 100 umsatzstärksten Zulieferern weltweit (vgl. Automobilproduktion 2014) und einer Aufstellung der Status-Quo-Lieferantenverflechtung europäischer OEM (vgl. Automotive News 2008) verwendet. Zusammen mit den Angaben der Zulieferer und OEM bezüglich der Standorte und der Produktion kann für jedes Modul entschieden werden, ob der OEM über die Möglichkeit verfügt, diese selbst zu fertigen, oder ob in jedem Fall eine Fremdbeschaffung notwendig ist. Eine detaillierte Aufstellung der Zulieferbeziehungen ist in Anhang A1.3 tabellarisch dargestellt.

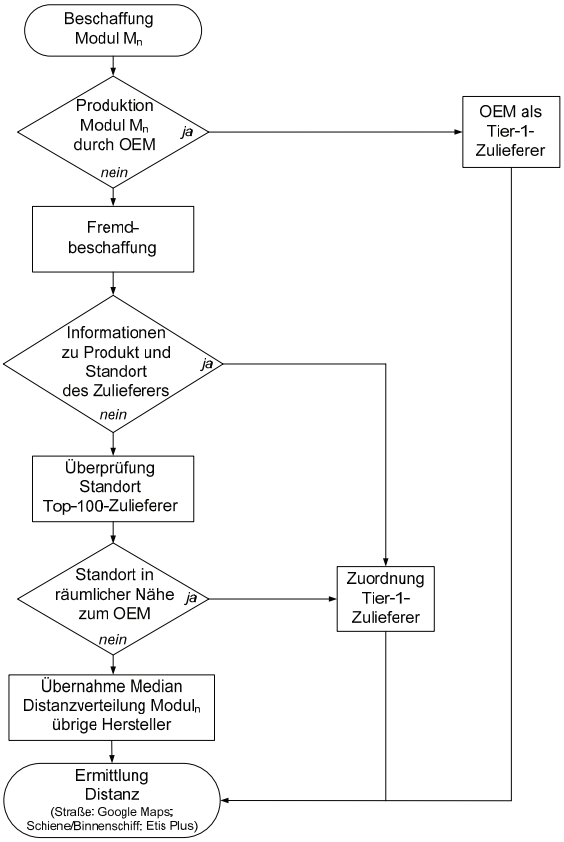


Abbildung 5-10: Algorithmus zur Bestimmung der Entfernungen zwischen OEM und Tier-1-Zulieferer (eigene Darstellung; Notation angelehnt an Rumbaugh et al. 1999 , S. 481)

Die Ermittlung der Entfernungen für die Verkehrsträger Straße und Schiene erfolgt mit Hilfe von Google Maps als Straßenroutenplaner und mit der Distanzmatrix für Schienengüterverkehr von ETIS Plus (vgl. Europäische Kommission 2015).

Ein wichtiges Teilergebnis stellt die Erkenntnis dar, dass ausnahmslos alle OEM eigene Motorenwerke besitzen und in der Lage sind, diese Modulgruppe selbst zu fertigen. Darüber hinaus verfügt die Mehrheit der Hersteller über Produktionsstätten für zentrale Komponenten des Fahrwerks, des Antriebstrangs und des Karosseriebaus. Abbildung 5-11 bietet eine Übersicht über das Produktionssystem der deutschen OEM. Neben der starken Vernetzung der Werke untereinander fällt zudem auf, dass, während die meisten Komponenten für Fahrwerk, Karosserie und Antriebsstrang in Deutschland produziert werden, ein Großteil der Hersteller die Motorenproduktion ins Ausland verlagert hat. Neben Österreich werden Motoren in Großbritannien, Spanien, Rumänien, Ungarn und Polen produziert.

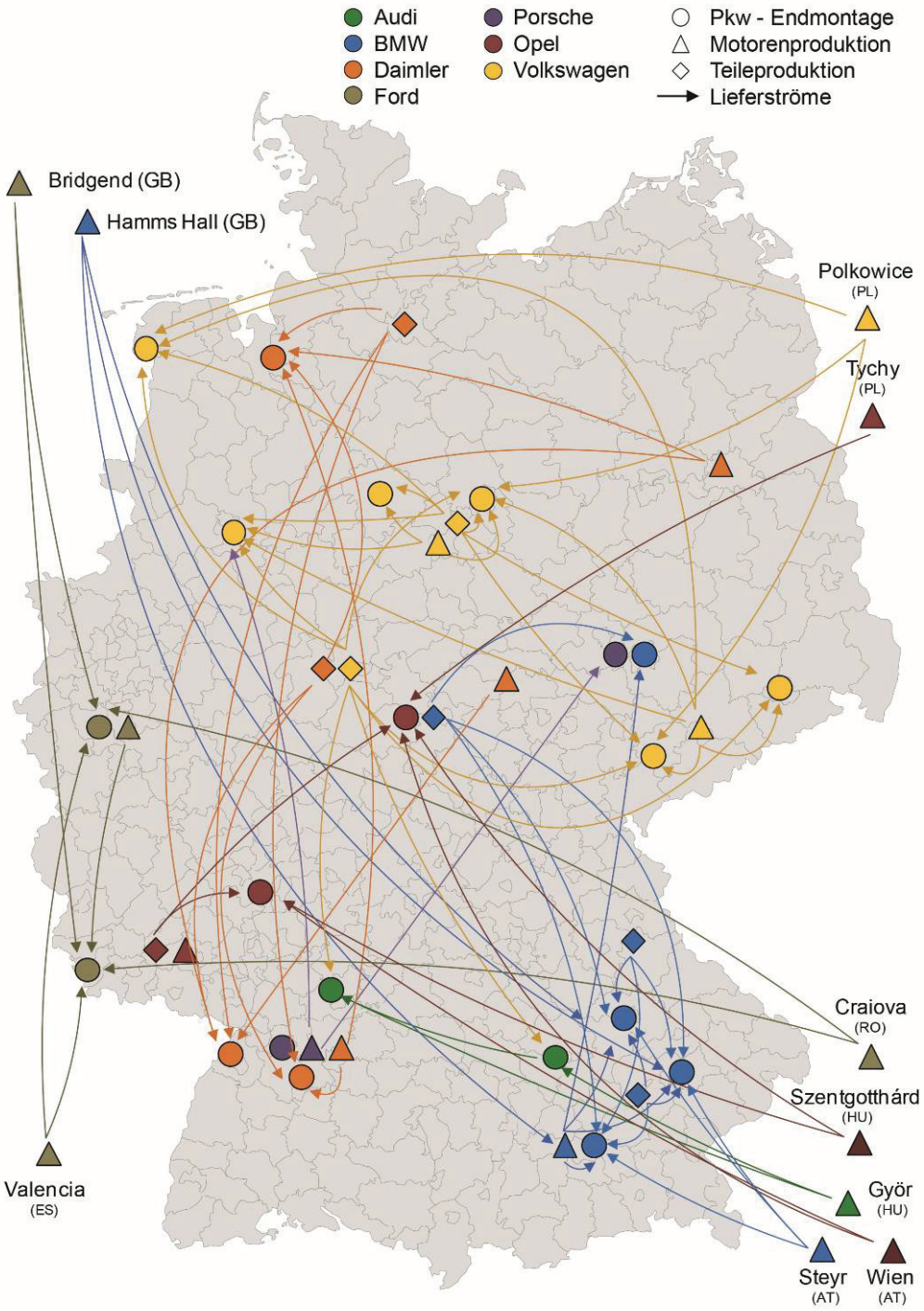


Abbildung 5-11: Produktionssystem für Motoren und zentrale Fahrwerkskomponente (eigene Darstellung basierend auf Handke und Glückler 2010, S. 79 und erweitert durch AUDI AG 2015, BMW AG 2015e, Daimler AG 2015a, Ford Motor Company 2015, Adam Opel AG 2015, Porsche AG 2015 und Volkswagen AG 2015)

Durch die zentralisierte Produktion dieser Komponenten an wenigen, großen Standorten entstehen weite Transportwege. So variieren beim Transport von Motoren die Entfernungen zwischen der Motorenproduktion und der Endmontage im Fahrzeugproduktionswerk zwischen 200 km und knapp 1.200 km. Abbildung 5-12 stellt die Ergebnisse für die Produktionswerke der OEM zusammenfassend dar.

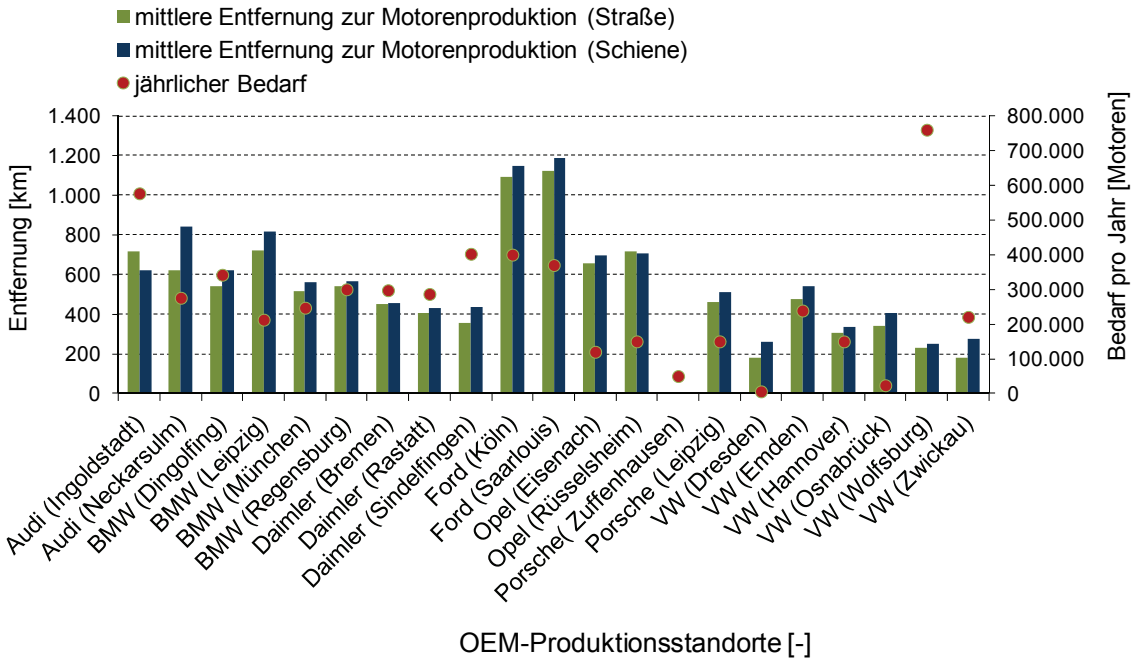


Abbildung 5-12: Durchschnittliche Entfernung zwischen Motorenproduktion und Endmontage (eigene Darstellung basierend auf Ergebnissen des in Abbildung 5-10 dargestellten Algorithmus)

Im Gegensatz zur Eigenproduktion der Hersteller fallen bei der Fremdbeschaffung der Module die mittleren Entfernungen zwischen Zulieferern und Endmontage meist geringer aus. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Module zeigt sich hingegen ein unspezifisches Bild. Zwar lassen sich leichte Tendenzen für geringere mittlere Transportentfernungen von großvolumigen Modulen wie Sitze oder Cockpits erkennen; es ist jedoch kein Zusammenhang zwischen Modulgewicht/-volumen und Transportdistanz festzustellen. Die in Abbildung 5-13 zusammengestellten Boxplots zur Darstellung der Distanzverteilungen der Module zeigen, dass sowohl inter- als auch intramodule Abweichungen bei den Entfernungen auftreten.

Die bei der Tier-1-Zulieferstufe zugrundegelegte Empirie lässt sich aufgrund des Umfangs und der fehlenden Verfügbarkeit von Informationen zu Produktionsstandorten nicht für die nachfolgenden Zulieferstufen durchhalten. Während sich die Produktion der Module weitestgehend auf Deutschland und die europäischen Nachbarländer

beschränkt, sinkt dieser Anteil mit steigendem Rang des Zulieferers (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 161).

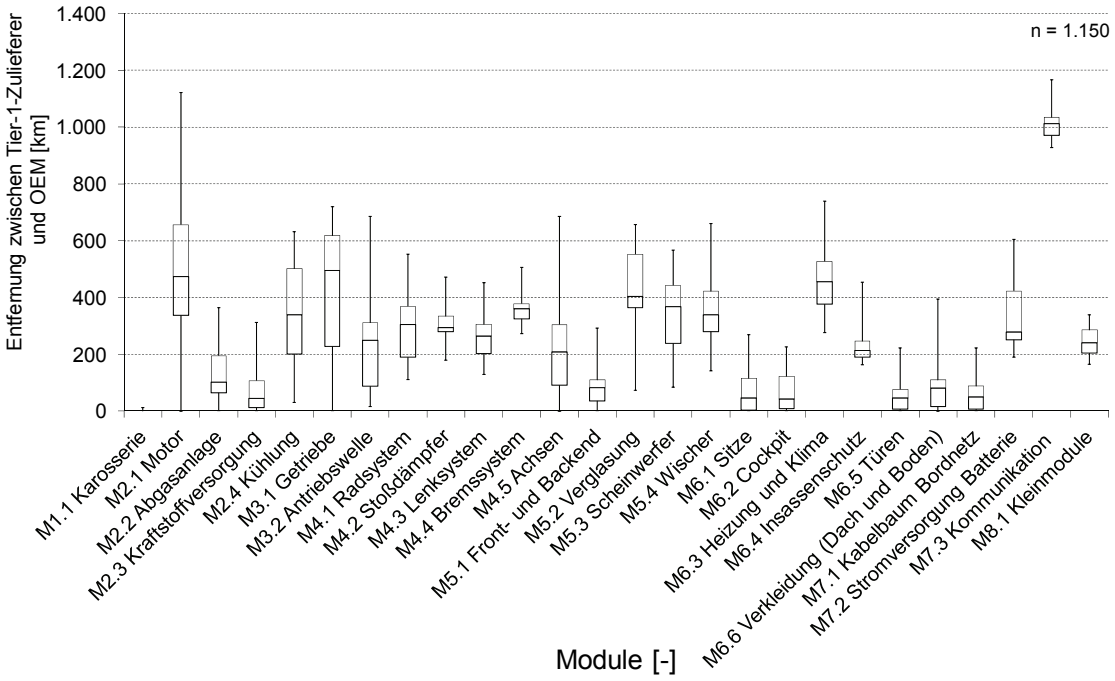


Abbildung 5-13: Verteilung der Entfernungen zwischen Tier-1 und OEM (eigene Darstellung - Stichprobe siehe Anhang A1.3)

Die Handelsdatenbank UN-Comtrade der Vereinten Nationen (UN) (siehe Anhang A1.4) erfasst sämtliche Ex- und Importe nach und aus Deutschland. Zusammen mit den Informationen aus Göpfert und Grünert (2012, S. 161) lassen sich für jede Zulieferstufe (Tier-2, Tier-3, Tier-n) die Anteile der Inlandsbeschaffung und die Güterströme aus dem europäischen Ausland und dem Rest der Welt (RdW) bestimmen (siehe Abbildung 5-14). Der hauptsächlich inländisch geprägten Modulbeschaffung steht bei Teilen und Komponenten ein hoher Anteil der Zulieferung aus dem nichteuropäischen Ausland gegenüber.

Die Herausforderungen bei der Beschreibung der Vorleistungskette bestehen darin, sowohl der Inlandsbeschaffung als auch den Lieferströmen aus dem Ausland Entfernungen zuzuordnen. Im Gegensatz zu den in Abbildung 5-13 dargestellten Distanzverteilungen der Tier-1-Zulieferstufe müssen an dieser Stelle aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit auf Mittelwerte und Distanzbänder verwendet werden. Bei den Zuliefernetzwerken innerhalb Deutschlands kann auf die Kraftverkehrsstatistik des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zurückgegriffen werden. Darin wird für jede der zwölf Güterabteilungen (NST/R 2007) die beförderte Gütermenge nach drei unterschiedlichen Distanzbändern (DB_1: bis 50 km, DB_2: 51 bis 150 km und DB_3: über 150 km)

angegeben. Im Mittel wurden in den letzten sieben Jahren etwa 39 % aller Transporte (bezogen auf das Gütergewicht) maximal 50 km weit transportiert. Während in Distanzband DB_2 nur etwa 19 % des Güteraufkommens transportiert wurden, lagen bei den restlichen 42 % die Transportentfernungen über 150 km (Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt[5]). Definitionsbedingt sind in den Statistiken sowohl die Transporte der Zulieferstufe 1 als auch die innerdeutsche Distribution der gefertigten Fahrzeuge enthalten.

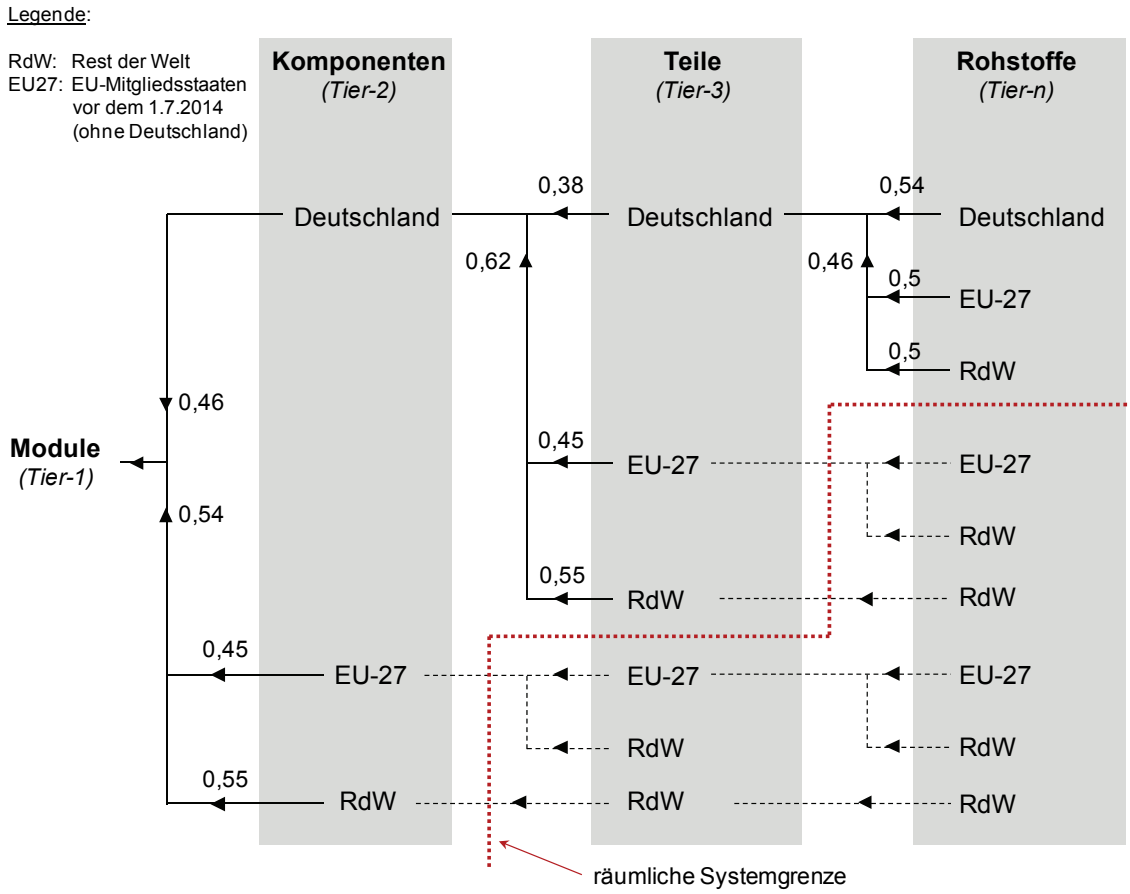


Abbildung 5-14: Beschaffung von Komponenten, Teilen und Rohstoffen nach Regionen (Anteile bezogen auf den Beschaffungswert - eigene Darstellung basierend auf Werten der UN-Comtrade zu den Warengruppen 870710 bis 870899 (siehe Anhang A1.4) und Göpfert und Grünert 2012 , S. 161)

5 (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2007, S.32-34; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2008, S.32-34; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2009, S.32-34; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2010, S.32-34; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2011, S.34-36; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2012, S.34-36; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2013b, S.34-36; Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2014, S.34-36).

Die Ergebnisse aus Abbildung 5-13 sowie die Berechnungen innerhalb der Distributionslogistik erlauben durch eine Differenzbildung die entsprechende Anpassung der Anteile der genannten drei Distanzbänder an die Zulieferstufen Tier-2 und Tier-3.

Die Importen von Komponenten und Teilen aus den EU-Ländern sind durch folgende Trends geprägt (vgl. Abbildung 5-15): Während Nord- und Südeuropa eine untergeordnete Rolle als Zulieferregionen für die Automobilindustrie spielen, stiegen die Zulieferströme aus Osteuropa in den letzten Jahren deutlich an. Im Jahr 2007 wurden etwa 80 % des Gütergewichts aller Zulieferteile zu gleichen Teilen aus west- und osteuropäischen Ländern importiert. Sechs Jahre später kamen mehr als 50 % aller Zulieferleistungen aus Osteuropa (vgl. UN-Comtrade). Besonders stark profitierten von dieser Entwicklung die direkten Nachbarländer Deutschlands wie Tschechien, Polen und Österreich sowie die Slowakei. Da für diese Arbeit keine ausreichende statistische Grundlage für die regionale Verteilung der Zulieferunternehmen innerhalb der Länder zugänglich war, wird zur Festlegung der zugehörigen Entfernungen zwischen den Zulieferern der geografische Schwerpunkt des jeweiligen Zulieferlandes festgelegt. Transportentfernung dient das über die Anteile der Importe gewichtete Mittel der Entfernungen.

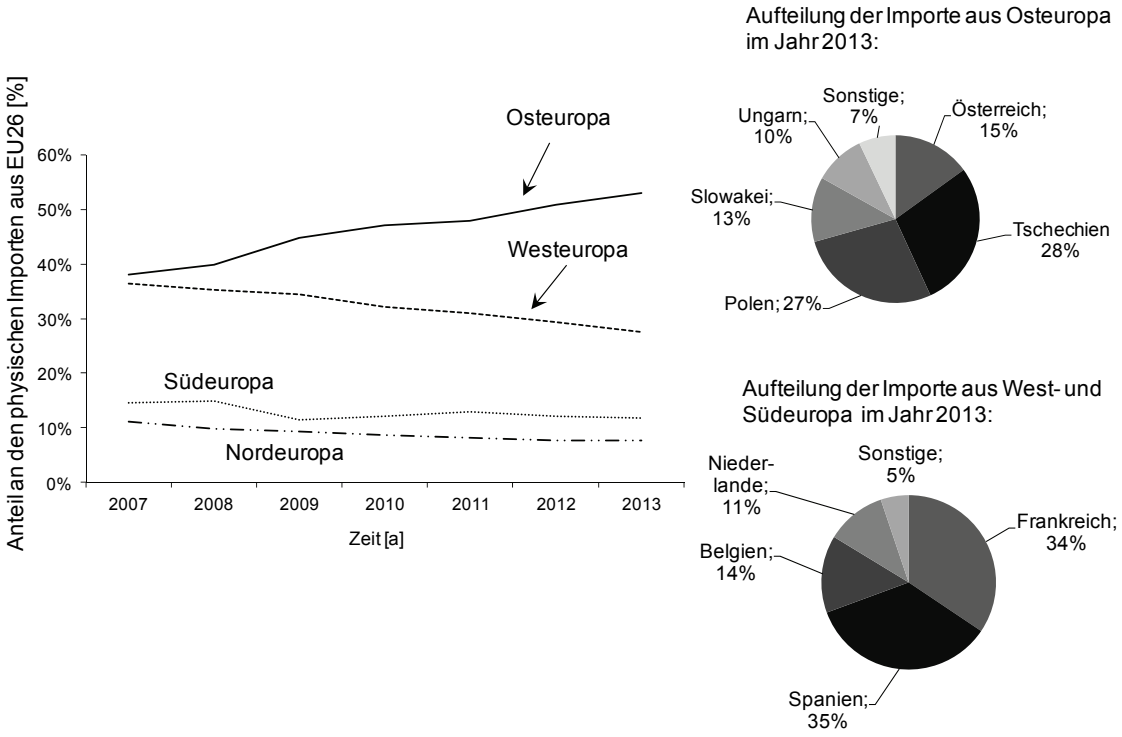


Abbildung 5-15: Importe der Warengruppe Kfz-Teile aus Europa nach Herkunftsländern (EU26: EU27 ohne Deutschland) (eigene Darstellung basierend auf Werten der UN-Comtrade zu den Warengruppen 870710 bis 870899 (siehe Anhang A1.4))

Im Subsystem BESCHAFFUNG werden das Transportaufkommen und die Transportentfernungen festgelegt. Beide Größen dienen als Grundlage zur Berechnung der Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger. Diese Kenngröße beeinflusst den Bedarf an Transportkapazitäten im Subsystem TRANSPORT.

5.1.4 Subsystem TRANSPORT

Das Subsystem TRANSPORT erfüllt den Zweck der Organisation des Transports zur Bereitstellung von Gütern zur richtigen Zeit am richtigen Ort. Die störungsfreie Funktion dieses Subsystems stellt eine Voraussetzung für die Produktion von Einzelteilen bis zu Komplettfahrzeugen dar.

Während bei der Berechnung von Ladekapazitäten und dem daraus ableitbaren Bedarf an Transportgefäßen empirische Untersuchungen die Grundlagen bilden, lassen sich Wirkungszusammenhänge bei der Verkehrsmittelwahl durch die Theorie der Verkehrsmittelaffinitäten begründen (vgl. Voigt 1953). Auf das gängige Verfahren zur Ableitung des physischen Verkehrsaufkommens aus ökonomischen Kennzahlen wie Bruttoinlandsprodukt oder Bruttowertschöpfung mit Hilfe von Wertdichten (vgl. Meersman und Van de Voorde 2008, S. 70ff.) musste an dieser Stelle nicht zurückgegriffen werden, da durch die Modelle ASTRA und GLOMO ein direkter Zugriff auf physische Größen, wie die Anzahl der Pkw, möglich ist. Die Ungenauigkeit durch die Ermittlung von Wertdichten lässt sich so vermeiden.

Der Wirkungsgraph des Subsystems TRANSPORT ist in zwei Bausteine zerlegbar: Nach einer vereinfachten Verkehrsmittelwahl werden im Anschluss die benötigten Kapazitäten der jeweiligen Verkehrsträger bestimmt. Im Falle des Straßengüterverkehrs zählt dazu eine detaillierte Betrachtung des Bedarfs nach Gewichts- und Jahresfahrleistungsklassen der Fahrzeuge. Die Menge der benötigten Fahrzeuge je Klasse wirkt sich auf das Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE aus und bestimmt dort die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes.

5.1.4.1 Verkehrsmittelwahl

Die Frage nach der Wahl des Verkehrsmittels stellt sich für jede Zulieferstufe und für jedes Modul, jede Komponente, jedes Einzelteil und jeden Rohstoff. Dieser sehr disaggregierte Ansatz unterscheidet sich von den existierenden Verkehrsmodellen, deren Betrachtung auf Ebene der Güterhauptgruppen oder der Güterkategorien (Schüttgut, Stückgut, etc.) stattfindet (vgl. Schade 2005, S. 116). Ein weit verbreiteter Ansatz bei dieser aggregierten Betrachtung stellt die Berechnung der Wahlwahrscheinlichkeit für einen Verkehrsträger auf Basis des Logit-Modells dar (vgl. Bühler 2006, S. 73 ff.). Dabei wird eine Nutzenmaximierung des Entscheidungsträgers basierend auf

dem Vergleich von Nutzenfunktionen, die den Verkehrsträgern zugeordnet werden, zugrundegelegt. Die Parameter, welche die Gewichtung der Elemente der Nutzenfunktion (Kosten, Zeit, etc.) darstellen, lassen sich mit Hilfe von beobachteten Daten zur Modalwahl schätzen (vgl. Ortúzar und Willumsen 2001, S. 201 ff.). Dieser Ansatz ist für die Betrachtungen in dieser Arbeit nicht zielführend. Einerseits lässt sich bei dem hohen Disaggregationsgrad keine vollständige Zeitreihe zur Modalwahl für die Module und Zulieferstufen beobachten und demnach eine Kalibrierung nur unzureichend ausführen. Andererseits weist eine Reihe von Modulen nicht die durch den Logit widergespiegelte Dynamik in der Verkehrsträgerwahl auf. Die durch das Statistische Bundesamt erfasste Pluralität der genutzten Verkehrsträger in der Automobillogistik (vgl. Destatis 2014) kann damit begründet werden, dass einige Module eine hohe Eignung für den Bahntransport, andere eine hohe Eignung für den Straßengüterverkehr aufweisen. Dies findet sich in der jeweiligen Entscheidung wieder, die auf der Ebene der Module oftmals zu fast 100 % für einen Verkehrsträger gefällt wird (vgl. Bühler 2006, S. 58 ff.).

Aus diesen Gründen basiert die Modalwahl im Wirkungsgraphen des Subsystems TRANSPORT auf Verkehrsträgeraffinitäten. Die Theorie der Verkehrsträgeraffinitäten (vgl. Voigt 1953, S. 199ff.) beruht darauf, dass die Gütergruppen aufgrund ihrer charakteristischen Eigenschaften eine Affinität für einen bestimmten Verkehrsträger entwickeln. Diese Neigung kann nur für einen oder für mehrere Verkehrsträger gelten und unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Das Konzept der Zuordnung von Affinitäten zu den Gütergruppen soll innerhalb dieser Arbeit auf Module und Zulieferstufen übertragen werden.

Die Entscheidung für und gegen ein Verkehrsmittel hängt nur bedingt von den klassischen Parametern Zeit und Kosten ab. Der wachsende Anteil von JiT- und JiS-Anlieferungen in der Automobilindustrie erfordert einen hohen Grad an Flexibilität und Verlässlichkeit. Dies spiegelt sich in den Gründen wieder, die gegen die Verkehrsträger Bahn und Binnenschiff sprechen. Laut Wittenbrink (2010, S. 34) erschweren hauptsächlich fehlende Gleisanschlüsse und die fehlende Möglichkeit von Direktzügen sowie eine zu geringe Transportgeschwindigkeit und Flexibilität die Nutzung der Bahn als Verkehrsträger. Liegen diese Barrieren nicht vor, werden die Güterströme weitestgehend auf die Bahn verlagert. Beispiele dafür sind die Güterbeförderungsleistungen im Zwischenwerksverkehr der OEM (vgl. Winter 2008, S. 44ff.), die Anlieferung von Rohstoffen zur Fertigung (vgl. Ihme 2006, S. 151) sowie die Distribution der gefertigten Fahrzeuge ins europäische Ausland oder zu den Hochseehäfen (vgl. Herold 2004, S. 65 und Holocher 2014, S. 58). Während die Transporte im Nachlauf der deutschen Nordseehäfen auch weitestgehend als bahnaffin bezeichnet werden können (vgl. Hamburg Port Authority 2012, S. 11), bildet das Binnenschiff das Rückgrat des

Hafenhinterlandverkehrs der niederländischen Häfen (vgl. Frerich und Müller 2006, S. 64).

Abbildung 5-16 zeigt abschließend eine Übersicht über die getroffenen Annahmen bezüglich der Verkehrsträgeraffinitäten einzelner Zulieferbeziehungen. Konkret bedeutet dies, dass Transporte in der Distributionslogistik hohe Anteile an Binnenschiff (Ford-Werke Köln) und Schiene aufweisen. Bei der Beschaffungslogistik werden in der Tier-1-Zulieferstufe nur Module per Schiene transportiert, die auch von den OEM selbst produziert werden (Motor, Achsen, Getriebe, Karosserie) (vgl. Winter 2008, S. 44ff.). Der hohe Anteil von JiT- und JiS-Anlieferungen erlaubt derzeit kaum verspätungsanfällige, multimodale Transportketten, so dass ein Schienenanschluss zwingend notwendig ist, um Ganzzüge zwischen den Produktionsstandorten anbieten zu können. Da diese aber zwischen Tier-1 Zulieferern und OEM-Standorten bisher nicht dokumentiert sind, ist davon auszugehen, dass fremdbeschaffte Module mit dem Lkw angeliefert werden. Im Gegensatz zu den Vorstufen (Tier-2 bis Tier-n) ist die Modulbeschaffung weitestgehend auf Deutschland und das angrenzende europäische Ausland begrenzt (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 161ff.).

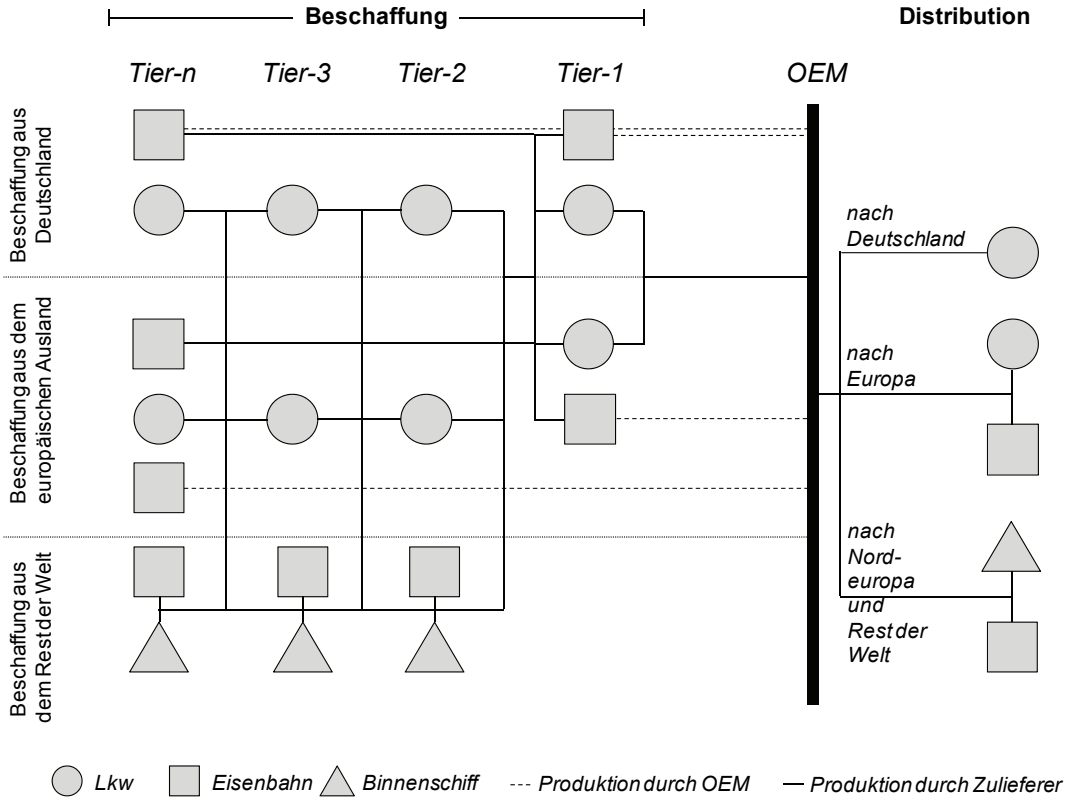


Abbildung 5-16: Verkehrsträgeraffinitäten von Zulieferbeziehungen(eigene Darstellung; Affinitäten basierend auf Frerich und Müller 2006, S. 64, Winter 2008, S. 44ff., Klug 2010, S. 213ff., Ihme 2006, S. 144ff.)

Mit abnehmendem Rang des Zulieferers nimmt einerseits die Anzahl der Lieferanten für die Komponenten, Bauteile und Rohstoffe zu (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 157f.) und andererseits erhöht sich der Auslandsanteil am Beschaffungswert (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 161). Die Wahl des Verkehrsträgers hängt vom Standort des Zulieferers ab: Während Lieferungen innerhalb Europas mit dem Lkw erfolgen, dominieren im Hafenhinterlandverkehr die Kombinationen aus Binnenschiff und Lkw oder Schiene und Lkw. Trotz hoher Anteile von Schiene und Binnenschiff beim Transport spezifischer Module, Komponenten, Bauteilen und Rohstoffen ergibt sich in der Beschaffungslogistik über alle Zulieferstufen und Module hinweg eine deutliche Dominanz des Straßengüterverkehrs (vgl. Klug 2010, S. 213).

5.1.4.2 Fahrzeugbedarf

Der zweite Block des Wirkungsgraphen widmet sich dezidiert dem Straßengüterverkehr, da dieser, wie oben beschrieben, das Verkehrsmittel mit dem höchsten Anteil an der Güterbeförderungsleistung darstellt. Der Fahrzeugbedarf als zentrale Einflussgröße für Umweltwirkungen und Transportkosten leitet sich aus der Menge der zu transportierenden Ladeeinheiten ab. Die Ladeeinheit definiert sich als Kombination aus dem zu transportierenden Gut und des erforderlichen Ladungsträgers (vgl. Arnold et al. 2008, S. 419). Die Art und Beschaffenheit des Ladungsträgers, dessen Aufgabe neben dem Schutz des Gutes auch die Vereinfachung des Handlings (automatisierte Be- und Entladung) beinhaltet, hängt von der Struktur des Transportgutes ab. In der Praxis finden Spezialladungsträger, standardisierte Gitterboxen und Paletten Anwendung. Zusätzlich sind in der Transportkette Kombinationen aus Paletten mit standardisierten Transportboxen aus Kunststoff anzutreffen (vgl. Arnold et al. 2008, S. 703 ff). Aus Sicht der Transportlogistik ist zur Ermittlung der benötigten Fahrzeuge die Anzahl der zu transportierenden Ladeeinheiten und deren Dimension und Gewicht ausschlaggebend (vgl. Kummer 2006, S. 174ff.).

Die Heterogenität zwischen den Zulieferstufen hinsichtlich Volumen und Masse der Module, Komponenten, Einzelteile und Rohstoffe legt bei der Berechnung von Volumen und Gewicht der Ladeeinheiten eine Unterscheidung der Zulieferstufen nahe. Die Module und Komponenten der Tier-1- und Tier-2-Zulieferer werden in spezielle Ladungsträger gepackt. Beim Transport der Teile und Rohstoffe werden universell einsetzbare Ladungsträger verwendet. Dies führt zu unterschiedlichen Berechnungslogiken bei der Bestimmung des Gewichtes der Ladeeinheit (siehe Gleichung 5.4). Bei den Tier-1- und Tier-2-Zulieferern ermittelt sich das Gewicht der Ladeeinheit durch die Addition des Gewichtes des Ladungsträgers mit dem Produkt aus Modulgewicht und Zuladungskapazität. Die verwendeten Parameter für die Ladungsträger beruhen auf

Transpofix (2014), Feil GmbH (2015) und Gebhardt (2015) und sind ausführlich im Anhang A1.5 dargestellt.

$$M_{m,z}^{LE} = M_{m,z}^{LT} + M_m * f_{m,z}^{L} \quad (5.4)$$

mit

M^{LE}:	*Gewicht der Ladeeinheit*
M^{LT}:	*Gewicht (Spezial-) Ladungsträger*
M_m:	*Gewicht Modul-Äquivalent*
f^{L}:	*Zuladungskapazität (Module pro Ladungsträger)*
$m=1,...26$:	*Art des Moduls*
$z= 1,2$:	*Stufe der Zulieferer*

Bei Standard-Ladungsträgern werden die Zuladungskapazitäten nicht in Anzahl Teile sondern als maximale Tragkraft des Ladungsträgers angegeben (vgl. Klug 2010, S. 150ff.). Deshalb wird für die Zulieferstufen Tier-3 und Tier-n das Gewicht der Ladeeinheit durch Multiplikation des Ladevolumens mit der Materialdichte der verwendeten Materialien des Modulbaus berechnet (vgl. Gleichung 5.5). Begrenzend wirkt an dieser Stelle die maximale Tragkraft des entsprechenden Ladungsträgers. Das maximale Ladevolumen richtet sich nach der Grundfläche und der Ladehöhe des entsprechenden Ladungsträgers. Da sich bei Einzelteilen im Vergleich zu Rohstoffen eine geringere Packdichte des Materials ergibt, muss das Ladevolumen zusätzlich mit einem Auslastungsgrad multipliziert werden.

$$M_{m,z}^{LE} = M_{m,z}^{LT} + \min\{V_{m,z}^{LT} * p * \sigma_m, Gmax_{m,z}^{LT}\} \quad (5.5)$$

mit

M^{LE}:	*Gewicht der Ladeeinheit*
M^{LT}:	*Gewicht (Spezial-) Ladungsträger*
V^{LT}:	*Ladevolumen des (Spezial-)Ladungsträgers*
$Gmax^{LT}$	*Maximale Tragkraft des Ladungsträgers*
p:	*maximale Packdichte im Ladungsträger*
σ:	*Dichte der verwendeten Materialzusammensetzung*
$m=1,...26$:	*Art des Moduls*
$z= 3,n$:	*Stufe der Zulieferer*

Die Vielzahl von unterschiedlichen Materialzusammensetzungen beeinflussen die Materialdichten der Module. Wie aus Abbildung 5-17 ersichtlich, dominiert der Einsatz von Stahlwerkstoffen mit etwa 61 % der Gesamtmasse eines Fahrzeuges bis heute den Automobilbau. Bei der Produktion von Modulen des Interieurs und Exterieurs kommen Kunststoffe oder Elastomere zum Einsatz. Komponenten der Antriebstechnologie, des Fahrwerks und der Karosserie bestehen überwiegend aus Stahl oder verwandten Werkstoffen (vgl. Hamm et al. 2013, S. 1043ff.). Bei der Produktion von Modulen und Komponenten für Exterieur und Interieur werden hingegen aufgrund der einfachen Verarbeitungsmöglichkeiten vorwiegend Thermoplaste eingesetzt (vgl. Seidel und Hahn 2014, S. 326).

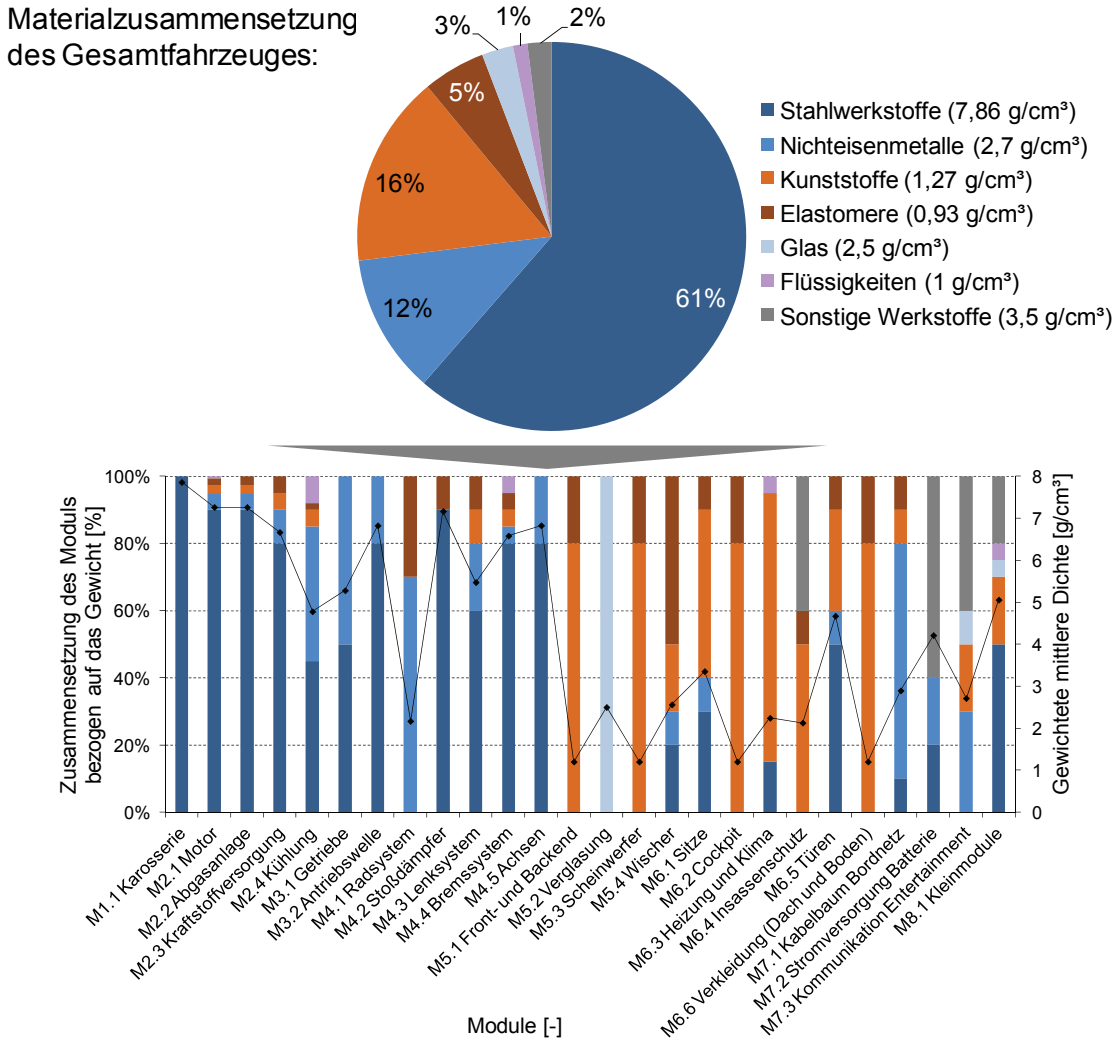


Abbildung 5-17: Werkstoffdichten und Materialzusammensetzung des Gesamtfahrzeuges und der Module (eigene Berechnungen auf Basis von Hamm et al. 2013, S. 1043ff.; Roos und Maile 2008, S. 10f. und S. 286, Lang 2011, S. 13ff. sowie Morello et al. 2011, S. 276)

Aus diesen ermittelten Materialzusammensetzungen lassen sich Materialdichten für die zur Modulproduktion verwendeten Komponenten, Teile und Rohstoffe ableiten. Diese variieren zwischen 1 g/cm^3 bei hohen Kunststoffanteilen und 7,86 g/cm^3 bei der Verwendung von Stahl als Werkstoff. Die sich daraus ergebenden Massen der Ladeeinheiten variieren dementsprechend. Abbildung 5-18 zeigt die daraus abgeleitete Verteilung der Anteile der Ladungsträger am Gewicht der Ladeeinheiten. Einerseits zeigt sich, dass die Ladungsträger bedingt durch eine geringe Ladekapazität beim Transport von Modulen (Tier-1) einen überwiegenden Teil des Ladeeinheitsgewichtes ausmachen. Andererseits variieren diese Werte innerhalb einer Zulieferstufe deutlich und hängen vom zu transportierenden Modul und dessen Struktur ab. Der Anteil der Ladungsträger am Gesamtgewicht variiert zwischen den Zulieferstufen, da die Packdichte bei Komponenten, Teilen und Rohstoffen mit zunehmendem Rang der Zulieferstufe ansteigt. Beim Transport von Rohstoffen (Tier-n) wird die Bela dung des Ladungsträgers nicht mehr durch die Packdichte oder der Zuladungskapazität, sondern durch die maximale Zuladung des Ladungsträgers begrenzt. Da selbst bei Materialien mit geringer Dichte, das auf Basis des Ladungsvolumens berechnete Gewicht über der maximalen Zuladung des Ladungsträgers liegt, sinkt in dieser Zulieferstufe die Varianz zwischen den unterschiedlichen Modulen auf den Wert 0.

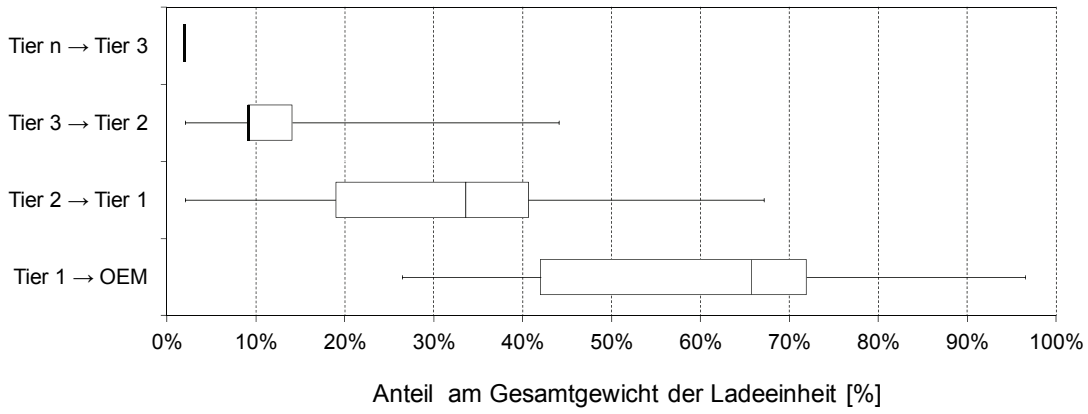


Abbildung 5-18: Verteilung der Anteile der Ladungsträger am Gesamtgewicht der Ladeeinheit für Module und Zulieferstufen (eigene Darstellung, Modellergebnisse)

Auf Basis der Masse und des Volumens der Ladeeinheiten lässt sich die Anzahl der zum Transport benötigten Fahrzeuge bestimmen. Dabei ergeben sich zwei beschränkende Parameter. Einerseits darf die Nutzlast des Fahrzeuges nicht überschritten werden und andererseits beschränkt das Ladevolumen des Transportmittels die Zuladung. Somit lässt sich neben der gewichtsbasierten Kapazität eines Nutzfahrzeu-

ges auch eine volumenbasierte Kapazität rechnerisch bestimmen. Die gewichtsbasierte Kapazität berechnet sich durch die ganzzahlige Division (div) der Nutzlast des Transportgefäßes durch das Gewicht der Ladeeinheit (siehe Gleichung 5.6). Dadurch wird gewährleistet, dass die Beladung nur aus ganzen Ladeeinheiten besteht (vgl. Günther und Tempelmeier 2012, S. 303).

$$K^{M}_{m,z,g} = G^{N}_{g} \; div \; M^{LE}_{m,z} \qquad (5.6)$$

mit

K^M:	*gewichtsbasierte Kapazität*
G^N:	*Nutzlast des Transportgefäßes*
M_{LE}:	*Gewicht Ladeeinheit*
$m=1,...26$:	*Art des Moduls*
$z= 1,2,3,n$:	*Stufe der Zulieferer*
$g= 1,2,3,4,5,6,SZM$:	*Gewichtsklassen der einsetzbaren Fahrzeuge*

Die Berechnung der volumenbasierten Kapazität weicht nur leicht von der gewichtsbasierten ab. Das Transportvolumen wird nicht durch das Volumen der Ladeeinheit geteilt, sondern es wird berechnet, wie viele Ladeeinheiten auf der Ladefläche des Transportgefäßes Platz finden. Diese Anzahl wird dann mit einem Stapelfaktor multipliziert (vgl. Gleichung 5.7). Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass Ladeeinheiten, deren Stapelfaktor bauartbedingt unter dem rechnerischen Ergebnis (Ladehöhe geteilt durch Höhe der Ladeeinheit) liegen, entsprechend berücksichtigt werden können (vgl. Günther und Tempelmeier 2012, S. 303).

$$K^{Vol}_{m,z,g} = \left(F^{L}_{g} \; div \; F^{SLT}_{m,z}\right) * S_{m,z,g} \qquad (5.7)$$

mit

K^{Vol}:	*volumenbasierte Kapazität*
F^L:	*Ladefläche Transportgefäß*
F^{SLT}:	*Grundfläche (Spezial-) Ladungsträger*
S:	*Stapelfaktor*
$m=1,...26$:	*Art des Moduls*
$z= 1,2,3,n$:	*Stufe der Zulieferer*
$g= 1,2,3,4,5,6,SZM$:	*Gewichtsklassen der einsetzbaren Fahrzeuge*

Die Ermittlung der tatsächlichen Kapazität erfolgt anschließend mittels Bildung eines Minimums zwischen den berechneten volumen- und gewichtsbasierten Kapazitäten (vgl. Gleichung 5.8). Die Transporte der Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe

können dann entweder volumen- oder gewichtsbeschränkt sein. Damit lässt sich aus der Güterbeförderungsleistung als Output des Subsystems BESCHAFFUNG die Fahrleistung der Nutzfahrzeuge im Straßengüterverkehr ableiten.

$$K^{T}_{m,z,g} = \min\left\{K^{Vol}_{m,z,g}, K^{M}_{m,z,g}\right\} \qquad (5.8)$$

mit

K^{T}:	*Transportkapazität*
K^{Vol}:	*Volumenkapazität*
K^{M}:	*Massenkapazität*
$m=1,...26$:	*Art des Moduls*
$z= 1,2,3,n$:	*Stufe der Zulieferer*
$g= 1,2,3,4,5,6,SZM$:	*Gewichtsklassen der einsetzbaren Fahrzeuge*

Der Fahrzeugbedarf setzt sich aus sieben Gewichtsklassen zusammen. Jede Gewichtsklasse weist Maße für die Ladefläche und eine Nutzlast auf. Zudem sind einige Gewichtsklassen bestimmten Transportaufgaben vorbehalten. So existieren für die Gewichtsklasse G6 (zulässiges Gesamtgewicht > 26t und ≤ 32t) fast ausschließlich Kippaufbauten. Aufbauten, die sich zum Transport von gefertigten Automobilen eignen, sind hingegen ausschließlich in der Gewichtsklasse G5 anzutreffen (vgl. Anhang A1.6).

Tabelle 5-2: Kapazitäten der Gewichtsklassenvon Nutzfahrzeugen (vgl. KBA Nutzfahrzeugbestand 2012, Daimler AG 2015b, sowie Wittenbrink 2011, S. 8)

Gewichtsklasse	*Ladefläche*			*Nutzlast*
	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	[t]
G1	2.600	1.692	1.932	1,49
G2	6.050	2.428	2.400	2,20
G3	6.080	2.428	2.500	4,62
G4	7.300	2.428	3.000	8,27
G5	7.820	2.428	3.000	13,20
G6	7.820	2.428	3.000	17,00
SZM	13.620	2.428	3.000	27,00

Bei Rohstoffen und Modulen kann davon ausgegangen werden, dass durch die geringe Anzahl an Zulieferern auf den Relationen zwischen Produzenten und Abnehmer täglich große Mengen transportiert werden (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 157). Deshalb wird in dieser Arbeit angenommen, dass der Fahrzeugeinsatz in den Zulieferstufen Tier-1 und Tier-n durch den Sattelzug als Gewichtsklassen mit der größten Nutzlast

bestimmt wird. Für die Zulieferstufen 2 und 3 gilt, dass stets das Fahrzeug eingesetzt wird, dessen Betrieb die geringsten Gesamtkosten verursacht. Da die Betriebskosten mit der Fahrzeuggröße ansteigen (vgl. Unterkapitel 5.2.3.1.1) ergibt sich als kostengünstigste Lösung jeweils die kleinstmögliche Gewichtsklasse der Fahrzeuge (siehe Gleichung 5.9). Unter dieser Annahme wird ein Fahrzeug genau dann eingesetzt, wenn das Transportaufkommen je Zulieferer und Tag durch die Transportkapazität des Fahrzeuges gedeckt wird und es sich um die geringstmögliche Gewichtsklasse handelt.

$$E_{m,z,g} = \begin{cases} 1, & \frac{Pb_{m,z}^{LE}}{N_{m,z}^{Z}} * \frac{1}{K_{m,z,g}^{T}} \leq 1 \ \wedge \ \frac{Pb_{m,z}^{LE}}{N_{m,z}^{Z}} * \frac{1}{K_{m,z,g+1}^{T}} > 1 \\ 0, & sonst \end{cases} \qquad (5.9)$$

mit

E:	*Fahrzeugeinsatz*
Pb^{LE} *:*	*täglicher Produktionsbedarf in Ladeeinheiten*
N^{Z}*:*	*Anzahl Zulieferer*
K^{T} *:*	*Transportkapazität*
m=1,…26:	*Art des Moduls*
z= 1,2,3,n:	*Stufe der Zulieferer*
g= 1,2,3,4,5,6,SZM:	*Gewichtsklassen der Nutzfahrzeuge*

Der Fahrzeugbedarf für jede Kombination aus Modul und Zulieferstufe leitet sich durch den Abgleich von Transportnachfrage und Transportangebot ab. Die Nachfrage entspricht der entstehenden Güterbeförderungsleistung beim Transport der Module. Das Angebot ergibt sich durch die berechnete Transportkapazität der Fahrzeuggewichtsklassen. Die maximal mögliche Fahrleistung der Fahrzeuge lässt sich dann durch Division dieser beiden Größen bestimmen. Daraus lässt sich der zur Befriedigung der Transportnachfrage benötigte Fahrzeugbedarf ermitteln.

Abschließend stellt Abbildung 5-19 eine Übersicht über den Wirkungsgraphen für das Subsystem TRANSPORT dar. Der Output des Teilmodells besteht aus der Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger Schiene, Binnen- und Seeschiff und dem Fahrzeugbedarf im Straßengüterverkehr nach Gewichtsklassen und Jahresfahrleistungsklassen, welcher die Elemente im Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE beeinflusst.

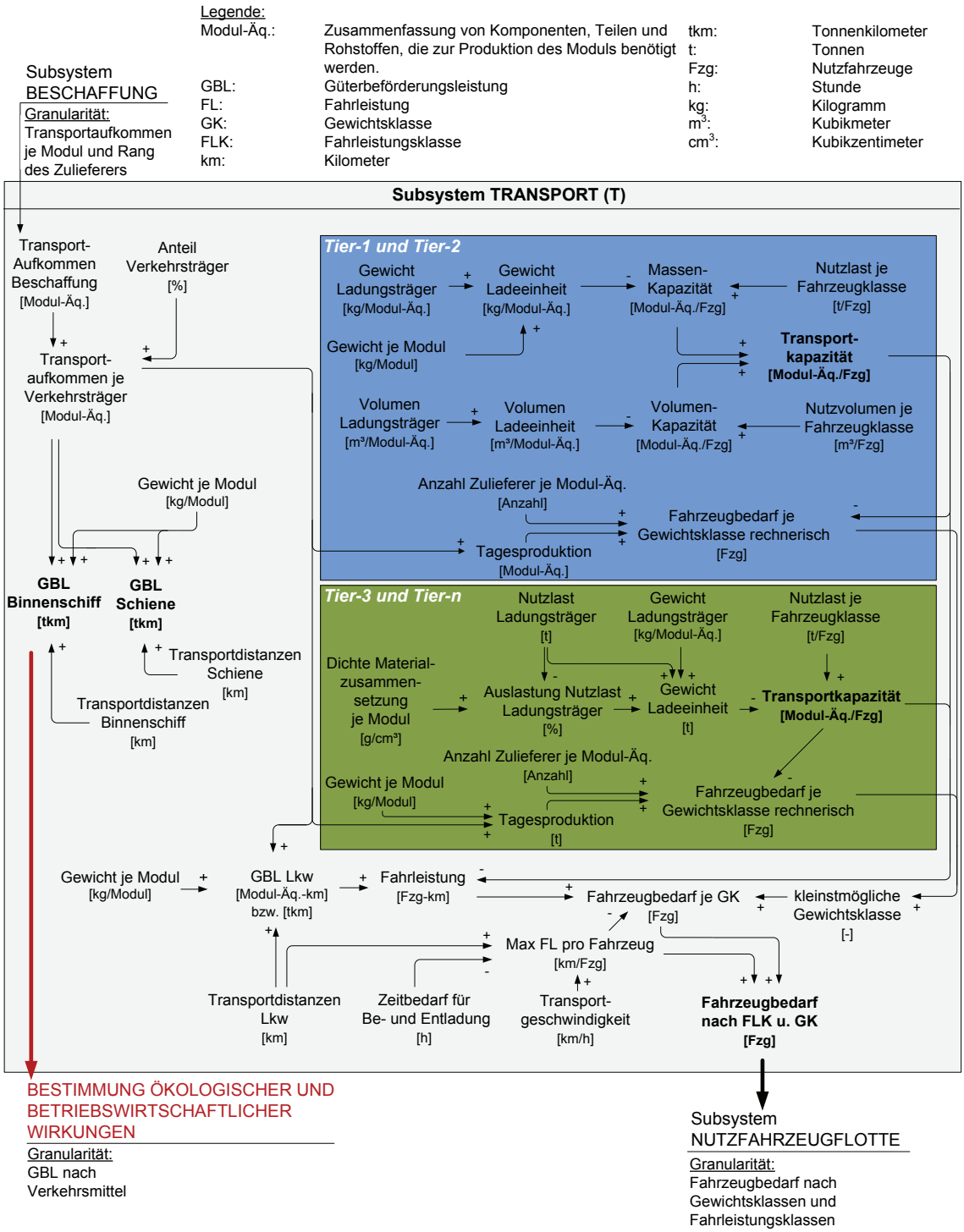


Abbildung 5-19: Wirkungsgraphen des Subsystems TRANSPORT (eigene Darstellung)

5.1.5 Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE

Die Elemente im Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE hängen von dem berechneten Fahrzeugbedarf im Subsystem TRANSPORT ab. Die theoretische Grundlage für die Wirkungszusammenhänge innerhalb dieses Subsystems basiert auf einem, als Alterungskette (Aging-Chain) bekannten, von Meadows et al. beschriebenen systemdynamischem Zusammenhang (vgl. Meadows et al. 1972, S. 102 f.). Damit wird im Subsystem NUTZFAHRZEUGFLOTTE nicht nur der Gesamtbestand an Nutzfahrzeugen, sondern auch dessen Alterung abgebildet. Das Alter der Fahrzeuge bestimmt spezifische, technische Fahrzeugparameter wie die Emissionsklasse und der Kraftstoffverbrauch.

Zur Berechnung des Nutzfahrzeugbestands wird die bestehende Flotte mit dem im Subsystem TRANSPORT ermittelten Fahrzeugbedarf verglichen. Höhe und Vorzeichen der Differenz bestimmen zusammen mit der zu ersetzenden Anzahl der Fahrzeuge aus der Flotte (Verschrottungen) die Anzahl der Neuzulassungen. Abbildung 5-20 zeigt den Wirkungsgraphen des Subsystems.

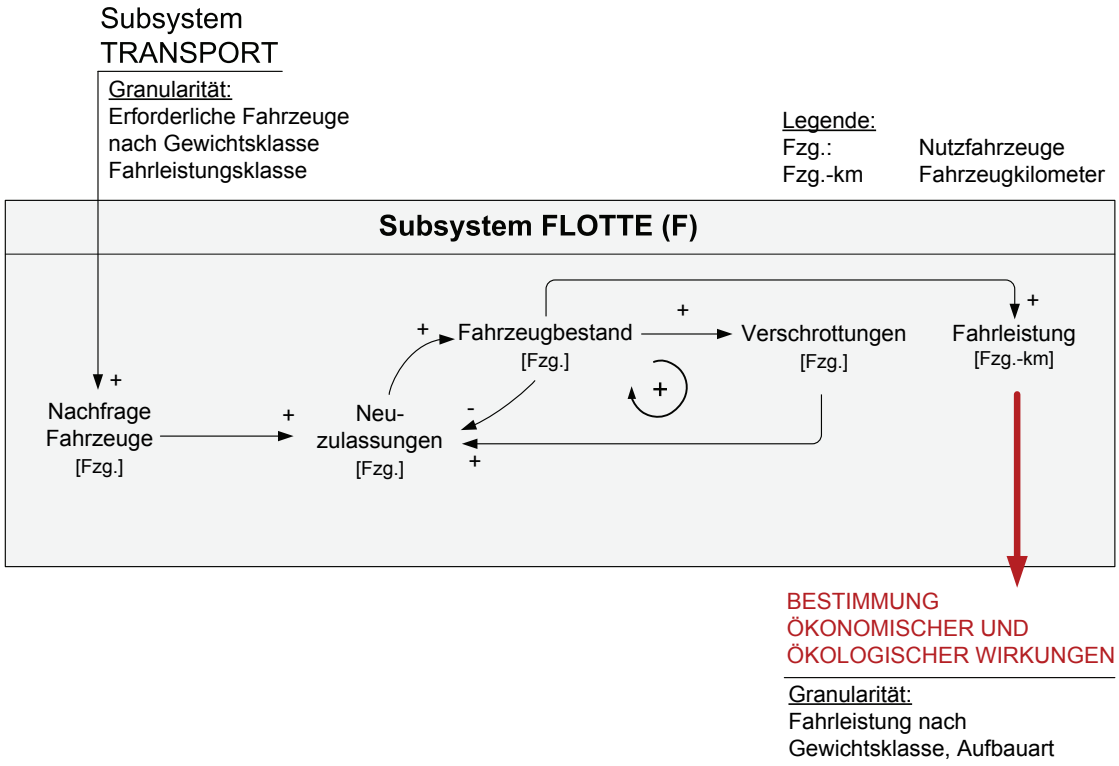


Abbildung 5-20: Wirkungsgraphen des Subsystems NUTZFAHRZEUGFLOTTE(eigene Darstellung)

Die neu zugelassenen Fahrzeuge erhalten je nach Jahr der Zulassung einen spezifischen Kraftstoffverbrauch und eine Schadstoffnorm. Aus dem Subsystem TRANSPORT steht zusätzlich eine Klassifizierung nach jährlicher Fahrleistung zur Verfügung.

Die Alterskohorten teilen den Bestand in zehn Teilbestände auf. Jeder dieser Teilbestände repräsentiert jeweils eine Altersstufe, wobei alle Fahrzeuge mit einem Alter größer gleich zehn Jahre in einer Gruppe zusammengefasst wurden. Abbildung 5-21 illustriert diese als Aging-Chain (Alterungskette) bezeichnete Verkettung von Fluss- und Bestandsvariablen (vgl. Eberlein et al. 2012) in der Vensim-Notation. Der Ansatz, Bestände oder Populationen in Kohorten aufzuteilen, geht auf die Beschreibungen in Meadows et al. (1972, S. 102f.) zurück.

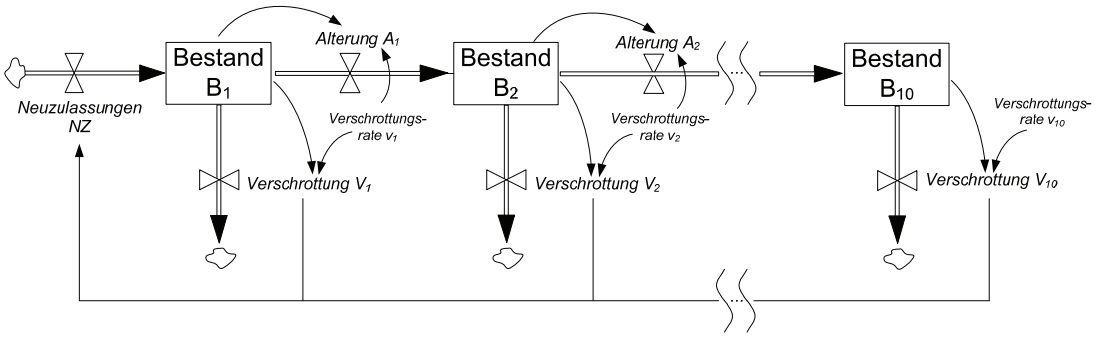


Abbildung 5-21: Aging-Chain des Bestandes an Nutzfahrzeugen(eigene Darstellung - Modellausschnitt)

Jedes Fahrzeug durchläuft bis zum Ausscheiden aus der Flotte die entsprechenden Altersstufen. Der Gesamtbestand berechnet sich durch Summierung der zehn Teilbestände (vgl. Gleichung 5.10). Die jeweiligen Einzelbestände werden durch die Subtraktion von Zufluss (Neuzulassungen, Alterung) und Abfluss (Verschrottung, Alterung) bestimmt.

$$FB_{e,a,gesamt}(t) = \sum_{i=1}^{10}\left[FB_{e,a,i}\,(t=0) + \int_{0}^{t}\left[Z_{e,a,i}\,(t) - V_{e,a,i}(t) - A_{e,a,i}(t)\right]dt\right] \qquad (5.10)$$

mit

$FB_{e,a,i}\,(t)$:	*Fahrzeugbestand zum Zeitpunkt t*
$Z_{e,a,i}\,(t)$:	*Zufluss durch Alterung aus der jüngeren Altersklasse zum Zeitpunkt t*
$V_{e,a,i}\,(t)$:	*Verschrottungen in der jeweiligen Altersklasse zum Zeitpunkt t*
$A_{e,a,i}\,(t)$:	*Alterung in der jeweiligen Altersklasse zum Zeitpunkt t*
$i=1,..,10$:	*Altersklassen der Nutzfahrzeuge*

e=1,…31: *Jahresfahrleistungsklassen der Nutzfahrzeuge*
a=1,…6: *EURO-Abgasnorm*

Der Zufluss in die Alterskohorten der Aging-Chain wird wie folgt bestimmt:

$$Z_{e,a,i}(t) = \begin{cases} A_{e,a,i-1}(t), & 1 < i \leq 10 \\ NZ_{e,a}(t), & i = 1 \end{cases} \qquad (5.11)$$

mit
$Z_{e,a,i}(t)$: *Zufluss durch Alterung aus der jüngeren Altersklasse zum Zeitpunkt t*
$A_{e,a,i}(t)$: *Alterung in der jeweiligen Altersklasse zum Zeitpunkt t*
$NZ_{e,a}(t)$: *Neuzulassungen (Neufahrzeuge) zum Zeitpunkt t*
i=1,..,10: *Altersklassen der Nutzfahrzeuge*
e=1,…31: *Jahresfahrleistungsklassen der Nutzfahrzeuge*
a=1,…6: *EURO-Abgasnorm*

Während zu Beginn der Aging-Chain der Zufluss aus den Neuzulassungen besteht, wird die Höhe der Folgebestände durch die Anzahl der alternden Fahrzeuge bestimmt. So steht am Ende einer Kohorte immer die Entscheidung an, ob ein Fahrzeug in die nächste Alterskohorte überwechselt (Alterung) oder aus dem Bestand ausscheidet (Verschrottung). Beide Größen hängen einerseits von der Verschrottungsrate und andererseits von der Höhe des Bestandes ab (vgl. Gleichung 5.12).

$$A_{e,a,i}(t) = \left(1 - v_{e,a,i}(t)\right) \times FB_{e,a,i}(t-1) \qquad (5.12)$$

mit
$FB_{e,a,i}(t)$: *Bestand zum Zeitpunkt t*
$A_{e,a,i}(t)$: *Alterung in der jeweiligen Altersklasse zum Zeitpunkt t*
$v_{e,a,i}(t)$: *Verschrottungsrate zum Zeitpunkt t*
i=1,..,10: *Altersklassen der Nutzfahrzeuge*
e=1,…31: *Jahresfahrleistungsklassen der Nutzfahrzeuge*
a=1,…6: *EURO-Abgasnorm*

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug aus dem Bestand ausscheidet, wird im Folgenden als Verschrottungsrate bezeichnet. Diese Rate lässt sich in eine zeitliche und eine fahrleistungsabhängige Komponente unterteilen. Die Bauteile der Nutzfahrzeuge unterliegen zeitlicher Ermüdung und eine hohe Fahrleistung führt zu einem erhöhten Verschleiß der Teile. Übersteigen die daraus resultierenden Wartungs- und Reparaturkosten die Grenze der Wirtschaftlichkeit, so scheiden die Fahrzeuge aus dem inländischen Bestand aus. Dies bedeutet zunächst nicht, dass das Fahrzeug verschrottet wird, da ein wirtschaftlicher Betrieb in Ländern mit geringeren Lohn- und Fahrzeugbetriebskosten durchaus möglich sein kann. Gleichung 5.13 stellt die Berechnung der Ausscheidungsrate dar. Für jede der 31 Fahrleistungsklassen, deren Zuordnung bereits im Teilmodell TRANSPORT stattfindet, wird abhängig von der Alterskohorte und der gesamten Fahrleistung entschieden, ob die Fahrzeuge in dieser Fahrleistungsklasse aus dem Bestand ausscheiden oder eine Alterskohorte weiter wandern. Bis in die Alterskohorte FB_{10} findet dieser Auswahlprozess nur auf Basis der Fahrleistungen statt. Bei Fahrzeugen, die zehn Jahre oder älter sind, wird zusätzlich eine altersbasierte Ausscheidungsrate ermittelt, die der zeitbezogenen Abnutzung Rechnung trägt.

$$v_{e,a,i}(t) = \begin{cases} 0, & 1 \leq i \leq 9 \\ 1,\ r_i \leq F_i(e) \wedge 1 \leq i \leq 9 & \\ r_{10}, & i = 10 \end{cases} \qquad (5.13)$$

mit

$v_{e,a,i}\ (t)$:	*Verschrottungsrate zum Zeitpunkt t*
r_i:	*Überlebensrate je Altersklasse*
F(e):	*Summenfunktion der Verteilung über die Jahresfahrleistungsklassen*
i=1,..,10:	*Altersklassen der Nutzfahrzeuge*
e=1,...31:	*Jahresfahrleistungsklassen der Nutzfahrzeuge*
a=1,...6:	*Euro-Abgasnorm*

Die damit bestimmbare Anzahl der Verschrottungen wird unter Berücksichtigung des aktuellen Fahrzeugbedarfs als Neuzulassungen in den Bestand zurückgeführt. Folglich wird die Fahrzeugflotte kontinuierlich erneuert und den Fahrzeugen analog zum Jahr der Zulassung die entsprechenden technischen Eigenschaften wie Kraftstoffverbrauch und Emissionsklasse zugeordnet. Hohe Fahrleistungen und die damit einhergehenden

hohen Verschrottungsraten führen zu einem geringen Durchschnittsalter der Flotte und einer schnellen Diffusion von neuen Abgasnormen und (Kraftstoff-) Effizienzmaßnahmen. Somit lassen sich der Gesamtbestand, die Altersverteilung des Bestandes sowie die Anzahl der Fahrzeuge nach Schadstoff- und Fahrleistungsklassen ermitteln.

5.2 Ein systemdynamisches Gestaltungsmodell zur Simulation von Zustandsänderungen im System „Automobilindustrie“

Die Charakteristika der erstellten Wirkungsgraphen weisen eine Kompliziertheit der Systemstruktur, bedingt durch eine große Anzahl an Systemelementen und Wirkungsbeziehungen auf. Zudem lassen die Rückkopplungen in der Systemstruktur auf ein komplexes Verhalten des Systems „Automobilindustrie“ schließen. Die Auswirkungen veränderter Systemzustände auf das Systemverhalten lassen sich folglich nur durch die Anwendung eines Modells analysieren.

Da bereits existierende Modelle (vgl. Kapitel 3) Defizite hinsichtlich der Detailtiefe aufweisen oder die Systemgrenzen für die Beantwortung der Forschungsfrage wichtige Elemente exkludieren, besteht die Möglichkeit die existierende Modelle entsprechend zu erweitern bzw. zu detaillieren oder ein neues Modell zu erstellen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde sich dafür entschieden, aufbauend auf den Wirkungsgraphen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen ein von bestehenden Modellen unabhängiges systemdynamisches Simulationsmodell zu erstellen. Um die Wirkungen einer Regionalisierung der automobilen Zulieferstruktur quantitativ bewerten zu können, wurden für die Modellkonzeption folgende Zielsetzung definiert:

- Bestimmung der jährlichen Nachfrage nach in Deutschland produzierten Fahrzeugen als Basis für die Automobilproduktion an deutschen Produktionsstandorten
- Ableitung der Produktionsmenge für Module in den Hierarchiestufen des Zuliefernetzwerkes und Zuordnung der entsprechenden Transportentfernungen
- Ermittlung von Güterbeförderungs- und Fahrleistung der Verkehrsmittel
- Quantifizierung der ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen

Die disaggregierte Betrachtung der Module und Zulieferhierarchiestufen erlaubt die Simulation differenzierter Szenarien der Regionalisierung. Darüber hinaus lassen sich durch die Unterscheidung der Produktionsstandorte die Wirkungen lokal zuordnen.

Um zukünftigen Entwicklungen Rechnung tragen zu können, aber dennoch die Unsicherheit bei den Inputparametern möglichst gering zu halten, wird ein Prognosehorizont bis zum Jahr 2030 gewählt. Da die verwendete Software-Lösung „Vensim“ keine

monatlichen Berechnungen ermöglicht und sich die durch die Software-Lösung vorgegebenen Berechnungsintervalle an der divergierenden geometrischen Reihe mit dem Startwert 0,5 orientieren, wurde als Intervalllänge 0,0625 Jahre gewählt.

5.2.1 Modellstruktur

Die Gliederung in Teilmodelle zur Verbesserung der Übersichtlichkeit des Modells orientiert sich an den in Kapitel 4 beschriebenen Subsystemen. Oft wird in diesem Zusammenhang von einer Modularisierung der Modellstruktur gesprochen (vgl. Schade 2005, S. 14 ff.). Da diese Begrifflichkeit allerdings schon im Zusammenhang mit der Automobilproduktion verwendet wird (vgl. Unterkapitel 4.2.2), soll im Weiteren von Teilmodellen gesprochen werden.

Abbildung 5-22 stellt eine Übersicht der Modellstruktur mit den Teilmodellen auf Basis der Subsysteme dar. Das Modell beinhaltet sämtliche im Unterkapitel 5.1 dargestellten Wirkungszusammenhänge. Das Gestaltungsmodell, welches es erlaubt gestaltend in das System „Automobilindustrie“ einzugreifen, wird durch ein Wirkungsmodell erweitert. Dieses kombiniert die endogenen Bestimmungsgrößen als Ergebnis des Gestaltungsmodells mit exogenen Determinanten um den zentralen Output zur Beantwortung der Forschungsfrage, die ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen, abzuleiten. Zur Bestimmung dieser Wirkungen wird für den Straßengüterverkehr auf Ergebnisse des Nutzfahrzeugflottenmodells aufgebaut. Die Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff werden im Teilmodell TRANSPORT berechnet. Die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen werden einerseits durch die Betriebskosten aus dem Teilmodul NUTZFAHRZEUGFLOTTE gebildet, um diese dann durch Berechnung von Bestands-, Lager- und Behälterkosten aus den Teilmodellen TRANSPORT und BESCHAFFUNG zu ergänzen.

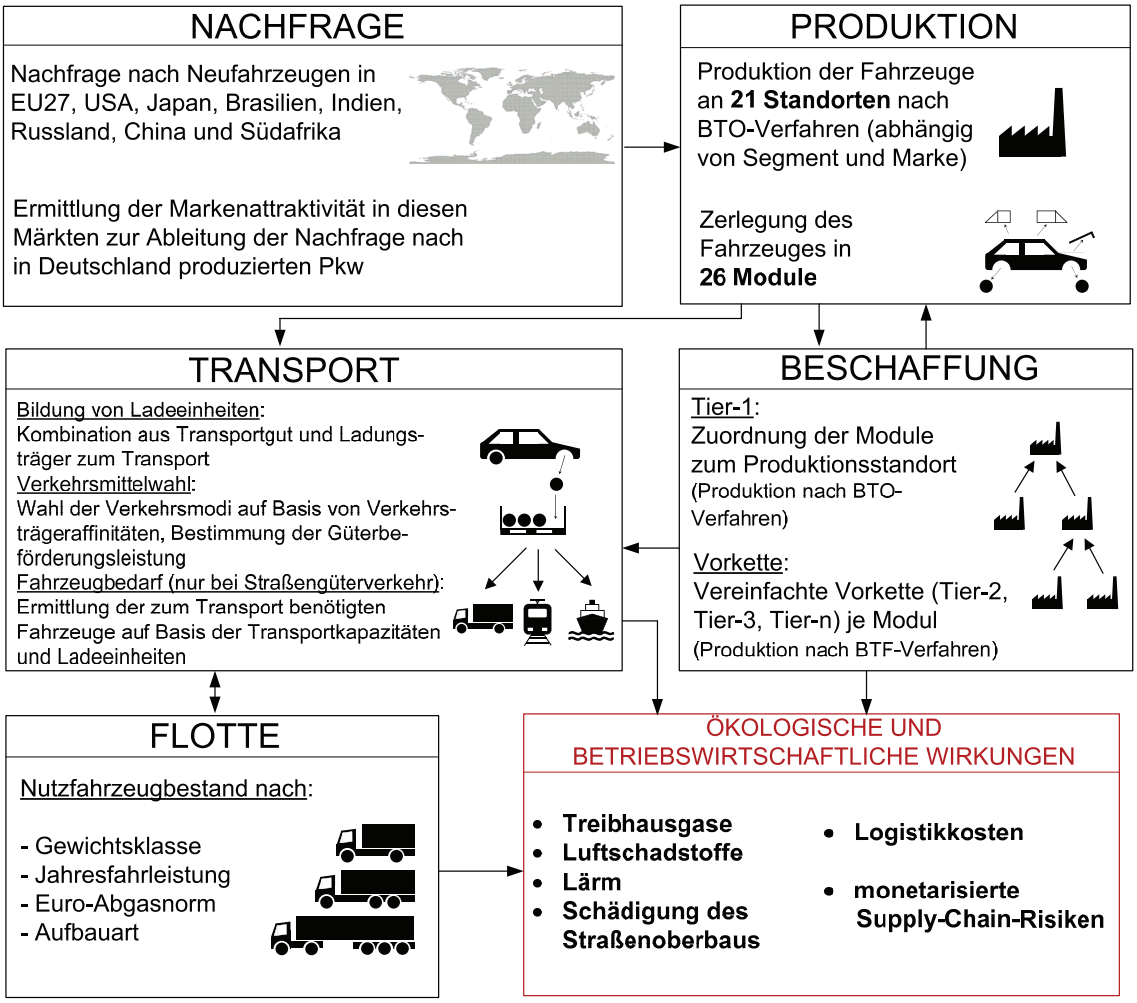


Abbildung 5-22: Struktur eines systemdynamischen Modells zur Abschätzung regionalisierungsbedingter ökologischer und betriebswirtschaftlicher Effekte (eigene Darstellung)

5.2.2 Wirkungsmodell zur Abschätzung transportbedingter ökologischer Effekte

Eine Regionalisierung der Zulieferstruktur ändert den Zustand des Subsystems BESCHAFFUNG und beeinflusst das Verhalten des Systems „Automobilindustrie“. Dies wirkt sich auf die Beförderungs- und Fahrleistung im Güterverkehr aus. Die damit verbundene zeitliche und räumliche Transformation von Gütern führt zu negativen Folgen für die Umwelt (vgl. Flämig 2015b, S. 33). In dieser Arbeit werden in der Kategorie der ökologischen Wirkungen CO_2-Emissionen, Luftschadstoffe, Geräuschemissionen und die Schädigung der Straßeninfrastruktur berücksichtigt. Sämtliche Wirkungen können als Umfeldwirkungen verstanden werden, da sie unbeteiligte Dritte in ihrem Handel beeinflussen oder einschränken. Handelt es sich um „…unkompensierte Auswirkungen ökonomischer Aktivitäten auf unbeteiligte Marktteil-

nehmer oder Dritte“ (Bretzke und Barkawi 2012, S. 35) so wird in der Ökonomie von (negativen) externen Effekten gesprochen.

Die Stärke der ökologischen Wirkungen hängt von systeminternen und externen Steuerungsgrößen ab. Als systemintern gilt die durch den Systemzustand im Subsystem BESCHAFFUNG beeinflusste Transportleistung (Güterbeförderungs- und Fahrleistung) der Verkehrsträger Schiene, Wasser und Straße. Als externe Determinanten werden in dieser Arbeit alle fahrzeugtechnischen Spezifika bezeichnet. Dazu zählen die Verkehrsträger, die Fahrzeuggröße, die eingesetzten Kraftstoffe und die Traktionsart (vgl. Flämig 2015b, S. 34). Der Straßengüterverkehr dominiert mit einem Anteil von über 70 % an der gesamten Güterbeförderungsleistung (vgl. Statistisches Bundesamt 2013b, S. 583) die transportbedingten Umweltwirkungen. Um dieser Dominanz bei der Betrachtung der externen Steuerungsgrößen Rechnung zu tragen, werden die Straßenfahrzeuge im weiteren Verlauf dieser Arbeit nach Gewichtsklassen disaggregiert betrachtet (vgl. Tabelle 5-2).

Die Diskussion hinsichtlich Entstehung, Wirkung und Reduktion von ökologischen Wirkungsdimensionen wird im Folgenden auf Basis von Emissionsfaktoren für Umwelteffekte und Ressourcen-/ Flächenverbrauch im Straßenbau, bezogen auf die Güterbeförderungsleistung (Binnenschiff und Schiene) und die Fahrleistung der Nutzfahrzeuge (Straßengüterverkehr), geführt.

5.2.2.1 Treibhausgasemissionen

Als Treibhausgase werden Gase bezeichnet, die den Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre verstärken. Der Treibhauseffekt beschreibt den Vorgang, bei dem langwellige, infrarote Strahlung der Sonne, die zuvor von der Erdoberfläche reflektiert wurde, durch eine hohe Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre auf die Erde zurückgestrahlt werden. Die überwiegende Anzahl der Experten weltweit ist sich einig, dass der erhöhte Ausstoß von Gasen wie Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) den Treibhauseffekt verstärkt und zu einer dauerhaften Klimaerwärmung führt. Zwischen den Jahren 1901 und 2008 wurde in Deutschland eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1 °C gemessen. Der Großteil dieser Erwärmung fand in der Periode zwischen den Jahren 1990 und 1999 statt (vgl. Pachauri und Meyer 2015, S. 3). Im selben Zeitraum hat sich die jährliche Wachstumsrate der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) von 1,0 ppm pro Jahr auf 1,9 ppm pro Jahr erhöht (vgl. Pachauri und Meyer 2015, S. 3). Aus diesen Messergebnissen lässt sich ein ursächlicher Zusammenhang zwischen dem Ausstoß von Treibhausgasen und der Erderwärmung ableiten (vgl. Pachauri und Meyer 2015, S. 18). Ein weiteres Ansteigen der Durchschnittstemperatur um mehr als zwei Grad Celsius würde zu extremen Auswirkungen auf das

Klimasystem der Erde führen. Neben einem Anstieg des Meeresspiegels ist mit klimatisch bedingten Dürren und Wetterextremen zu rechnen (vgl. IPCC 2013, S. 90ff.). Die tatsächlichen Auswirkungen und damit verbundenen Schäden werden regional sehr stark differieren und sind nur schwer abschätzbar.

Im Wesentlichen setzen sich die Treibhausgasemissionen aus Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) zusammen. Während Methan primär bei landwirtschaftlichen Aktivitäten entsteht (z. B. Viehzucht, Ackerbau), haben etwa 91 % der CO_2-Emissionen ihren Ursprung bei der Verbrennung fossiler Energieträger (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015b). Von diesen 91 % entfallen etwa 21 % (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015b) auf den Straßenverkehrssektor allgemein[6]. Neben den dieselbetriebenen Lkw emittieren die Dieselmotoren von Lokomotiven und Schiffen Treibhausgase. Zudem entstehen bei der Stromproduktion für elektrisch betriebene Lokomotiven je nach Energieträger CO_2-Emissionen. Um die CO_2-Emissionen der Verkehrsträger Straße, Schiene und Binnen-/ Seeschiff vergleichen zu können, werden im Folgenden spezifische Emissionen betrachtet. Dabei werden die absoluten Emissionen pro Kilometer durch die mittlere Ladekapazität der Verkehrsmittel dividiert. Bei gleicher Antriebstechnik können die spezifischen Emissionen variieren. Je höher die Widerstände (Rollwiderstand, Luftwiderstand) sind, die beim Betrieb eines Verkehrsmittels entstehen, desto geringer der Wirkungsgrad. Ebenso steigen mit dem Verhältnis vom Gesamtgewicht zur Nutzlast die spezifischen Emissionen pro Tonnenkilometer. Unter Berücksichtigung der Erzeugung und der Verteilung der Kraftstoffe entstehen beim Betrieb von Verkehrsmitteln folgende, durchschnittliche Well-to-Wheel-CO_2-Emissionen (WTW) (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015d, IFEU et al. 2010, PLANCO Consulting GmbH und Bundesanstalt für Gewässerkunde 2007, Schmied und Knörr 2013, S. 13 und Drewes 2011, S. 181):

- Lkw: 67,2 g/tkm
- Elektrisch betriebener Güterzug: 19,3 g/tkm
- Binnenschiff: 16,6 g/tkm
- Seeschiff: 12,8 g/tkm
- Flugzeug: 538,5 g/tkm

Derzeit weisen Seeschiffe die geringsten und das Flugzeug die höchsten CO_2-Emissionen pro Tonnenkilometer auf. Die Emissionen im Straßengüterverkehr liegen etwa drei- bis viermal so hoch wie bei elektrischen betriebenen Güterzügen. Deren

6 Die Vorketten zur Herstellung der Kraftstoffe werden im Allgemeinen der Energiewirtschaft zugeschrieben, so dass bei ganzheitlicher Betrachtung (WTW) der Anteil des Straßenverkehrs höher liegen würde.

Emissionen hängen vom Strommix ab und können mit vermehrtem Einsatz erneuerbarer Energieträger sinken. Die CO_2-Emissionen pro produzierter Kilowattstunde (kWh) Strom betrugen im Jahr 2014 etwa 569 g CO_2/kWh (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015d). Der Anteil der elektrischen Traktion an der gesamten Betriebsleistung im Schienengüterverkehr beträgt etwa 95 % (vgl. Knörr et al. 2012, S. 32), so dass die Emissionen von elektrischen Güterzügen zur Abschätzung der ökologischen Effekte in dieser Arbeit maßgeblich sind.

Alle genannten Werte beziehen sich auf die Well-to-Wheel-Emissionen. Diese berücksichtigen CO_2-Emissionen, die bei der Verbrennung von primären (z. B. Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran) und sekundären (z. B. Diesel) Energieträgern entstehen. Zusätzlich werden Emissionen, die bei der Förderung, Herstellung und Transport der Energieträger entstehen, bei dieser Betrachtung berücksichtigt.

Entstehung von Treibhausgasen

Die Tank-to-Wheel-Emissionen (TTW) entstehen durch die Verbrennung fossiler Energieträger (chemische Oxidation). Diese Verbrennung ist notwendig, um die chemisch gebundene Energie im Energieträger in mechanische Energie (Nutzarbeit) umzuwandeln. Die Höhe der Emission hängt neben der chemischen Zusammensetzung des Energieträgers vom Wirkungsgrad des Gesamtsystems ab.

Gleichung 5.14 stellt die Verbrennung eines kohlenstoffhaltigen Energieträgers unter idealen Bedingungen dar (vgl. Mollenhauer 2007, S. 463). Produkte dieser Oxidation sind H_2O und CO_2. Die emittierte Menge an CO_2 hängt vom Kohlenstoffgehalt im Brennstoff ab: Mit wachsendem atomaren Verhältnis von Kohlenstoff (C) zu Wasserstoff (H) steigen die spezifischen Emissionen pro eingesetzter Kilowattstunde Brennstoff.

$$C_nH_{2n+2} + \frac{3n+1}{2} O_2 \;\rightarrow\; n\,CO_2 \;+\; (n+1)\,H_2O + Wärme \qquad (5.14)$$

Tabelle 5-3 stellt die spezifischen Emissionen ausgewählter Energieträger gegenüber. Mit einer Reduktion der Anzahl Kohlenstoffatome im Brennstoff (Entkarbonisierung) (vgl. Förstner 2004, S. 104) sinken die spezifischen CO_2-Emissionen.

Tabelle 5-3: CO_2 – Emissionen ausgewählter Energieträger bei vollständiger Verbrennung (eigene Darstellung und Berechnung basierend auf Förstner 2004, S. 104, Robert Bosch GmbH 2004, S. 42 und Dittmeyer et al. 2005, S. 109)

Brennstoff	*chemische Formel Hauptbestandteil*	*Verhältnis H:C*	*spezifische CO_2 - Emissionen* [kg/kWh]
Steinkohle	$C_{24}H_{12}$	0,5:1	0,33
Diesel	$C_{16}H_{34}$	2,125:1	0,27
Benzin	C_8H_{18}	2,25:1	0,26
Erdgas	CH_4	4:1	0,2
Wasserstoff	H_2	∞	0

Die Werte in Tabelle 5-3 basieren auf der Annahme, dass jede eingesetzte Verbrennungskraftmaschine - unabhängig vom Energieträger - den gleichen Wirkungsgrad besitzt. Im realen Betrieb können Wirkungsgrade variieren. Der thermische, innere Wirkungsgrad des Dieselmotors fällt, bedingt durch eine stärkere Verdichtung des Brennstoffes, höher als beim Ottomotor mit Benzinbetrieb aus (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 384). Bei CNG-betriebenen Stadtbussen wurde ebenfalls ein geringerer Wirkungsgrad als bei vergleichbaren Dieselbussen festgestellt, der zu etwa 10 % höheren Treibhausgasemissionen führt (vgl. Faltenbacher 2006, S. 82).

Zukünftige Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen

Das Treibhausgas CO_2 wird freigesetzt, sobald kohlenstoffhaltige Energieträger oxidiert werden. Handlungsoptionen zur Senkung von CO_2-Emissionen ergeben sich dadurch einerseits durch eine Entkarbonisierung der Energieträger und andererseits durch eine Verbesserung der Wirkungsgrade der eingesetzten Verbrennungskraftmaschinen.

Für die Verkehrsträger lassen sich derzeit bis zum Ende des für diese Arbeit zugrundegelegten Betrachtungshorizonts im Jahr 2030 folgende Strategien zur Minderung der CO_2-Emissionen erkennen: Während der vermehrte Einsatz erneuerbarer Energien (Entkarbonisierung) bei der Erzeugung von Bahnstrom zukünftig die spezifischen Treibhausgasemissionen im Schienenverkehr reduzieren könnte, werden aller Voraussicht nach sowohl Lkw als auch Binnen-/Seeschiffe und dieselbetriebene Lokomotiven bis zum Betrachtungshorizont im Jahr 2030 durch die Verbrennung konventioneller Energieträger angetrieben. Die Senkung der spezifischen CO_2-Emissionen bei Lkw, Schiff und dieselbetriebenen Lokomotiven lässt sich technologisch durch eine Steigerung des Wirkungsgrades des Antriebes (Verbrennungskraftmaschine, Getriebe, Achsen) erreichen. Die deutlich längere Nutzungsdauer von Binnenschiffsmotoren und Lokomotiven im Vergleich zum Lkw (vgl. Knörr et al. 2012, S. 8) bremst allerdings die Diffusion von effizienteren Antrieben bei diesen Verkehrs-

trägern, so dass sich die spezifischen Emissionsfaktoren dieser Verkehrsträger bis zum Jahr 2030 nur marginal ändern werden. Im Straßengüterverkehr wurden in den letzten 30 Jahren Wirkungsgradverbesserungen realisiert. Die in Tabelle 5-4 dargestellte Entwicklung der spezifischen Emissionen pro Fahrzeugkilometer für unterschiedliche Gewichtsklassen weist Effizienzgewinne in den ersten zehn Jahren bis zum Jahr 1995 aus. Ab dem Jahr 1995 lässt sich kein Rückgang der spezifischen Emissionen feststellen. Begründet wird die Stagnation der Verbrauchsentwicklung mit der Verschärfung der EURO-Abgasnormen (vgl. Kapitel 5.2.2.2). Ein erneuter Anstieg des Kraftstoffverbrauchs durch Einführung der EURO-6-Abgasnorm hat sich bei jüngsten Fahrtests jedoch nicht bestätigt (vgl. Zeitzen 2014, S. 12).

Tabelle 5-4: Entwicklung der spezifischen CO_2 – Emissionen [g/km] 1985 bis 2014[7] (Tank-to-wheel (TTW))

Gewichtsklasse	*Bereich des zulässigen Gesamtgewichtes [t]*	*1985*	*1995*	*1997*	*2000*	*2006*	*2014*	*Änderung 1985 bis 1995*	*Änderung 1985 bis 2014*
		alle Werte in g CO_2 / Fzg.-km							
G1	[0;3,5]	365	259	246	257	279	289	-29%	-21%
G2	(3,5;7,5]	436	368	370	393	421	422	-15%	-3%
G3	(7,5;12]	528	518	486	513	480	496	-2%	-6%
G4	(12;18]	679	604	602	567	633	660	-11%	-3%
G5	(18;26]	873	705	654	667	663	678	-19%	-22%
G6	(26;32]	1.109	1.024	1.014	1.023	1.038	1.003	-8%	-10%
SZM	40	1076	875	888	901	916	910	-19%	-15%

Im Gegensatz zur Entkarbonisierung der Energieträger, ist das Reduktionspotential von CO_2-Emissionen durch Wirkungsgradverbesserungen aufgrund der Thermodynamik begrenzt (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 383, Warnatz et al. 2001, S. 43). Optimierte Antriebsstränge und automatisierte Getriebe können zusätzlich zu Effizienzsteigerung bei der Verbrennungskraftmaschine den Wirkungsgrad des Gesamtsystems führen. Eine weitere Reduktion des Verbrauchs kann durch aerodynamische Optimierung an Fahrzeug und Auflieger/Anhänger erreicht werden. Dazu hat die EU-Kommission die zulässigen Höchstlängen der Fahrzeuge angepasst, um das Anbringen aerodynamischer Elemente ohne Laderaumeinbußen zu ermöglichen (Richtlinie 2015/719/EC). Eine Reduktion über die genannten Maßnahmen hinaus kann die Elektrifizierung/Hybridisierung des Antriebstranges im Verteilerverkehr erzielen.

7 Eigene Berechnungen basierend auf jährlichen Mittelwerten (Realverbräuche auf festgelegtem Testzyklus) aus Lastauto Omnibus 1985, S.276 – 320; Lastauto Omnibus 1995, S. 235 bis 275; Lastauto Omnibus 2000, S.297-325; Lastauto Omnibus 2006, S.289-305; Lastauto Omnibus 2014, S.286-296.

Insgesamt sind durch Effizienzsteigerungen des Gesamtsystems im Straßengüterverkehr bis zum Jahr 2030 Verbrauchseinsparungen von 10 % bis maximal 20 % zu erwarten (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 501ff.; Lange et al. 2008, S. 11, Dünnebeil et al. 2015, S. 173 sowie Breuer und Kopp 2013, S. 77). Die Bestrebungen der EU-Kommission zur Regulierung des CO_2-Ausstoßes und die damit verbundene Messung von Realverbräuchen (vgl. Fontaras et al. 2014, S. 6) werden die Transparenz bezüglich des Kraftstoffverbrauchs zukünftig steigern. Dadurch kann der Handlungsdruck zur Umsetzung von Effizienzmaßnahmen auf die Hersteller vergrößert werden.

Fazit zu Treibhausgasemissionen

Der Ausstoß von Treibhausgasen verstärkt den Treibhauseffekt und trägt zur Klimaerwärmung bei. Eine Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen kann durch eine Entkarbonisierung der Energieträger und eine Verbesserung des Wirkungsgrades der Antriebseinheit erreicht werden. Während im Schienengüterverkehr vermehrt erneuerbare Energieträger bei der Erzeugung von Bahnstrom zum Einsatz kommen und damit die CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2030 auf etwa 530 g CO_2/kWh[8] sinken könnten, werden bei Lkw Wirkungsgradverbesserungen bei den Antrieben erwartet. Bei Schiffen und dieselbetrieben Lokomotiven ist bedingt durch lange Nutzungsdauern in den nächsten 15 Jahren lediglich eine Effizienzsteigerung von maximal 5 % bei Binnenschiffen und maximal 10 % im Schienengüterverkehr im Vergleich zum Basisjahr 2014 zu erwarten (vgl. Knörr et al. 2012, S. 59).

5.2.2.2 Luftschadstoffe

Der in Kapitel 3.1.1 beschriebene Verbrennungsprozess erfolgt unter realen Bedingungen nur unvollständig. Dies hat zur Folge, dass neben CO_2 auch andere Gase emittiert werden. Diese tragen nur zum Teil zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei, sondern zeichnen sich durch eine toxische Wirkung auf die Umwelt aus. Bei unvollständigen Verbrennungsprozessen können Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO_2), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) sowie Rußpartikel (PM) als Schadstoffe entstehen (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 409/410).

Die Luftschadstoffe unterscheiden sich in der Stärke und der Art der Umweltwirkung: Während sich SO_2 in Verbindung mit Wasser zu einer schwefeligen Säure mit starker Reizwirkung für Umwelt (saurer Regen) und Mensch löst (vgl. Esch und Dahlhaus

8 Die Abschätzung dieses Wertes basiert auf einer Analyse der Entwicklung der Emissionen in den letzten 20 Jahren (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015d) und projiziert diese in die Zukunft.

2013, S. 410), wird CO eine stark toxische Wirkung, die mit einer Blockade des Sauerstofftransportes im Blut verbunden ist, zugeschrieben (vgl. Bank 2000, S. 543). Feinstäube und Partikelemissionen (Ruß) betreffen den gesamten Atemapparat, mit besonderer Relevanz bei Lungengängigkeit. Die damit beförderten Schadstoffe können krebserregend sein. Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC) reizen die Atemwege und lösen ebenfalls Krebserkrankungen aus (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 410). Bei NO_x wurden neben Smog-, Ozon- und Säurebildung negative Wirkungen auf die Atemwege nachgewiesen (vgl. Förstner 2004, S. 132). Jüngst konnte zudem ein Zusammenhang zwischen der NO_x-Konzentration in der Luft und der Häufigkeit von Diabetes Typ-2-Erkrankungen nachgewiesen werden (vgl. Andersen et al. 2012, S. 97). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Luftschadstoffe auf Menschen toxisch wirken. Partikel- und HC-Emissionen können krebserregend sein.

Je nachdem, welcher Energieträger eingesetzt wird, unterscheidet sich die Menge der emittierten Luftschadstoffe. Der bei Lokomotiven, Binnenschiffen und Lkw eingesetzte Dieselmotor begünstigt die Entstehung von Rußpartikeln und NO_x (vgl. Bank 2000, S. 546). Dies führt dazu, dass etwa die Hälfte aller straßenverkehrsbedingter Rußpartikel- und Stickstoffoxid-Emissionen durch den Betrieb von Nutzfahrzeuge entsteht (vgl. Knörr et al. 2012, S. 41). Die Emissionen von Luftschadstoffen werden seit dem Jahr 1990 durch die sogenannten EURO-Abgasnormen reguliert. Die Einhaltung der in der EU-Verordnung (EG) Nr. 595/2009 festgelegten Grenzwerte gilt als Voraussetzung für die Typgenehmigung von Straßenfahrzeugen durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). Das Absenken der Grenzwerte führte bis heute zu einer Reduktion aller Luftschadstoffe (vgl. Statistisches Bundesamt 2013b, S. 452f.). Der Ausstoß von Luftschadstoffen bei Großfeuerungsanlagen zur Stromerzeugung wird durch die Bundesimmissionsschutz-Verordnung begrenzt (§ 4, 13. BImSchV). Die Typgenehmigung von Binnenschiffen wird nach Richtlinie 2004/26/EG der Europäischen Kommission geregelt. Für Seeschiffe existieren weltweit keine einheitlichen Standards der International Maritime Organization (IMO) zur Begrenzung der Luftschadstoffe. Die europäischen Behörden versuchen den Ausstoß von Luftschadstoffen allerdings durch regionale Lösungen (Emission Control Areas - ECA) zu reduzieren (vgl. Drewes 2011, S. 102).

Bei der Erzeugung von Bahnstrom fallen im Verkehrsträgervergleich die geringsten Emissionen an. Der Einsatz von regenerativen Energieträgern und die fehlenden Volumen- und Gewichtsbeschränkungen für die Abgasnachbehandlung im Vergleich zu Straßenfahrzeugen vergrößern zukünftige Emissions-Reduktionspotentiale. In Tabelle 5-5 werden die Emissionsfaktoren der Verkehrsträger vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 5-5: Emissionsfaktoren unterschiedlicher Verkehrsträger im Verhältnis zur eingesetzten Arbeit (eigene Berechnungen basierend auf Drewes 2011, S. 99, Memmler et al. 2013, S. 38, Knörr et al. 2013, S. 34 sowie dem Handbuch für Emissionsfaktoren 3.1 (Umweltbundesamt (UBA) 2010))

Verkehrsträger	*CO*	*HC*	*NO_x*	*PM*
		alle Werte in g/kWh		
schwere Nutzfahrzeuge (zulässiges Gesamtgewicht > 3,5t)	0,2	0,02	0,6	0,01
Schienenverkehr (Elektro-Traktion)	0 bis 0,6	0 bis 0,01	0 bis 0,7	0 bis 0,03
Schienenverkehr (Diesel-Traktion)	0,0	0,00	0,0	0,00
Binnenschiff (Tragfähigkeit >3.000t)	1,9	0,50	10,4	0,28

Entstehung der Luftschadstoffe

Unabhängig vom Verkehrsträger gilt, dass Luftschadstoffe durch unvollständige Verbrennung oder Verunreinigung der Energieträger entstehen. Durch Verbesserung der Kraftstoffqualität konnten diesbezüglich Fortschritte erzielt werden. So wurde beispielsweise durch Reduktion des Schwefelgehaltes im Dieselkraftstoff die Oxidation von Schwefel (S) zu Schwefeldioxid (SO_2) nahezu eliminiert (vgl. Bank 2000, S. 478 und Förstner 2004, S. 134).

Schadstoffe, die durch unvollständige Verbrennung entstehen, spielen jedoch weiterhin eine wichtige Rolle für Emissionsvermeidungsstrategien. Neben Ruß, HC und CO betrifft dies auch die Stickoxide. Bei Verbrennungsvorgängen beinhalten diese die Summe aus NO und NO_2, wobei auf NO ein deutlich größerer Anteil entfällt (vgl. Bank 2000, S. 479). NO_x kann einerseits durch Oxidation des in der Luft enthaltenen Stickstoffes und andererseits durch Reaktion mit dem im Brennstoff organisch gebundenen Stickstoff auftreten. Verstärkt wird die Entstehung von NO_x durch Luftüberschuss beim Verbrennungsprozess (promptes NO_x) sowie durch einen hohen Stickstoffgehalt im Brennstoff (Brennstoff-NO_x). Zudem wirkt sich auch die Betriebsweise der Verbrennungskraftmaschine auf den NO_x-Ausstoß aus (vgl. Förstner 2004, S. 133).

Bei der unvollständigen Verbrennung unter Luftmangel entstehen Rußpartikel (PM). Das dadurch entstehende Acetylen (Kohlenwasserstoffverbindung) bestimmt die Bildung der 20 nm bis 30 nm großen Primär-Rußteilchen (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 408f.). Lokaler Luftmangel begünstigt zusätzlich die Bildung von Kohlenmonoxid (CO). Da Diesel-Motoren mit Luftüberschuss arbeiten, sind die CO-Emissionen im Vergleich zum Benzin-Motor deutlich geringer (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 407). Neben CO und NO_x stellen unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) weitere

unerwünschte Nebenprodukte der Verbrennung dar. Die Kohlenwasserstoffe entstehen durch unvollständige Verbrennung des Brennstoffes und der daraus folgenden Bildung von unverbrannten oder teilverbrannten Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen (vgl. Warnatz et al. 2001, S. 281).

Anders als bei der Emission von CO_2 tritt bei der Erhöhung des stöchiometrischen Verhältnisses zwischen Wasserstoff und Kohlenstoff (vgl. Tabelle 5-3) nicht automatisch eine Verringerung aller Luftschadstoffe ein. Im Gegensatz zu einer Verringerung der NO_x- und CO-Emissionen sowie der Anzahl der Rußpartikel kann der Ausstoß von HC im Vergleich zum Einsatz von Dieselkraftstoff bei Verwendung von Erdgas als Brennstoff bis zu 180 % höher liegen (vgl. Faltenbacher 2006, S. 42).

Zukünftige Entwicklung der spezifischen Luftschadstoffemissionen

Während bei der Erzeugung des Bahnstroms mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien die spezifischen Emissionen der Luftschadstoffe sinken, lassen sich die durch Verbrennungsvorgänge entstehenden Luftschadstoffe nur durch Abgasnachbehandlung oder katalytische Reduktion vermindern. Für die in Lkw eingesetzten Dieselmotoren wurden für Luftschadstoffe Anfang der 1990er Jahre verbindliche Obergrenzen gesetzlich festgelegt. In den in Tabelle 5-6 zusammenfassend dargestellten EURO-Abgasnormen wurden die spezifischen Obergrenzen pro Kilowattstunde (kWh) eingesetzter Arbeit je nach Luftschadstoff seit dem Jahr 1993 um 69 % bis 98 % gesenkt (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2014). Bei der Messung von NO_x-Emissionen von Diesel-Pkw zeigte sich allerdings kürzlich, dass die gesetzlichen Schadstoffgrenzwerte im Realbetrieb um ein vielfaches überschritten werden (vgl. Franco et al. 2014, S. 37). Ob dies auch bei Nutzfahrzeugen der Fall ist, wurde bislang noch nicht untersucht.

Bis zur Einführung der EURO-Abgasnorm 3 wurde die Emissionsreduktion durch Optimierung des Verbrennungsprozesses realisiert (vgl. Robert Bosch GmbH 2004, S. 334). Bei der Optimierung des Motors steht die Identifikation des emissionsminimalen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses im Mittelpunkt. Wie in Abbildung 5-23 dargestellt, entsteht bei der Reduktion von Rußpartikel (PM), NO_x, HC und CO ein Zielkonflikt: Während eine Erhöhung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses die Rußemissionen senkt, erhöht sich gleichzeitig die Entstehung von Stickoxid. Es existiert dementsprechend kein Luft-Kraftstoff-Verhältnis, welches den Ausstoß aller Luftschadstoffe minimiert. Das aus Systemsicht optimale Luftverhältnis liegt bei einem Massenverhältnis aus Luft und Brennstoff von $\lambda = 3$ (vgl. Mollenhauer 2007, S. 490). Eine weitere Absenkung der spezifischen Emissionen kann nur durch eine nachgelagerte Abgasbehandlung erreicht

werden. Daher wurden mit zunehmender Verschärfung der Grenzwerte ab EURO 3 nachmotorische Emissionsminderungsmaßnahmen notwendig, um die verbleibenden Emissionen (besonders NO_x und Rußpartikel) weiter zu reduzieren.

Tabelle 5-6: Schadstoffgrenzwerte der EURO-Abgasnormen (eigene Darstellung basierend auf Umweltbundesamt (UBA) 2014)

Schadstoff	*vor Euro I* ab 01.10.1990	*Euro I* ab 01.10.1993	*Euro II* ab 01.10.1996	*Euro III* ab 01.10.2001	*Euro IV* ab 01.10.2006	*Euro V* ab 01.10.2009	*Euro VI* ab 31.12.2013	*Veränderung Euro I / Euro VI*
	alle Werte in g/kWh							
CO	11,2	4,9	4	2,1	1,5	1,5	1,5	-69%
HC	2,4	1,23	1,1	0,66	0,46	0,46	0,13	-89%
NO_x	14,4	9	7	5	3,5	2	0,4	-96%
Partikelmasse (PM)	-	0,4	0,15	0,1	0,02	0,02	0,01	-98%

Für die Reduzierung von NO_x bedeutet dies die Umsetzung folgender Maßnahmen: Die Abgasrückführung (AGR) in den Verbrennungsraum zur innermotorischen Reduktion der Stickoxide (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 427) und die nachgelagerte selektive katalytische Reduktion (SCR) mit Hilfe von Harnstoff $(NH_2)_2CO$ (Markenname AdBlue). Der Harnstoff leitet eine Reihe von chemischen Reaktionen ein, nach deren Ende Stickstoff (N_2) und Wasser (H_2O) emittiert wird (vgl. Robert Bosch GmbH 2004, S. 338f.). Mittlerweile hat sich die SCR-Technologie auf Grund des damit einhergehenden niedrigeren Kraftstoffverbrauchs weitestgehend durchgesetzt (vgl. Heuke und Marx 2006, S. 13).

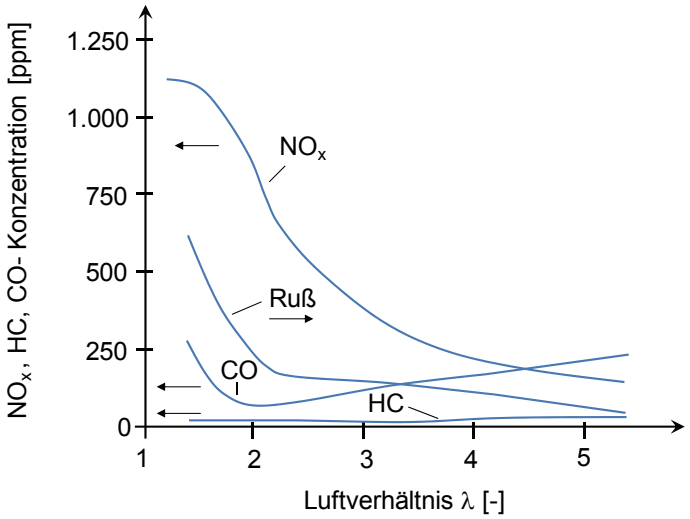


Abbildung 5-23: Schadstoffkonzentration im Abgas eines Dieselmotors bei Variation des Luftverhältnisses(eigene Darstellung basierend auf Mollenhauer 2007, S. 490)

Zur Reduktion der Rußpartikel hat sich der Rußpartikelfilter etabliert, dessen Filterwirksamkeit derzeit über 95 % liegt (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 434). Die Filter unterliegen einer mechanischen Porenverstopfung, so dass der Wirkungsgrad mit steigender Porenverstopfung abnimmt. Die Folge sind regelmäßig notwendige Regenerationsphasen, die bei Temperaturen von 600°C bis 700°C stattfinden und eine hohe Motordrehzahl erfordern und mit Kraftstoffmehrverbrauch verbunden sind (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 434).

Eine weitere Reduktion über die Grenzwerte von EURO 6 hinaus wird derzeit diskutiert (vgl. Bretzke und Barkawi 2012, S. 128). Die Erfahrungen aus den vergangenen EURO-Grenzwerten lehren, dass sämtliche außermotorische Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen, wie Abgasrückführung, katalytische Reduktion oder Filtersysteme zum Betrieb Energie benötigen und somit den Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems senken. Wirkungsgradverbesserungen bei Motoren können durch neue Emissionsminderungsmaßnahmen reduziert werden. Dies erklärt die anfängliche Stagnation und den darauf folgenden leichten Anstieg des Verbrauchs seit Einführung der EURO-Abgasnorm 3 (vgl. Tabelle 5-3). Dieser Trend scheint mit der Einführung der EURO-Abgasnorm 6 gestoppt. Testergebnisse zeigen einen leichten Rückgang der Kraftstoffverbrauchswerte von Sattelzügen unter Volllast um etwa 4 % von EURO 6 gegenüber EURO 5. Gleichzeitig konnte auch der Verbrauch des additiven Harnstoffs (AdBlue) im Mittel um 30 % gesenkt werden (vgl. Zeitzen 2014, S. 12).

Fazit zu Luftschadstoffen

Mit Blick in die Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass sich die spezifischen Luftschadstoffemissionen des elektrifizierten Schienengüterverkehrs mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien deutlich absenken werden. Bei konventionellen Verbrennungsmotoren scheint derzeit das maximale Reduktionspotential durch die physikalischen Rahmenbedingungen begrenzt, so dass sich die spezifischen Emissionsfaktoren von Binnenschiffen, dieselbetriebenen Lokomotiven und Lkw bis zum Jahr 2030 nur marginal ändern werden. Eine weitere, absolute Reduktion der Luftschadstoffemissionen kann jedoch durch eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs (vgl. Kapitel 4.1.1) und der damit verbundenen Verringerung der eingesetzten, mechanischen Arbeit (kWh) erreicht werden.

5.2.2.3 Geräuschemissionen

Verkehrsbedingte Geräuschemissionen steigen mit dem Wachstum des physischen Transports. Die damit verbundenen Konfliktsituationen nehmen besonders in unmittelbarer Nähe von Wohnbebauungen zu (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 1). Der Begriff

„Verkehrslärm“ (Puls 2007,S. 1), der bereits eine negative Wertung enthält, hat sich im allgemeinen Sprachgebrauch durchgesetzt.

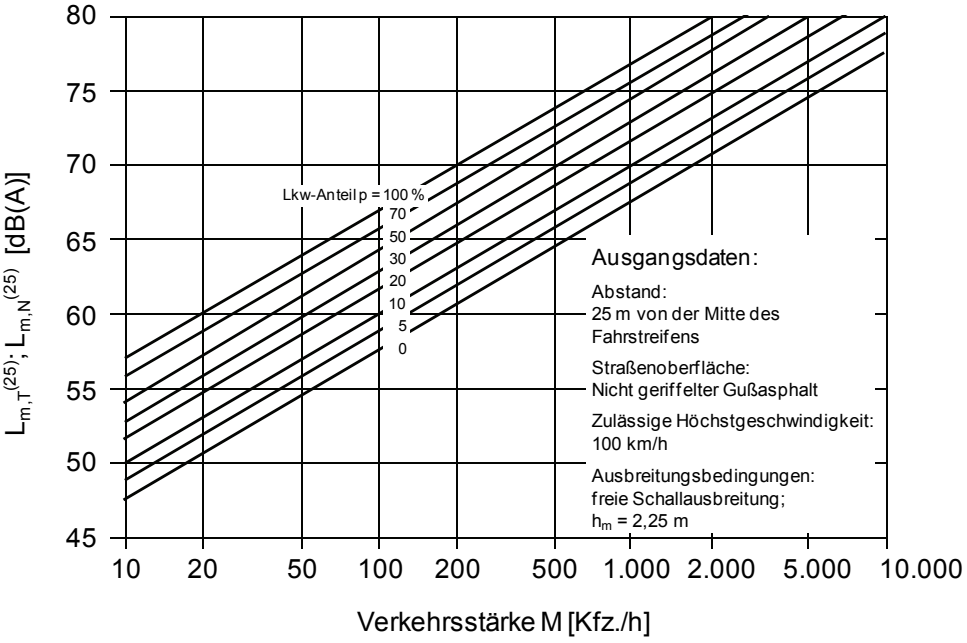
Die Auswirkungen von Geräuschemissionen auf den menschlichen Organismus lassen sich in zwei unterschiedliche Kategorien unterteilen (vgl. Puls 2007, S. 18): Aurale und extra-aurale Effekte. Aurale Effekte betreffen direkt das Hörorgan (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 126). Durch kurzfristige, plötzlich auftretende, hohe Schalldruckpegel in einer Höhe von etwa 100 bis 120 dB(A) können akute Gehörschäden durch das Absterben der Innenohr-Haarzellen entstehen (vgl. Maue et al. 2009, S. 97). Sowohl die kurze Dauer als auch die Stärke der Pegel sind nicht im (Straßen-) Verkehr zu finden, sondern meist in der industriellen Produktion, bei Musikveranstaltungen oder Explosionen. Die extra-auralen Effekte rufen Störungen des physischen und psychischen Wohlbefindens hervor, die in der Folge zu Schlaf- und Kommunikationsstörungen sowie Leistungsminderungen führen können (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 133ff.). Im Gegensatz zu auralen Effekten liegt die Ursache für extra-aurale Effekte in Schalldruckpegeln, die dauerhaft über 70 dB(A) (tags) bzw. 60 dB(A) (nachts) liegen (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 262). Die Folgen dieser erhöhten Schalldruckpegel machen sich häufig durch eine belästigende Wirkung bemerkbar (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 156). Im Gegensatz zu den auralen Wirkungen, die sich auf bestimmte Berufs- und Altersgruppen beschränken, betreffen die extra-auralen Wirkungen die breite Bevölkerung.

Nach § 3, Abs. 2 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) sind bei den Wirkungen von Immissionen neben Menschen auch Tiere zu berücksichtigen. Ein dauerhaft erhöhter Schalldruckpegel kann die Kommunikation zwischen Tieren stören und zu Beeinträchtigungen bei der Fortpflanzung und der Aufzucht von Nachwuchs führen (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2016). Dies führt unter Umständen zu einem Aussterben von bedrohten Tierarten und reduziert damit die Biodiversität.

Die für den Menschen wahrnehmbaren Schalldruckpegel (gemessen in Dezibel (A)) variieren zwischen der Hörschwelle von 0 dB(A) und der Schmerzschwelle bei 120 dB(A) (vgl. Maue et al. 2009, S. 61). Die Beurteilung unterschiedlicher Schalldruckpegel zwischen diesen Grenzwerten hängt stark von der Tageszeit und der damit verbundenen Tätigkeit der Menschen ab. So kann nachts beispielsweise schon ein dauerhafter Schalldruckpegel von über 38 dB(A) zur Schlafbeeinflussung führen. Ab etwa 55 dB(A) beginnt tagsüber eine Beeinflussung der Leistung und Emotion bis hin zur Verärgerung. Diese Schwelle wird als Zumutbarkeitsgrenze bezeichnet (vgl. Förstner 2004, S. 160). Über diesem Wert kommt es zu ersten extra-auralen Wirkungen und ab einem dauerhaft erhöhten Lärmdruckpegel von 85 dB(A) zur Lärmschwerhörigkeit (vgl. Förstner 2004, S. 160).

Der durch den Straßenverkehr dominierte Verkehrslärm stellt heute im Wohnumfeld die bedeutendste Lärmquelle dar (vgl. Förstner 2004, S. 161). Die Geräuschbelastung durch den Schienenverkehr fällt zwar geringer aus, dennoch kann es besonders entlang stark befahrener Trassen zu erheblichen Lärmbelastungen kommen (vgl. Förstner 2004, S. 161). Bei den Geräuschemissionen der Binnenschifffahrt spielt der gewerbliche Verkehr kaum eine Rolle. Erhöhte Lärmdruckpegel entstehen dort hauptsächlich durch den Betrieb von für Freizeitaktivitäten genutzten Sportbooten (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 414). Neben den Geräuschemissionen, die durch den Betrieb der Transportgefäße (Lkw, Güterzug, Binnenschiff) entstehen, fällt auch ein nicht unerheblicher Teil der Geräuschemissionen bei den Be-, Um- und Entladevorgängen in der Transportkette an (vgl. Knothe 1995, S. 19).

Zur Beurteilung einer Lärmquelle schlägt die Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV) die Berechnung eines Beurteilungspegels vor. Dieser lässt sich sowohl für den Straßenverkehr als auch für den Schienenverkehr bestimmen. Für den Straßenverkehr wird aus der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) abhängig von der Straßenkategorie und der Tageszeit die maßgebende Verkehrsstärke (M) berechnet (vgl. Abbildung 5-24). Abhängig vom straßenkategoriespezifischen Lkw-Anteil lässt sich der Mittelungspegel ableiten. Unabhängig von der Verkehrsstärke steigen die Mittelungspegel mit wachsendem Lkw-Anteil: Wird beispielsweise der Lkw-Anteil von 0 % auf 5 % erhöht, so steigt der Mittelungspegel um etwa 2 dB(A). Durch die Multiplikation mit Korrekturfaktoren, die unterschiedliche Beschaffenheit des Straßenoberbaus und topografische Begebenheiten berücksichtigen, lässt sich der Beurteilungspegel, der die Stärke der Umweltwirkung beeinflusst, berechnen (16. BImSchV Anlage 1).



Straßenkategorien		*tags (6 bis 22 Uhr)*		*nachts (22 bis 6 Uhr)*	
		Maßgebende Verkehrsstärke M	*Lkw-Anteil*	*Maßgebende Verkehrsstärke M*	*Lkw-Anteil*
		[Kfz/h]	*[%]*	*[Kfz/h]*	*[%]*
1	Bundesautobahnen	0,06 DTV	25	0,014 DTV	45
2	Bundesstraßen	0,06 DTV	20	0,011 DTV	20
3	Landes-, Kreisstraßen, Gemeindeverbindungsstraßen	0,06 DTV	20	0,008 DTV	10
4	Gemeindestraßen	0,06 DTV	10	0,011 DTV	3

Legende:
M: Verkehrsstärke L_m(25): Mittelungspegel 25 m von der Mitte des Fahrstreifens
T: Tag N: Nacht

Abbildung 5-24: Abhängigkeit zwischen Mittelungspegel und durchschnittlicher täglicher Verkehrsstärke (DTV) bei unterschiedlichen Lkw-Anteilen (16. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV), Anlage 1)

Die Bestimmung des Beurteilungspegels für den Schienenverkehr gestaltet sich deutlich komplizierter, da die Berechnung von einer Vielzahl bahnbetrieblicher Größen (z. B. Beschaffenheit von Brücken und Oberbau), die zu Pegelkorrekturen führen, abhängt und sich daher nur für konkrete Strecken berechnen lässt (16. BImSchV, Anlage 2).

Entstehung von Geräuschemissionen

Um Schalldruckpegel miteinander vergleichen und bewerten zu können, sind Kenntnisse bezüglich der physikalischen Grundlagen über die Entstehung von Geräuschemissionen notwendig. Neben der Frequenz (gemessen in Hertz) des erzeugten Schalls, welche die Tonhöhe bestimmt, bildet die Lautstärke das entscheidende Charakteristikum der Geräuschemission. Gemessen wird die Lautstärke als Schalldruckpegel zum Zeitpunkt t in der Einheit Dezibel (dB). Gleichung 5.15 (Maue et al. 2009, S. 59) stellt die Abhängigkeit zwischen gemessenen Schalldruck p und Schalldruckpegel $L_p(t)$ dar:

$$L_p(t) = 10 \cdot \lg\left(\frac{p^2(t)}{p_0^2}\right) \qquad (5.15)$$

mit

p:	*gemessener Schalldruck zum Zeitpunkt t*
p_0*:*	*Hörschwelle (2 * 10^{-5} Pa)*

Durch die Logarithmierung des Quotienten der Schalldruckwerte in Gleichung 5.15 wird eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 10 dB(A) unabhängig vom Pegelbereich etwa als eine Verdopplung der Lautstärke wahrgenommen (vgl. Maue et al. 2009, S. 62). Die logarithmische Addition führt dazu, dass zwei Schalldruckpegel mit gleicher Stärke zu einer Erhöhung des gesamten Schalldruckpegels um etwa 3 dB(A) führen. Beträgt die Differenz zwischen den zwei Schalldruckpegeln 10 dB(A), ist der Einfluss der leiseren Schallquelle zu vernachlässigen (vgl. Maue et al. 2009, S. 69-71).

Die Geräuschemission im Straßengüterverkehr, messbar durch den maximalen absoluten Schalldruckpegel L_{max}, setzt sich aus den Roll- und Motorengeräuschen zusammen. Größere Auflageflächen und eine höhere Anzahl von Reifen sowie die deutlich höhere Nennleistung der Motoren führen zu einem absolut höheren Schalldruckpegel verglichen mit den Pkw. Bei Fahrten unter etwa 58 km/h dominiert beim Lkw das Motorengeräusch (vgl. Rosenheck et al. 1997, S. 28). Übersteigt die Fahrgeschwindigkeit diesen Wert, ist für die Bestimmung des Schalldruckpegels das Rollgeräusch maßgeblich. Der Schnittpunkt zwischen Roll- und Motorgeräusch bei 58 km/h führt bei Lkw zu folgender Abgrenzung: Im Stadtverkehr dominiert das Motorengeräusch, auf Überland- und Autobahnfahrten besteht die Geräuschemission maßgeblich aus Rollgeräuschen (vgl. Rosenheck et al. 1997, S. 28). Im Mittel liegt der maximale Schalldruckpegel eines Lkw um etwa 10 dB (A) höher als bei Pkw (vgl. Rosenheck et al. 1997, S. 28), so dass der Lkw als doppelt so laut wahrgenommen wird. Die Diffe-

renz zwischen Lkw und Pkw ist jedoch geschwindigkeitsabhängig. Während bei Fahrgeschwindigkeiten von etwa 20 km/h die Geräuschemissionen eines Sattelzuges (zulässiges Gesamtgewicht von 40 Tonnen) etwa 39,8 Pkw-Äquivalenten entspricht, sinkt dieser Faktor bei 50 km/h auf 13,8 Pkw-Äquivalente (vgl. Bickel 2005, S. 130).

Die Geräuschemissionen im Schienengüterverkehr entstehen hauptsächlich durch das Bremsen von Güterwagen (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 218). Somit entsteht bei der Vorbeifahrt eines Güterzuges (v_{max} = 80 km/h) ein Schalldruckpegel L_{max} von etwa 74 dB(A) bis 81 dB(A) (vgl. Förstner 2004, S. 161 und Leibniz Universität Hannover 2011).

Die durch den Güterverkehr verursachten Geräuschemissionen beschränken sich nicht nur auf den Betrieb der Transportgefäße, sondern sie entstehen auch bei den Be- und Entladevorgängen. Es handelt sich hierbei neben Geräuschen, die durch den Betrieb des Gabelstaplers oder anderer Hilfsmittel zur Be- und Entladung entstehen, um die Bewegungen der Ladung auf dem Fahrzeug und die Bewegung der Bordwand oder ähnlichen beweglichen Teilen am Fahrzeug. Tabelle 5-7 zeigt, mit welchen Schalldruckpegeln diese Vorgänge zu bewerten sind.

Tabelle 5-7: Schalldruckpegel L_{max} unterschiedlicher Aktivitäten im Straßengüterverkehr im Vergleich (eigene Berechnungen basierend auf Rosenheck et al. 1997, S. 28, Knothe 1995, S. 26, Poulikakos et al. 2008, S. 279 und Poulikakos et al. 2010, S. 347)

Gewichtsklasse	*Palettenhubwagen über Überladebrücke*	*Palettenhubwagen über fahrzeugeigene Ladebordwand*	*Rollcontainer über Überladebrücke*	*Rollcontainer über fahrzeugeigene Ladebordwand*	*Kleinstabler über Überladebrücke*	*Rollgeräusche, Wagenboden*	*Fahrgeräusch bei 30 km/h*	*Fahrgeräusch bei 50 km/h*	*Fahrgeräusch bei 80 km/h*
	alle Werte in dB(A)								
G1							65	72	77
G2							72	77	82
G3									
G4	83	88	64	78	73	75	78	82	87
G5									
G6							79	83	88
SZM							79	83	88

Zukünftige Entwicklung der spezifischen Geräuschemissionen

Maßnahmen zur Reduktion straßengüterverkehrsbedingter Geräuschemissionen können an der Quelle oder bei der Ausbreitung ansetzen: Einerseits können fahrzeugseitige Maßnahmen die Emissionsquellen mindern, andererseits kann die Umwelt durch Lärmschutzmaßnahmen vor den Geräuschemissionen geschützt werden. Dazu

zählen beispielsweise Straßenrandbebauung, Lärmschutzwände und andere städtebauliche Maßnahmen.

Verbesserungen in der Motorakustik lassen sich nach Kloepfer et al. (2006, S. 199) durch eine Verkapselung (Anbringung von Akustikabdeckungen) des Motorraums sowie durch verbesserte Ansaug- und Abgasschalldämpfer erreichen. Allgemeine akustische Verbesserungen durch einen optimierten Betrieb sind bei Getriebe- und Antriebsstrang möglich. Im Gegensatz zu den akustischen Optimierungen, die nur zu einer Reduktion von wenigen dB(A) führen, liegen die Potentiale einer Kapselung zwischen 10 und 13 dB(A). Durch Motorkapselung steigt allerdings das Fahrzeugewicht (vgl. Mollenhauer 2007, S. 551). Aus Gewichtsgründen und wegen den begrenzten Platzverhältnissen im Motorraum wurden bisher hauptsächlich Teilkapselungen mit Potentialen um etwa 2 dB(A) durchgeführt (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 201). Die effektivste Maßnahme zur Senkung der Geräuschemissionen stellt die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstranges bis hin zum völligen Ersatz der Verbrennungskraftmaschine dar. Weitere Maßnahmen stellen Geschwindigkeitsbegrenzungen oder die Verringerung der Motorleistungen dar.

Im Schienengüterverkehr steht die Umrüstung der Bremsen im Fokus zukünftiger Maßnahmen zur Geräuschemissionsminderung. Durch den Einsatz neuer Technologien bei der Produktion von Bremsklötzen lässt sich mittelfristig bis zum Jahr 2030 eine Pegelminderung von etwa 15 dB(A) erreichen (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 51). Um diese Reduktion zu erreichen, ist es allerdings notwendig, den gesamten Zug umzurüsten.

Neben den motorseitigen Maßnahmen bieten sich auch eine Reihe von Maßnahmen zur Reduzierung der Abrollgeräusche an der Schnittstelle zwischen Fahrbahnoberfläche und Reifen an. Die EU-Reifengeräuschrichtlinie (2001/43/EG) kann bei geeigneter Anpassung der Grenzwerte die fahrzeugseitige Reduktion vorantreiben. Neue Reifentechnologien sind laut Kloepfer et al. (2006, S. 202) in der Lage, die Geräuschemissionen um etwa 3 dB(A) zu reduzieren. Offenporige Deckschichten, auch bekannt als „Flüsterasphalt“, und andere akustische Optimierungen an den Fahrbahnoberflächen können die Geräuschemissionen um etwa weitere 6 bis 10 dB(A) reduzieren. Deren geräuschreduzierende Wirkung lässt allerdings über die Jahre um ca. 0,5 dB(A) pro Jahr nach (vgl. Kloepfer et al. 2006, S. 204).

Im Gegensatz zu den fahrzeugseitigen Lärmquellen kann die Reduzierung der Be- und Entladegeräusche eine größere Herausforderung darstellen: Akustische Optimierung der Ladeflächen und Entladehilfsmittel (Gabelstapler, Hubwagen) sind nur begrenzt möglich und abhängig vom Zustand der Hilfsmittel und der Bodenbeschaffenheit (vgl.

Lenkewitz und Müller 2005, S. 17). Beides wird sich in der Zukunft nicht grundlegend verändern, so dass mittelfristig die in Tabelle 5-7 genannten Werte Bestand haben werden.

Fazit zu Geräuschemissionen

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass Lärm bei hohen Schalldruckpegeln und längerer Einwirkzeit dauerhaft zu Erkrankungen bei Menschen und zu einer geringeren Biodiversität bei Tieren führen kann. Neben dem reinen Betrieb der Transportgefäße entstehen bei Be-, Um- und Entladevorgängen Geräuschemissionen. Die Reduktion von güterverkehrsbedingten Geräuschemissionen ist an natürliche und physikalische Grenzen gebunden. Da die Wirkung der Geräuschemission immer von Stärke und Dauer abhängt, muss neben einer Reduktion der Schalldruckpegel ebenso die Einwirkzeit der Geräuschemissionen reduziert werden.

5.2.2.4 Abnutzung der Infrastruktur

Die für den Transport von Gütern relevante Verkehrsinfrastruktur setzt sich in Deutschland aus dem Straßen- und dem Schienennetz und den Binnenwasserstraßen zusammen. Sowohl der Neubau als auch die Instandhaltung von Verkehrsinfrastrukturen verbraucht Ressourcen. Werden Kapazitäten bestehender Infrastrukturen erweitert, so steigen der Flächenverbrauch und der Anteil der versiegelten Oberfläche. Da der Flächen- und Ressourcenverbrauch für den Bau und die Instandhaltung von Infrastrukturen für die Binnenschifffahrt und den Schienengüterverkehr, verglichen mit dem Straßennetz, absolut gering ausfallen (vgl. Statistisches Bundesamt 2013a, S. 24), und für die Abnutzung und Dimensionierung der Schieneninfrastruktur der Personenverkehr maßgeblich ist (vgl. Naumann und Oßenbrügge 2010, S. 138f. sowie Deutsche Bahn AG 2014, S. 58ff.), werden in diesem Unterkapitel nur die Wirkungen des Baus und der Instandhaltung der Straßeninfrastruktur betrachtet.

In der Bundesrepublik Deutschland existiert derzeit ein Straßennetz mit einer Länge von 230.514 Kilometern. Die Streckenlänge verteilt sich zu etwa 6 % auf Bundesautobahnen, 17 % auf Bundesstraßen, 37 % auf Landstraßen sowie 40 % auf Kreisstraßen (vgl. Statistisches Bundesamt 2013b, S. 16). Die Entwicklung der Straßenlängen stagnierte in den letzten 20 Jahren. Die Gesamtausgaben für die Straßeninfrastruktur werden daher durch die Instandhaltung des bestehenden Streckennetzes dominiert. Derzeit existieren auf den deutschen Bundesautobahnen etwa 300 Baustellen, mit einer Instandhaltungsquote von über 50 % (vgl. BAST 2014). Der Ressourcenverbrauch und die Kosten für Bund und Länder werden durch die Instandhaltungsmaßnahmen verursacht. Sowohl die Intensität und die Intervalllänge der

Instandhaltungsmaßnahmen als auch die Dimensionierung bei Neubauten sind von der täglichen Belastung der Infrastruktur abhängig.

Die Straßeninfrastruktur wird sowohl von Pkw als auch von Lkw benutzt. Im Vergleich zum deutschen Pkw-Bestand mit 44 Millionen Fahrzeugen fällt der Bestand an Nutzfahrzeugen mit etwa 2,7 Millionen Fahrzeugen gering aus (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2015b). Die geringere Flottenstärke wird einerseits durch eine bis zu zehnfach höhere jährliche Fahrleistung der Nutzfahrzeuge (vgl. Radke 2014, S. 153) und durch ein maximal 15-fach größeres zulässiges Gesamtgewicht überkompensiert (vgl. Kummer 2006, S. 166ff.). Auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen ist der Straßengüterverkehr Hauptverursacher von Straßenschäden und den damit verbundenen Ressourcen- und Flächenverbrauch durch Neubau und Instandhaltung (vgl. Wolf 2010, S. 67ff.).

Entstehung von Straßenschäden

Ursächlich verantwortlich für die Belastung des Straßenoberbaus und der daraus resultierenden Schädigung der Fahrbahn sind, neben Witterungsverhältnissen, die Achslast der Fahrzeuge sowie die Anzahl der Lastwiederholungen (vgl. Balduzzi 1962, S. 17). Die Grundsteine für die quantitative Erfassung der Zusammenhänge zwischen Achslast und Schädigungspotential wurden Ende der 1950er Jahre mit dem AASHO-Straßentest der American Assosiation of State Higway and Transportation Officials (AASHTO) in den USA gelegt (vgl. Balduzzi 1962). Ziel des Tests war die Bestimmung der Bemessungsgrundlage für Straßenneubauprojekte. Mittlerweile hat sich die Methode allerdings auch zur Messung von Schädigungspotentialen unterschiedlicher Fahrzeuggrößen etabliert (vgl. Wolf 2010, S. 31). Der AASHO-Straßentest liefert als Ergebnis den Zusammenhang zwischen Achslast und Schädigungspotential: Bei einer Verdopplung der Achslast verachtfacht sich das Schädigungspotential des Fahrzeuges (vgl. Balduzzi 1962, S. 65). Die daraus abgeleitete „Vierte-Potenz-Regel“ ist in Gleichung 5.16 (vgl. Glaeser et al. 2006, S. 15) dargestellt. Das Schädigungspotential des Straßenoberbaus ergibt sich aus der Summe der einzelnen Achslasten zur vierten Potenz.

$$\vartheta Lkw = \sum_{i=1}^{a} \left(Al_{Lkw,i}\right)^4 \qquad (5.16)$$

mit

ϑLkw:	*Schädigungspotential des Straßenoberbaus,*
$Al_{Lkw,i}$:	*Achslast der i-ten Achse des Lkw,*
a:	*Anzahl der Lkw-Achsen*

Verglichen mit dem Pkw-Verkehr ist der Straßengüterverkehr maßgeblich für die Abnutzung der Straßeninfrastruktur verantwortlich. Entscheidend für die Gesamtbelastung ist aber nicht nur das zulässige Gesamtgewicht des Fahrzeuges, sondern, wie dieses auf die Anzahl der Achsen verteilt ist. Tabelle 5-8 stellt die unterschiedlichen Gewichtsklassen und deren Schädigungspotentiale gegenüber. Es wurden die für die Gewichtsklassen üblichen Achskonfigurationen verwendet.

Tabelle 5-8: Maximales Schädigungspotential unterschiedlicher Gewichtsklassen(eigene Berechnungen basierend auf Glaeser et al. 2006, S. 23ff)[9]

Gewichts-klasse	*Anzahl Achsen*	*max. zulässiges Gesamtgewicht* *[t]*	*max. Schädigungspotential unter Vollast* *[äqu. 10 t]*
G1	2	3,5	0,002
G2	2	7,5	0,041
G3	2	12	0,312
G4	2	18	1,410
G5	3	26	2,306
G6	4	32	2,259
SZM	5	40	2,463

Zukünftige Entwicklung des spezifischen Schädigungspotentials

Aus den vorangehenden Ausführungen leiten sich zwei Strategien zur Reduktion des spezifischen Schädigungspotentials und des daraus folgenden Instandhaltungsaufwands ab: Zum einen eine gleichmäßigere Verteilung der Lasten auf alle Achsen und zum anderen eine Erhöhung der Anzahl der Achsen. Durch eine Nivellierung des Gewichtes über alle Achsen lässt sich laut Gleichung 5.16 das Schädigungspotential senken. Der Vergleich eines fünf-achsigen Sattelzuges mit einer Verteilung der Achslast von 7,4 t, 10,7 t, 7,3 t, 7,3 t, 7,3 t und einen Schädigungspotential von 2,46 äqu. 10 t mit einer Gleichverteilung von je 8 t pro Achse und einem Schädigungspotential von 2,05 äqu.10 t[9], verdeutlicht, dass sich eine Reduktion um etwa 17 % einstellt. Technische Rahmenbedingungen wie die festgelegte Position von Motor und Getriebe (vgl. Hoepke und Brähler 2013, S. 23) sowie des Laderaums schränken diese Reduktionsoption ein. Daher ist zukünftig nur mit einer Reduktion des spezifischen Schädigungspotentials zu rechnen, wenn die Längenmaße der Lkw und die Anzahl Achsen bei gleicher Nutzlast erweitert werden.

9 Die verwendete Einheit äqu.10 t setzt die Ergebnisse in das Verhältnis zu einer Achse mit 10 t zulässiger Achslast (vgl. Glaeser et al. 2006, S. 19).

5.2.2.5 Zusammenhang zwischen exogenen und endogenen Steuerungsgrößen im ökologischen Wirkungsmodell

Alle in diesem Unterkapitel beschriebenen ökologischen Wirkungen werden durch die im Teilmodell FAHRZEUGFLOTTE festgelegte Fahrleistung der Nutzfahrzeuge im Straßengüterverkehr und der Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger Schiene, Binnen- und Seeschiff aus dem Teilmodell TRANSPORT bestimmt. Die exogenen Determinanten transportbedingter ökologischer Wirkungen variieren zwischen den Verkehrsträgern. Die Kraftstoffverbräuche und die Abgasnachbehandlung beeinflussen die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bei allen Verkehrsmitteln. Geräuschemissionen entstehen durch Roll- und Motorgeräusche im Straßengüterverkehr und durch Bremsgeräusche im Schienengüterverkehr. Die Schädigung des Straßenoberbaus wird durch das Fahrzeuggewicht und die Anzahl der Achsen determiniert.

Bei allen exogenen Steuerungsgrößen könnten zukünftig Verbesserungen realisiert werden, welche die ökologischen Wirkungen senken. Besonders der Kraftstoffverbrauch und damit der Ausstoß von CO_2-Emissionen und Luftschadstoffen im Straßengüterverkehr könnten bis zum Ende des Betrachtungshorizontes im Jahr 2030 um bis zu 20 % gesenkt werden.

5.2.3 Wirkungsmodell zur Abschätzung transportbedingter betriebswirtschaftlicher Effekte

Neben den beschriebenen ökologischen Wirkungsdimensionen entstehen durch eine Veränderung der Zulieferstruktur auch betriebswirtschaftliche Effekte. Im Kontext dieser Arbeit werden darunter alle hervorgerufenen monetären Veränderungen im Verlauf der kompletten Lieferkette verstanden. Diese umfassen die Logistikkosten und betriebswirtschaftliche Effekte, die durch Supply-Chain-Risiken entstehen.

Während transportbedingte ökologische Wirkungen eine Vielzahl unbeteiligter Dritter betreffen, begrenzen sich die transportbedingten betriebswirtschaftlichen Auswirkungen auf die produzierenden Unternehmen. Anders als bei Umweltwirkungen besteht daher bei betriebswirtschaftlichen Wirkungen zunächst kein generelles gesellschaftliches Interesse zu deren Reduktion. Sie können jedoch unter Umständen die Wirksamkeit ökologisch motivierter Interventionen unterstützen, falls sich Maßnahmen identifizieren lassen, die sowohl ökologische als auch betriebswirtschaftliche Wirkungen gleichermaßen reduzieren.

Zu den betriebswirtschaftlichen Wirkungsdimensionen zählen neben den Transportkosten Behälter- und Lagerkosten sowie finanzielle Auswirkungen von Störungen in der Lieferkette auf die produzierenden Unternehmen. Dabei muss entweder der durch

Störungen in der Lieferkette hervorgerufene Produktionsausfall vermieden (Vermeidungskosten) oder der dadurch entstehende Schaden finanziell getragen werden (Schadenskosten).

5.2.3.1 Logistikkosten

Die Aufgabe der Logistik besteht in der Materialversorgung der Produktion und der dazu nötigen Raumüberbrückung, der Transport, und der Zeitüberbrückung, die Lagerhaltung, von Gütern. Als Logistikkosten werden alle Kosten bezeichnet, die durch Organisation und Durchführung der Lagerung und des physischen Transportes von der Quelle bis zur Senke anfallen (vgl. Koch 2012, S. 17). Gemäß Gudehus (2011, S. 147) lassen sich die Logistikkosten in sechs Bestandteile unterteilen: Transport-, Lager-, Bestandskosten, Handlingkosten (Verpackung, Kommissionierung, Bereitstelllung), Planungs- und Steuerungskosten. Das breite Spektrum der Logistikdienstleistung und das Fehlen einheitlicher Definitionen der Kostenkomponenten führen dazu, dass die zentrale Erfassung und Addition der Bestandteile in vielen Unternehmen eine große Herausforderung darstellt (vgl. Weber und Wallenburg 2010, S. 64). Dadurch entstehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Vollständigkeit der Kostenbetrachtung (vgl. Weber und Wallenburg 2010, S. 64). In Deutschland konnten laut Befragungen (vgl. Straube und Pfohl 2008) in nahezu allen Industriezweigen die Logistikkosten bis 2005 gesenkt werden. Danach kam es, bedingt durch steigende Energiekosten, zu einer Trendumkehr. Im Durchschnitt betragen die Logistikkosten im Handel etwa 16 % und in der Industrie etwa 7 % der Gesamtkosten. Der Fahrzeugbau verzeichnet unter den Industriesektoren sowohl die größte Steigerungsrate seit dem Jahr 2005 als auch mit 9 % den absolut höchsten Anteil (vgl. Straube und Pfohl 2008, S. 46 und Hofmann und Bachmann 2006, S. 23). Steigende Energie- und Lohnkosten gelten als Treiber für eine mittelfristige Steigerung der Logistikkosten (vgl. Weber und Wallenburg 2010, S. 64).

Regionale Beschaffungsnetzwerke reduzieren die Transportentfernungen. Dies beeinflusst die entfernungsabhängigen Logistikkosten. Von den genannten Kostenkomponenten weisen die Transport-, die Lager-, die Behälter- sowie die Bestandskosten eine Abhängigkeit von der Transportdistanz auf (vgl. Gudehus 2011, S. 147). Die Kosten für Planung, Steuerung sowie Kommissionierung entstehen entfernungsunabhängig (vgl. Gudehus 2011, S. 933) und betragen etwa 20 % der gesamten Logistikkosten (vgl. Straube und Pfohl 2008, S. 49). Damit können diese für den weiteren Verlauf dieser Arbeit vernachlässigt werden. Die Zusammensetzung der entfernungsabhängigen Logistikkosten ist in der folgenden Gleichung 5.17 dargestellt.

$$C_{L,gesamt}(t) = C_T(t) + C_S(t) + C_C(t) + C_B(t) \quad (5.17)$$

mit

$C_{L,gesamt}$:	*Gesamtlogistikkosten zum Zeitpunkt t*
C_T:	*Transportkosten*
C_S:	*Lagerkosten*
C_C:	*Behälterkosten*
C_B:	*Bestandskosten*

5.2.3.1.1 Transportkosten

Die Kosten, die durch den Betrieb der Transportgefäße zwischen Quelle und Senke entstehen, erreichen mit Anteilen zwischen 20 % und 30 % den höchsten Anteil an den Logistikkosten (vgl. Straube und Pfohl 2008, S. 49 und Weber 2012, S. 120). Folglich wird die Entwicklung der Transportkosten die Höhe der Logistikkosten zukünftig maßgeblich bestimmen: Befragte Experten der Transportlogistik (vgl. Straube und Pfohl 2008, S. 48) vermuten bei den Transportkosten das höchste Risiko von zukünftigen Kostensteigerungen.

Die in Gleichung 5.18 dargestellten absoluten Transportkosten sind abhängig von den eingesetzten Verkehrsmitteln und Fahrzeugtypen (Gewichtsklassen und Aufbauarten), von der Fahrleistung sowie von den spezifischen Transportkosten.

$$C_T(t) = \sum_g \left[c^T_{v,g}(t) \times FL_{v,g}(t)\right] \quad (5.18)$$

mit

C_T	*Gesamttransportkosten zum Zeitpunkt t*
$c^T_{v,g}$	*spezifische Transportkosten nach Gewichtsklasse*
$FL_{v,g}$	*Fahrleistung nach Gewichtsklasse*
$v = 1,2,3$:	*Verkehrsträger (Straßengüter-, Schienengüterverkehr und Binnenschiff)*
$g = 1,\ldots 7$:	*Gewichtsklassen (nur im Straßengüterverkehr)*

Die spezifischen Transportkosten C^T variieren zwischen den Verkehrsträgern: Während bei Binnenschiffen etwa 1,7 bis 3,6 Euro-Cent pro Tonnenkilometer anfallen,

kostet der Transport mit dem Schienengüterverkehr etwa 2,9 bis 3,9 Euro-Cent pro Tonnenkilometer (eigene Berechnungen ohne Berücksichtigung von Vor- und Nachlauf, basierend auf PLANCO Consulting GmbH und Bundesanstalt für Gewässerkunde 2007, S. 9ff.). Der Transport mit Fahrzeugen des Straßengüterverkehrs kostet im Durchschnitt etwa 4,4 bis 5,0 Euro-Cent pro Tonnenkilometer (eigene Berechnungen basierend auf Bühler 2006, S. 167). Die Kosten für den Containertransport per Seeschiff liegen bei etwa 0,01 Euro-Cent pro Tonnenkilometer (eigene Berechnungen[10] basierend auf SeaRates 2015).

Auf Grund der Dominanz des Straßengüterverkehrs beim Transport in der automobilen Zulieferkette (vgl. Destatis 2014) sollen im Folgenden die Bestimmungsgrößen für die Kosten dieses Verkehrsträgers im Detail analysiert werden.

Die spezifischen Transportkosten (Fahrzeugvollkosten) setzen sich aus den Fahrzeugeinsatzkosten und den Fahrzeuggemeinkosten zusammen (vgl. Schubert 2013, S. 126). Im Durchschnitt beträgt der Aufschlag auf die Fahrzeugeinsatzkosten für diese Fahrzeuggemeinkosten etwa 8 % bis 18 % (vgl. Wittenbrink 2011, S. 32). Zu den fixen Bestandteilen der Fahrzeugeinsatzkosten zählen Steuern, Versicherung, zeitabhängige Abschreibung (Leasing- oder Mietkosten) sowie Fahrpersonalkosten. Die variablen Bestandteile setzen sich aus fahrleistungsabhängiger Abschreibung, Reifen-, Wartungs-, Schmierstoffkosten sowie Kraftstoff- und Mautkosten zusammen (vgl. Schubert 2013, S. 126). Abbildung 5-25 stellt für die Kostenkomponenten die derzeitigen Anteile an den Transportkosten und das Risiko einer zukünftigen Preissteigerung dar. Die Kraftstoffkosten weisen sowohl den höchsten Anteil an den Gesamtkosten als auch das größte Risiko zukünftiger Preissteigerungen auf. Diese durch die Volatilität des Ölpreises getriebene Entwicklung wird bei der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 7.3.4 aufgegriffen.

10 Mittelwert der Transportkosten eines 40-Fuß-Containers auf den Relationen Hamburg - Shanghai und Hamburg - New York.

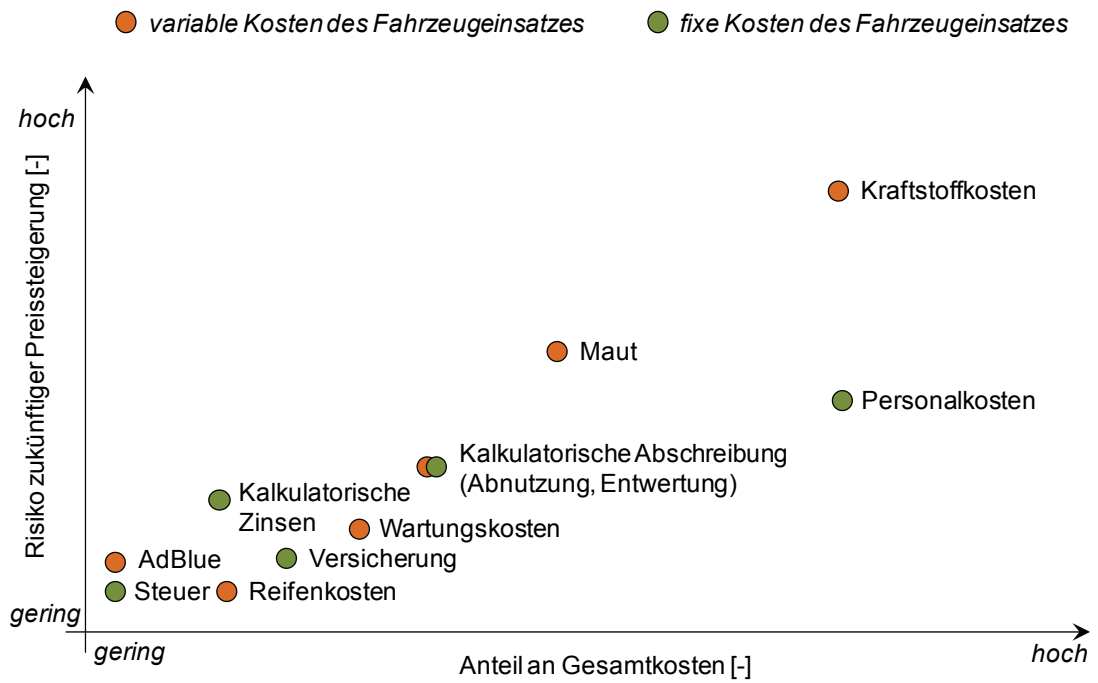


Abbildung 5-25: Kostenkomponenten des Lkw-Transports(eigene, ergänzte Darstellung, basierend auf Schubert 2013, S. 126ff., Wittenbrink 2011, S. 33 sowie Hartmann und Barwig 2012, S. 49f.)

Neben den Kraftstoffkosten entfallen auf Personalkosten und Maut (nur im Fernverkehr mit zulässigen Gesamtgewicht ≥7,5t) die größten Anteile der Gesamtkosten. Aus diesem Grund findet nachfolgend eine gesonderte Betrachtung dieser drei Komponenten statt. Neben kurzen retrospektiven Betrachtungen der Entwicklung steht besonders die Beschreibung zukünftiger Trends im Mittelpunkt.

Kraftstoffkosten

Die Kraftstoffkosten hängen einerseits von den Kraftstoffverbräuchen der Fahrzeuge und andererseits vom Kraftstoffpreis (Diesel, netto) ab. Wie in Kapitel 5.2.2.1 bereits dargestellt, ist zu erwarten, dass aufgrund der technologischen Entwicklung, Verbrauchsreduktionspotentiale realisiert werden können. Steigende Ölpreise wirken der Kostensenkung durch Effizienzsteigerungen entgegen.

Der nominale Preisverlauf des Netto-Dieselpreises aus Abbildung 5-26 stellt die historische Entwicklung dar. Nominale Preise lassen sich unter Zuhilfenahme der Inflationsrate in reale Preise umrechnen. Da die Vergleichsbasis der Speditionen nicht dem Warenkorb, welcher der gesamten Inflation zugrundegelegt wird, entspricht, wird zur Deflation der Erzeugerpreisindex für Straßengüterverkehr des Statistischen Bundesamtes verwendet. Während die Dieselpreise zwischen dem Jahr 2005 und Oktober

2015 nominal um etwa 14 % stiegen, ergibt sich für den gleichen Zeitraum lediglich eine reale Preissteigerung von etwa 1 % (vgl. Anhang A3.2).

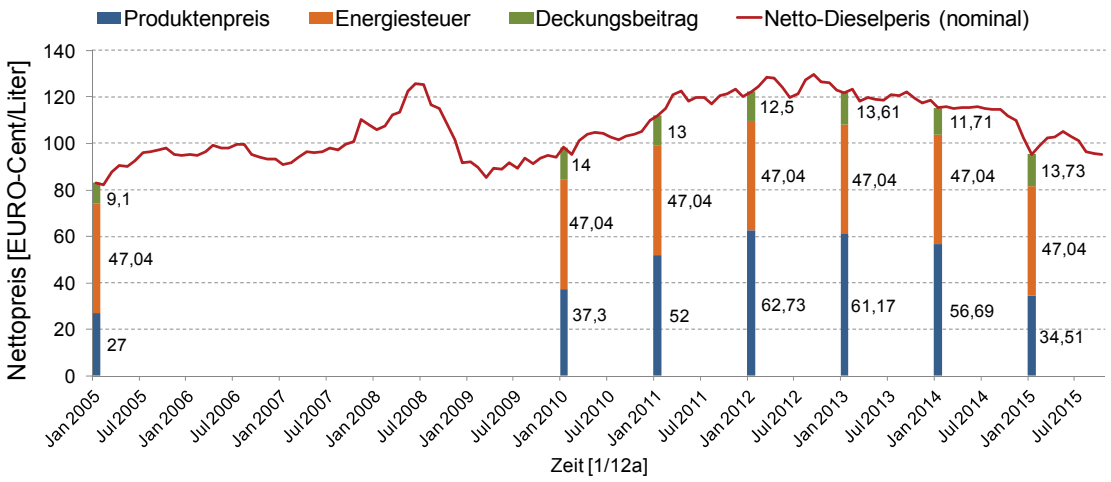


Abbildung 5-26: Entwicklung und Zusammensetzung des nominalen Netto-Dieselpreises (eigene Darstellung basierend auf Mineralölwirtschaftsverband (MWV) 2015)

Die Netto-Dieselkosten setzen sich aus drei Komponenten zusammen (vgl. Abbildung 5-26): Produktenpreis zur Herstellung des Dieselkraftstoffes, der Energiesteuer sowie dem Deckungsbeitrag für die Mineralölkonzerne. Während der Deckungsbeitrag und die Mineralölsteuern[11] in den vergangenen fünf Jahren konstant blieben, hängt der Produktenpreis (Preis zur Herstellung des Kraftstoffes aus Rohöl) des Dieselkraftstoffs vom Rohölpreis ab. Der Entwicklung von Rohölpreis der Sorte Brent korrelierte zwischen den Jahren 2005 und 2014 stark[12] positiv mit dem Produktenpreis des Diesels (Korrelationskoeffizient 0,965; siehe Anhang A.2), so dass daraus auf eine zukünftige Kopplung geschlossen werden kann. Da Dieselkraftstoff immer nur als Koppelprodukt[13] (vgl. Dittmeyer et al. 2005, S. 109ff.) bei der Raffinerie von Rohöl entsteht, wird diese Korrelation immer sehr hoch bleiben, aber nie auf den Wert 1 steigen. Eine starre

11 Da die Höhe der Besteuerung heute bereits über der von der EU geforderten energiebezogenen Besteuerung liegt, ist zumindest am Ende des Übergangszeitraums 2023 (EU-Richtlinie 2003/96/EG) nicht mit einer Erhöhung zu rechnen.

12 Laut Fahrmeir et al. (2011, S. 139) wird ab einem Korrelationskoeffizienten von $|r| \geq 0{,}8$ von einer starken Korrelation gesprochen.

13 Die Fragmentierung des Rohöls in der Raffinerie zur Gewinnung von Mineralölprodukten erlaubt nur eine Zerlegung in Benzin, Kerosin, Diesel, leichtes und schweres Heizöl in vorbestimmte Anteile eine Verschiebung dieser Anteile der entstehenden Produkte ist nur sehr begrenzt möglich (vgl. Dittmeyer et al. 2005 S. 109ff. sowie Alfke et al. 2008, S. 29ff.).

Kopplung von Rohöl- und Dieselpreis scheint, unter Nicht-Berücksichtigung tageszeitlicher und saisonaler Sondereffekte, also zulässig.

Die Prognose der zukünftigen Preisentwicklung stellt sich jedoch nicht einfach dar. Die International Energy Agency (IEA) zeigt in dem mittlerweile jährlich erscheinenden World Energy Outlook mögliche zukünftige Preisentwicklungen auf. Tabelle 5-9 stellt diese in einem Überblick dar.

Tabelle 5-9: Ausgewählte Preisprognosen der International Energy Agency (IEA)(Szenario „new policies“ und Rohöl-Marktpreise im Vergleich (alle Werte nominal)) [14]

Ölpreis-Studien	*2000*	*2010*	*2012*	*2014*	*2015*	*2020*	*2030*	*Abweichung IEA-Prognose von Marktpreisen 2010*
			alle Werte in US-Dollar/Barrell					
World Energy Outlook 2000		26				44		-66%
World Energy Outlook 2005		40				50		-48%
World Energy Outlook 2006		58			60	70		-25%
World Energy Outlook 2008		107			120	148		39%
World Energy Outlook 2009					102	131		
World Energy Outlook 2010					102	123	165	
World Energy Outlook 2011					114	134	174	
World Energy Outlook 2012					128	145	182	
World Energy Outlook 2013					119	135	179	
Marktpreis WTI	32,12	77,06	80,23	106,69				
Marktpreis Brent	31,03	76,64	91,23	113,09				

Ohne Berücksichtigung der im Krisenjahr 2008 erstellten Prognose unterschätzen die Prognosen den Preis für das Jahr 2010 um etwa 47 %. Folglich scheint der durch die IEA unterstellte Preisbildungsmechanismus die Realität unzureichend abzubilden. Allein am New York Mercantile Exchange (NYMEX), einem der wichtigsten Handelsplätzen für Rohöl weltweit, wurden beispielsweise am 18. September 2014 eine Menge von 762 Millionen Barrel (vgl. CME Group 2014) gehandelt. Die weltweite physische Nachfrage nach Rohöl beträgt hingegen nur etwa 90 Millionen Barrel pro Tag (vgl. International Energy Agency (IEA) 2013, S. 491). Es findet folglich eine Entkopplung des Preisbildungsmechanismus vom physischen Bedarf statt. Zukünftige Preisentwicklungen können damit nur unzureichend mit der herkömmlichen Angebot-Nachfrage-

14 Vgl. International Energy Agency (IEA) 2000; International Energy Agency (IEA) 2005; International Energy Agency (IEA) 2006; International Energy Agency (IEA) 2008; International Energy Agency (IEA) 2009; International Energy Agency (IEA) 2010; International Energy Agency (IEA) 2011; International Energy Agency (IEA) 2012 und International Energy Agency (IEA) 2013

Logik beschrieben werden. Dies erklärt die deutliche Abweichung der vergangenen IEA Prognosen von den realen Werten, bei gleichzeitig nur geringen Differenzen zwischen den Nachfrageprognosen der IEA und dem tatsächlichen Verbrauch (vgl. International Energy Agency (IEA) 2000, S. 342). Unter der Annahme, dass sich die Verhältnisse an den Kapitalmärkten nicht wesentlich ändern, muss auch zukünftig mit einer hohen Unsicherheit bezüglich der Preisentwicklung des Rohöls gerechnet werden. Wird der Mittelwert der IEA Prognose aus den Jahren 2010 bis 2013 der Preisentwicklung bis zum Jahr 2030 zu Grunde gelegt, so wird etwa ein Wert von 175 US-Dollar pro Barrel erreicht. Die Berücksichtigung der bisherigen Unterschätzung durch die IEA führt zu einem Preis von etwa 325 US-Dollar pro Barrel.

Neben der Steigerung des Rohölpreises als entscheidender Treiber der Dieselkosten wäre auch eine Erhöhung der Energiesteuer bis zum Jahr 2030 denkbar. Durch die höhere Energiedichte des Dieselkraftstoffes würde sich die Energiesteuer bei einer energiegehaltsbezogenen Bewertungsgrundlage, wie in der EU-Richtlinie 2003/96/EG vorgeschlagen, verändern. Derzeit liegen die deutschen Sätze unter den von der EU geforderten Abgaben; eine Steigerung scheint deshalb vor Ablauf der Übergangsfrist im Jahr 2023 unwahrscheinlich. Wie sich die Energiesteuer für Dieselkraftstoffe nach diesem Zeitraum entwickelt, ist derzeit nicht abzuschätzen.

Die als Deckungsbeitrag definierte „Differenz zwischen direkt zurechenbaren Erlösen (Einzelerlöse) und direkt zurechenbaren Kosten (Einzelkosten)“ (Springer Gabler Verlag 2015a) wird vom Mineralölwirtschaftsverband als dritte preisbildende Komponente ausgewiesen. Abbildung 5-26 zeigt eine uneinheitliche Entwicklung des Deckungsbeitrages zwischen den Jahren 2005 und 2014. Zwar lässt sich zunächst ein Anstieg feststellen, ab dem Jahr 2012 setzt eine Stagnation und ab dem Jahr 2013 ein Rückgang an. Da die Bildung des Deckungsbeitrages unterschiedlichsten Einflüssen (z. B. unternehmerische Preispolitik, Forderung der Anteilseigner etc.) unterliegt, wird im Folgenden von einem mittleren Deckungsbeitrag von 11,94 Cent/Liter (Mittelwert der monatlichen Werte von Januar 2005 bis Juli 2014) ausgegangen.

Abbildung 5-27 zeigt zusammenfassend die spezifischen Transportkosten, abhängig von unterschiedlichen Entwicklungen des Dieselpreises. Den Berechnungen liegen die in Kapitel 5.2.2.1 eingeführten Verbrauchsdaten der Fahrzeuge aus dem Jahr 2014 (vgl. Tabelle 5-4) zugrunde. Desweiteren wurden außer den Kraftstoffkosten alle Kostenkomponenten (vgl. Tabelle 5-10) der Transportkosten konstant gehalten, so dass nur der Effekt der Dieselpreiserhöhung dargestellt wird. Als obere Schranke der spezifischen Transportkosten wurde auf Basis der IEA-Prognosen ein Rohölpreis von 175 US-Dollar/Barrel festgelegt. Die untere Schranke bildet ein Dieselpreis, basierend auf einem Rohölpreis von 50 US-Dollar/Barrel, da dieser den mittleren weltweiten

Kosten zur Förderung von Rohöl entspricht (vgl International Energy Agency (IEA) 2013, S. 454). Auf Basis der verwendeten Eingangsdaten ist keine Aussage hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeiten einzelner Preisentwicklungen zu treffen; die Ergebnisse sollen lediglich einen Korridor für die zukünftige Entwicklung als Grundlage für Sensitivitätsrechnungen (vgl. Kapitel 7.3.4) liefern.

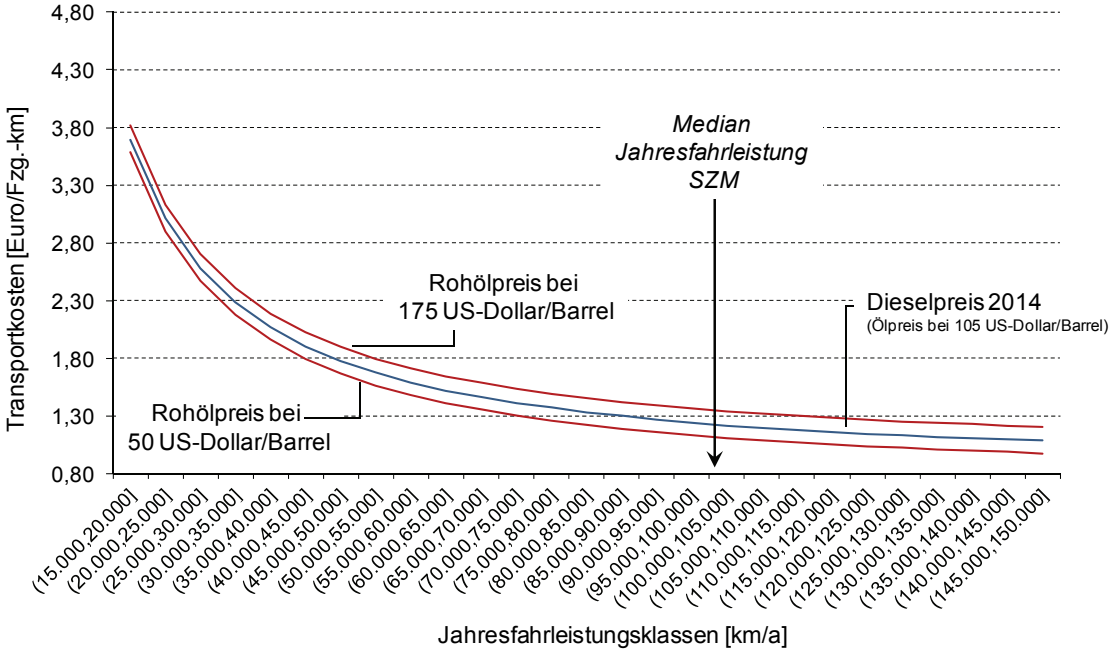


Abbildung 5-27: Entwicklung der nominalen Transportkosten für Sattelzüge abhängig vom Dieselpreis und der Jahresfahrleistung (eigene Darstellung - Modellergebnisse)

Straßenbenutzungsgebühren

Neben den Kraftstoffkosten stellen die Mautkosten bei hohen Fahrleistungen die zweitgrößte variable Kostenkomponente dar (vgl. Wittenbrink 2011, S. 33). Mautkosten fallen derzeit für Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht ab 7,5 Tonnen an (Bundesfernstraßenmautgesetz (BFStrMG), § 1). Die Berechnung der Mautsätze auf deutschen Bundesfernstraßen basiert auf der Emissionsklasse des Fahrzeuges und der Anzahl der Achsen (BFStrMG, Anlage 1). Damit werden sowohl den Umweltwirkungen durch Luftschadstoffe (vgl. Kapitel 5.2.2.2) als auch der Abnutzung der Infrastruktur (vgl. Kapitel 5.2.2.4) Rechnung getragen. Während eine Erhöhung der Mautsätze zumindest kurz- bis mittelfristig unwahrscheinlich scheint, ist eine Ausweitung der Mautpflicht ab dem Jahr 2018 auf alle Bundesstraßen nahezu sicher (vgl. Verkehrsrundschau 2014). Dies würde im Besonderen im Regionalverkehr zu einer Steigerung der spezifischen Kosten führen, da derzeit der Anteil der Autobahnkilometer

an den Gesamtkilometern im Fernverkehr bei etwa 85 % und im Regionalverkehr bei etwa 65 % liegt (vgl. Wittenbrink 2011, S. 76).

Personalkosten

Die Fahrpersonalkosten stellen die fixe Komponente mit dem größten Anteil an den Fahrzeugeinsatzkosten dar. Besonders im Nahverkehr mit geringen Jahresfahrleistungen können Personalkosten bis zu 50 % der Fahrzeugeinsatzkosten erreichen (vgl. Wittenbrink 2011, S. 26). Die Personalkosten enthalten neben dem Jahresbruttolohn der Fahrer Sozialabgaben der Arbeitgeber sowie die Spesen des Fahrpersonals. Der Personalfaktor pro Fahrzeug berücksichtigt Urlaub, Krankenstand und andere Ausfallraten des Fahrpersonals (vgl. Schubert 2013, S. 134). Die in der Literatur genannten Werte für Personalfaktoren liegen bei etwa 1,25 Fahrer/Fahrzeug (vgl. Schubert 2013, S. 42 und Wittenbrink 2011, S. 26). In Summe entstehen so durchschnittlich Personalkosten pro Fahrzeug in einer Höhe von etwa 47.200 Euro (vgl. Schubert 2013, S. 134).

Durch den wachsenden Fachkräftemangel, welcher von mehr als zwei Drittel der Transport- und Logistikdienstleister als Risiko identifiziert wird (vgl. Wittenbrink 2011, S. 22) und der damit verbundenden Erhöhung der Bruttolöhne durch Angebotsverknappung, können zukünftige Kostensteigerungen entstehen. Eine weitere Verschärfung der Lenk- und Ruhezeiten und die damit einhergehende Erhöhung des Personalfaktors sind derzeit nicht zu erwarten. Die Kontrollrate liegt in Deutschland zudem über den gesetzlichen Vorgaben (vgl. Europäische-Kommission 2012, S. 4) und die Anzahl der Verstöße ist durch die verbindliche Einführung des digitalen Tachographen (Richtlinie 2006/22/EG) bereits gesunken (vgl. Europäische-Kommission 2012, S. 8). Es ist folglich nur von einer fachkräftemangel-getriebenen Steigerung der Bruttolöhne auszugehen.

Sonstige Fahrzeugeinsatzkosten

Während Versicherungs-, Wartungs-, Reifen- und AdBlue-Kosten ausführlich in der Literatur dokumentiert sind, werden weder die Berechnungslogik noch die Ergebnisse für Restwerte oder Leasingraten[15] öffentlich zugänglich gemacht. Das hängt einerseits damit zusammen, dass die Restwertberechnung für viele Leasinggesellschaften Teil des Geschäftsmodells ist und andererseits mit der Nutzungsdauer und der Fahrleistung variiert. Als Restwert wird der Wert eines Fahrzeuges bezeichnet, der nach Ablauf der Nutzungsdauer bei einem Verkauf auf dem Gebrauchtfahrzeugmarkt erlöst werden

15 Die Höhe der Leasingraten orientiert sich am Restwert nach dem Nutzungszeitraum. Für die Fahrzeugeinsatzkosten ist es demnach unerheblich, ob das Fahrzeug geleast oder gekauft wird (vgl. Granjot 2007, S. 56).

kann. Öffentlich zugängliche Information zur Methodik bei der Restwertberechnung bietet derzeit nur das Statistische Bundesamt (vgl. Linz et al. 2003). Gleichung 5.19 stellt die Berechnungslogik des Restwertes in Abhängigkeit von der Jahresfahrleistung und des Alters dar (vgl. Linz et al. 2003, S. 540).

$$\ln RW_{g,a} = \alpha + \beta_1 \times T_{g,a} + \beta_2 \times \frac{JLL_{g,a}}{12} + \beta_3 \times \ln P_{g,a} + \varepsilon \qquad (5.19)$$

mit

$RW_{g,a}$:	*Restwert des Nutzfahrzeuges*
$T_{g,a}$:	*Alter des Nutzfahrzeuges (Haltedauer)*
$JLL_{g,a}$:	*Jahresfahrleistung*
$P_{g,a}$:	*Neupreis*
$g = 1,…7$:	*Gewichtsklassen der Nutzfahrzeuge*
$a = 1,…8$:	*Aufbauarten der Nutzfahrzeuge*

Die durch Linz et al. (2003, S. 541) ermittelten Werte für die Parameter entstanden auf Basis einer Stichprobe des Pkw-Marktes und lassen sich nicht ohne Anpassung auf Nutzfahrzeuge übertragen. Nutzfahrzeuge verfügen über langlebige Dieselmotoren, die auf höhere Kilometerleistungen als bei Pkw ausgelegt sind (vgl. Kurek 2006, S. 37f.). Der prozentuale Restwert ist bei gleicher Kilometerleistung beim Nutzfahrzeug dementsprechend höher. Aus diesem Grunde wurde auf Basis einer Stichprobe von Gebrauchtfahrzeugen mit Angaben zu Jahresfahrleistung und Preis die Parameter für Gleichung 5.19 mit Hilfe der Kleinste-Quadrate-Methode[16] neu ermittelt (siehe Anhang A3.3). Die Ergebnisse der Restwertberechnung liegen für Sattelzugmaschinen mit einer Fahrleistung von 90.000 Kilometer pro Jahr bei einer monatlichen Belastung von etwa 1.581 Euro (inklusive Wartungskosten und Sattelanhänger). Dieses Ergebnis liegt im Rahmen der in der Literatur genannten Werte für Full-Leasingverträge (beinhalten den Wertverlust und die Wartungskosten während der Leasingperiode), welche zwischen 1.300 und 1.700 Euro pro Monat (vgl. Wittenbrink 2011, S. 48) variieren.

Für die Wartungs-, Instandhaltungs- und Reifenkosten sowie den anfallenden Kosten für Steuer und Versicherung ergeben sich die in Tabelle 5-10 dargestellten Werte.

16 Der Kleinste-Quadrate-Ansatz (KQ) stellt eine Methode zur Parameterschätzung einer linearen Regression dar. Dabei werden die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen Schätzfunktion und beobachteten Werten minimiert (vgl. Fahrmeir et al. 2011, S. 480).

Tabelle 5-10: Sonstige spezifische Komponenten der Transportkosten je Gewichtsklasse bei einer Fahrleistung von 95.000 km/a (eigene Berechnungen auf Basis von Wittenbrink 2011, S. 37ff.; Lastauto Omnibus 2014, S. 292 sowie Kraftfahrzeugsteuergesetz (KraftStG) § 9)

Kostenkomponente	*G1*	*G2*	*G3*	*G4*	*G5*	*G6*	*SZM*
	alle Werte in Euro/Fzg.km						
Wartungs-und Instandhaltungskosten	0,076	0,118	0,146	0,141	0,158	0,257	0,117
Reifenkosten	0,019	0,036	0,035	0,022	0,041	0,059	0,033
Versicherung	0,00003	0,00004	0,00004	0,00005	0,00005	0,00006	0,00006
Steuer	0,000001	0,000002	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001

Gesamttransportkosten

Die Fahrzeugeinsatzkosten bestehen zu einem überwiegenden Teil aus Personal-, Kraftstoff- und Mautkosten. In Abhängigkeit von der jährlichen Fahrleistung ändert sich die Zusammensetzung; der summierte Anteil der drei Komponenten an den Gesamtkosten von etwa 80 % bleibt hingegen konstant (vgl. Abbildung 5-28).

Zukünftig besteht besonders das Risiko von Kostensteigerungen bei den Kraftstoffen. Unter ungünstigen Bedingungen durch einen Rohölpreis von 325 US-Dollar/Barrel sowie einer Mineralölsteuer für Dieselkraftstoff von 65,45 Euro-Cent/Liter kann dies im Jahr 2030 zu einer Steigerung der spezifischen Kosten im Vergleich zum Jahr 2014 um etwa 37 % von 1,24 auf 1,71 Euro/Fahrzeugkilometer führen[17]. Eine starke Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung sowie der hohe Anteil an den Gesamtkosten machen die Transportkosten zum größten Treiber der Logistikkosten.

17 Werte wurden ermittelt für eine jährliche Fahrleistung von 99.000 km/a; Kraftstoffverbrauch und alle sonstigen Kostenkomponenten wurden konstant gehalten (Quelle: Modellberechnungen).

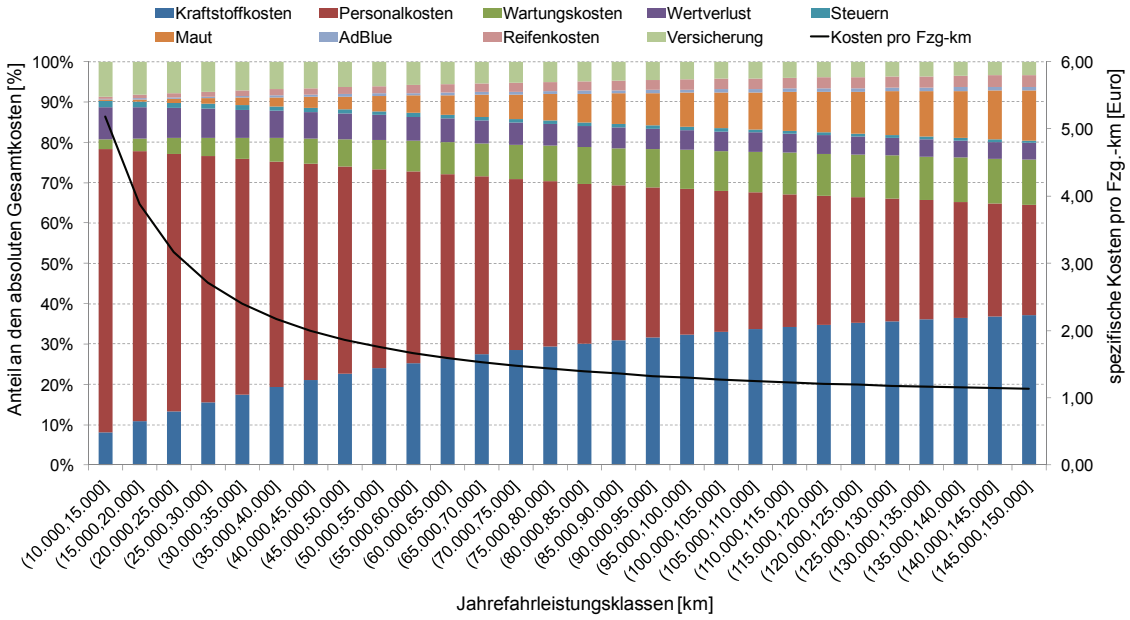


Abbildung 5-28: Aufteilung und absolute Entwicklung der Gesamtkosten (2014), abhängig von ausgewählten jährlichen Fahrleistungen für die Gewichtsklasse SZM (eigene Darstellung - Modellergebnisse)

5.2.3.1.2 Bestands- und Lagerkosten

Bestandskosten

Die Bestandskosten einer Lieferkette setzen sich aus dem Produkt aus der Summe von Sicherheitsbestand und Losgrößenbestand mit den Kosten der gelagerten Einheiten zusammen (vgl. Tempelmeier 2012, S. 49f.). Die dadurch entstehende Kapitalbindung wird durch die Verweildauer und den Zinssatz bestimmt (vgl. Schuh et al. 2013, S. 127):

$$C_B(t) = \left[\sum_m \left[B_{S,m}(t) + B_{L,m}(t) \right] \times c_m \right] \times (1+i)^t \qquad (5.20)$$

mit

C_B: *Bestandskosten*

B_S: *Sicherheitsbestand*

B_L: *Losgrößenbestand*

i:	*Zinssatz*
t:	*Verweildauer im Bestand*
c_m:	*Kosten pro Einheit m*
$m = 1,…n$:	*Anzahl der Rohstoffe, Teile, Komponenten, Module*

Sicherheitsbestände (B_s) dienen zur kurzfristigen Kompensation von Fehlmengen durch unvorhersehbare Nachfrage- oder Produktionsschwankungen (vgl. Arnold und Furmans 2007, S. 174). Nach Meyer und Sander (2009, S. 56) lässt sich die Höhe der Sicherheitsbestände wie folgt bestimmen:

$$B_S = k_B \times \sigma \qquad (5.21)$$

mit

B_S:	*Sicherheitsbestand*
k_B:	*Sicherheitsfaktor*
σ:	*Standardabweichung des Prognosefehlers*

Der Sicherheitsfaktor k_B hängt von der Verteilungsfunktion der Nachfrage ab (vgl. Arnold et al. 2008, S. 157). Mit wachsender Standardabweichung des Prognosefehlers (Abweichung zwischen Prognose und Nachfrage) steigt der Sicherheitsbestand. Dieser kann als eine Art Grundbestand verstanden werden, welcher permanent im Lager verfügbar ist und in regelmäßigen Abständen an die Unsicherheiten der Nachfrage und Produktion angepasst werden muss. Bei den kurzen Lieferzeiten in der Automobilindustrie werden Sicherheitsbestände in der Höhe der Produktionsreichweite von ein bis maximal zwei Tagen aufgebaut (vgl. Wannenwetsch 2010, S. 31). Das Aufbauen von Sicherheitsbeständen wird bei geringer Anzahl von Bauteilvarianten und einer Build-to-Forecast (BTF) Beschaffungsstrategie eingesetzt, was im Wesentlichen bei der Produktion von (Klein-) Teilen und einfacheren Komponenten der Fall ist. Besonders bei A-Teilen, bei Teilen mit hohen Wertdichten, z. B. Module (vgl. Klug 2010, S. 457f.), wird versucht, die Sicherheitsbestände und die damit verbundene Kapitalbindung gering zu halten (vgl. Wannenwetsch 2010, S. 31).

Losgrößenbestände (B_L) dienen der Minimierung von Rüstzeitverlusten, indem Ressourcen termingerecht für die nächste Wertschöpfungsstufe innerhalb der Produktionslinie vorbereitet und zur Verfügung gestellt werden (vgl. Tempelmeier 2012, S. 41). Meist erfolgt dann eine kurze Zwischenlagerung in unmittelbarer Nähe der Produkti-

onsstraße. Transportlosgrößenbestände als Teil der Losgrößenbestände sind immer dann notwendig, wenn die Sendungsgröße die Kapazität des Transportgefäßes unterschreitet. Die Güter werden dann bis zum Erreichen der Losgröße zwischengelagert (vgl. Arnold et al. 2008, S. 11). Beide Größen hängen nicht von der Transportentfernung ab. Während der Losgrößenbestand in der Produktion unabhängig vom Transport ist, wächst der Transportlosgrößenbestand analog zur Größe des Transportgefäßes.

Sämtliche beschriebenen Bestandsgrößen dienen der Erfüllung der vertraglich geregelten Liefertreue der Zulieferer. Um diese Liefertreue zu messen, werden unterschiedliche Servicegrade verwendet. Der Servicegrad α als ereignisorientierte Kennziffer gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Bedarf durch den physischen Lagerbestand voll erfüllt werden kann (vgl. Tempelmeier 2012, S. 27ff.). Diese Kennziffer beträgt derzeit (Stand 2015) bei Tier-1 Zulieferern mindestens 98 % (vgl. Gehr und Hellingrath 2007, S. 120). Die Höhe des Bestandes muss demnach garantieren, dass in maximal 2 % aller Fälle die Termintreue der Lieferung nicht eingehalten wird.

Ein kostenminimale Logistikplanung befindet sich immer im Spannungsfeld zweier logistischer Zielgrößen: Senkung der Bestandskosten und Einhaltung des Lieferservicegrades zur Vermeidung von Vertragsstrafen. Bestandssenkende Maßnahmen beeinflussen den Servicegrad negativ und vice versa (vgl. Schuh et al. 2013, S. 22). Dennoch findet sich in der Praxis ein zyklischer Anpassungsprozess des Bestandes wieder, der u. a. auch durch die Zielerreichung von Quartals- und Jahreszahlen getrieben ist (vgl. Schuh et al. 2013, S. 23).

Lagerkosten

Für den Zusammenhang zwischen Bestand und Lagerkosten gilt: Je größer der Bestand, desto höher die Lagerkosten. Während Losgrößenbestände den Aufbau kleinerer Zwischenlager nach sich ziehen, werden Sicherheitsbestände und Transportlosgrößenbestände in größeren Lagern zwischengespeichert. Die Kosten des Lagerbetriebes setzen sich aus fixen und variablen Komponenten zusammen, so dass die spezifischen Kosten pro Lagereinheit in der Regel mit steigender Lagerfläche sinken (vgl. Arnold et al. 2008, S. 154f.). Neben den Kosten für die Hallenmiete fallen bei der Lagerung Personal- und Betriebskosten an. Die Anteile dieser Kosten an den Gesamtkosten liegen, bezogen auf die Lagerfläche, über dem Anteil der Mietkosten (vgl. Hartmann und Barwig 2012, S. 73). Bei den in der Automobillogistik eingesetzten, zumeist sortenreinen Lagern, entstehen monatliche spezifische Lagerkosten von etwa 26 Euro pro Quadratmeter Lagerfläche (eigene Berechnungen basierend auf Hartmann und Barwig 2012, S. 73).

Die Logistik in der Automobilindustrie lässt sich als bestands- und lagerflächenarm beschreiben: Der überwiegende Einsatz von Just-in-Time Anlieferstrategien in Verbindung mit BTO-Produktionsstrategien bei Modulen (vgl. Klein 2013, S. 166) senkt die Lagerbestände in der Tier-1-Zulieferstufe. Bei Rohstoffen, (Klein-)Teilen und einfacheren Komponenten werden Sicherheits- und Lagerbestände weiterhin eine Rolle spielen. Bei Modulen reduzieren sich die Bestandsgrößen im Wesentlichen auf Transit- und Losgrößenbestände.

5.2.3.1.3 Behälterkosten

Um die zu transportierenden Waren maschinell be- und entladen zu können und vor Beschädigungen zu schützen, werden in der Logistik Behälter eingesetzt. Je nach Schutzbedarf und Packdichte der Waren kommen in der Automobillogistik Europaletten, Euro-Gitterboxen, VDA-Kleinladungsträger oder Spezialladungsträger zum Einsatz (vgl. Klug 2010, S. 149ff.; Ihme 2006, S. 43).

Europaletten und Euro-Gitterboxen sind die am häufigsten verwendeten Ladungsträger. Die Maße der Ladungsträger beziehen sich auf die DIN-Norm 55510, welche auf der European Packing Federation aus dem Jahre 1959 beruht (vgl. Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 345). Diese garantiert ein europaweites standardisiertes Handling. Europaletten werden zum Transport von Rohstoffen, verpackten Fertigwaren sowie Waren in Kleinladungsträgern verwendet. Die nach Empfehlung des Verbandes der Deutschen Automobilindustrie (VDA) entwickelten und genormten Kleinladungsträger (KLT) dienen zum gesammelten Transport von (Klein-) Teilen auf Europaletten (vgl. Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 345). Gitterboxen beinhalten vornehmlich (Klein-) Teile und Komponenten. Spezialladungsträger sind Sonderanfertigungen zum Transport von Modulen (vgl. Wardecki 2007, S. 80f.). Bei Modulen handelt es sich um Bauteile, die vom Tier-1 Zulieferer Just-in Time zum OEM geliefert und direkt in die Fahrzeuge eingebaut werden. Um die Produktion nicht zu verzögern, ist ein besonderer Schutz dieser Transportware nötig (vgl. Hofmann und Bachmann 2006, S. 35). Im Gegensatz zu Paletten, Gitterboxen und Kleinladungsträger ist die Einsatzflexibilität von Spezialladungsträger eingeschränkt (vgl. Klug 2010, S. 152). Tabelle 5-11 enthält eine Übersicht über ausgewählte Behälter und Ladungsträger der Automobillogistik.

Tabelle 5-11: Kennzahlen ausgewählter Behälter und Ladungsträger der Automobillogistik (eigene Aufstellung nach Klug 2010, S. 149ff.; Arnold et al. 2008, S. 704; Transpofix 2014; Zahn und Göbel 2013a, S. 2ff.; Zahn und Göbel 2013b, S. 2ff.; Vahrenkamp und Kotzab 2012, S. 345; Ihme 2006; S. 40ff.; Hofmann und Bachmann 2006, S. 35).

Behältertyp	*Eigengewicht*	*Tragkraft*	*Abmessungen (L x B x H)*	*Preisspanne*
	[kg]	*[kg]*	*[mm]*	*[Euro/Stück]*
Europalette	22	1.500	1.200 × 800 × 150	6,50 - 7,50
Euro-Gitterbox	90	1.000	1.240 × 835 × 970	70,00 - 75,00
VDA-Kleinladungsträger (R-KLT 3215)	0,57	50	300 × 200 × 147	1,71 - 2,23
VDA-Kleinladungsträger (R-KLT 6429)	2,97	50	600 × 400 × 280	8,35 - 10,86
Spezialladungsträger (Modul Sitze)	135	44,20	1.500 x 800 x 1.220	51,00 - 500,00
Spezialladungsträger (Modul Cockpit)	270	17,30	1.800 x 1.200 x 1.010	51,00 - 500,00

Durch den Einsatz von Ladungsträgern und Behältern entstehen für die Mehrzahl der Unternehmen Kosten in Höhe von 1 % - 10 % der Logistikkosten. Kommen Spezialladungsträger zum Einsatz, so können die Behälterkosten auf bis zu 50 % steigen (vgl. Hofmann und Bachmann 2006, S. 30). Die in der Automobillogistik zum Transport von Modulen eingesetzten Spezialbehälter besitzen je nach Einsatzart einen Wert zwischen 51 Euro und 500 Euro pro Stück (vgl. Hofmann und Bachmann 2006, S. 35). Durch die vernetzten Transportprozesse entstehen Behälterverfügbarkeitsprobleme innerhalb der Lieferkette, die durch Sicherheitsbestände ausgeglichen werden müssen (vgl. Gehr und Hellingrath 2007, S. 27). Um Behälterengpässe zu vermeiden, beträgt die Reichweite des Behälterbestandes im Mittel mehr als sechs Tage (vgl. Hofmann und Bachmann 2006, S. 28). Die Berechnung der Behälterkosten erfolgt mit Gleichung 5.22 (angelehnt an Klug 2010, S. 156):

$$C_C = \sum_m \left[t_u \times \frac{P_m^d}{Kap_m^c} \times k_C \right] \times c_m^c \qquad (5.22)$$

mit

C_c: *Behälterkosten*

t_u: *Umlaufzeit*

$P_m{}^d$:	*Tagesproduktion je Modul, Komponenten, Teil und Rohstoff*
$Kap_m{}^c$:	*Kapazität pro Behälter*
k_c:	*Sicherheitsfaktor Ladungsträger*
$m = 1,...n$:	*Art des Moduls*

Die Distanzabhängigkeit der Behälterkosten ergibt sich durch die Umlaufzeit der Ladungsträger/Behälter. Diese beschreibt den vollständigen Umlauf eines Behälters im Voll- und Leergutstatus (vgl. Klug 2010, S. 156). Der durch das Behältermanagement bestimmte Sicherheitsfaktor (vgl. Hofmann und Bachmann 2006, S. 18) erhöht den Bestand und ist abhängig von der eingesetzten Behälterart: Da Spezialladungsträger nur für eine begrenzte Anzahl von Modulvarianten nutzbar sind, müssen für jedes Modul gesondert Sicherheitsbestände aufgebaut werden (vgl. Wardecki 2007, S. 81). Im Gegensatz dazu erlaubt der Einsatz von Standardbehältern (Gitterbox, Europalette, KLT) einen Sicherheitsbestands-Pool, der für eine Reihe unterschiedlicher Komponenten und Einzelteile eingesetzt werden kann.

Fazit

Die entfernungsabhängigen Logistikkosten bestehen aus Transport-, Bestands- und Behälterkosten. Die spezifischen Transportkosten pro Tonnenkilometer steigen mit sinkender Packdichte der Güter. Bei Transportkosten besteht ein erhebliches Risiko zukünftiger Kostensteigerungen. Die Modularisierung der Produktion erfordert den Einsatz von teuren Spezialladungsträgern und erweist sich somit als Treiber der Behälterkosten. Durch die Fortschreitung der produktionssynchronen Belieferung wird erwartet, dass die Bestandskosten zukünftig eine geringere Rolle spielen werden und nur bei Einzelteilen und Komponenten in nennenswertem Maße auftreten. Durch die vermehrte Just-in-Sequence Anlieferung können Bestandskosten bei der Resequenzierung der Produktion aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Supply Chain entstehen (vgl. Klug 2010, S. 390).

5.2.3.2 Schadenskosten durch Risiken in der Lieferkette

Distanzabhängige Logistikkosten, wie Transport- und Behälterkosten, treten kontinuierlich auf. Neben regelmäßig entstehenden Kosten können durch Störungen in der Lieferkette diskontinuierliche Aufwendungen anfallen. Im Gegensatz zu kontinuierlich auftretenden Kosten lassen sich diskontinuierlich anfallende Kosten nur dann in der Kalkulation berücksichtigen, falls die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Höhe der Kosten bekannt sind. Das Auftreten von diskontinuierlichen Kosten wird aufgrund der

fehlenden Prognostizierbarkeit als Wagnis oder Risiko empfunden (vgl. Philipp 1967, S. 34).

Der Begriff Risiko lässt sich vielfältig definieren. Aus Sicht der Psychologie wird Risiko synonym zum Begriff „Gefahr“ verwendet (vgl. Butz 2005, S. 399). Allen Definitionen gemein ist der Bezug auf zukünftige Auswirkungen des heutigen Handelns. Diese Auswirkungen verstehen sich sowohl als positive als auch als negative Abweichungen einer Zielerreichung (vgl. Kummer und Sudy 2007, S. 256). Im Kontext der Logistik lassen sich Supply-Chain-Risiken als negative Abweichung (Schaden) einer Zielerreichung, welche durch eine Ereignis in oder im unmittelbaren Umfeld der Lieferkette verursacht wird, definieren (vgl. Kersten et al. 2006, S. 5). Formal lässt sich das Risiko (R) als ein Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit (τ) und Schadensausmaß (I) definieren (vgl. Skorna 2013, S. 25):

$$R = \tau \times I \qquad (5.23)$$

mit

R:	*Risiko*
τ*:*	*Eintrittswahrscheinlichkeit*
I:	*Ausmaß*

Während in den vergangenen Jahrzehnten die Eintrittswahrscheinlichkeit (τ) von Risikoereignissen innerhalb der Lieferketten durch wachsende Vernetzung und veränderte Rahmenbedingungen (z. B. extreme Witterungsverhältnisse, politische Instabilitäten) zunahmen (vgl. Sodhi und Tang 2012, S. 7), wurde dem Management von Risiken erst Anfang der 2000er Jahre eine erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt (vgl. Singh et al. 2012, S. 273f.). Aufgabe des Supply-Chain-Risk-Managements ist es, Risiken innerhalb der Lieferkette zu identifizieren, zu analysieren, zu bewerten und deren Wirkungen zu minimieren (vgl. Ziegenbein 2007, S. 69 und Thom, S. 43). Als Grundlage zur Zertifizierung des Risikomanagements wurde im Jahr 2009 auf Basis von wissenschaftlichen Erkenntnissen der ISO (International Organization of Standardization) eine Norm ausgearbeitet (ISO 31010:2009). Diese Norm legt ein standardisiertes Vorgehen zur Identifizierung, Analyse und Bewertung von Risiken fest mit dem Ziel, die Verwundbarkeit der Lieferkette zu reduzieren (vgl. ISO 31010:2009, S. 11).

Die Verwundbarkeit (Vulnerabilität) einer Lieferkette hängt von der Anzahl der Unregelmäßigkeiten mit negativer Auswirkung (Störung) sowie der Möglichkeit, diese

Störungen zu vermeiden, ab. Ein hoher Anteil von Single Sourcing, kurze Produktlebenszyklen, ein niedriger Wertschöpfungsanteil des OEM und eine starke Abhängigkeit von Lieferanten sowie verzweigte Beschaffungsnetzwerke (vgl. Wagner und Bode 2008, S. 304; Jüttner et al. 2003, S. 205 sowie Wildemann 2013 , S. 105) führen dazu, dass die Lieferketten in der Automobilindustrie stark und häufig von Störungen und Ausfällen betroffen sind: Ein durch eine Befragung (N=760) ermittelter Supply-Chain-Vulnerabilitätsindex (SCVI) zeigt, dass die Lieferketten in der Automobilindustrie unter allen Industrien am anfälligsten für Störungen sind (vgl. Wagner und Neshat 2010, S. 126).

5.2.3.2.1 Lieferverzug als bedeutendstes Geschäftsrisiko

Ereignisse, die zu Supply-Chain-Risiken führen, können an unterschiedlichen Stellen in der Lieferkette auftreten. Neben nachfrageseitigen Unregelmäßigkeiten können Ereignisse im Unternehmen selbst, der Umwelt oder der Beschaffungslogistik zu Risiken führen (vgl. Kersten et al. 2006, S. 6). Unter den genannten Ursachen treten nach Einschätzung von Industrieunternehmen Störungen der Lieferkette besonders häufig in der Beschaffungslogistik auf. Zudem haben diese Störungen von allen die stärkste Wirkung (vgl. Kersten et al. 2006, S. 6).

Zur systematischen Betrachtung von Risiken bietet sich die Differenzierung nach Ursache und Wirkung (vgl. Braun 1984, S. 22ff.) an. Vielfältigen Ursachen für Risiken innerhalb einer Lieferkette stehen drei übergeordnete Wirkungen gegenüber: Lieferverzug an den Endkunden, erhöhte (Liefer-) Kosten sowie beschädigte oder nicht funktionsfähige Bauteile (vgl. Skorna 2013, S. 36). Der Lieferverzug als eine mögliche Folge von Unregelmäßigkeiten im Material- oder Informationsfluss der Beschaffung (vgl. Jüttner et al. 2003, S. 200) und die damit verbundene Verzögerung der Produktion stellen für Unternehmen derzeit das mit Abstand bedeutendste Geschäftsrisiko dar (vgl. Allianz 2014, S. 8 und Wagner und Silveira-Camargos 2012, S. 59). Den Ursachen für Lieferverzüge werden in den folgenden Unterkapiteln die Wirkungen gegenübergestellt.

5.2.3.2.2 Ursache von Lieferverzügen

Um die Vielfältigkeit der möglichen Ursachen für Risiken in einer Lieferkette abbilden zu können, bietet sich ein Ishikawa-Diagramm (vgl. Ishikawa 1994, S. 42) an (siehe Abbildung 5-29). Diese Darstellungsform stellt die Kausalbeziehungen zwischen der Auswirkung in Form des Lieferverzuges und den möglichen Ursachen grafisch dar.

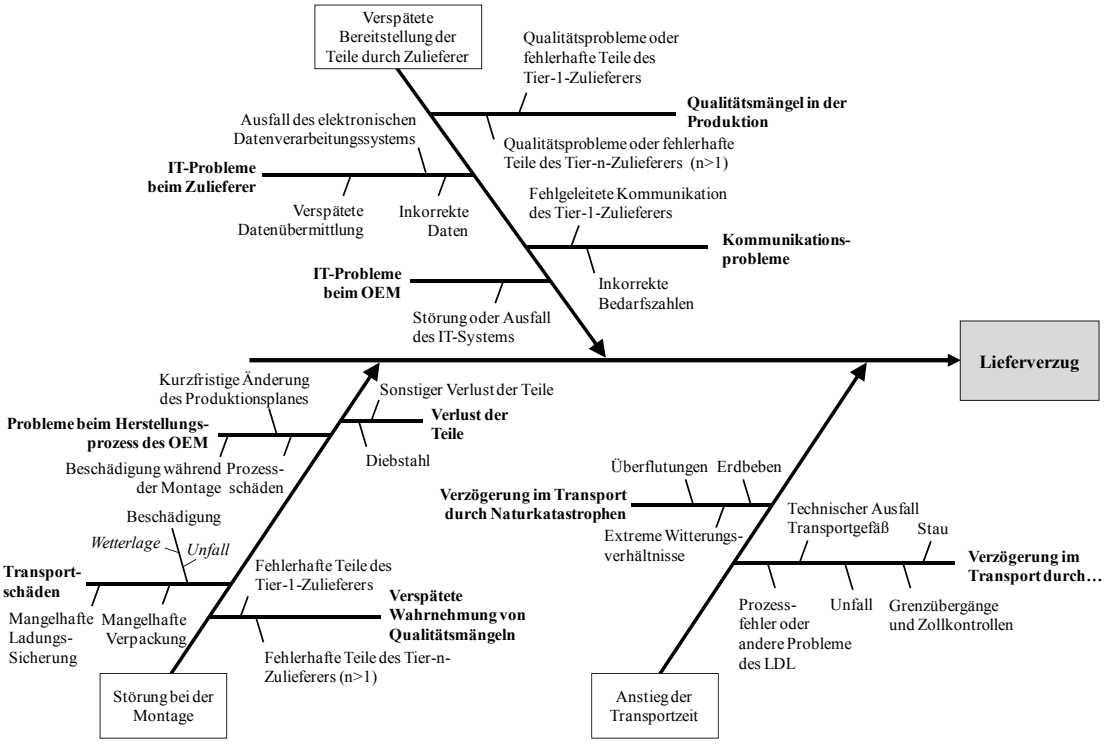


Abbildung 5-29: Ishikawa-Diagramm zur Darstellung der Kausalitätsbeziehungen für Lieferverzüge in der Supply Chain (eigene Darstellung basierend auf Ausführungen von: Blackhurst et al. 2008, S. 149; Thun et al. 2007, S. 4; Wagner und Bode 2008, S. 323; Wagner und Silveira-Camargos 2012, S. 59; Zsidisin 2003, S. 221 sowie Ziegenbein 2007, S. 185ff.)

Die Ursachen für eine verspätete Auslieferung an den Endkunden (Lieferverzug) lassen sich in drei Oberkategorien einteilen:

- Verspätete Bereitstellung der Teile durch die Zulieferer und ein dadurch entstehender Verzug in der Produktion,
- Störungen bei der Endmontage an der Produktionslinie des OEM sowie
- Anstieg der Transportzeit bei der Zu- oder Auslieferung.

Die durch eine Regionalisierung der Zulieferstruktur veränderten Transportentfernungen beeinflussen zwei der drei Ursachen: Kürzere Wege verringern die Transportzeit und damit die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen auf dem Transportweg, welche die Lieferung verzögern können. Die Bereitstellung der Bauteile durch die Zulieferer kann nach einer Produktionsstörung durch lange Transportentfernungen weiter verzögert werden.

Lieferverzug durch Anstieg der Transportzeit

Als Transportrisiken werden alle Risiken bezeichnet, die innerhalb des Transportnetzwerkes entstehen können und in der Folge zu einem Anstieg der Transportzeit führen. Wie in Abbildung 5-29 dargestellt, können die Ursachen für Verzögerungen im Transport einerseits an einer Verlängerung der Transportzeit durch dichten Verkehrsfluss oder schlechten Witterungsbedingungen liegen. Andererseits kann der Transport durch einen Unfall des Transportgefäßes oder technischen Ausfalls unterbrochen werden. Während Unfall- und Ausfallraten mit steigendem technischen Fortschritt und dem Einsatz von Fahrerassistenzsystemen zukünftig sinken werden (vgl. Hoepke und Brähler 2013, S. 33 und Flämig 2015a, S. 387), zählen durch Naturkatastrophen bedingte Ausfälle und Verzögerungen mittlerweile zu den bedeutendsten Transportrisiken (vgl. Allianz 2014, S. 8). Im grenzüberschreitenden Transport entstehen zudem Zeitverluste an den Grenzen und Zollstellen (vgl. Wannenwetsch 2010, S. 150). Risiken wie Zeitverluste an Grenzen und Verzögerungen durch die Auswirkungen von Naturkatastrophen, weisen eine geografische Abhängigkeit auf und können als punktuelle Risiken mit indirekter Abhängigkeit von der Transportdistanz bezeichnet werden. Risiken wie Unfälle und Ausfallraten des Transportgefäßes weisen hingegen eine direkte Entfernungsabhängigkeit auf.

Unfälle stellen derzeit die bedeutendste Ursache für Transportrisiken dar (vgl. Hoffmann 2014, S. 172). Als güterverkehrsbedingte Unfälle werden im Folgenden alle Unfälle bezeichnet, die unter Beteiligung des Güterverkehrs entstehen. 99 % aller Unfälle mit Beteiligung des Güterverkehrs entstehen im Straßenverkehr. Bei Binnenschiffen und im Schienengüterverkehr treten vernachlässigbar wenige Unfälle auf (vgl. CE Delft et al. 2011, S. 87), da diese Verkehrsmittel kaum Berührungspunkte zum motorisierten Individualverkehr (MIV) aufweisen. Daher können bei der Betrachtung der güterverkehrsbedingten Unfälle die Verkehrsträger Schiene und Binnenschiff vernachlässigt werden.

Tabelle 5-12 stellt die spezifischen Unfallraten der Lkw-Gewichtsklassen dar. Während bei schweren Nutzfahrzeugen (G2 bis G6, SZM) die Quoten eine geringe Varianz aufweisen, fallen im Besonderen die fünffach erhöhten Quoten der leichten Nutzfahrzeuge auf. Es ist zu vermuten, dass dies zwei Gründe hat: Zunächst werden die leichten Nutzfahrzeuge vorwiegend in verdichteten und städtischen Gebieten eingesetzt. In diesen Bereichen ist bedingt durch die Dichte der Verkehrsteilnehmer die Unfallrate besonders hoch (vgl. Statistisches Bundesamt 2013b, S. 17). Desweiteren ist das Fahren eines leichten Nutzfahrzeuges ohne gesonderte Fahrerlaubnis mit Besitz des Führerscheins Klasse B (Fahrerlaubnisverordnung (FeV) § 6 Abs. 1)

gestattet. Fahrer dieser Fahrzeuge müssen keine besondere Ausbildung – wie bei Berufskraftfahrern sonst üblich – absolvieren.

Tabelle 5-12: Unfallraten im Straßengüterverkehr nach Gewichtsklassen (eigene Berechnungen basierend auf Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2013a, Statistisches Bundesamt 2013b, S. 17, Kühn und Krail 2013, S. 5 sowie Anhang A 3.1)

		Anzahl Unfälle mit Beteiligung von Nutzfahrzeugen				
Gewichts-klasse	zulässiges Gesamtgewicht	Gesamt	Nutzfahrzeug als Hauptverursacher bei Personenschaden	Fahrzeuge im Bestand 1.1.2014	Durchschnittliche jährliche Fahrleistung (Median)	Unfallrate
	[t]	[Unfälle]	[%]	[Mio. Fzg.]	[km/a]	[Unfälle/Fzg.-km]
G1	[0;3,5]	22.501	63%	463.977	16.646	$2{,}9 \times 10^{-6}$
G2	(3,5;7,5]	3.697	58%	255.741	32.348	$4{,}5 \times 10^{-7}$
G3	(7,5;12]	1.683	57%	79.023	46.585	$4{,}6 \times 10^{-7}$
G4	(12;18]			67.787	33.000	$2{,}1 \times 10^{-7}$
G5	(18;26]	5.386	54%	90.379	70.357	$2{,}1 \times 10^{-7}$
G6	(26; 32]			36.218	28.000	$2{,}1 \times 10^{-7}$
SZM	40	10.585	51%	184.589	99.107	$5{,}8 \times 10^{-7}$

Der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen kann durch Kontrolle und Korrektur des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug den Fahrer entlasten und damit die Unfallhäufigkeit reduzieren (vgl. Flämig 2015a, S. 387). Dennoch kann es zu Situationen kommen, in denen ein Eingreifen des Fahrers nötig wird. Eine Veränderung der gesetzlichen Lenk- und Ruhezeiten zur Bekämpfung der Müdigkeit der Fahrer kann durch Unaufmerksamkeit verursachte Unfälle reduzieren. Gleichzeitig führt eine fehlende Anpassung in der Personaleinsatzplanung zu vermehrtem Zeit- und Termindruck.

Lieferverzug durch verspätete Bereitstellung von Bauteilen

Neben Verzögerungen beim Transport können Unregelmäßigkeiten in der Produktion der Zulieferer zu einem Lieferverzug führen. Während sich durch Lagerhaltung in den Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n Lieferverzögerungen begrenzen lassen, führt der Ausbau der produktionssynchronen Anlieferung (JiT, JiS) bei den Tier-1-Zulieferern zu einer unmittelbaren Auswirkung der Lieferverzögerungen auf die Produktion des OEM. Die Störungsanfälligkeit der produktionssynchronen Lieferung führt dazu, dass etwa 58 % aller Supply-Chain-Störungen in der Tier-1-Zulieferstufe auftreten. Auf die Tier-2-Zulieferstufe entfallen etwa 32 % der Störungen, auf die Tier-3-Zulieferer etwa 10 % (vgl. Glendon und Bird 2013, S. 5).

Häufige Gründe für verspätete Lieferungen bzw. falsche Mengen (siehe Abbildung 5-29) lassen sich auf Probleme in der Kommunikation zwischen OEM und Zulieferer zurückführen. Die Ursachen dafür liegen zumeist in technischen Ausfällen oder Fehlern des IT-Systems. Diese reichen von kleineren Datenfehlern bis hin zu großflächigen Ausfällen und betreffen, der vernetzten IT-Strukturen geschuldet, mittlerweile 90 % aller produzierenden Unternehmen (vgl. Glendon und Bird 2013, S. 6).

Zusätzlich zu Kommunikationsproblemen treten Qualitätsdefizite bei der Produktion der Zulieferer auf. Negative Abweichungen der Qualität führen dazu, dass die Funktionalität nicht mehr voll gewährleistet werden kann oder die Schnittstellen der Module, Komponenten und Einzelteile ihre Passgenauigkeit verlieren (vgl. Piller und Waringer 1999, S. 126f.). Da die Variantenvielfalt der Module stetig zunimmt und die Module ohne Zwischenlagerung direkt ins Fahrzeug verbaut werden, führen Qualitätsdefizite bei Tier-1-Zulieferern unmittelbar zu Produktionsverzögerungen beim OEM. Lassen sich die Qualitätsdefizite durch Modifikation nicht vor Ort beheben, so müssen die Zulieferer neue Module, Komponenten und Teile produzieren und anliefern. Bei schwerwiegenden Qualitätsdefiziten kann die erforderliche Anpassung nur durch iterative Verfahren unter Einbezug der OEM und den damit verbundenen Verzögerungen bei der Produktion behoben werden (vgl. Schraft und Westkämper 2005, S. 177f.).

Im Gegensatz zu den Transportrisiken besteht bei den produktionsbedingten Störungen kein kausaler Zusammenhang zwischen Eintrittswahrscheinlichkeit und Länge der Transportdistanz. Allerdings beeinflusst die Dauer bis zum Eintreffen der Nachlieferung den durch das Ereignis verursachten Schaden.

5.2.3.2.3 Wirkungen von Lieferverzügen

Die Wirkungen von Lieferverzügen hängen von der Strategie der Unternehmen im Umgang mit Suppy-Chain-Risiken ab. Gemäß Kersten et al. (2006, S. 9f.) lassen sich drei Taktiken unterscheiden: Das Tragen des Risikos, die Risikovermeidung oder das Übertragen von Risiken an Dritte. Da das System „Automobilindustrie“, wie es in dieser Arbeit abgegrenzt wird, nur Zulieferer und OEM beinhaltet, wird das Übertragen der Risiken an Dritte im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Zur monetären Bewertung der betriebswirtschaftlichen Wirkungen unterschiedlicher Risiken in der Lieferkette wird an dieser Stelle ein Ansatz der Umweltökonomie herangezogen. Demnach lassen sich die Schäden durch den Ausstoß von Klimagasen auf zwei unterschiedliche Arten monetär bewerten: Die erste Methode berücksichtigt die Kosten, die zur Vermeidung der Folgen aufgewendet werden müssen (Vermeidungskosten), die zweite Methode beruht auf einer Abschätzung des Schadens, der in Folge des Ausstoßes von Klimagasen entsteht (Schadensausmaß) (vgl. Rogall 2002, S. 47).

Analog zu den Strategien im Umgang mit Risiken (vgl. Kersten et al. 2006, S. 9f.) lässt sich dieser Ansatz auf die Bewertung der Supply-Chain-Risiken übertragen. Dabei werden einerseits die Aufwendungen zur Abwendung eines Lieferverzuges diskutiert und andererseits der Schaden, der durch den Lieferverzug entsteht, abgeschätzt.

Kosten durch Vermeidung der Auswirkungen eines Lieferverzugs

Oberstes Ziel des Supply-Chain-Managements ist es, im Falle einer Störung entstehende Fehlmengen zu korrigieren, um die Produktion aufrechtzuerhalten (vgl. Weber 2012, S. 170f.). Die Vermeidung des Lieferverzuges durch Verringerung der Fehlmengensituation lässt sich auf zwei Arten erreichen: Eine beschleunigte Bereitstellung des fehlenden Materials oder die Bereitstellung eines alternativ verwendbaren Materials (vgl. Weber 2012, S. 172). Alternativen zu beschädigten oder qualitativ minderwertigen Modulen, Komponenten, Einzelteilen oder Rohstoffen lassen sich kurzfristig nur aus einem Sicherheitsbestand bereitstellen. Wie bereits ausführlich in dieser Arbeit diskutiert, führen die Variantenvielfalt und die daraus abgeleitete BTO-Produktionsstrategie bei Modulen (Tier-1) dazu, dass kein Sicherheitsbestand angelegt wird. Durch Single Sourcing (vgl. Kapitel 2.3) von Modulen und Komponenten stehen zudem nur wenige alternative Beschaffungsoptionen zur Verfügung. Existieren keine Sicherheitsbestände oder sind diese kurzfristig erschöpft, so besteht zur Vermeidung des Lieferverzuges nur die Möglichkeit der beschleunigten Bereitstellung.

Die beschleunigte Bereitstellung wird durch eine Erhöhung der Transportgeschwindigkeit erreicht, um die Distanz zwischen Zulieferer und OEM schneller zu überbrücken. Bei diesen „Eilfrachten“ (vgl. Weber 2012, S. 172) kommen neben leichten Nutzfahrzeugen bis 3,5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht bei weiteren Entfernungen auch Kleinflugzeuge und Hubschrauber zum Einsatz (vgl. Haidar 2014, S. 54). Aufgrund der begrenzten Transportkapazität sind diese Eilfrachten bei großvolumigen Modulen kostenintensiv. Insgesamt steigen durch die Eilfrachten die spezifischen Transportkosten pro Tonnenkilometer an (siehe Tabelle 5-13).

Tabelle 5-13: Vergleich der Transportkosten unterschiedlicher Transportmittel abhängig von der Transportgeschwindigkeit (eigene Darstellung basierend auf Modellergebnissen sowie Hoepke und Brähler 2013, S. 24ff.)

Gewichtsklasse	*spezifische Betriebskosten*	*maximale Nutzlast*	*minimale Transportkosten*	*maximale Transport-geschwindigkeit*
	[Euro/Fzg.-km]	[t]	[Euro/tkm]	[km/h]
SZM (bis 40t zulässiges Gesamtgewicht)	1,34	26	0,05	80
G1 (bis 3,5t zulässiges Gesamtgewicht)	0,78	1,5	0,52	150

Neben der beschleunigten Bereitstellung der Güter nach einer Störung im Zuliefernetzwerk können Unregelmäßigkeiten in der Produktion (z. B. Mehrproduktion durch Transportschäden) zu Schwankungen von Produktion und Lagerbestand bei den Zulieferern in den niedrigeren Hierarchiestufen führen. Dieses, in der Logistik unter dem Namen Bullwhip-Effekt (vgl. Forrester 1961) bekannte Phänomen, kann zu höheren Lager-, Produktions- und Transportkosten führen und damit zusätzliche Vermeidungskosten verursachen.

Einfluss veränderter Transportentfernungen auf die Schadenskosten

Sollte eine Vermeidung des Lieferverzuges nicht möglich sein, kommt es zu einem produktionsausfallbedingten Schaden. Dieser entsteht dadurch, dass geplante Deckungsbeiträge nicht realisiert werden können. Zusätzlich zu diesen entfallenen Deckungsbeiträgen können weitere Effekte durch Reaktionen der Endkunden auftreten: Neben den Verhandlungen über Preisnachlässe durch verzögerte Auslieferungen zählen dazu auch eventuelle Stornierungen der Bestellungen (vgl. Trippner 2006, S. 79f.). Häufig auftretende Lieferverzögerungen können sich negativ auf zukünftige Kaufentscheidungen und den Pkw-Absatz eines Herstellers auswirken (vgl. Trippner 2006, S. 77). Zusätzlich zu den kundenseitigen Auswirkungen reduziert sich für die OEM die Amortisation der Produktionsanlagen durch geringere Kapazitätsauslastungen, und es fallen Kosten für die Pufferlagerung nicht betroffener Module während der Störung an (vgl. Ziegenbein 2007, S. 99). Da die letztgenannten Auswirkungen Analysen der Produktionsanlagen erfordern, welche über den Rahmen dieser Arbeit hinaus gehen, werden im Folgenden nur die Deckungsbeitragsausfälle berücksichtigt.

Auf Basis von Ziegenbein (2007, S. 98) und den oben beschriebenen Erkenntnissen wurde Gleichung 5.24 zur Berechnung des Schadensausmaßes einer Produktionsunterbrechung entwickelt.

$$S\,(t) = \frac{P_d}{t_d} \times t_i \times DB \times \delta\,(t) \times (1 + \gamma(t)) \qquad (5.24)$$

mit

$$\delta\,(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{cr1} \\ m \times \dfrac{t - t_{cr1}}{t_{cr2} - t_{cr1}}, & t_{cr2} > t \geq t_{cr1} \\ m, & t \geq t_{cr2} \end{cases}$$

$$\gamma\,(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{re1} \\ e \times \dfrac{t - t_{re1}}{t_{re2} - t_{re1}}, & t_{re2} > t \geq t_{re1} \\ e, & t \geq t_{re2} \end{cases}$$

S:	*Schadensausmaß*
t_d:	*Tagesproduktionszeit*
t_i:	*Ausfallzeit Produktion*
P_d:	*Tagesproduktion*
DB:	*Deckungsbeitrag pro Fahrzeug*
δ (t):	*Reaktion der Endkunden in Abhängigkeit der Lieferverzögerung*
γ (t):	*Imageverlust in Abhängigkeit der Lieferverzögerung*
m:	*Maximaler Ausfall an Deckungsbeiträgen*
e:	*Maximaler Imageverlust*
t_{cr1}, t_{cr2}:	*Reaktionszeit der Endkunden*
t_{re1}, t_{re2}:	*Zeitraum bis zum Imageverlust*
t:	*Ausfallzeit*

Während der erste Teil der Gleichung den direkten Verlust an Deckungsbeiträgen ausweist, wird dieser im zweiten Teil durch Kundenreaktionen multiplikativ verstärkt. δ(t) steht für die Reaktionsfunktion der Kunden. Diese reagiert bis zu einer Auslieferungsverzögerung bis t_{cr1} nicht, zwischen t_{cr1} und t_{cr2} steigt diese an und erreicht dann ab einer Verzögerung von t_{cr2} ihr Maximum. Ähnliches gilt mit γ (t) für den Imageverlust und die Auswirkungen auf die zukünftigen Deckungsbeiträge.

Tabelle 5-14 stellt die zur Berechnung des Schadensausmaßes benötigten Deckungsbeiträge pro Fahrzeug ausgewählter Produktionswerke dar. Durch Multiplikation mit der stündlichen Produktionsmenge können die spezifischen Deckungsbeiträge pro Zeiteinheit berechnet werden.

Tabelle 5-14: Spezifische Deckungsbeiträge ausgewählter Produktionsstandorte deutscher Automobilhersteller (eigene Berechnungen basierend auf: AUDI AG 2014, S. 31; BMW AG 2014, S. 11; Daimler AG 2013, S. 35; Adam Opel AG 2015 , S. 32; Porsche AG 2014 , S. 86; Volkswagen AG 2013, S. 26 sowie Absatzwirtschaft 2013) [18]

Hersteller	*Produzierte Einheiten an ausgewählten Standorten* *[Pkw]*	*durchschnitlliche Tagesproduktion* *[Pkw/d]*	*Durchnschnitllicher Deckungsbeitrag* *[Euro/Pkw]*	*spezifischer Deckungsbeitrag* *[Euro/h]*
AUDI	594.222 (Ingoldstadt - Jahr 2013)	2.277	3.169	300.621
BMW	247.326 (München - Jahr 2013)	948	3.403	134.363
Daimler	445.861 (Sindelfingen - Jahr 2012)	1.708	2.365	168.337
Opel	107.977 (Rüsselsheim - Jahr 2013)	414	449	11.610
Porsche	29.751 (Zuffenhausen - Jahr 2013)	114	16.461	78.182
Volkswagen	760.024 (Wolfsburg - Jahr 2012)	2.912	605	73.406

Neben dem spezifischen Deckungsbeitrag hat auch die Dauer der Produktionsstörung t_i einen entscheidenden Einfluss auf das Schadensausmaß. Diese hängt von der Ursache des Lieferverzuges ab: Handelt es sich um eine Störung in der Transportkette, so muss ein Ersatztransport organisiert und durchgeführt werden. Ist die Ursache eine Produktionsstörung beim Zulieferer, so hängt die Dauer der Produktionsstörung davon ab, wie schnell diese behoben werden kann. Während bei Störungen mit geringem Komplexitätsgrad die Zulieferer selbst das Problem lösen können, kann eine umfangreiche Störung eine Abstimmung mit Experten des OEM unumgänglich machen (vgl. Klug 2010, S. 78).

18 Annahmen: 261 Arbeitstage pro Jahr, Dreischichtbetrieb, (Opel: Zweischichtbetrieb), acht Stunden pro Schicht.

Bei einer großen Distanz zwischen Zulieferer und OEM wird die Störung in der Produktion des Zulieferers später beim OEM spürbar, allerdings erhöht sich in der Folge die Dauer bis zur Normalisierung der Produktion. Bei leichten Störungen, die durch den Zulieferer selbst gelöst werden können, entsteht die Differenz durch die längere Transportdauer nach Wiederaufnahme der Produktion beim Zulieferer (vgl. Sheffi 2007, S. 65). Werden jedoch durch eine komplexe Störung OEM-Experten vor Ort beim Zulieferer gebraucht, so verlängert sich der Produktionsausfall zusätzlich um die Dauer für die Überbrückung der Strecke zwischen OEM und Zulieferer. Beide Fälle werden in der Gleichung 5.25 dargestellt.

$$t_n(x) = t_{L-Z} + t_p + t_{bel} + x \times \frac{1}{v_{LKW}} + \left(x \times \frac{1}{v_{PKW}} + t_{L-OEM} \right) \qquad (5.25)$$

mit

t_n:	*Zeit bis zur Normalisierung der Produktion*
$t_{L\text{-}Z}$:	*Dauer für Problemidentifikation und ggf. –lösung beim Zulieferer*
t_p:	*Durchlaufzeit pro Modul, Komponente und Teil*
t_{bel}:	*Zeitbedarf Be- und Entladung Transportgefäß*
$t_{L\text{-}OEM}$:	*Dauer für Problemidentifikation und ggf. –lösung durch Experten des OEMs beim Zulieferer*
v_{LKW}:	*durchschnittliche Geschwindigkeit Lkw*
v_{PKW}:	*durchschnittliche Geschwindigkeit Pkw zur Bestimmung der Anfahrzeit*
x:	*Entfernung zwischen Zulieferer und OEM*

Die Dauer bis zur Normalisierung der Produktion weist infolgedessen eine lineare Abhängigkeit von der Transportdistanz auf. Die Steigung dieser Geraden hängt vom Ausmaß der Störung ab. Müssen Experten des OEM zur Problemlösung vor Ort sein, so verläuft die Kurve steiler als ohne den Einsatz von Experten.

Tatsächliche Schadenskosten

Die tatsächlichen Kosten eines Lieferverzuges lassen sich durch die Bildung des Minimums zwischen Vermeidungskosten und Schadensausmaß bestimmen. Es wird unterstellt, dass die Akteure rational handeln und versuchen, die Gesamtkosten zu minimieren. Dies setzt eine umfassende Information über die Kostenstruktur voraus und muss aus diesem Grund nicht zwangsweise in allen Fällen gelten. Unter der Annahme vollkommener Kostentransparenz ergibt sich folgende Gleichung:

$$C_{Schaden} = \min \{S(t), C_V(t)\} \quad (5.26)$$

mit

$C_{Schaden}$:	*Schadenskosten*
S:	*Schadensausmaß*
C_V:	*Vermeidungskosten*

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass Risiken in der Supply-Chain zu den bedeutendsten Geschäftsrisiken im verarbeitenden Gewerbe gehören. Gründe für Lieferverzüge sind einerseits in den Transportrisiken selbst zu suchen, andererseits entstehen diese auch häufig durch eine produktionsstörungsbedingte, verspätete Auslieferung der Zulieferer. Produktionssynchrone Anlieferungen führen dazu, dass sich selbst kurze Verzögerungen direkt auf die Produktion auswirken (vgl. Klug 2010, S. 302). Durch Eilfrachten kann versucht werden, diese Lieferverzögerungen zu vermeiden. Der Wechsel auf Transportmittel mit höherer Transportgeschwindigkeit ist in der Regel kostenintensiver. Besonders bei niedriger Packdichte der Bauteile (Module, komplexere Komponenten) steigen die Kosten für Eilfrachten stark an. In diesen Fällen kann es günstiger sein, Kosten durch den Stillstand der Produktion, das sogenannte Schadensausmaß, in Kauf zu nehmen.

5.2.3.3 Zusammenhang zwischen exogenen und endogenen Steuerungsgrößen im betriebswirtschaftlichen Wirkungsmodell

Analog zu den ökologischen Wirkungen werden auch die betriebswirtschaftlichen Wirkungen endogen durch die Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger Schiene und Binnen-/Seeschiff und der Fahrleistung aus dem Teilmodell NUTZFAHRZEUGFLOTTE beeinflusst. Die Bestandsgrößen und der Ladungsträgerbedarf hängen von den Produktionsstrategien und den Nachfrageschwankungen im Teilmodell BESCHAFFUNG ab. Die Modularisierung im Teilmodell PRODUKTION determiniert die Art der eingesetzten Ladungsträger (Standard- oder Spezialladungsträger).

Exogen werden die Transportkosten überwiegend durch die Personalkosten und die Kombination aus Kraftstoffpreisen und Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge bestimmt. Lager- und Behälterkosten hängen von den Preisentwicklungen für den Betrieb und die Miete von Lagerflächen und den Ladungsträgern ab. Die monetären Wirkungen eines transportrisikobedingten Lieferverzugs wird durch die Unfallraten der Fahrzeuge und

den Deckungsbeiträgen der Hersteller determiniert. Besonders die Kraftstoffkosten könnten, bedingt durch die Unsicherheiten im Rohölmarkt in Zukunft deutlich zunehmen. Bei einem Anstieg des Rohölpreises auf 175 US-Dollar pro Barrel bis zum Jahr 2030 würden beispielsweise die Transportkosten im Vergleich zum Jahr 2014 um etwa 30 % steigen.

5.3 Modellvalidierung und -kalibrierung

Nach der Modellbeschreibung in den letzten Abschnitten bleibt abschließend die Qualität des Modells zu prüfen. Ein Maß zur Beurteilung der Qualität ist die Güte. Die Güte eines Modells wird daran gemessen werden, wie gut dieses in der Lage ist, das reale System abzubilden (vgl. Dahme 2015, S. 20). Messbar wird der Grad der Güte durch Ermittlung der Abweichung zwischen real beobachteten Kennzahlen des Systems und den durch das Modell erzeugten Simulationsergebnissen. Die realen Werte bestehen aus Beobachtungsreihen der Vergangenheit und punktuellen Werten, zu denen nur Beobachtungen des realen Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegen. Beide Werte stellen gleichsam wichtige Bausteine des Kalibrierungs- und Validierungsprozesses dar. Mangelnde Granularität und veränderte Erhebungslogik der Daten schränkt den Kalibrierungszeitraum erheblich ein.

Der Umfang des vorliegenden Modells erfordert – wie bei umfangreichen Modellen üblich (vgl. Schade 2005, S. 150ff.) – eine schrittweise Kalibrierung des Gesamtmodells. Auf Basis der Aufteilung des Gesamtmodells in Teilmodelle wurde aus diesem Grund ein sequenzieller Ablauf der Kalibrierung durchgeführt. Abbildung 5-30 zeigt dieses Ablaufdiagramm mit den jeweiligen Kalibrierungsvariablen der Teilmodelle und den entsprechenden statistischen Quellen für die Kontrollwerte. Da die Ergebnisse der Teilmodelle aufeinander aufbauen, ist die Einhaltung der im Ablaufdiagramm dargestellten Reihenfolge der Kalibrierung obligatorisch.

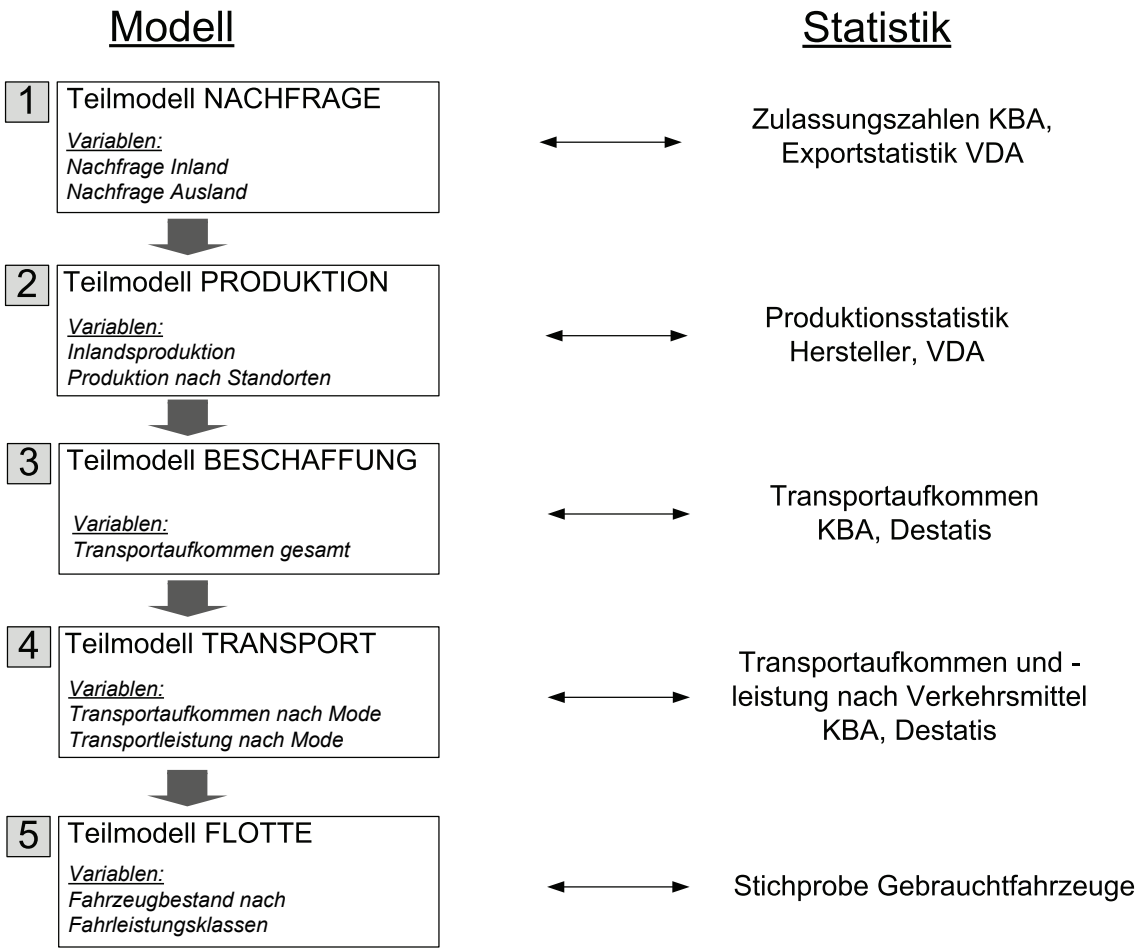


Abbildung 5-30: Ablaufdiagramm der Modellkalibrierung (eigene Darstellung)

Die Schritte 1 und 2 beinhalten die Kalibrierung der Teilmodelle NACHFRAGE und PRODUKTION. Diese bilden gleichzeitig auch das Mengengerüst für sämtliche aufbauenden Berechnungen. Zentrale Kalibrierungsvariablen der beiden Teilmodelle sind neben der Nachfrage nach in Deutschland produzierten Pkw und die damit verbundenen Exportquoten die abgeleiteten Produktionszahlen der Hersteller an den Produktionsstandorten. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 5-31 zu finden. Es zeigt sich, dass der konjunkturell bedingte Einbruch der Nachfrage aus dem Ausland während der Wirtschafts-, Finanz- und Bankenkrise im Jahr 2009 nicht vollständig abgebildet werden kann. Das Modell ist dennoch in der Lage die Entwicklung der Nachfrage und die Exportquote der letzten zehn Jahre in der Tendenz nachzubilden. Der Mittelwert der Abweichungen zwischen simulierten Produktionszahlen und der Produktionsstatistik liegt bei etwa 5 %.

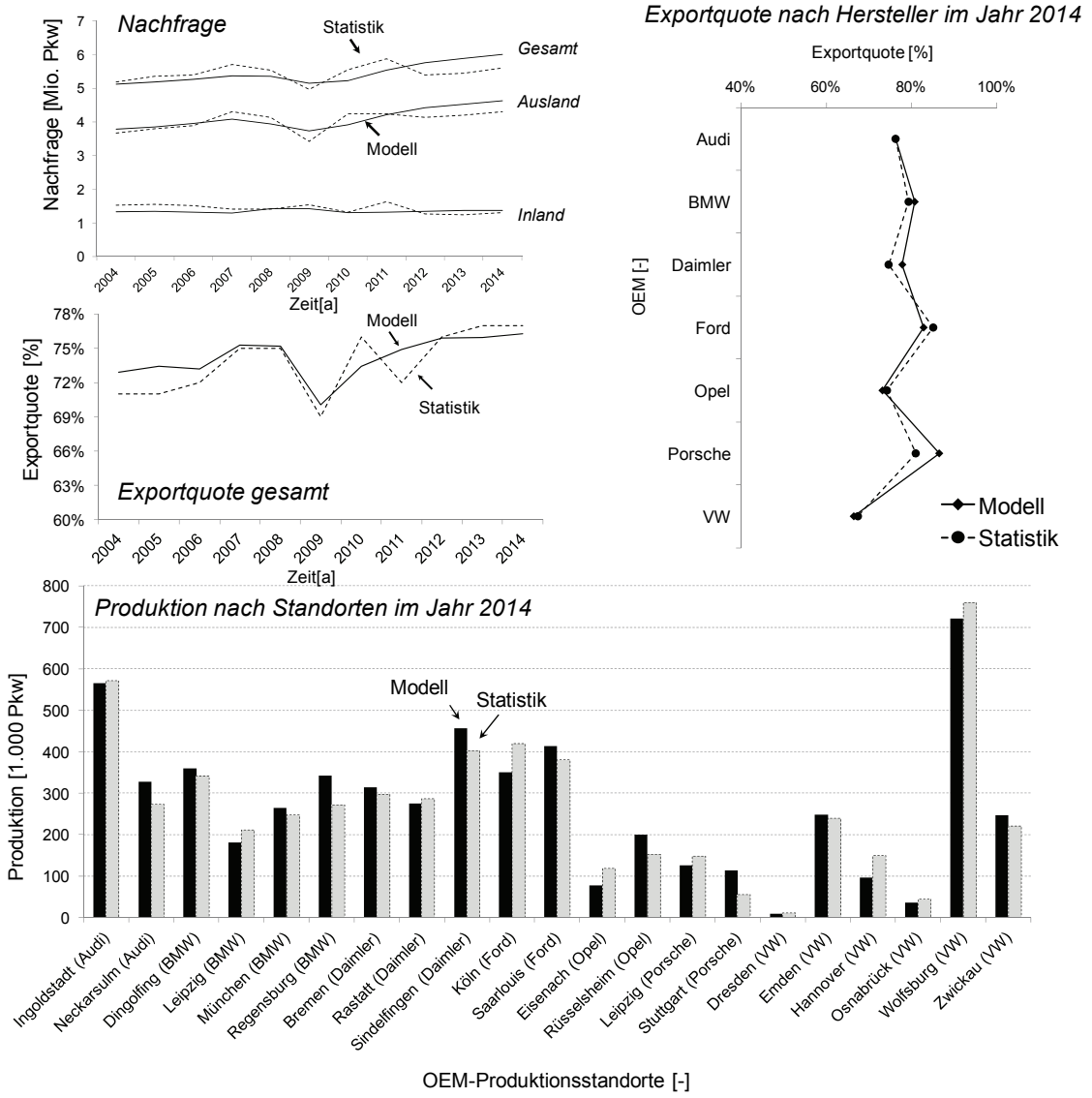


Abbildung 5-31: Modellvalidierung NACHFRAGE und PRODUKTION(eigene Darstellung basierend auf Statistiken von VDA 2015 und Daten aus Abbildung 5-4)

Neben der Produktionsmenge lässt sich das simulierte inländische Transportaufkommen mit statistischen Werten vergleichen. Modellberechnungen für das Transportaufkommen ergeben für das Jahr 2014 etwa 50 Millionen Tonnen. Verglichen mit den Statistiken des Statistischen Bundesamtes für die Güterabteilung „Fahrzeuge“ (NST/R 2007) ergibt sich eine Abweichung von -49 %. In der Statistik sind allerdings auch das Transportaufkommen durch die Produktion von Lkw und Bussen sowie die Ersatzteillieferungen zur Reparatur der in Deutschland zugelassenen Pkw enthalten. Damit ist keine direkte Vergleichbarkeit gegeben. Auch die detailliertere Aufteilung der Abteilung in die Gruppen „Erzeugnisse der Automobilindustrie“ und „Sonstige Fahrzeuge“ ist für den direkten Vergleich mit den Modellergebnissen zu aggregiert.

Eine Auswertung der Angaben des Statistischen Bundesamtes zum Transportaufkommen der Verkehrsträger innerhalb der Güterabteilung „Fahrzeuge“ ergibt für das Jahr 2014 einen Anteil des Straßengüterverkehrs von 86 %. 13 % des gesamten Transportaufkommens werden mit der Eisenbahn transportiert und 1 % entfallen auf das Binnenschiff. Die Modellergebnisse für das Jahr 2014 weichen leicht von der Statistik ab: 14,5 % des Transportaufkommens entfallen auf die Eisenbahn, 81,4 % werden mit Lkw transportiert und der Anteil des Binnenschiffs beträgt 4,1 %. Analog zu den absoluten Angaben sind auch hier die Lkw- und Busproduktion sowie der Ersatzteilmarkt zusätzlich zur Automobilproduktion in den Statistiken berücksichtigt.

Neben Statistiken zu Transportaufkommen und der Anteil der Verkehrsträger lassen sich auch Einzelergebnisse im Subsystem Nutzfahrzeugflotte durch empirische Datenerhebungen validieren. Der Median der Jahresfahrleistung der Sattelzugmaschinen beträgt bei Modellsimulation im Jahr 2015 etwa 132.000 km/Jahr. Im Vergleich dazu ergab die Verteilung der Jahresfahrleistungen einer Stichprobe gebrauchter Sattelzugmaschinen einen Median von etwa 99.000 km/Jahr (siehe Anhang A 3.1). Diese enthält allerdings nur deutsche Sattelzugmaschinen.

Der im Modell berechnete Fahrzeugbedarf beinhaltet auch Fahrzeuge für den Verkehr zwischen Deutschland und dem Rest Europas. Dies müssen nicht zwangsweise in Deutschland zugelassene Sattelzugmaschinen sein. Zudem lässt sich bei Betrachtung einer Sattelzugmaschine ohne Sattelanhänger keine Rückschlüsse auf die Einsatzart ziehen. Sattelzüge, die zum Transport von Steine und Erden eingesetzt werden, weisen aufgrund der durchschnittlichen Transportweite von etwa 79 km (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2012, S. 35) deutlich geringere Jahresfahrleistungen auf, als die in der Transportlogistik der Automobilindustrie eingesetzten Fahrzeuge.

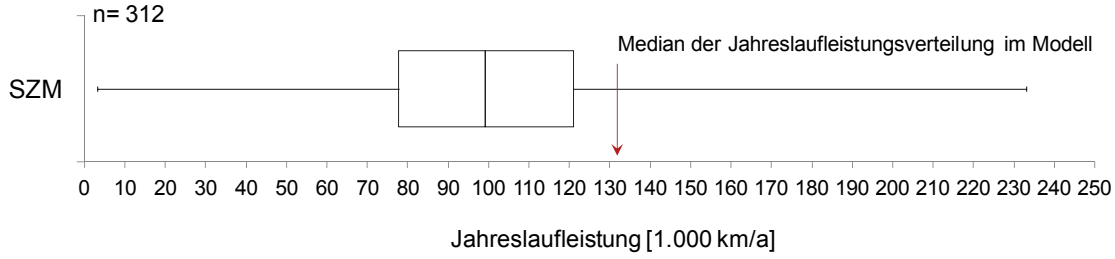


Abbildung 5-32: Boxplot der Jahresfahrleistungsverteilung einer Stichprobe von Gebrauchtfahrzeugen (Sattelzugmaschinen) und Median der Jahresfahrleistungsverteilung im Modell (eigene Darstellung basierend auf Anhang A3.1 und Modellergebnisse für das Jahr 2015)

Das Modell liefert Ergebnisse zu Produktionsmengen an den Produktionsstandorten der OEM mit geringen Abweichungen zu verfügbaren Statistiken. Die Ergebnisse zu Transportaufkommen und Anteile der Verkehrsträger sowie die Fahrleistung der

Nutzfahrzeuge weichen allerdings deutlich von verfügbaren empirischen Daten ab. Inwieweit diese Abweichungen die Güte des Modells beeinflussen, lässt sich nur schwer abschätzen, da die Abgrenzungen der Grundgesamtheit und Erhebungsmethode der Statistiken zum Teil nicht mit den Annahmen und Abgrenzungen im Modell übereinstimmen.

6 Erkenntnisse über das Systemverhalten zur Definition von Regionalisierungsszenarien

Gute Kenntnisse über das Verhalten und die Struktur eines Systems sind eine Voraussetzung, um Szenarien als „schlüssige Bilder möglicher Zukünfte“ (Springer Gabler Verlag 2015b) zu entwickeln. Daher werden in diesem Kapitel zunächst transportentfernungsunabhängige Zustandsgrößen analysiert, die das Systemverhalten bis zum Betrachtungshorizont im Jahr 2030 bestimmen. Zu diesen Zustandsgrößen zählen, neben dem Transportaufkommen in der Beschaffungslogistik, die Fahrleistungsintensität sowie die spezifischen Transportkosten und CO_2-Emissionen.

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Transportaufkommens in der Beschaffungslogistik regional nach den OEM-Produktionsstandorten differenziert betrachtet. Darüber hinaus liefert die Analyse des Systemverhaltens Erkenntnisse über die Heterogenität der Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe hinsichtlich ihrer Fahrleistungsintensität und dem Transportaufkommen. Daraus lassen sich Vermutungen über die Stärke ökologischer und betriebswirtschaftlicher Wirkungen von Transportentfernungsreduktionen in den Zulieferstufen Tier-1 bis Tier-n und bei verschiedenen Arten von Modulen, Komponenten, Teilen und Rohstoffen ableiten. Diese Informationen dienen als Basis, um schlüssige Regionalisierungsszenarien zu entwickeln.

6.1 Entwicklung des Transportaufkommens in der Beschaffungslogistik bis zum Jahr 2030

Das Transportaufkommen in der Automobillogistik wird durch die Produktionsmengen beeinflusst. Die eingegangenen Bestellungen bei den OEM bestimmen sowohl die Anzahl der produzierten Pkw-Einheiten als auch die Produktionsmenge im Beschaffungsnetzwerk. Durch Multiplikation mit den jeweiligen Massen lässt sich daraus das Transportaufkommen in den Zulieferstufen der Beschaffungslogistik und in der Distributionslogistik ableiten.

6.1.1 Entwicklung der Pkw-Produktion an deutschen Standorten

Die Nachfrage nach Neuwagen in den weltweiten Märkten, übernommen aus den beiden Modellen ASTRA und GLOMO, beeinflusst die Nachfrage nach in Deutschland produzierten Pkw je Marke und Segment (vgl. Wirkungsgraph des Subsystems NACHFRAGE). Daraus ergibt sich für die deutschen Produktionsstandorte der in Abbildung 6-1 dargestellte Verlauf der kumulierten jährlichen Produktionsmenge bis zum Jahr 2030.

Die wachsende weltweite Nachfrage führt unter der Annahme, dass der Anteil der deutschen Hersteller an den weltweiten Neuzulassungen unverändert bleibt, zu einem Anstieg der in Deutschland produzierten Pkw um etwa 12,6 % zwischen den Jahren 2014 und 2030. Absolut gesehen bedeutet dies ein Wachstum von etwa 5,7 Millionen produzierten Pkw im Jahr 2014 auf etwa 6,4 Millionen produzierten Pkw im Jahr 2030. Knapp 80 % dieser absoluten Produktionssteigerung von 0,7 Millionen Pkw entfallen auf den Zeitraum zwischen den Jahren 2014 und 2022. Danach fallen die Steigerungsraten deutlich geringer aus. Erklären lässt sich dieser Verlauf durch die als Input verwendeten Nachfragesimulationen der Modelle ASTRA und GLOMO, die etwa ab dem Jahr 2022 eine Stagnation der Nachfrage auf dem europäischen Markt und eine Abschwächung des Nachfragewachstums auf den weltweiten Märkten beinhalten. In beiden Modellen wird die Nachfrage durch die Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung beeinflusst (vgl. Krail 2009, S. 42 und Schade et al. 2014, S. 166). In Europa wird nach dem Jahr 2022 in den Modellen von einem leichten Bevölkerungsrückgang und einem unterdurchschnittlichen Wirtschaftswachstum ausgegangen. Weltweit schwächen sich in GLOMO ab dem Jahr 2022 sowohl das Wirtschafts- als auch das Bevölkerungswachstum ab (vgl. Schade et al. 2014, S. 170).

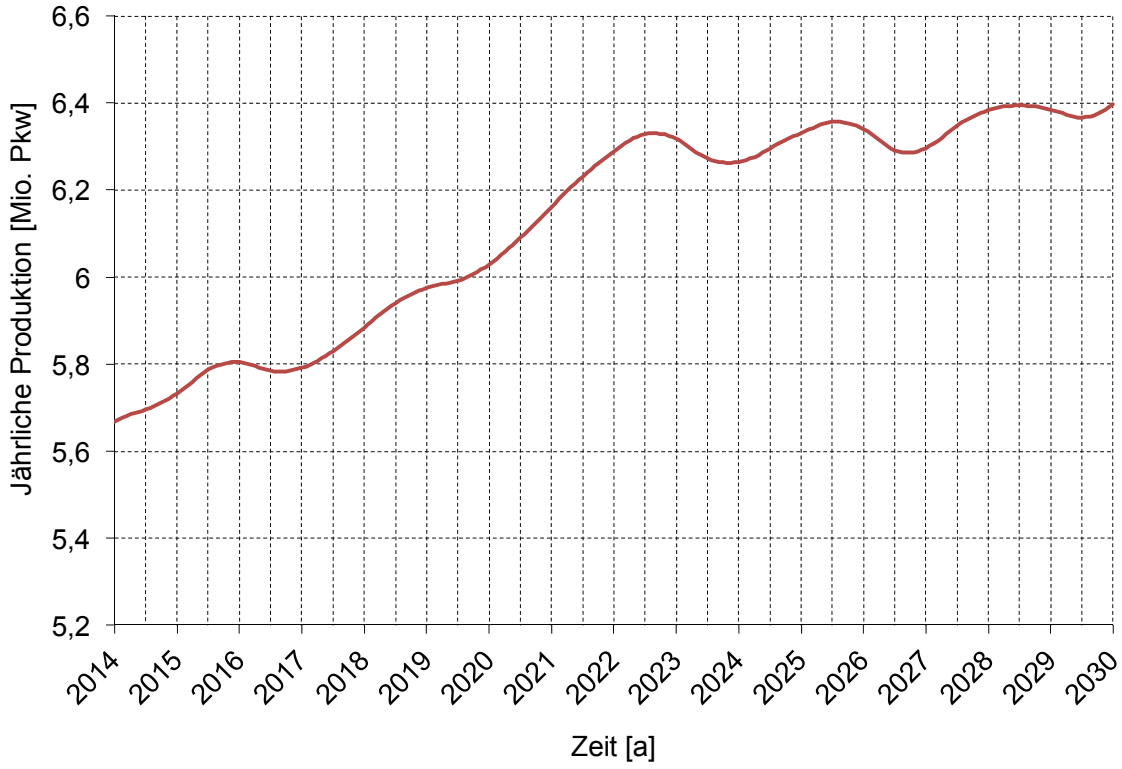


Abbildung 6-1: Entwicklung der kumulierten jährlichen Pkw-Produktion aller deutschen Produktionsstandorte (Modellergebnisse)

Auf Basis der Spezialisierung der OEM-Produktionsstandorte auf Marken und Segmente (vgl. Abbildung 5-4) können aus der gesamten Anzahl in Deutschland produzierter Pkw die Produktionsmengen für einzelne Standorte abgeleitet werden. Das Ergebnis ist in Tabelle 6-1 dargestellt. Mit der Spezialisierung der OEM-Produktionsstandorte auf Segmente und Marken variiert die Steigerung der Produktion zwischen den Standorten. Der Anstieg der Nachfrage auf den weltweiten Märkten nach Fahrzeugen der „Oberklasse“ führt an den entsprechenden Produktionsstandorten (Audi in Neckarsulm, BMW in Dingolfing, Daimler in Sindelfingen, Porsche in Stuttgart und Leipzig sowie Volkswagen in Dresden) zu überdurchschnittlichen Produktionssteigerungen von etwa 17 % bis 24 %.

Tabelle 6-1: Produktionsmenge der OEM-Produktionsstandorte (Modellergebnisse für das Jahr 2014 und 2030)

OEM-Produktionsstandorte	*Produktion 2014*	*Exportquote 2014*	*Produktion 2030*	*Exportquote 2030*	*Steigerung der Produktion zwischen 2014 und 2030*
	[Pkw/a]	*[%]*	*[Pkw/a]*	*[%]*	*[%]*
Ingoldstadt (Audi)	562.971	73,4%	616.764	76,1%	10%
Neckarsulm (Audi)	328.633	79,1%	407.541	82,9%	24%
Dingolfing (BMW)	361.416	80,7%	440.919	83,9%	22%
Leipzig (BMW)	179.374	85,8%	195.269	87,3%	9%
München (BMW)	263.574	77,1%	290.622	78,9%	10%
Regensburg (BMW)	340.449	79,1%	374.308	80,8%	10%
Bremen (Daimler)	313.854	73,5%	348.631	75,9%	11%
Rastatt (Daimler)	272.626	74,2%	296.916	76,9%	9%
Sindelfingen (Daimler)	459.303	78,2%	548.511	81,3%	19%
Köln (Ford)	343.605	81,3%	356.003	83,2%	4%
Saarlouis (Ford)	407.312	82,6%	433.426	84,3%	6%
Eisenach (Opel)	76.972	64,0%	77.639	67,4%	1%
Rüsselsheim (Opel)	197.249	75,2%	207.858	77,4%	5%
Leipzig (Porsche)	126.091	82,4%	147.778	84,8%	17%
Stuttgart (Porsche)	114.468	90,7%	136.283	91,9%	19%
Dresden (VW)	9.230	99,6%	14.423	99,7%	56%
Emden (VW)	248.491	81,2%	287.505	83,7%	16%
Hannover (VW)	106.427	8,6%	109.445	13,0%	3%
Osnabrück (VW)	34.904	60,1%	36.440	63,5%	4%
Wolfsburg (VW)	713.995	67,3%	829.962	73,0%	16%
Zwickau (VW)	246.111	69,2%	268.975	72,8%	9%
Summe	5.707.053		6.425.216		12,6%

Produktionsstandorte, an denen Marken produziert werden, deren Markenattraktivität im Ausland gering ist, weisen Wachstumsraten auf, die deutlich unter 10 % liegen. Für Marken mit einer starken Fokussierung auf den stagnierenden europäischen Markt, wie Ford und Opel, liegen die Wachstumsraten unter 7 %. Für alle Produktionsstandorte gilt, dass die Exportquote durch die Stagnation des deutschen Marktes bei gleichzeitigem Wachstum weltweiter Absatzmärkte zunimmt.

6.1.2 Entwicklung der Produktionsmenge im Beschaffungsnetzwerk

Zur Ableitung der Produktionsmenge der Zulieferer werden die zu produzierenden Pkw in Module, Komponenten, Einzelteile und Rohstoffe zerlegt. Aus Gründen der einheitlichen Darstellung werden im weiteren Verlauf der Arbeit alle Komponenten, Einzelteile und Rohstoffe, die zur Produktion eines Moduls benötigt werden, zu Modul-Äquivalenten zusammengefasst. In Abbildung 6-2 ist dieser Zusammenhang bildlich dargestellt.

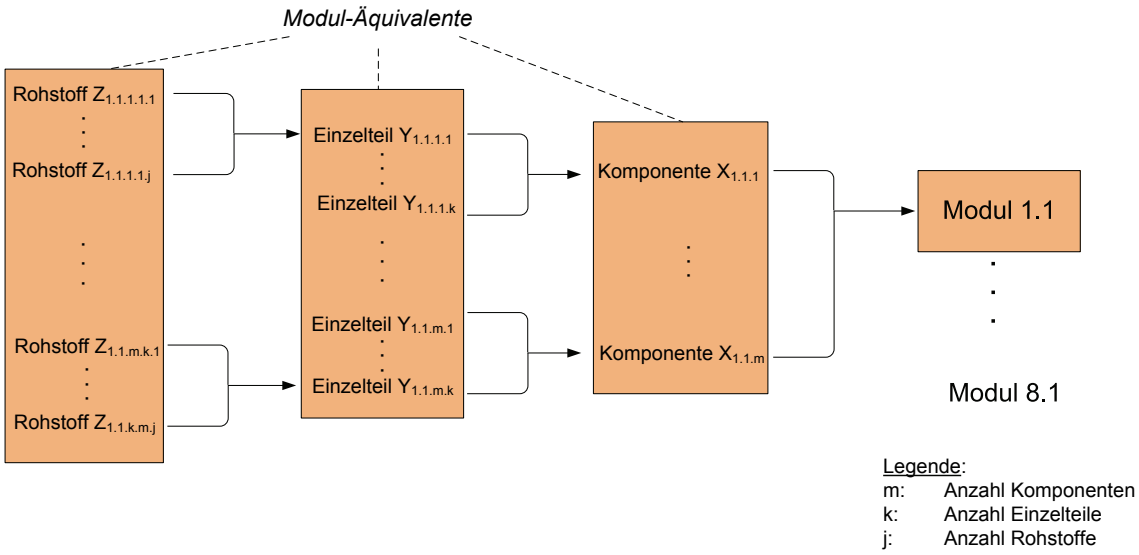


Abbildung 6-2: Zusammenhang zwischen Modulen und Modul-Äquivalenten (eigene Darstellung)

Aus dem in Tabelle 6-1 dargestellten Produktionsvolumen der OEM in Pkw lässt sich die Produktionsmenge in Modul-Äquivalenten in den Zulieferstufen der Beschaffungslogistik bestimmen.

Die in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Produktionsstrategien in den Zulieferstufen bestimmen den Verlauf und der Höhe der Produktionsmenge: Durch die BTO-Produktions-

strategie der Tier-1-Zulieferer folgt die Anzahl der produzierten Einheiten exakt der Produktionsmenge der OEM und damit der Nachfrage nach Pkw. Das Erreichen des Order-Penetration-Punktes und der damit einhergehende Wechsel von der BTO- zur BTF-Produktionsstrategie zwischen der Tier-1- und Tier-2-Zulieferstufe führt zu einem volatileren Verlauf der Produktionsmenge. Die Volatilität nimmt mit steigendem Rang der Zulieferstufe zu. Dieses unter dem Begriff Bullwhip-Effekt (vgl. Arnold et al. 2008, S. 29ff.) bekannte peitschenartige Aufschaukeln der Produktionsentwicklung wurde bereits in den 1960er Jahren durch Jay W. Forrester (vgl. Forrester 1961, S. 26f.) beschrieben und kann als typisches, oszillierendes Verhalten eines komplexen Systems bezeichnet werden. Die Gründe für diese immer stärker werdende Abweichung zwischen Soll- und Ist-Produktionsmenge liegen darin, dass innerhalb der BTF-Produktionsstrategie die zu produzierende Menge anhand der Vorperiodenproduktion, der Steigerungsraten vergangener Perioden sowie dem Bestand zum Zeitpunkt t bestimmt wird. Während eine konstante Wachstumsrate der Nachfrage nach Pkw über mehrere Zeitperioden zu einer geringen Volatilität führt, erhöhen schwankende Wachstumsraten die Differenz zwischen Produktionsoutput und Nachfrage der rangniedrigeren Zulieferstufen. Basierend auf der Gesamtproduktion der OEM zeigt Abbildung 6-3 die Simulationsergebnisse für die Entwicklung der Produktionsmenge.

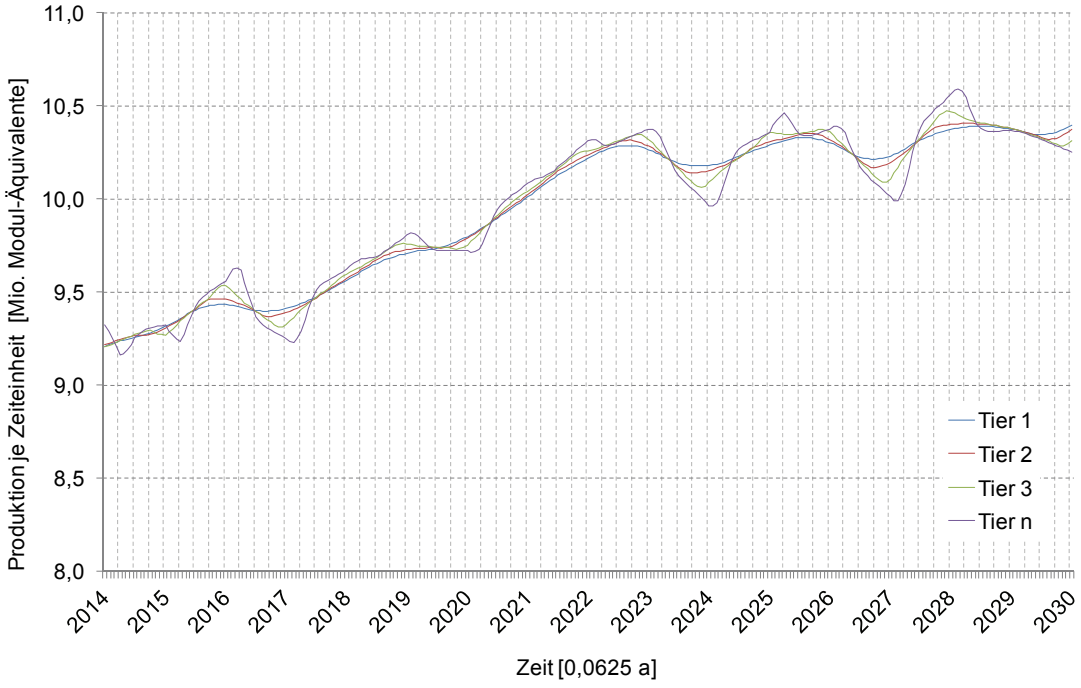


Abbildung 6-3: Entwicklung der Produktionsmengen in den Zulieferstufen der Beschaffungslogistik (Modellergebnisse)

Analog zur Entwicklung der Produktionsmenge variiert die Höhe der Bestände: Hohe Abweichungen zwischen produzierter Menge und Nachfrage in der Periode t führen je nach Vorzeichen zu überhöhten oder verminderten Bestandsmengen in der Periode t+1. Unter Verwendung eines Sicherheitsbestands mit der Reichweite einer Tagesproduktion (das entspricht etwa 5 % der monatlichen Produktionsmenge) ergeben sich für die Zulieferstufen die in Abbildung 6-4 dargestellten zeitlichen Entwicklungen der Sicherheitsbestände. Für die Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n gilt: Je niedriger die Hierarchie der Zulieferstufe, desto stärker die Volatilität der Bestände. Die BTO-Produktionsstrategie in der Tier-1-Zulieferstufe erfordert keinen Aufbau von Sicherheitsbeständen.

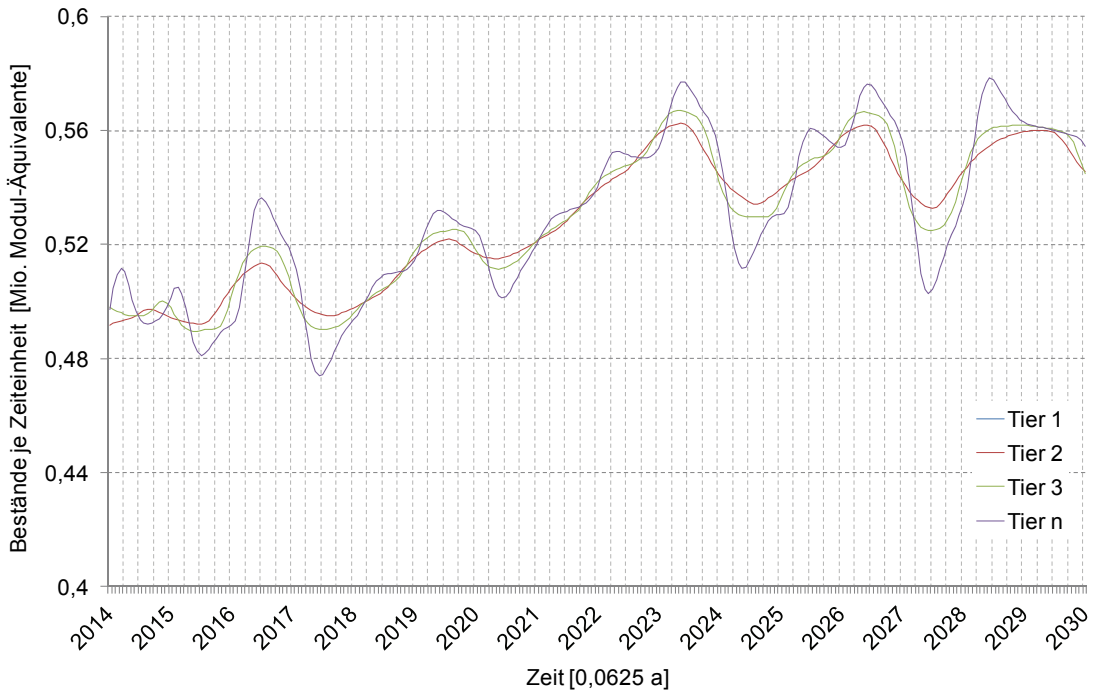


Abbildung 6-4: Sicherheitsbestandsentwicklung in den Zulieferstufen der Beschaffungslogistik (Modellergebnisse)

6.1.3 Entwicklung des Transportaufkommens in der Beschaffungslogistik

Das Transportaufkommen wird statistisch in der physischen Maßeinheit Tonnen erfasst. Die Überführung der ermittelten Produktionsmenge der OEM in Fahrzeugen (vgl. Tabelle 6-1) und das daraus abgeleitete Aufkommen in Modul-Äquivalenten in diese Maßeinheit erfolgt auf Basis eines durchschnittlichen Pkw-Gewichtes von 1.400 Kilogramm und den Anteilen der Modul-Äquivalente am Gesamtgewicht (vgl. Abbildung 5-7). Zusammen mit den in Anhang A1.5 dargestellten Zuladungskapazitä-

ten und Massen der Ladungsträger ergeben sich die Massen und die Anzahl der Ladeeinheiten.

In Abbildung 6-5 ist das Ergebnis der Multiplikation der Anzahl Ladeeinheiten mit der Masse der Module und Ladungsträger (vgl. Anhang A1.5) aus Kapitel 5.1.2 für die Zulieferstufen dargestellt. In Summe über alle vier Zulieferstufen steigt das Transportaufkommen in der Beschaffungslogistik bedingt durch die steigende Nachfrage zwischen den Jahren 2014 und 2030 um etwa 12,6 % von 67,6 Millionen Tonnen auf 75,8 Millionen Tonnen (vgl. Abbildung 6-5 – Summe der Werte in den Zulieferstufen Tier-1 bis Tier-n). Dieser Anstieg entspricht dem in Abbildung 6-1 dargestellten Anstieg der Produktionsmenge in Pkw. Das Produkt aus dem mittleren Fahrzeuggewicht von etwa 1.400 Kilogramm mit der Anzahl der produzierten Pkw ergibt in der Distribution im Jahr 2030 ein Transportaufkommen von etwa 9 Millionen Tonnen. Dieser Wert ist bereits um die Anzahl der Fahrzeuge, die von den Kunden selbst im Werk abgeholt werden, reduziert. Somit sind etwa 90 % des gesamten Transportaufkommens der Beschaffungslogistik zuzuordnen. Die restlichen 10 % entfallen auf die Distributionslogistik.

Das Transportaufkommen in der Beschaffungslogistik wird maßgeblich durch den Einsatz von Ladungsträgern beeinflusst: Unter der Annahme, dass in den Zulieferstufen Tier-n und Tier-3 Standardladungsträger eingesetzt werden, ergibt sich die Zuladungskapazität der Ladungsträger aus der maximalen Tragkraft. Diese beträgt bei Paletten mit einem Eigengewicht von 22 Kilogramm etwa 1.500 Kilogramm. Bei einer vollen Auslastung der Tragkraft ergibt sich so ein minimaler Anteil des Ladungsträgers am Gewicht der Ladeeinheit von etwa 1,4 %. Bei der schwereren Gitterbox in der Tier-3-Zulieferstufe steigt dieser Anteil auf etwa 6 %. Mit dem Einsatz von Spezialladungsträgern sinkt die Zuladungskapazität. So ergibt sich beispielsweise für den Ladungsträger zum Transport eines Cockpits mit einem Eigengewicht von 225 Kilogramm und eine Zuladungskapazität von etwa 22 Kilogramm (vgl. Anhang A1.5) ein Anteil des Ladungsträgers am Gewicht der Ladeeinheit von über 90 %. Auf Basis dieser Berechnungen lässt sich den Ladungsträgern im Tier-2-Zuliefernetzwerk durchschnittlich etwa 24 % und im Tier-1-Zuliefernetzwerk etwa 75 % des Transportaufkommens zuordnen. Im Gegensatz zu den eigentlichen Transportgütern (Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe) müssen die Ladungsträger nach dem Transport von der Quelle zur Senke wieder zurück zur Quelle transportiert werden. Somit gehen die Massen der Ladungsträger doppelt in die Berechnung des Transportaufkommens ein.

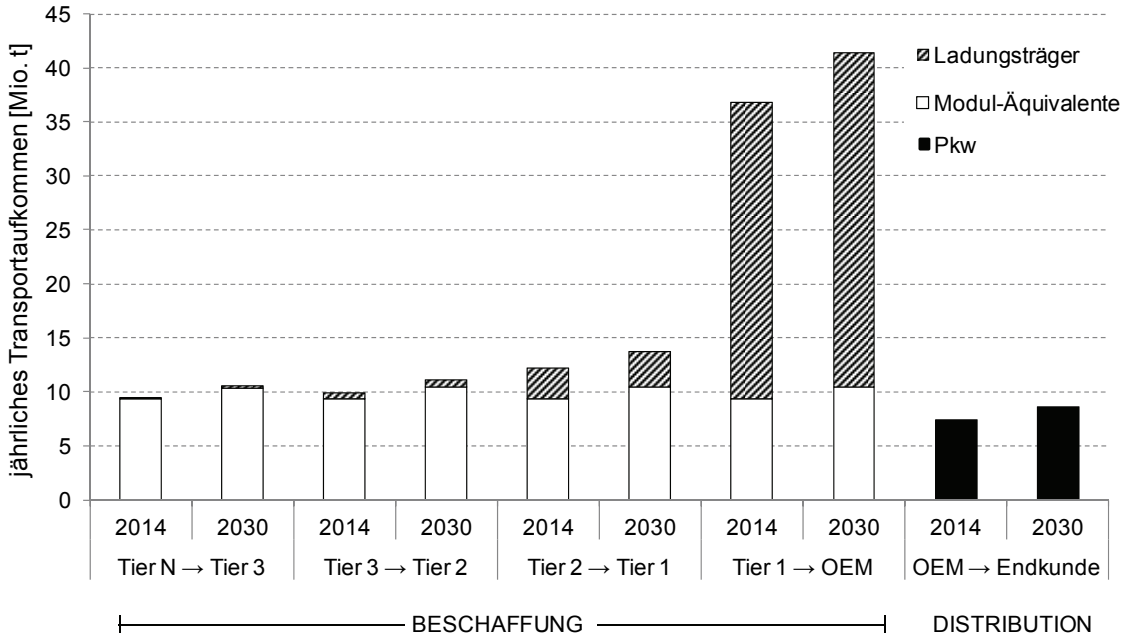


Abbildung 6-5: Jährliches Transportaufkommen im Jahr 2014 und 2030 (Modellergebnisse)

6.2 Fahrleistungsintensität und Verkehrsmenge in der Beschaffungslogistik

Die in dieser Arbeit betrachteten ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen des Transports werden durch die Verkehrsmenge bestimmt (vgl. Flämig 2015b, S. 35). Die Verkehrsmenge in Fahrzeugkilometer ergibt sich aus der Division des Transportaufkommens durch die Nutzlast der Transportgefäße. Bedingt durch den Einsatz unterschiedlicher Ladungsträger zum Transport der Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe ergeben sich abweichende Auslastungen der Nutzlast. Die Auslastung leitet sich ab aus der ganzzahligen Division von Ladevolumen bzw. Nutzlast der Nutzfahrzeuge und dem Volumen bzw. dem Gewicht der Ladeeinheiten (vgl. Unterkapitel 5.1.4.2). Mit steigendem Volumen der Ladungsträger und sinkender Zuladungskapazität geht die Auslastung der Nutzlast zurück. In Abbildung 6-6 sind die Modellergebnisse für die maximal mögliche Auslastung der Nutzlast eines Sattelzuges mit einer Nutzlast von 27 Tonnen in den Zulieferstufen Tier-1 und Tier-2 dargestellt. Die Ergebnisse variieren in der Tier-1-Zulieferstufe stärker als beim Transport von Komponenten. Großvolumige Module wie beispielsweise die Karosserie, der Kraftstofftank oder die Achsen führen zu einer Auslastung der Nutzlast von nur etwa 20 %. Im Gegensatz dazu kann durch eine hohe Packdichte beim Transport von Antriebswellen eine Auslastung der Nutzlast von über 90 % erreicht werden. Die im Durchschnitt höhere mögliche Packdichte beim Transport von Komponenten führt dazu, dass in der Tier-2-Zulieferstufe die Nutzlast bei jedem Modul-Äquivalent stärker ausgelastet werden kann.

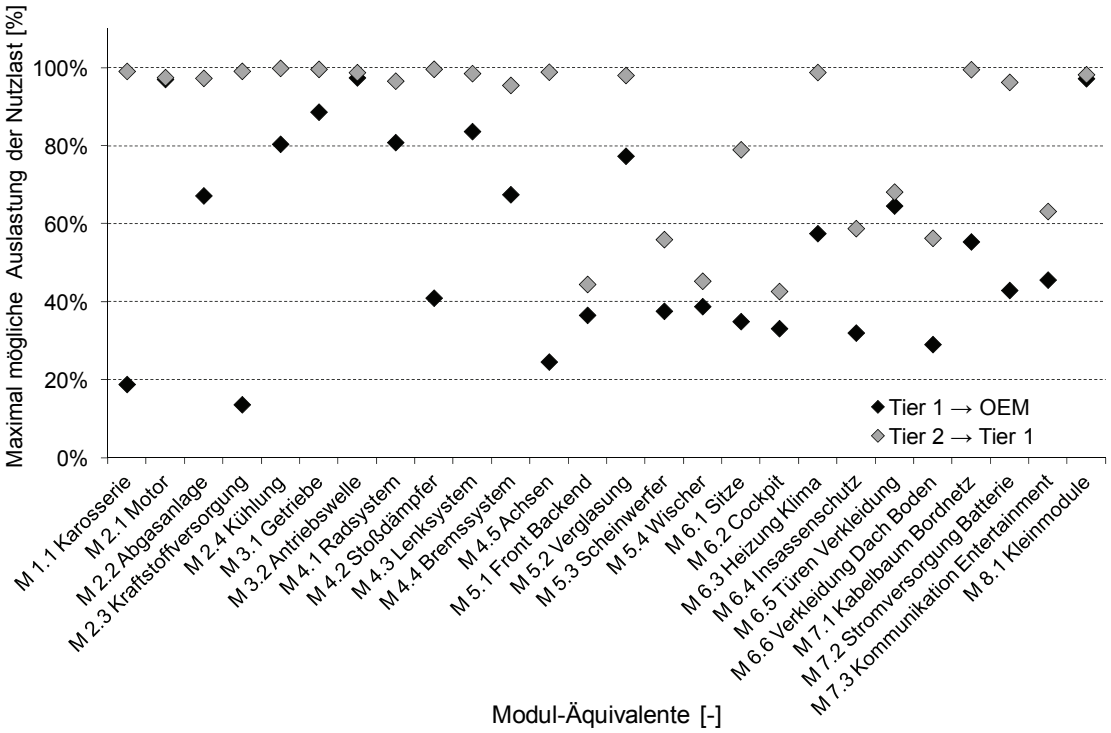


Abbildung 6-6: Maximale Auslastung der Nutzlast beim Transport von Modulen und Komponenten am Beispiel des Sattelzuges (Modellergebnisse)

Aus diesen Ergebnissen lassen sich die in Abbildung 6-7 dargestellten Auslastungen der Nutzlast aggregiert für die vier Zulieferstufen ableiten. In den Zulieferstufen Tier-1 und Tier-2 ergibt sich durch den Einsatz von großvolumigen Spezialladungsträgern und deutlichen Unterschieden bei den Moduleigenschaften (z. B. Volumen, Masse) eine etwa zwei bis zweieinhalbfach höhere Standardabweichung der gewichtsmäßigen Auslastung als bei Transporten in der Tier-3-Zulieferstufe. Der Median der Nutzlastauslastung beträgt in der Tier-1-Zulieferstufe 50 %, in der Tier-2-Zulieferstufe 97 % und in den Zulieferstufen der Ränge 3 und n jeweils 99 %.

Geringe Massedichten der Ladeeinheiten führen zwar zu einer Auslastung des Transportvolumens der Transportgefäße, die mögliche Nutzlast der Fahrzeuge wird hingegen nicht voll ausgeschöpft. Abbildung 6-6 zeigt, dass in der Tier-1-Zulieferstufe lediglich bei Transporten von Antriebswellen, Getrieben und Kleinmodulen die Nutzlast nahezu voll ausgelastet wird. Umgekehrt bedeutet dies, dass etwa 90 % aller Transporte in der ersten Zulieferstufe durch das Volumen und nicht durch die Nutzlast der Transportgefäße beschränkt sind. Bei Komponenten steigt der Anteil der gewichtsbeschränkten Transporte auf 58 %. In der Tier-3- und Tier-n-Zulieferstufe erreichen hingegen 85 % bzw. 100 % der Transporte die Nutzlastbegrenzung.

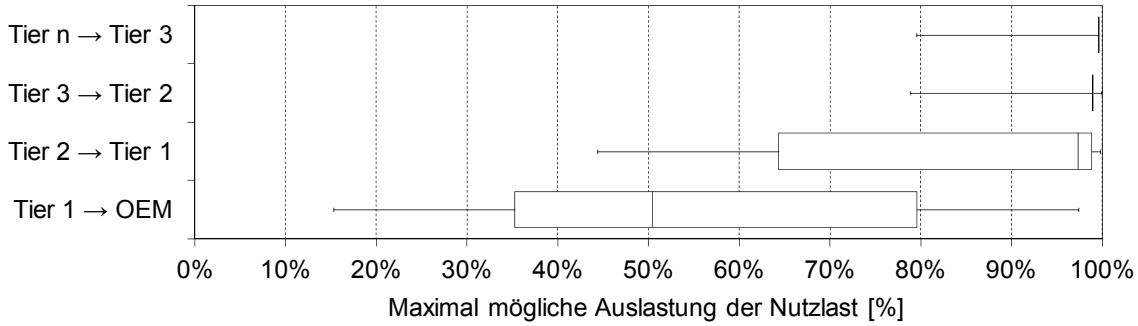


Abbildung 6-7: Maximale Auslastung der Nutzlast in den Zulieferstufen am Beispiel des Sattelzuges (Modellergebnisse)

Auf Basis der unterschiedlichen Auslastungen der Nutzlast der Transportgefäße lässt sich die durch den Transport der Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe entstehende Verkehrsmenge ableiten. Eine geringe Auslastung der Nutzlast führt zu einer hohen Verkehrsmenge. Ein Maß zur Beschreibung der Verkehrsmenge ist die Fahrleistung der eingesetzten Transportgefäße (Lkw). Dabei gilt: Je höher die Fahrleistung, desto höher die Verkehrsmenge. Um die Zulieferstufen hinsichtlich der erzeugten Verkehrsmenge vergleichen zu können, wird für diese Arbeit die Kennzahl „Fahrleistungsintensität“ definiert: Die Ratio zwischen der Fahrleistung der Transportgefäße (Lkw) und der Güterbeförderungsleistung gibt die Anzahl der Fahrzeugkilometer an, die durch den Transport eines Moduls oder einer Tonne über die Entfernung eines Kilometers entstehen (vgl. Gleichung 4.1 in Kapitel 4.2.4).

In Abbildung 6-8 sind die Fahrleistungsintensitäten in Bezug auf die Güterbeförderungsleistung in Tonnenkilometer mit und ohne Einbezug der Ladungsträger sowie in Bezug auf die Güterbeförderungsleistung in Modulkilometer dargestellt. Bei Vergleich der ersten beiden Derivate wird der Einfluss des Ladungsträgergewichtes deutlich: Eine Reihe von Modulen mit geringen Dichten (z. B. Karosserie, Sitze, Front- und Backend, Cockpit) werden in schweren Ladungsträgern transportiert. Bezogen auf die eigentliche Modulmasse führt der Transport dieser Module zu einer entsprechend hohen Fahrleistungsintensität. Durch Bezug auf die Güterbeförderungsleistung in Modulkilometer (Produkt aus der Anzahl der Module und der Transportdistanz) lässt sich die Fahrleistungsintensität um diesen Effekt bereinigen.

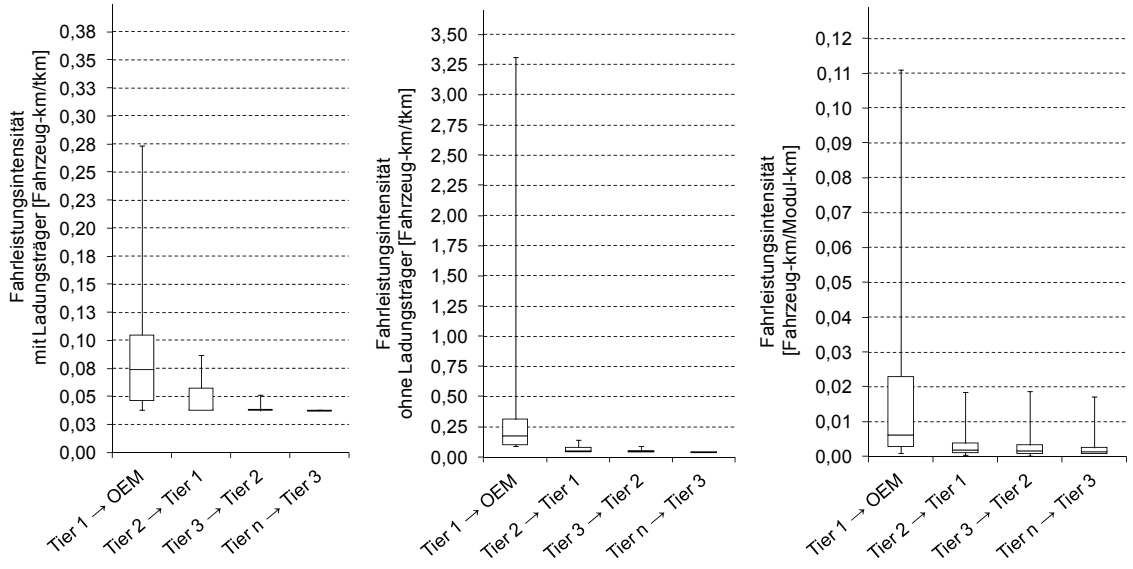


Abbildung 6-8: Fahrleistungsintensitäten in den Zulieferstufen (Modellergebnisse)

Bei allen drei Berechnungsvarianten der Fahrleistungsintensität ist die Standardabweichung ($\sigma_{Tier\text{-}1}$) in der Tier-1-Zulieferstufe mindestens dreimal so hoch wie in den Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n. Der Median der Fahrleistungsintensität beim Transport von Modulen liegt im Mittel etwa zweieinhalbmal höher als in den vorgelagerten Zulieferstufen. Der Transport von Modulen ist im Mittel doppelt so fahrleistungsintensiv wie Transporte in der Tier-2-Zulieferstufe. Im Vergleich zu den homogenen Ergebnissen in den Zulieferstufen Tier-2 ($\sigma_{Tier\text{-}2}$ =0,0036 Fzg.-km / Modul-Äq.-km) bis Tier-n ($\sigma_{Tier\text{-}n}$= 0,0033 Fzg.-km / Modul-km) weisen die Ergebnisse in der Tier-1-Zulieferstufe bezogen auf die 26 betrachteten Module eine stärkere Streuung ($\sigma_{Tier\text{-}1}$ =0,023 Fzg.-km / Modul-km) auf. Im Mittel (Median) entstehen so in der Tier-1-Zulieferstufe aus einem Modulkilometer 0,0062 Fahrzeugkilometer. Der Transport des Moduls „Karosserie“ ist bedingt durch das große Volumen mit Abstand am fahrleistungsintensivsten. Mit einem Sattelzug lassen sich im Mittel nur neun Karosserien transportieren. Dies führt zu einer Fahrleistungsintensität von 0,11 Fahrzeugkilometer pro Modulkilometer und erklärt die positiven Ausreiser in Abbildung 6-8.

Mittels der berechneten Fahrleistungsintensitäten lässt sich die Anzahl der täglichen Lkw-Anlieferungen an den entsprechenden OEM-Produktionsstandorten ableiten (vgl. Abbildung 6-9). Analog zur steigenden Produktionsmenge wächst die Anzahl der täglichen Lkw-Anlieferungen. Dies betrifft in erster Linie die Produktionsstandorte Dingolfing, Neckarsulm und Sindelfingen mit einem hohen Anteil der Produktion im Oberklasse-Segment, da die Nachfrage nach in Deutschland produzierten Pkw der Oberklasse bis zum Jahr 2030 überdurchschnittlich wächst (vgl. Schade et al. 2014,

S. 172ff.). Die relativen Steigerungsraten der übrigen Produktionsstandorte fallen geringer aus (vgl. Tabelle 6-1). Insgesamt variiert die simulierte Anzahl der täglichen Lkw-Anlieferungen zwischen den Standorten: Während große Produktionsstandorte wie Wolfsburg oder Ingolstadt täglich durch knapp 800 bis 1.000 Lkw-Transporte erreicht werden, kommt es im Zulauf zur Volkswagen Manufaktur in Dresden zu etwa 20 Lkw-Transporten täglich. Somit schwanken auch die durchschnittlichen Anliefersequenzen bei einem Zwei-Schicht-Betrieb (16 Stunden) zwischen 0,99 Lkw/Minute (Volkswagen Wolfsburg) und 0,02 Lkw/Minute (Volkswagen Dresden).

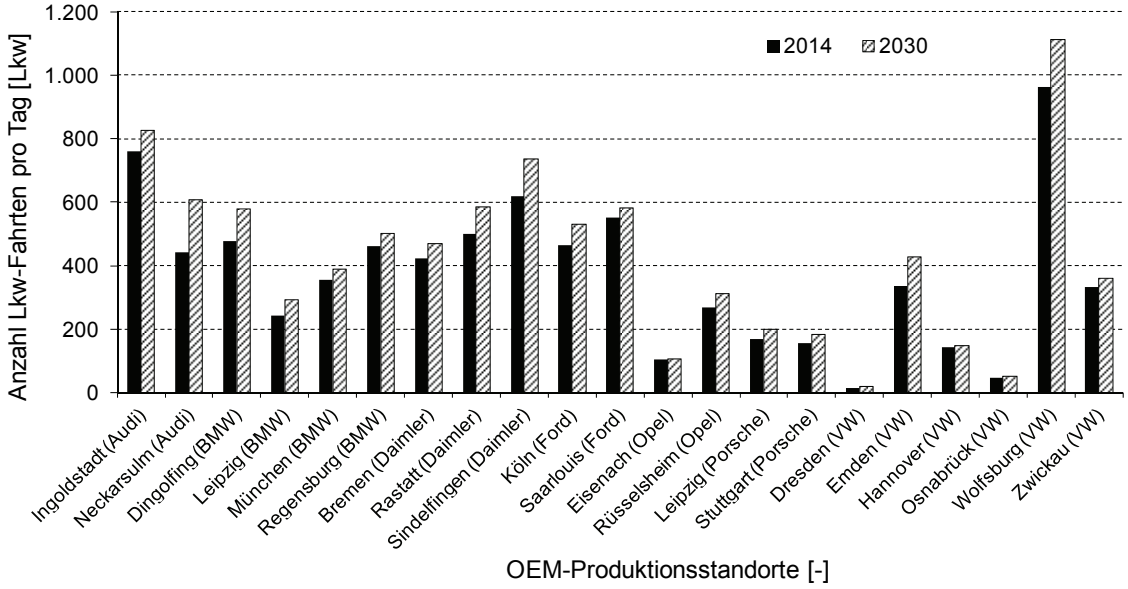


Abbildung 6-9: Anzahl täglicher Lkw-Fahrten der Beschaffungslogistik im Zielverkehr zu den Produktionsstandorten der OEM (Modellergebnisse)

Werte zur Validierung dieser Ergebnisse sind in der Literatur nur schwer zu finden. Graf und Ivisic (2005) berichten für den Daimler Produktionsstandort von etwa 1.700 Lkw-Fahrten täglich (vgl. Graf und Ivisic 2005, S. 30). Dieser Wert beinhaltet auch die Lkw-Fahrten in der Distributionslogistik, welche bei Annahme einer Zuladungskapazität von sechs Pkw pro Lkw in Sindelfingen bis zu 400 zusätzliche Lkw-Fahrten bedeuten können. Zudem ist, entgegen der Annahmen in dieser Arbeit, der Einsatz von Nutzfahrzeugen mit geringeren Zuladungskapazitäten als beim Sattelzug bei der Anlieferung von Modulen beobachtbar (vgl. Uebach 2005, S. 49). Die in dieser Arbeit ermittelten Werte können daher in der Realität höher ausfallen.

Mit wachsendem Verkehrsaufkommen sind ökologische und betriebswirtschaftliche Effekte verbunden. Die Fahrleistung der Fahrzeuge beeinflusst die Transportkosten sowie die Entwicklung der Luftschadstoff- und CO_2-Emissionen. Mit Blick auf die Zukunft ergeben sich allerdings sowohl bei den spezifischen Fahrzeugemissionen als

auch bei den Transportkosten Unsicherheiten: Entwicklungen von Effizienztechnologien reduzieren den spezifischen Kraftstoffverbrauch und senken damit sowohl die Emissionen als auch die Transportkosten. Ölpreissteigerungen können zu einer deutlichen Erhöhung der Transportkosten führen. Sowohl die Entwicklung des Ölpreises als auch die zukünftigen Effizienzsteigerungen lassen sich aufgrund von Informationsdefiziten bis zum Jahre 2030 nicht final festlegen. Aus diesem Grund werden im Folgenden für die Ergebnisse bezüglich der Transportkosten und der CO_2-Emissionen lediglich durch Ober- und Untergrenzen bestimmte Lösungsräume dargestellt.

6.3 CO_2-Emissionen in der Beschaffungslogistik

Zur Bestimmung der Relevanz einzelner Modul-, Komponenten-, Teile- und Rohstofftransporte hinsichtlich der Treibhausgasemissionen sind in Abbildung 6-10 die spezifischen CO_2-Emissionen der Transportvorgänge vergleichend gegenübergestellt. Diese leiten sich aus den in Abbildung 6-8 dargestellten Fahrleistungsintensitäten und den in Unterkapitel 5.2.2.1 dargestellten Emissionsfaktoren für Sattelzüge ab. Dabei gilt: Je höher die Fahrleistungsintensität beim Transport eines Moduls, einer Komponente, eines Einzelteils oder eines Rohstoffs ausfällt, desto mehr CO_2 wird pro Kilometer ausgestoßen. Folglich sinkt analog zur Fahrleistungsintensität der Median der CO_2-Emissionen pro Modul-Äquivalent, wie in Abbildung 6-10 dargestellt, mit abnehmender Hierarchie der Zulieferstufe von 5,66 g/Modul-Äq.-km (Tier-1) auf 1,32 g/Modul-Äq.-km (Tier-n). Die höchste Differenz stellt sich zwischen der Tier-1- und Tier-2-Zulieferstufe ein. Neben den unterschiedlichen Medianwerten zeichnen sich die Werte für die Module innerhalb der Tier-1-Zulieferstufe, analog zur Verteilung der Fahrleistungsintensitäten, durch eine hohe Varianz aus. Während sich die Standardabweichung der Verteilung in den Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n nur marginal unterscheidet, liegt diese bei den Modulen der Tier-1-Zulieferstufe mit σ_{Tier1} = 21,36 g/Modul-km um den Faktor sieben höher. Der Grund dafür liegt in der hohen Varianz der Zuladungskapazitäten der Ladungsträger und der damit einhergehenden Auslastung der Nutzlast zwischen den Modulen: Während zum Transport eines Cockpits ein Ladungsträger benötigt wird, können mit einem Ladungsträger 20 Antriebswellen transportiert werden (vgl. Anhang A1.5).

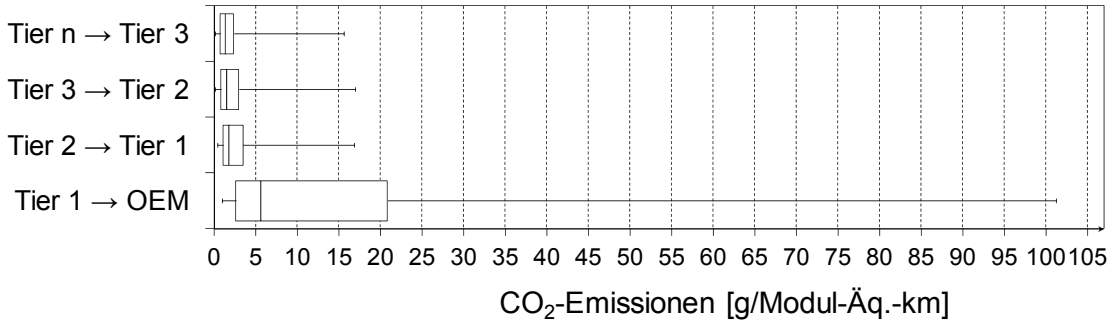


Abbildung 6-10: CO_2-Emissionen in den Zulieferstufen (Modellergebnisse)

Im Gegensatz zur ersten Zulieferstufe stellen die Transporte von Komponenten, Teilen und Rohstoffen in den Tier-2- bis Tier-n-Zulieferstufen hinsichtlich der CO_2-Emissionen eine relativ homogene Menge dar. Aufgrund der starken Heterogenität der Modultransporte werden diese in Abbildung 6-11 gesondert betrachtet. Besonders hohe positive Abweichungen zum Median weisen aufgrund geringer Auslastung der Nutzlast die Module Karosserie (M 1.1), Kraftstoffversorgung (M 2.3), Radsystem (M 4.1), Achsen (M 4.5), Front- und Backend (M 5.1), Sitze (M 6.1), Cockpit (M 6.2), Türverkleidung (M 6.5) sowie die Verkleidungen für Dach und Boden (M 6.6) auf. Die zukünftige Entwicklung der CO_2-Emissionen ist jedoch stark von der Marktdiffusion spritsparender Effizienztechnologien abhängig. Die in Abbildung 6-11 dargestellten Fehlerbalken zeigen daher die möglichen Abweichung vom derzeitigen technischen Status Quo bis zum Jahr 2030 (maximal -20 %; vgl. Kapitel 5.2.2.1).

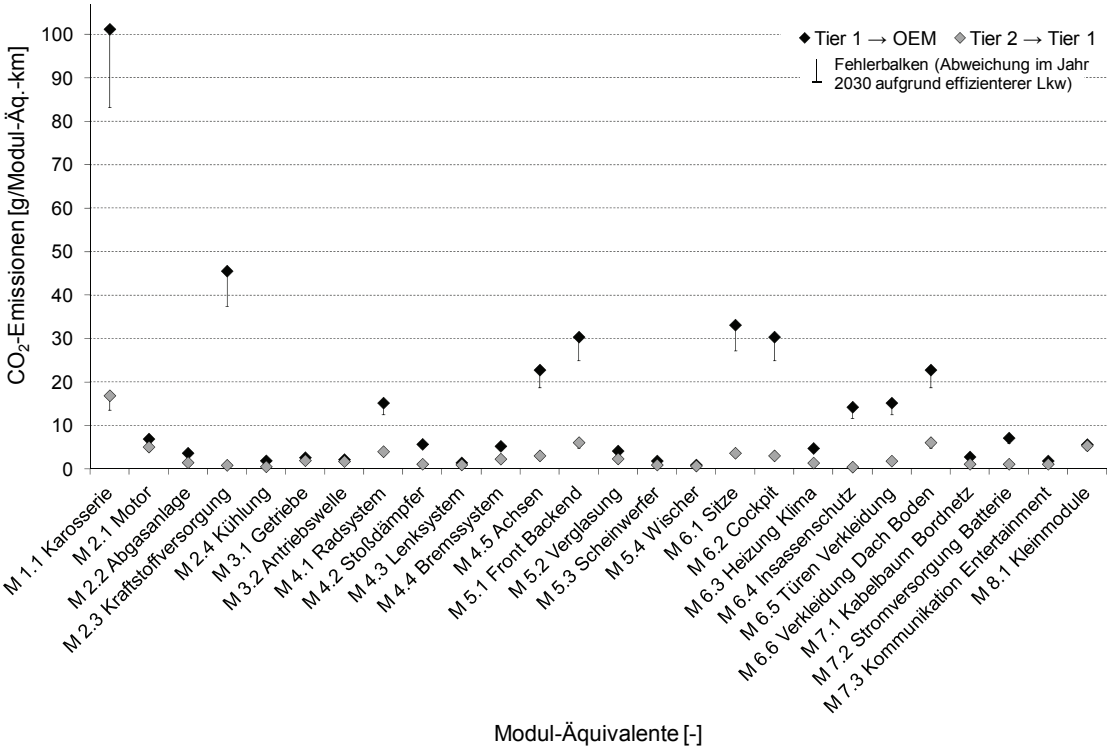


Abbildung 6-11: CO_2-Emissionen des Transports in der Tier-1- und Tier-2-Zulieferstufe (Modellergebnisse)

6.4 Transportkosten in der Beschaffungslogistik

Analog zum Vorgehen bei der Berechnung der CO_2-Emissionen lassen sich die Transportkosten für die Zulieferstufen und Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe aus der Verkehrsmenge ableiten. Als Grundlage dienen hierbei die in Unterkapitel 5.2.3.1.1 ermittelten Transportkosten pro Fahrzeugkilometer.

Da sowohl die Transportkosten als auch die Emissionen direkt von der Fahrleistungsintensität der Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe abhängen, zeichnet sich, wie in Abbildung 6-12 dargestellt, ein sehr ähnliches Bild ab: Während die Ergebnisse für die Tier-2- bis Tier-n-Zulieferer nur leicht um den Median (μ) von 0,2 Eurocent/Modul-km streuen, weist die Ergebnisverteilung für die Tier-1-Zulieferstufe eine deutlich höhere Standardabweichung ($\sigma_{Tier\text{-}1}$ = 2,8 Eurocent/Modulkilometer ; $\mu_{Tier\text{-}1}$ = 0,7 Eurocent/Modulkilometer) auf.

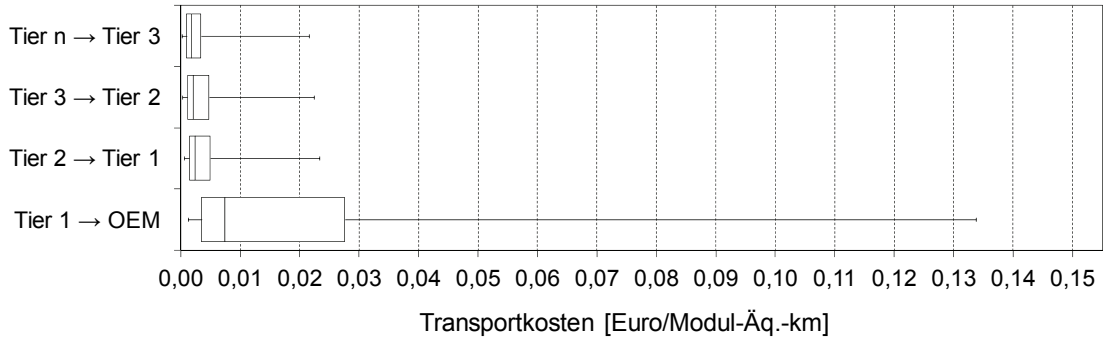


Abbildung 6-12: Transportkosten in den Zulieferstufen (Modellergebnisse für das Jahr 2030 und bei einem Rohölpreis von 112 US-Dollar/Barrel)

Auch hierbei lassen sich besonders die in Kapitel 6.3 genannten Module als Ausreißer identifizieren. Der Transport des Moduls „Karosserie“ ist bedingt durch die mit Abstand höchste Fahrleistungsintensität am teuersten (vgl. Abbildung 6-13). Dies erklärt, warum die Recherchen zu den Standorten der Karosserieproduktion in Kapitel 5.1.3 ergab, dass die OEM das Modul ausnahmslos selbst direkt bei der Endmontage der Pkw fertigen. Neben der Karosserie liegen die Transportkosten der Module Kraftstoffversorgung (M 2.3), Radsystem (M 4.1), Achsen (M 4.5), Front- und Backend (M 5.1), Sitze (M 6.1), Cockpit (M 6.2), Türverkleidung (M 6.5) sowie die Verkleidungen für Dach und Boden (M 6.6) deutlich über dem Median der Transportkosten aller Module in der Tier-1- Zulieferstufe. Der Transport von Komponenten in der Tier-2-Zulieferstufe weist, wie bereits die Fahrleistungsintensität und die CO_2-Emissionen, eine starke Homogenität der Transportkosten auf.

Da die Kraftstoffkosten bei hohen Jahresfahrleistungen der Fahrzeuge die Transportkosten maßgeblich beeinflussen (siehe Kapitel 4.1.1), muss zukünftig mit einer möglichen Variation der Transportkosten gerechnet werden. Die in Abbildung 6-13 dargestellten Werte beziehen sich auf einen Ölpreis von 112 US-Dollar pro Barrel. Bei einem hohen Ölpreis (175 US-Dollar/Barrel) steigen die Transportkosten um etwa 18 %, bei niedrigen Ölpreisen (50 US-Dollar/Barrel) ergibt sich eine Reduzierung gegenüber den heutigen Transportkosten um etwa -18 %.

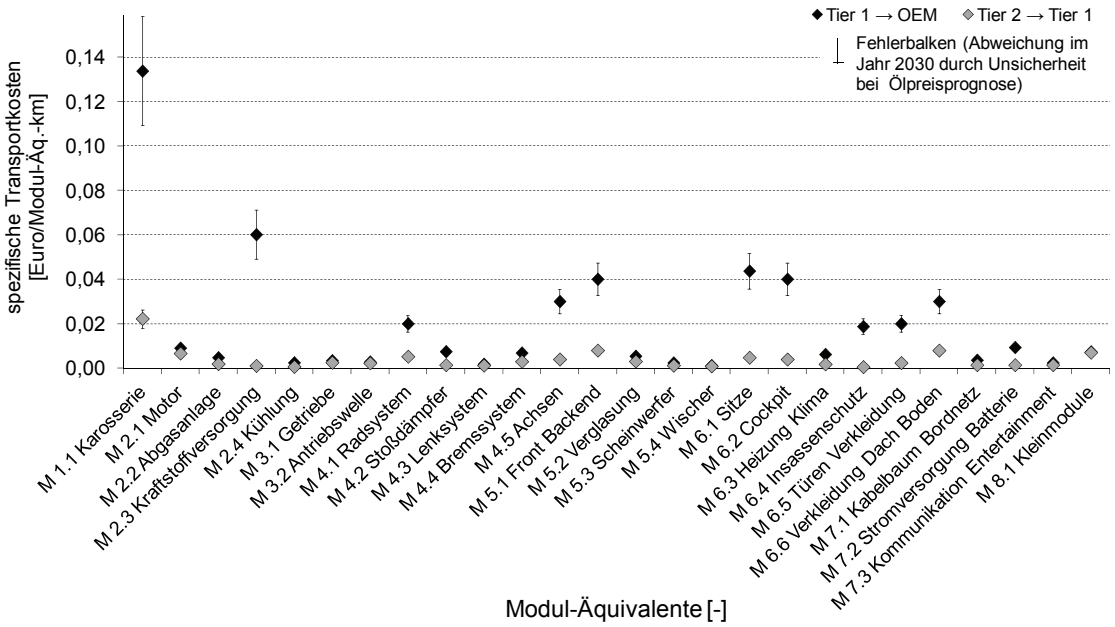


Abbildung 6-13: Transportkosten für Modul-Äquivalente in den Zulieferstufen Tier-1 und Tier-2 (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

6.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse über das Systemverhalten

Die gewonnenen Erkenntnisse aus diesen ersten Simulationsergebnissen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Insgesamt steigt die Nachfrage nach in Deutschland produzierten Pkw durch ein Anwachsen der weltweiten Nachfrage bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 2014 um etwa 12 % an. In gleichem Umfang dazu steigt auch das Transportaufkommen im Betrachtungsraum. Bedingt durch die Abweichungen zwischen Prognose und tatsächlicher Auslieferung wächst mit abnehmender Hierarchie der Zulieferstufe die Volatilität von Produktionsmenge und Bestand (Bullwhip-Effekt). Diese Volatilität tritt dementsprechend auch beim Verlauf des Transportaufkommens auf.

Der Anteil der Ladungsträger an der gesamten transportierten Masse variiert zwischen 75 % in der Tier-1-Zulieferstufe und 1,4 % beim Transport von Rohstoffen (Tier-n). Großvolumige Module wie beispielsweise Sitze, Cockpit sowie Front- und Backend erreichen beim Transport eine mittlere Auslastung (Median) der Nutzlast von weniger als 50 %. Im Gegensatz dazu führt eine hohe Materialdichte dazu, dass die maximal mögliche Zuladung die Nutzlast übersteigen würde. Dementsprechend unterscheiden sich die abgeleiteten Fahrleistungsintensitäten sowohl zwischen als auch innerhalb der Zulieferstufen. Insgesamt liegen die Standardabweichungen und die Mediane für die

Transportkosten und Emissionen innerhalb der Tier-1-Zulieferstufe deutlich über den Werten für die Transporte der Zulieferer Tier-2 bis Tier-n. Die heterogenen Ergebnisse für Modultransporte stehen einer Homogenität hinsichtlich der Transportkosten und CO_2-Emissionen bei Transporten von Komponenten, Teilen und Rohstoffen gegenüber.

7 Szenarien der Regionalisierung und Ergebnisse der Simulation

Die Regionalisierung der Zulieferstruktur führt zu einer Zustandsänderung im Subsystem BESCHAFFUNG. Ob die Regionalisierung durch eine pauschale Senkung der durchschnittlichen Transportentfernungen in den Zulieferstufen oder differenziert nach einzelnen Lieferbeziehungen von Modulen, Komponenten, Einzelteilen und Rohstoffen realisiert wird, soll auf Basis der in Kapitel 6 gewonnenen Erkenntnisse in diesem Kapitel festgelegt werden. Zusätzlich wird bei der Szenarienbildung der in Kapitel 5.1.3 beschriebene Status-Quo der Lieferbeziehungen und der daraus ableitbaren Transportentfernungen berücksichtigt.

Für die definierten Szenarien werden auf Basis der in Kapitel 5.2.2 und 5.2.3 ermittelten Determinanten die ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen bestimmt. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion zu Chancen der Umsetzung für die drei Szenarien und daraus ableitbaren Handlungsempfehlungen für Politik und Industrie.

7.1 Szenarien für regionale Zulieferstrukturen

Das vorherige Kapitel zeigt die Heterogenität der Ergebnisse hinsichtlich der Fahrleistungsintensität einerseits zwischen den Modulen in der Tier-1-Zulieferstufe und andererseits die Homogenität in den Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n. Gleichzeitig beschreibt Kapitel 5.1.3 Unterschiede zwischen der Länge der Transportentfernungen in den Zulieferstufen. Um diesen Merkmalen des Systems „Automobilindustrie“ gerecht zu werden, sollen im Folgenden drei unterschiedliche Szenarien der Regionalisierung betrachtet werden:

- Regionale Zulieferstrukturen durch Verlagerung der Tier-1-Zulieferer in lokale Zulieferparks (**R1**)
- Reduktion der Transportentfernungen innerhalb der Tier-2-Zulieferebene durch Verlagerung der außereuropäischen Produktion nach (Ost-) Europa (**R2**)
- Reduktion der Transportentfernungen innerhalb der Tier-3-Zulieferebene durch Verlagerung der außereuropäischen Produktion nach (Ost-) Europa (**R3**)

Während durch das Regionalisierungsszenario R1 die Wirkungen einer Standortverlagerung ausgewählter Modulproduzenten in die unmittelbare Nähe der OEM-Produktionsstandorte untersucht werden, besteht die Regionalisierung in den Szenarien R2 und R3 darin, dass die ausländische Beschaffung vermehrt in Europa stattfindet und dadurch die Transportentfernungen gesenkt werden.

7.1.1 Regionalisierungsszenario R1: Verlagerung der Tier-1-Zulieferer in lokale Zulieferparks

Derzeit produzieren etwa 90 % aller Tier-1-Zulieferer in Deutschland. Der Mittelwert der durch den in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Algorithmus ermittelten Transportentfernungen zwischen Tier-1 und OEM beträgt etwa 109 km (vgl. Abbildung 7-3). Gemäß der Definition von Regionalität des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2014) lassen sich somit bereits heute bei den Tier-1-Zulieferern regionale Produktionsstrukturen erkennen. Das Regionalisierungsszenario R1 beinhaltet eine Transportentfernungsreduktion zwischen den Tier-1-Zulieferern und den Produktionsstandorten der OEM. Dabei werden Standorte der Zulieferer, die bereits heute an mehr als zwei Standorten (vgl. Anhang A1.3) produzieren, sukzessive in unmittelbare Nähe zu den Produktionsstandorten der OEM verlegt. In Ansätzen ist diese Regionalisierung bereits heute durch das Bilden von werknahen Lieferantenparks erkennbar (vgl. Schraft und Westkämper 2005). Aufbauend auf diesen Entwicklungen werden unter Berücksichtigung der Modellzyklen alle für eine regionale Produktion geeigneten Zulieferer in Lieferantenparks ($d_{Tier\text{-}1 \rightarrow OEM}$ = 0 km) oder in unmittelbarer Nähe ($d_{Tier\text{-}1 \rightarrow OEM}$ = 5 km) zu den Produktionswerken angesiedelt. Die Distanz von 5 km ergibt sich dadurch, dass in diesem Abstand zu allen betrachteten OEM-Produktionswerken unbebaute Flächen in ausreichender Größe zur Verfügung stehen. Die Flächen wurden mit Hilfe des Online-Kartendienstes Google-Earth identifiziert.

Der Median der Fahrleistungsintensität beträgt in der Tier-1-Zulieferstufe etwa das 3,7-Fache der anderen Zulieferstufen; somit entstehen trotz geringer Transportentfernungen relativ hohe Fahrleistungen der Nutzfahrzeuge. Die Modellergebnisse zeigen zudem, dass die Fahrleistungsintensitäten zwischen den Modulen deutlich variieren ($\sigma_{Tier\text{-}1}$ =0,023 Fzg.-km/Modul-km). Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden für die Eignung einer Regionalisierung folgende Kriterien festgelegt: Die Fahrleistungsintensität eines Moduls ist größer gleich 0,003 Fzg.-km/Modulkilometer[19] UND die Modulproduktion wird nicht durch den OEM selbst durchgeführt UND bereits heute werden die Module durch den Zulieferer dezentral (mehr als zwei innerdeutsche Standorte) produziert. Auf Basis dieser Entscheidungskriterien weisen von 27 in dieser Arbeit untersuchten Modulen folgende zwölf eine Eignung für eine regionale Ansiedlung auf: Abgasanlage (M 2.2), Kraftstoffversorgung (M 2.3), Radsystem (M 4.1), Bremssystem (M 4.4), Front- und Backend (M 5.1), Sitze (M 6.1), Cockpit (M 6.2), Heizung Klima

19 Dies entspricht dem ersten Quartil der in Abbildung 6-8 dargestellten Verteilung der Fahrleistungsintensität.

(M 6.3), Insassenschutz (M 6.4), Türverkleidung (M 6.5), Verkleidung von Dach und Boden (M 6.6) sowie Kabelbaum/Bordnetz (M 7.1).

Während die Produktionsstandorte der übrigen Module unverändert bleiben, reduzieren sich für die genannten Module die Transportentfernungen zwischen OEM und Tier-1-Zulieferer auf 0 Kilometer, falls ein werkseigener Zulieferpark besteht, auf einen Kilometer, falls der bestehende Zulieferpark durch das öffentliche Straßennetz vom Produktionsstandort des OEM getrennt ist und auf fünf Kilometer, falls bisher kein Lieferantenpark besteht.

Die zeitliche Dimension der Regionalisierung wird durch die Modellzyklen bestimmt. Die zwischen Tier-1-Zulieferer und OEM vereinbarte Vertragslaufzeit zur Produktion orientiert sich an der Dauer der Produktion bis zum nächsten Modellwechsel (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 168). Abbildung 7-1 stellt die geplanten Modellzyklen bis zum Jahr 2030 dar. Ein Wechsel des Standortes ist aufgrund der Vertragskonstellation demnach jeweils nur zu Beginn eines neuen Modellzyklus umsetzbar. In der Automobilindustrie haben sich die Modellzyklen in den letzten Jahrzehnten deutlich verkürzt. Mit den derzeitigen Zyklenlängen von etwa 6 Jahren scheint das Minimum jedoch weitestgehend erreicht zu sein (vgl. Niederländer 2000, S. 196 und AUDI AG 2015, BMW AG 2015e, Daimler AG 2015a, Ford Motor Company 2015, Adam Opel AG 2015, Porsche AG 2015 sowie Volkswagen AG 2015).

Als Zeitpunkt für den nächstmöglichen Standortwechsel der Tier-1-Zulieferer wurde in Szenario R1 das Jahr 2017 festgelegt, da eine Standortverlagerung mit den dazugehörigen Planungs- und Baumaßnahmen vor diesem Zeitpunkt als unrealistisch einzuschätzen ist. Zunächst werden die Modulproduzenten regionalisiert, die bereits heute mindestens in einem der existierenden Lieferantenparks angesiedelt sind. Im Zuge der darauffolgenden Modellwechsel werden dann sukzessive die Produktionsstandorte der übrigen Modulproduzenten mit Regionalisierungseignung verlagert. Die in den Zulieferparks vorhandenen Produktionsstandorte werden nicht verändert.

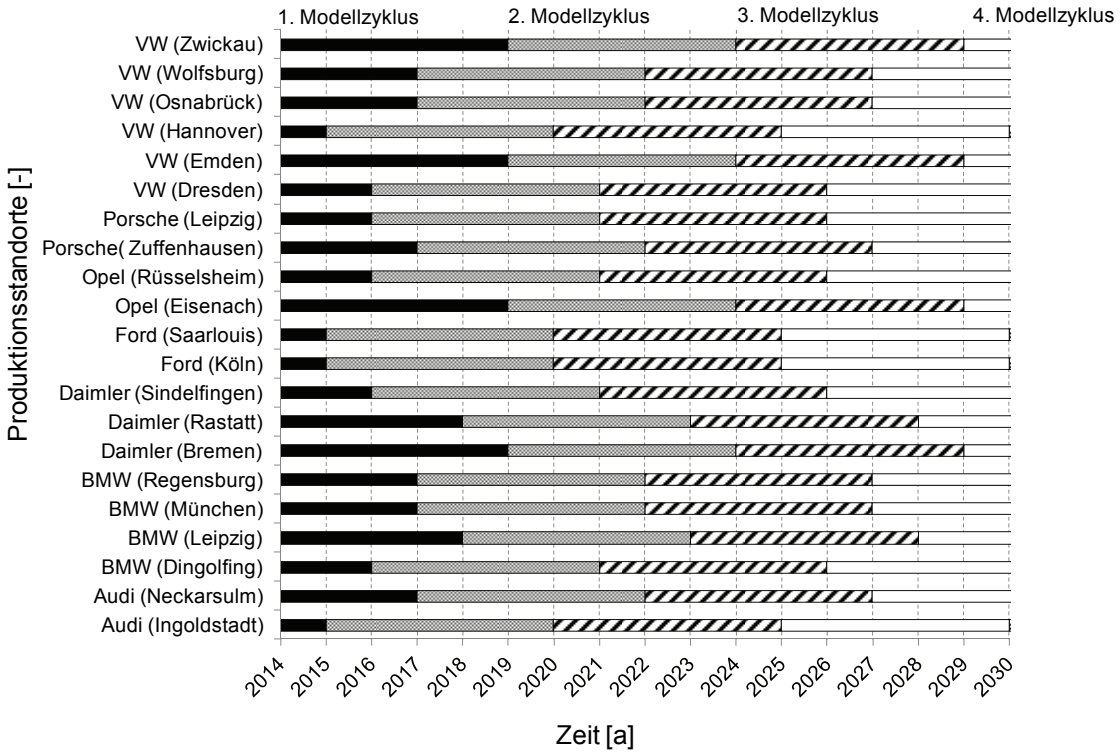


Abbildung 7-1: Modellzyklen der OEM-Produktionsstandorte (eigene Darstellung basierend auf AUDI AG 2015, BMW AG 2015e, Daimler AG 2015a, Ford Motor Company 2015, Adam Opel AG 2015, Porsche AG 2015, Volkswagen AG 2015, und Niederländer 2000, S. 196)

Eine Regionalisierung innerhalb der Tier-1-Zulieferebene beeinflusst neben den Entfernungen zwischen OEM und Tier-1-Zulieferer auch die Entfernungen zwischen Tier-1-Produktionsstandorten und der ranghöheren Zulieferstufe.

Wie in Abbildung 7-2 dargestellt, kann es sowohl zu Verkürzungen als auch zu Verlängerung der Entfernungen zwischen Tier-2- und Tier-1-Zulieferer kommen. Da derzeit keine ausreichenden Informationen zur Ermittlung der Tier-2-Zulieferer-Standorte vorliegen, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit von einer geografischen Gleichverteilung der Tier-2-Standorte ausgegangen. Damit lässt sich die durch die Regionalisierung bedingte Entfernungsanpassung, wie in Abbildung 7-2 dargestellt, durch die Bildung des Mittelwerts zwischen dem entfernungsmaximalen und entfernungsminimalen Fall ableiten. Dadurch erhöht sich die Distanz zwischen Tier-2 und Tier-1-Zulieferer im Mittel um den Abstand $d_1^* = z$ zwischen Tier-1 und OEM nach der regionalen Standortverlagerung.

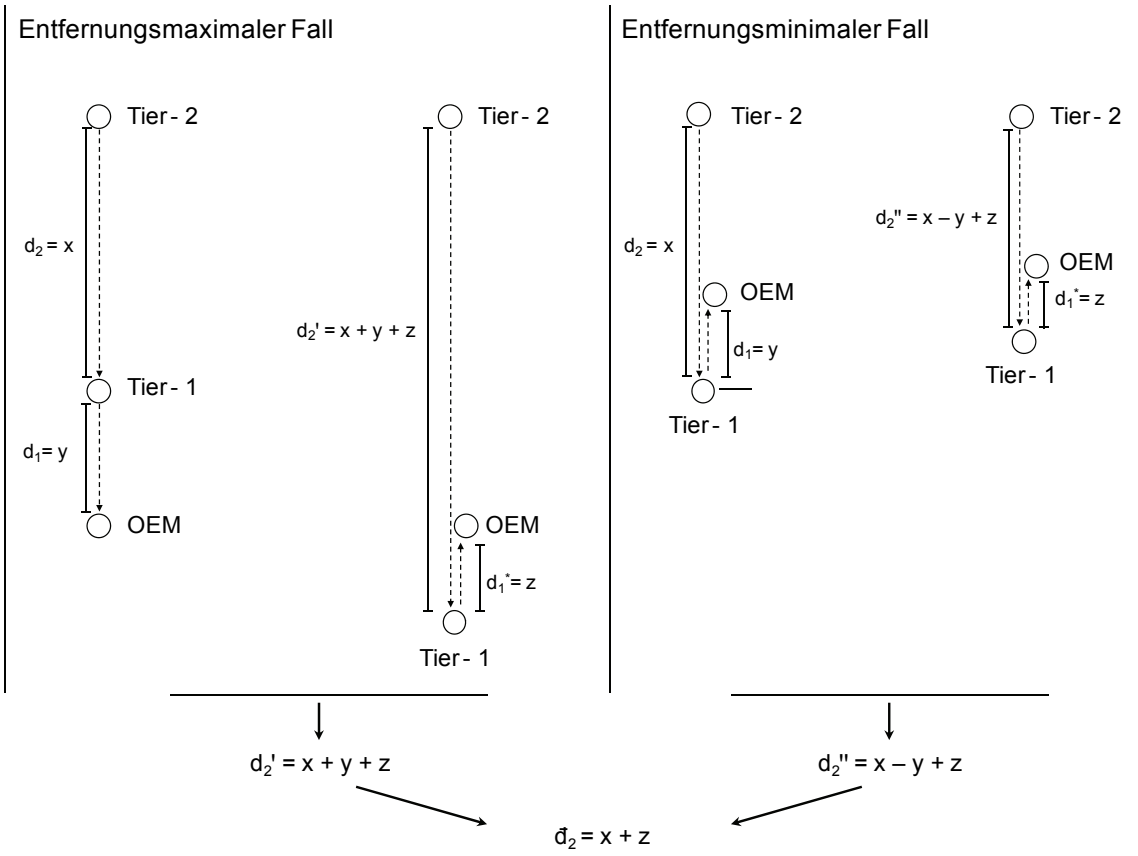


Abbildung 7-2: Veränderung der Entfernungen in Szenario R1

7.1.2 Regionalisierungsszenario R2: Verlagerung der Tier-2-Produktion nach Europa

Die Produktionsstandorte der Tier-2-Zulieferstufe befinden sich mehrheitlich im Ausland (vgl. Abbildung 7-3). Die entstehenden mittleren Transportentfernungen von 4.365 km (vgl. Auswertungen der UN-Comtrade in Kapitel 5.1.3) liegen dadurch deutlich über den Transportentfernungen in der Tier-1-Zulieferstufe. Die Gründe für eine Produktionsverlagerung ins Ausland liegen laut Zanker et al. (2013, S. 9) in mehr als 70 % aller Fälle an den geringeren Personalkosten (siehe Anhang Abbildung A- 6). Damit scheint eine Verlagerung aus Ländern mit niedrigem Arbeitskostenniveau wie China, Indien aber auch den osteuropäischen Ländern (vgl. Schröder 2010, S. 6) nach Deutschland, zumindest bis Ende des Betrachtungshorizonts im Jahr 2030, unwahrscheinlich. Komponenten weisen zudem einen höheren Grad der Standardisierung auf, da die Variantenbildung ab der Produktion von Modulen (Tier-1) einsetzt (vgl. Braun 2012, S. 63ff.). Der hohe Standardisierungsgrad ermöglicht Skalenerträge die zu sinkenden spezifischen Grenzkosten der Produktion führen und somit die Kosten einer zentralen Produktion gegenüber dezentralen Produktionsstandorten senken. Im

Gegensatz zu Szenario R1 ist eine Regionalisierung im Kontext von Szenario R2 daher nicht mit einer innerdeutschen Dezentralisierung der Produktion verbunden.

In Szenario R2 wird davon ausgegangen, dass die außereuropäische Produktion entsprechend den in Abbildung 5-14 dargestellten Anteilen nach (Ost-) Europa verlagert wird. Der innerdeutsche Beschaffungsanteil wird konstant gehalten. Regionalisierung bedeutet daher in Szenario R2 eine Reduktion der Transportentfernungen durch Verlagerung der Produktion innerhalb der Tier-2-Zulieferstufe von weltweiten Produktionsstandorten nach Europa. Ein Überblick über die Kennzahlen der drei Szenarien wird in Abbildung 7-3 gegeben.

Da die Fahrleistungsintensitäten zwischen den Komponenten deutlich geringer als bei Modulen variieren ($\sigma_{Tier\text{-}2}$ =0,0037 Fzg.-km/Modul-Äq.-km) und damit kaum Unterschiede bei den spezifischen Emissionen und Transportkosten auftreten, wird bei der Reduktion der Transportentfernungen nicht zwischen den Komponenten unterschieden. In Szenario R2 wird daher für jede Komponente der Tier-2-Zulieferstufe der gleiche Regionalisierungspfad hinterlegt. Maximal könnten bis zum Jahr 2030 alle außereuropäischen Produktionsstandorte verlagert werden (Anteil der außereuropäische Produktion = 0 %), im minimalen Fall würde der Status-Quo beibehalten (Anteil der außereuropäischen Produktion = 30 %). Als realistischer Pfad der Regionalisierung wurde für diese Arbeit der Mittelwert zwischen diesen beiden Zuständen gewählt. Folglich sinkt für alle Komponenten der Anteil von außereuropäischen Produktionsstätten am Beschaffungswert gleichermaßen und linear bis zum Jahr 2030 auf 15 %. Von einer modellzyklenbasierten, stufenweisen Absenklung wie in Szenario R1, kann an dieser Stelle abgesehen werden, da die Vertragslaufzeiten zur Beschaffung von Komponenten eher kurzfristig und preisbasiert ausgestaltet sind (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 167f.).

7.1.3 Regionalisierungsszenario R3: Verlagerung der Tier-3-Produktion nach Europa

Etwa zwei Drittel (62 %) der Einzelteile wird derzeit im Ausland produziert. Ähnlich wie beim Bezug von Komponenten wird etwa die Hälfte davon im europäischen Ausland gefertigt. Etwa 34 % der gesamten Beschaffungsmenge wird von Tier-1-Zulieferen an außereuropäischen Standorten produziert (vgl. Abbildung 5-14). Die aus der Verteilung der Produktionsstandorte abgeleiteten Transportentfernungen zwischen den Tier-2- und Tier-3-Zulieferstufen liegt im Mittel bei 5.664 km (vgl. Auswertung der UN-Comtrade in Kapitel 5.1.3).

Auch bei Einzelteilen existiert ein hoher Standardisierungsgrad und die damit verbundenen Skalenerträge, welche eine zentrale Produktion begünstigen. Somit sind die Voraussetzungen für eine Regionalisierung in Szenario R3 sehr ähnlich wie in Szenario R2. Der außereuropäische Anteil am Beschaffungswert sinkt analog zu Szenario R2 gleichermaßen und linear bis zum Jahr 2030 auf 17 % (Mittelwert zwischen keiner Produktion im außereuropäischen Raum (0 %) und dem Status-Quo (34 %)). Die Vertragslaufzeiten zur Beschaffung von Einzelteilen gestalten sich ebenfalls kurzfristig und preisbasiert (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 167f.), so dass in Szenario R3 eine lineare Entwicklung der Regionalisierung als realistisch angesehen werden kann.

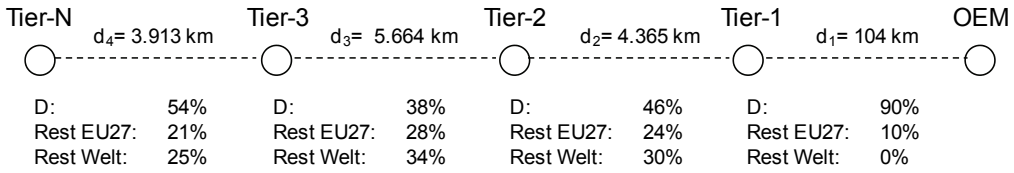
7.1.4 Vergleich der Regionalisierungsszenarien

Die drei betrachteten Szenarien R1, R2 und R3 unterscheiden sich wie folgt: Szenario R1 beinhaltet die Regionalisierung der Tier-1-Zulieferer durch die verstärkte Ansiedlung der Produktion von Modulen mit hoher Transportintensität und dezentraler Produktion in unmittelbarer Nähe zum OEM Produktionswerk. Den Szenarien R2 und R3 wird jeweils eine Regionalisierung in Form der Verlagerung der außereuropäischen Produktionsstandorte nach Europa zugrunde gelegt. Die in Abbildung 7-3 dargestellte Übersicht stellt die drei Szenarien und das sogenannte Basisszenario vergleichend gegenüber. Das Basisszenario entspricht dem ermittelten Status-Quo der Produktionsstandorte und der daraus abgeleiteten Transportentfernungen.

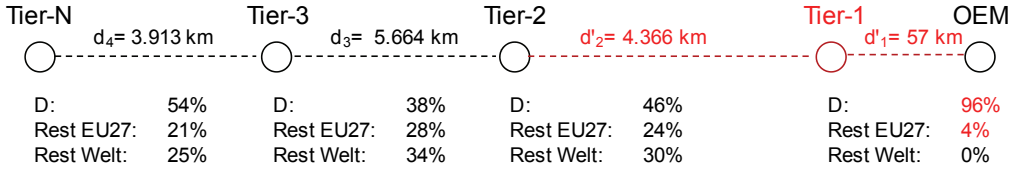
Im Vergleich zum Basisszenario reduziert sich im Szenario R1 die durchschnittliche Transportweite zwischen Tier-1-Zulieferern und den OEM-Produktionsstandorten durch die Ansiedlung der Zulieferer in unmittelbarer Nähe zum OEM von 104 km auf 57 km. Als Folge dieser Regionalisierung ändern sich auch die Transportentfernungen zwischen Tier-2- und Tier-1-Zulieferer. Auf Grundlage der in Abbildung 7-2 dargestellten Überlegungen könnte sich die Distanz d'_2 um durchschnittlich einen Kilometer erhöhen. Dies entspricht dem gewichteten Mittelwert der Entfernungen $d_{\text{Tier-1} \rightarrow \text{OEM}}$ in Szenario R1 (vgl. Kapitel 7.1.1). Die Verlagerung der Tier-2-Produktionsstandorte nach Europa in Szenario R2 führt zu einer Reduzierung der durchschnittlichen Transportentfernung zwischen Tier-2- und Tier-1-Zulieferer von d_2 = 4.365 km auf d'_2 = 2.476 km. Dadurch, dass der Anteil der innerdeutschen Produktion konstant bleibt und die außerdeutsche Vorkette außerhalb des Betrachtungsraums liegt, ändert sich bei der dargestellten Betrachtung die Transportdistanz zwischen Tier-3- und Tier-2-Zulieferer nicht. Dieses beschriebene Vorgehen gilt ebenfalls für Szenario R3. Dadurch, dass der innerdeutsche Anteil am Beschaffungswert geringer als in der Tier-2-Zulieferstufe ist, ergibt sich eine höhere mittlere Transportdistanz zwischen Tier-2- und Tier-3-Produktionsstätten. Durch die Verlagerung ist die mittlere Transportentfernung um etwa 16 % höher als d'_2 und beträgt d'_3= 2.878 km.

Durch die Regionalisierung der Zulieferstruktur reduzieren sich bei allen Szenarien zu die Transportentfernungen. Bedingt durch die unterschiedlichen im Basisszenario dargestellten Ausgangslagen, fallen die Transportentfernungsreduktionen unterschiedlich hoch aus: In Szenario R1 sinkt die durchschnittliche Entfernung zwischen Tier-1 und OEM um 47 km, in Szenario R2 um 1.889 km (Entfernung Tier-1 ↔ Tier-2) und in R3 um 2.786 km (Entfernung Tier-2 ↔ Tier-3).

B Basisszenario

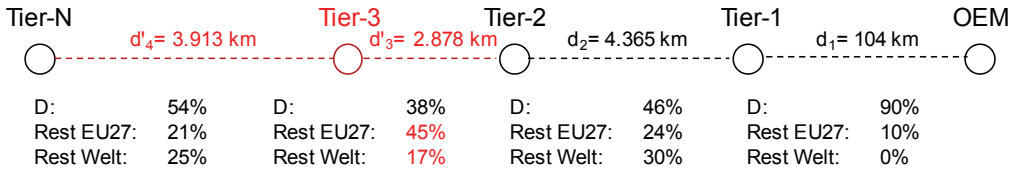


R1 Regionalisierung Tier-1



R2 Regionalisierung Tier-2

R3 Regionalisierung Tier-3



LEGENDE:

$d_1, \ldots d_4$:	*Ø-Entfernung*
D:	*Anteil am Beschaffungswert aus Deutschland*
Rest EU27:	*Anteil am Beschaffungswert aus Rest-EU27*
Rest Welt:	*Anteil am Beschaffungswert aus dem Rest der Welt*

Abbildung 7-3: Vergleich der Regionalisierungsszenarien (eigene Darstellung; Transportentfernungen ermittelt auf Basis der Ausführungen in Kapitel 5.1.3)

Auf Basis dieser beschriebenen Szenarien werden in den folgenden zwei Unterkapiteln die ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen der Umsetzung der Szenarien beschrieben und diskutiert.

7.2 Auswirkungen der Regionalisierung auf Verkehrskennziffern

Um die Wirkungen einer Regionalisierung der Zulieferstruktur quantifizieren zu können, werden die beschriebenen Szenarien als unterschiedliche Systemzustände im System „Automobilindustrie“ simuliert. Zunächst werden die Änderungen der CO_2-Emissionen und die Transportkosten dargestellt. Im Anschluss daran werden die übrigen ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen beschrieben, um dann zusammenfassend die Vereinbarkeit von ökologischen und betriebswirtschaftlichen Zielen in den Szenarien zu überprüfen.

Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich an dem in Abbildung 1-2 (siehe Kapitel 1) dargestellten Ablauf zur Bestimmung der transportbedingten Umweltnutzung: Es werden zunächst die regionalisierungsbedingten Anpassungsprozesse der Güterbeförderungsleistung analysiert. Daraus abgeleitet ergibt sich die Fahrleistung für die Nutzfahrzeuge. Diese bestimmt die Größe der Nutzfahrzeugflotte und deren Zusammensetzung bezüglich der Jahresfahrleistungen. Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich mit Hilfe des in Kapitel 5.2 dargestellten Modells die ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen bestimmen.

7.2.1 Veränderungen der Güterbeförderungsleistung

Die durch regionalisierten Zulieferstrukturen veränderten Transportentfernungen beeinflussen das als Güterbeförderungsleistung bezeichnete Produkt aus Transportaufkommen und Entfernung. Zusätzlich zum absoluten Niveau der Güterbeförderungsleistung wirkt sich eine veränderte Beschaffungsstrategie auf die Verkehrsmittelwahl aus: Die auf Affinitäten beruhende Wahl der Verkehrsträger ist u. a. abhängig von der Ursprungsregion (Deutschland, Europa und Welt). Güter aus Deutschland und Europa werden fast ausschließlich per Lkw transportiert; Güter aus Übersee werden nach dem Transport per Seeschiff mit der Eisenbahn oder dem Binnenschiff in Deutschland verteilt.

Da innerhalb der Tier-1-Zulieferstufe nur beim Modultransport zwischen den OEM-eigenen Produktionswerken (z. B. Motoren, Getriebe) keine Lkw eingesetzt werden (vgl. Winter 2008, S. 44ff.), und diese Zulieferrelationen unverändert bleiben, tritt der Effekt der Verkehrsträgerverlagerung nur bei den Regionalisierungsszenarien R2 und R3 auf.

Durch die Verlagerung der außereuropäischen Produktion nach (Ost-) Europa ändert sich die Transportkette. Die Kombination aus Hochseetransport, Hafenhinterlandtransport mit Binnenschiff oder Eisenbahn und Nachlauf mit Lkw wird ersetzt durch einen durchgehenden Lkw-Transport von der Quelle bis zur Senke. Insgesamt reduziert sich dadurch die gesamte Güterbeförderungsleistung, bei gleichzeitiger Verlagerung von See- und Binnenschiff sowie Bahntransporten zum Straßengütertransport.

Die Abbildung 7-4 zeigt den Verlauf der Güterbeförderungsleistung des Verkehrsträgers Seeschifffahrt in den vier Szenarien. Da die Produktionsstandorte sämtlicher Module (Tier-1) in Deutschland oder im europäischen Ausland liegen, spielt dieser Verkehrsträger beim Transport in der Tier-1-Zulieferstufe keine Rolle. Dementsprechend ergibt sich kein Unterschied zwischen der Güterbeförderungsleistung im Basisszenario und in Szenario R1. In den Szenarien R2 und R3 lassen sich hingegen Rückgänge im Vergleich zum Basisszenario erkennen: Durch Verlagerung von Tier-2-Zulieferern nach Europa kommt es im Jahr 2030 in Szenario R2 zu einer im Vergleich zum Basisszenario um -29 % geringeren Güterbeförderungsleistung mit Seeschiffen. Werden Tier-3-Zulieferer in Szenario R3 nach (Ost-) Europa verlagert, so führen die geringeren Massen der Ladungsträger und ein durch die räumliche Systemgrenze vermindertes Transportaufkommen dazu, dass diese Differenz der Güterbeförderungsleistung mit Seeschiffen zwischen Basisszenario und Szenario R3 -15 % beträgt.

Die reduzierte Anzahl der Seetransporte in Szenario R2 und R3 wirkt sich direkt auf den Hafenhinterlandverkehr und die Güterbeförderungsleistung der eingesetzten Verkehrsträger aus. Dies betrifft sowohl Binnenschiffe als auch den schienengebundenen Verkehr. Analog zur Seeschifffahrt bedeutet dies für die Binnenschifffahrt einen Rückgang der Güterbeförderungsleistung im Vergleich zum Basisszenario im Jahr 2030 um 29 % in Szenario R2 und 15 % in Szenario R3 (siehe Abbildung 7-4). Die Differenz zwischen den Szenarien R2 und R3 ergibt sich einerseits durch die geringere Masse und der höheren Zuladungskapazität der Ladungsträger beim Transport von Teilen in der Tier-3-Zulieferstufe, verglichen mit Komponenten in der Tier-2-Zulieferstufe. Allerdings werden im Modell nur die Vorketten innerdeutscher Produktionsstandorte berücksichtigt (räumliche Systemgrenze). Die leichten Abweichungen der Güterbeförderungsleistung zwischen dem Basisszenario und Szenario R1 erklärt sich durch die Verlängerung der Transportentfernungen zwischen Tier-1- und Tier-2-Zulieferern. In einigen Fällen hat dies eine Verlängerung der durch das Binnenschiff zurückgelegten Transportentfernung zur Folge. Diese Effekte können allerdings als marginal bezeichnet werden, da die Abweichung durchgehend unter 1 % liegt.

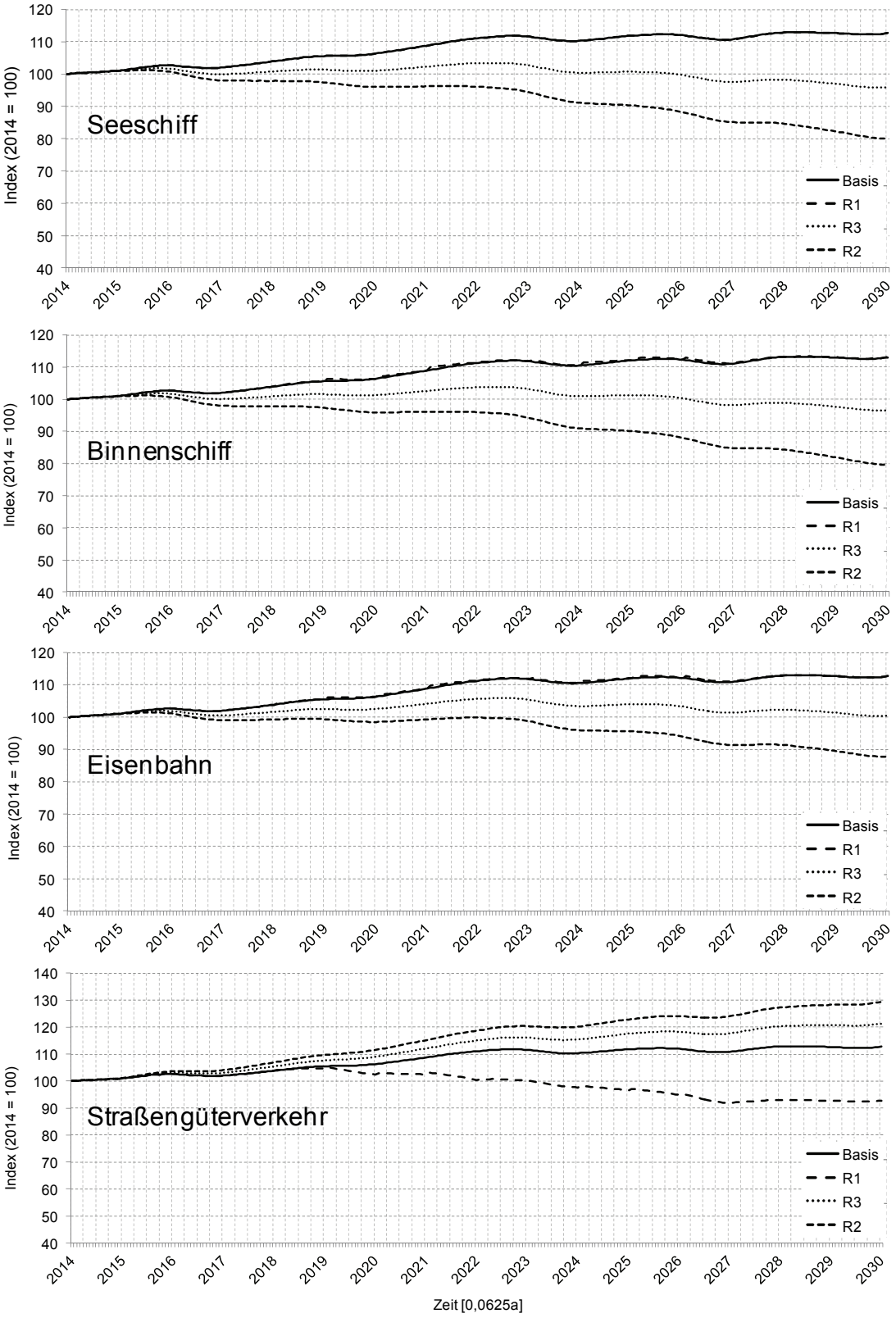


Abbildung 7-4: Entwicklung der Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse)

Neben dem Binnenschiff ist die Eisenbahn das zweite bedeutende Verkehrsmittel im Hafenhinterlandverkehr. Analog zur Entwicklung der Güterbeförderungsleistung mit dem Binnenschiff sinkt auch die mit der Eisenbahn ab. Die in Abbildung 7-4 dargestellten Abweichungen zum Basisszenario fallen allerdings weniger stark als beim Verkehrsträger Binnenschiff aus: Die im Schienengüterverkehr transportierten Tonnenkilometer weichen in den Szenarien R2 und R3 vom Basisszenario um jeweils - 22 % bzw. - 11 % ab. Diese im Vergleich zum Rückgang der Güterbeförderungsleistung von Binnenschiffen geringere relative Differenz hängt mit der größeren Grundgesamtheit der durch den Schienengüterverkehr erbrachten Güterbeförderungsleistung zusammen. Im Gegensatz zum Binnenschiff werden auch Module innerhalb der Tier-1-Zulieferstufe mit der Eisenbahn transportiert. Die dadurch entstehende größere Grundgesamtheit führt bei gleicher absoluter Reduktion der Güterbeförderungsleistung der Eisenbahn zu einem geringeren relativen Anteil.

Neben den Veränderungen der Güterbeförderungsleistungen mit dem See-, dem Binnenschiff und der Eisenbahn ergeben sich ebenfalls Änderungen bei der Güterbeförderungsleistung im Straßengüterverkehr. Es lassen sich zwei Effekte feststellen: Geringere Transportentfernungen durch Verlagerung der Tier-1-Zulieferer in regionale Zulieferparks (Szenario R1) senken die Güterbeförderungsleistung im Straßengüterverkehr. Die Verlagerung der außereuropäischen Produktion nach (Ost-) Europa in den Szenarien R2 und R3 erhöht hingegen die Güterbeförderungsleistung mit dem Lkw, da der Übersee- und Hafenhinterlandverkehr durch innereuropäische Transporte ersetzt wird. Für das Szenario R1 ergibt sich dadurch bis zum Jahr 2030 eine im Vergleich zum Basisszenario um 17,7 % reduzierte Güterbeförderungsleistung im Straßengüterverkehr. Die Veränderungen in Szenario R2 und R3 führen hingegen zu einem Anstieg von 14,8 % in Szenario R2 und 7,6 % in Szenario R3 (vgl. Abbildung 7-4). Neben Vorzeichen und Stärke der Effekte unterscheiden sich die Szenarien auch im Verlauf der Kurven über die Jahre. Während in den Szenarien R2 und R3 die Verlagerung modellzyklenunspezifisch und kontinuierlich stattfindet, orientiert sich die Regionalisierung in Szenario R1 an den Modellwechseln in der Produktion. Im Gegensatz zu den Szenarien R2 und R3 werden die Effekte erst ab dem Jahr 2018 sichtbar, da zu diesem Zeitpunkt der erste Modellwechsel stattfindet, bei dem sich die Zulieferstruktur beeinflussen lässt.

7.2.2 Verlagerungen zwischen den Verkehrsmitteln

Die Regionalisierung der Zulieferstruktur führt zu einer Verlagerung zwischen den Verkehrsmitteln. Die Transporte im Hafenhinterlandverkehr werden durch das Binnenschiff und die Eisenbahn dominiert. Der Lkw wird hauptsächlich eingesetzt, um Güter zwischen Deutschland und dem europäischen Ausland sowie innerhalb Deutschlands zu transportieren. Die Verlagerung der Produktionsstätten aus dem außereuropäischen Ausland nach (Ost-) Europa in den Szenarien R2 und R3 führt daher zu einer Verlagerung vom Binnenschiff und der Eisenbahn zum Lkw.

Der in Tabelle 7-1 dargestellte Anteil der Verkehrsmittel bezieht sich auf die Summe der Güterbeförderungsleistung von Binnenschiff, Eisenbahn und Lkw. Im Basisszenario beträgt dieser Anteil im Jahr 2030 für das Binnenschiff 10 %, für die Eisenbahn 17 % und für den Lkw 73 %. Durch die Reduzierung der Transportentfernungen zwischen den Tier-1-Zulieferern und OEM-Produktionsstandorten sinkt in Szenario R1 der Anteil der Güterbeförderungsleistung im Straßengüterverkehr auf 69 %. Der Rückgang der Güterbeförderungsleistung bei Lkw und die im Vergleich zum Basisszenario unveränderte Güterbeförderungsleistung bei Binnenschiffen und der Eisenbahn führen zu einem um einen Prozentpunkt höheren Anteil der Binnenschiffe. Der Anteil der Eisenbahn steigt dadurch um drei Prozentpunkte.

Tabelle 7-1: Anteil der Verkehrsmittel an der Güterbeförderungsleistung ohne Seeschiffe (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Verkehrsmittel	*Basisszenario*	*Szenario R1*	*Szenario R2*	*Szenario R3*
Binnenschiff	10%	11%	7%	8%
Eisenbahn	17%	20%	13%	15%
Lkw	73%	69%	80%	77%

In den Szenarien R2 und R3 sinkt die Güterbeförderungsleistung im Hafenhinterlandverkehr bei gleichzeitigem Anstieg der Lkw-Transporte. Daher steigt der Anteil des Straßengüterverkehrs an der gesamten Güterbeförderungsleistung auf 80 % in Szenario R2 und 77 % in Szenario R3. Im Vergleich zum Basisszenario ist dies ein Anstieg um sieben bzw. vier Prozentpunkte. Mit wachsender Verlagerung der Tier-2- und Tier-3-Zulieferer sinkt der Anteil der Verkehrsmittel Binnenschiff und Eisenbahn. Der Rückgang im Vergleich zum Basisszenario fällt mit etwa drei Prozentpunkten in Szenario R2 und etwa zwei Prozentpunkten in Szenario R3 bei Binnenschiffen und der Eisenbahn ähnlich hoch aus.

Während sich in Szenario R1 die veränderten Anteile der Verkehrsmittel aus einem Rückgang der Güterbeförderungsleistung im Straßengüterverkehr um etwa 1,95 Mrd. tkm im Jahr 2030 ergeben, werden in den Szenarien R2 Transporte vom Binnenschiff und der Eisenbahn in Höhe von etwa 1,02 Mrd. tkm auf den Lkw verlagert. Die Abgrenzung des Betrachtungsraums führt dazu, dass diese Verlagerung in Szenario R3 nur etwa halb so groß ist (vgl. Tabelle 7-2).

In Tabelle 7-2 werden die Veränderungen der Güterbeförderungsleistung bei den Verkehrsmitteln in den Szenarien R1, R2 und R3 gegenüber dem Basisszenario dargestellt. Die Rückgänge der Werte bei Binnenschiffen und der Eisenbahn in den Szenarien R2 und R3 sind geringer als der Zuwachs im Straßengüterverkehr. Der Grund dafür ist, dass innerdeutsche Produktionsstandorte von Tier-1- und Tier-2-Zulieferern geringere Transportentfernungen zu den Seehäfen als zu (ost-) europäischen Produktionsstandorten aufweisen. Daher steigt mit der Verlagerung von Binnenschiffen und der Eisenbahn im Hafenhinterlandverkehr auf den Lkw die Güterbeförderungsleistung in den Szenarien R2 und R3 um etwa 60 % bzw. 69 % an.

Tabelle 7-2: Veränderungen der Güterbeförderungsleistung im Vergleich zum Basisszenario (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Verkehrsmittel	*Szenario R1*	*Szenario R2*	*Szenario R3*
		alle Werte in Mrd. tkm	
Binnenschiff	0	-0,44	-0,22
Eisenbahn	0	-0,58	-0,28
Lkw	-1,95	1,63	0,84

Die Verlagerung zwischen den Transportmitteln in den Szenarien R2 und R3 ist neben der Veränderung der gesamten Güterbeförderungsleistung ein zentraler Effekt der Regionalisierung. Durch die in den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 beschriebenen unterschiedlichen Emissions- und Kostenfaktoren ist die Aufteilung der Güterbeförderungsleistung nach Verkehrsmitteln für die folgende Abschätzung der ökologischen und ökonomischen Effekte einer Regionalisierung von zentraler Bedeutung. Während die Emissionen und die Transportkosten der Verkehrsmittel Binnenschiff, Eisenbahn und Seeschiff in dieser Arbeit direkt aus der Güterbeförderungsleistung abgeleitet werden, ergeben sich die ökologischen und ökonomischen Effekte der Regionalisierung im Straßengüterverkehr durch eine Betrachtung der Lkw-Fahrleistungen.

7.2.3 Einfluss veränderter Güterbeförderungsleistungen im Straßengüterverkehr auf Fahrleistung und Nutzfahrzeugflotte

Nach Bestimmung der Güterbeförderungsleistung ist die Ableitung der Fahrleistung der Nutzfahrzeuge der nächste Schritt in der Wirkungskette zur Ermittlung der ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen. Aus der ermittelten Güterbeförderungsleistung lässt sich mittels Multiplikation mit der Fahrleistungsintensität die Fahrleistung der eingesetzten Nutzfahrzeuge bestimmen. Dabei gilt: Je fahrleistungsintensiver ein zu transportierendes Gut ist, desto höher sind die durch den Transport entstehenden Fahrzeugkilometer. Der in Abbildung 7-5 dargestellte Verlauf stellt die Fahrleistungen der Szenarien R1, R2 und R3 den Werten des Basisszenarios gegenüber. Da mit abnehmendem Rang der Zulieferer die Fahrleistungsintensität zunimmt, sinkt die Fahrleistung in Szenario R1 bis zum Jahr 2030 mit etwa -27 % überproportional zur Güterbeförderungsleistung. In den Szenarien R2 und R3, die von einer Regionalisierung auf Zulieferstufen mit geringeren Fahrleistungsintensitäten ausgehen, kommt es im Vergleich zur Entwicklung der Güterbeförderungsleistung zu einem leicht unterproportionalen Zuwachs der Fahrleistung um etwa 13 % in Szenario R2 bzw. 7 % in Szenario R3. Wie der Verlauf der Güterbeförderungsleistung sinkt auch die Fahrleistung in Szenario R1 zwischen den Jahren 2018 und 2027 zunächst nahezu linear ab. Danach tritt eine Stagnation der Entwicklung ein, da die Standortverlagerung der Tier-1-Zulieferer mit den letzten Umsiedlungen in Zulieferparks im Jahr 2026 abgeschlossen ist.

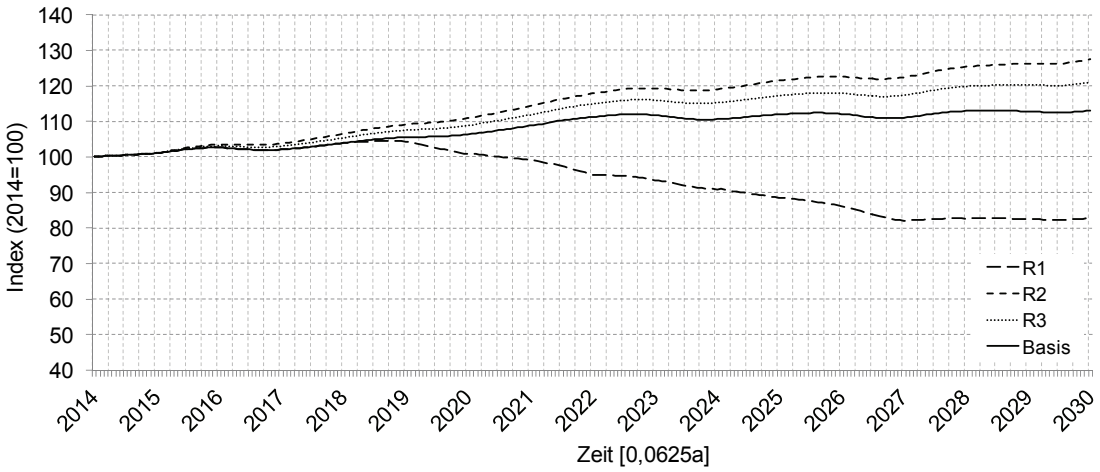


Abbildung 7-5: Entwicklung der Fahrleistung des Verkehrsträgers Straße im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse)

Insgesamt entstehen im Basisszenario durch den Transport von Modulen, Komponenten, Einzelteilen und Rohstoffen im Jahr 2030 etwa 1,35 Milliarden Lkw-Fahrzeugkilometer. Mit ca. 42 % entfallen auf die Tier-2-Zulieferstufe, gefolgt von der Tier-1-Zulieferstufe (38 %), die meisten Fahrzeugkilometer. Die Zulieferstufen mit den Rängen 3 und n erreichen jeweils einen Anteil von 13 % bzw. 7 % der gesamten Fahrleistung.

Durch die regionalisierten Beschaffungsstrukturen in Szenario R1 sinkt die Fahrleistung auf etwa 0,98 Mrd. Fahrzeugkilometer (vgl. Abbildung 7-6). Dem Rückgang innerhalb der Tier-1-Zulieferstufe steht durch die Verlängerung der Entfernungen zwischen Tier-1- und Tier-2-Zulieferer ein leichter Zuwachs in der Zulieferstufe des zweiten Ranges gegenüber. Die Verlagerungseffekte zum Straßengüterverkehr in den Szenarien R2 und R3 führen zu einem Anstieg der Fahrleistung auf etwa 1,5 Mrd. (R2) bzw. 1,4 Mrd. (R3) Fahrzeugkilometer im Jahr 2030. Die Fahrleistungen in den Zulieferstufen Tier-3 und Tier-n erreichen unabhängig von den Szenarien nur etwa 20 % des gesamten Aufkommens. Die Gründe dafür liegen neben den deutlich geringeren Fahrleistungsintensitäten auch in den höheren Anteilen außereuropäischer Beschaffung sowie der räumlichen Grenze des Betrachtungsraumes, der die Vorketten außerdeutscher Produktionsstätten für die Szenarienbewertung außer Acht lässt.

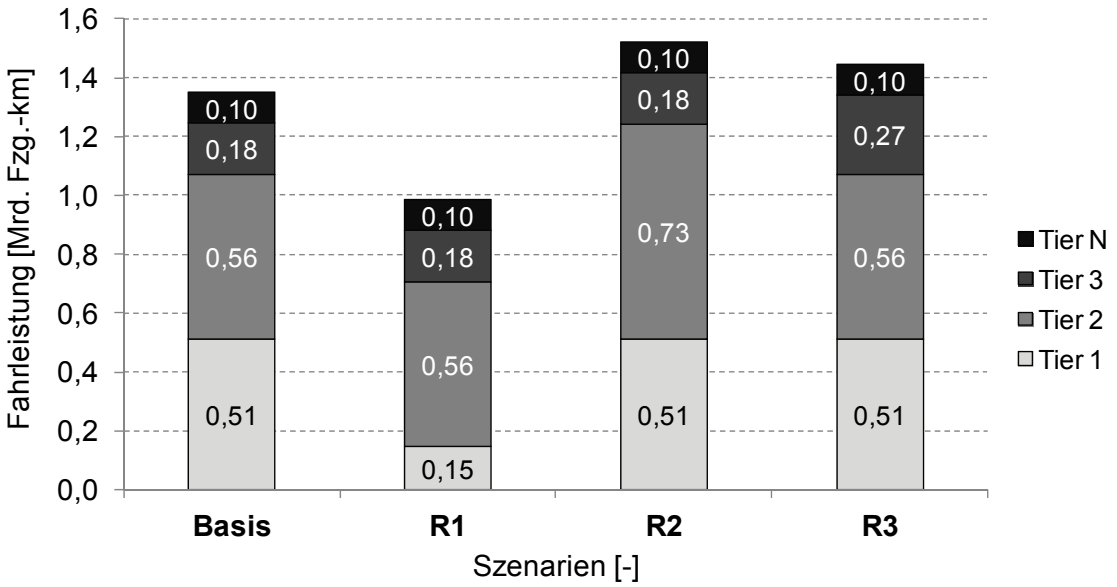


Abbildung 7-6: Lkw-Fahrleistung nach Zulieferstufen in den Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

7.2.3.1 Nutzfahrzeugbedarf nach Größenklassen

Zur Ableitung der ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen der Regionalisierungsszenarien müssen Güterbeförderung- und Fahrleistung mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Transportkosten und CO_2-Emissionen verknüpft werden. Beide Determinanten hängen von der eingesetzten Fahrzeuggröße ab. Größere und damit schwerere Fahrzeuge weisen höhere spezifische Emissionsfaktoren und Transportkosten pro Fahrzeugkilometer auf.

In Abbildung 7-7 werden die eingesetzten Fahrzeuge nach Größenklassen in den Szenarien im Jahr 2030 dargestellt. Bei allen Szenarien dominiert der Sattelzug mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 Tonnen. Dies hat mehrere Gründe: Der Sattelzug ist das einzige Transportgefäß im Straßengüterverkehr, welches groß genug ist, um einen 40-Fuß-Container zu transportieren (vgl. Brähler 2013, S. 150ff.). Zudem werden im Fernverkehr zwischen Europa und Deutschland ausnahmslos Sattelzüge eingesetzt, da diese die geringsten spezifischen Transportkosten pro Tonnenkilometer aufweisen (vgl. Wittenbrink 2011, S. 52ff.). Das Single-Sourcing (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 157) und die hohe Fahrleistungsintensität in der Tier-1-Zulieferstufe führen zu einem Anstieg und einer Bündelung des Transportvolumens. Dies legt die Vermutung nahe, dass auch beim Transport zwischen Tier-1-Zulieferen und OEM-Produktionsstandorten Sattelzüge als größte Fahrzeugklasse zum Einsatz kommen. Geringere Bündelungsmöglichkeiten durch Multiple-Sourcing (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 157) und kürzere Transportentfernungen bei der innerdeutschen Belieferung von Tier-1- und Tier-2-Zulieferern lassen auf den Einsatz von leichteren Gewichtsklassen (G1 bis G5) schließen. Dabei wird die Gefäßgröße durch die Anzahl der Zulieferer, der Menge der täglichen Belieferung (vgl. Unterkapitel 5.1.4.2) und der Fahrleistungsintensität mit dem Ziel, die Transportkosten zu minimieren, determiniert.

Der durch diese Wirkungszusammenhänge bestimmte Fahrzeugbedarf ist in Abbildung 7-7 dargestellt. Insgesamt werden für den Transport in allen Zulieferstufen im Jahr 2030 etwa 12.500 Fahrzeuge benötigt (Basisszenario). Davon entfallen etwa 76 % auf den Sattelzug als schwerste Gewichtsklasse. Die restlichen 24 % verteilen sich auf die Gewichtsklassen G1 bis G5.

Durch den Rückgang der Fahrleistung nimmt der gesamte Fahrzeugbedarf zwischen dem Basisszenario und dem Szenario R1 um etwa 3.000 Fahrzeuge auf 9.500 Fahrzeuge ab (Jahr 2030). Diese Differenz beinhaltet einerseits den Rückgang des Bedarfs an Sattelzügen durch eine Absenkung der Fahrleistung zwischen Tier-1-Zulieferer und OEM-Produktionsstandort und andererseits den leichten Anstieg des Bedarfs an Fahrzeugen durch die Anpassung der Entfernungen zwischen Tier-2- und Tier-1-

Zulieferer. Durch die Verlagerung der Produktion nach Europa werden die Transporte auf die Straße verlagert. Die führt zu einer Zunahme des Fahrzeugbedarfs in den Szenarien R2 und R3. Hierbei steigt die Anzahl der benötigten Sattelzüge um etwa 1.000 Fahrzeuge in Szenario R2 und 500 Fahrzeuge in Szenario R3.

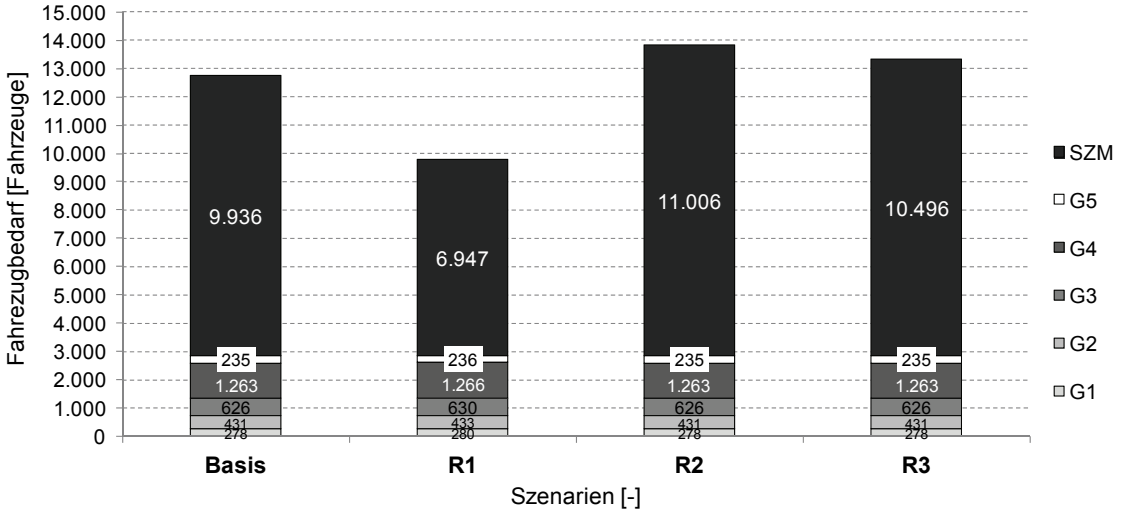


Abbildung 7-7: Fahrzeugbedarf in der Beschaffungslogistik nach Gewichtsklassen für die Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

7.2.3.2 Nutzfahrzeugbedarf nach Fahrleistungsklassen

Neben der Größe der eingesetzten Nutzfahrzeuge werden die Transportkosten von der jährlichen Fahrleistung der Fahrzeuge bestimmt: Mit steigender Anzahl der gefahrenen Kilometer sinkt der Anteil der Fixkosten an den Gesamtkosten und die Transportkosten pro Fahrzeugkilometer nehmen ab (vgl. Unterkapitel 5.2.3.1.1). Gleichzeitig beeinflusst die jährliche Fahrleistung die Diffusion von Effizienztechnologien und Abgasnormen in die Nutzfahrzeugflotte. Mit sinkender Fahrleistung werden die Fahrzeuge länger genutzt. Mit steigender Nutzungsdauer verlangsamt sich die Erneuerung der Fahrzeugflotte und die damit verbundene Diffusion neuer Technologien.

Im Vergleich zum Basisszenario steigt in Szenario R1 der Anteil der Sattelzugmaschinen mit geringen Jahresfahrleistungen an (vgl. Abbildung 7-8). Geringe Durchschnittsgeschwindigkeit auf Kreisstraßen (vgl. Esch und Dahlhaus 2013, S. 415) sowie ein hoher Anteil von Be- und Entladezeiten an der gesamten Betriebsdauer der Fahrzeuge führen zu geringen jährlichen Fahrleistungen. Dies führt zu einem Anstieg der Anzahl Fahrzeuge mit einer Jahresfahrleistung zwischen 10.000 Kilometer und 15.000 Kilometer pro Jahr. Diese werden eingesetzt, um die Entfernungen zwischen den Zulieferparks und den OEM-Produktionswerken zu überbrücken. Die spezifischen Kosten für

diese Fahrleistungsklasse liegen mit knapp 4,50 Euro pro Fahrzeugkilometer etwa viermal so hoch wie bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 95.000 Kilometer pro Jahr. Neben den gestiegenen Anteilen von Jahresfahrleistungsklassen unter 20.000 Kilometer pro Jahr steigt in Szenario R1 auch der Anteil der Jahresfahrleistungsklassen über 100.000 Kilometer pro Jahr an. Dies liegt daran, dass Tier-1-Zulieferer, die bereits heute dezentral produzieren, in die Zulieferparks verlagert werden, während zentral produzierende Zulieferer ihren Produktionsstandort beibehalten. In der Verteilung der Transportentfernungen treten damit Häufungen bei geringen und bei hohen Transportentfernungen auf, während die Anteile der mittleren Transportentfernungen zurückgehen (vgl. Abbildung 7-8).

In den Szenarien R2 und R3 steigt die Anzahl der Transporte zwischen Deutschland und dem europäischen Ausland. Diese Transporte weisen Entfernungen auf, die zu einer jährlichen Fahrleistung der Sattelzüge von über 100.000 Kilometer führen. In Szenario R2 steigt dadurch, wie in Abbildung 7-8 dargestellt, der Anteil der Nutzfahrzeugflotte, welcher zwischen 130.000 Kilometer und 135.000 Kilometer pro Jahr fährt, an. In Szenario R3 führt die Verlagerung nach (Ost-) Europa zu einem Anstieg der Nutzfahrzeuge mit einer jährlichen Fahrleistung zwischen 140.000 Kilometer und 145.000 Kilometer pro Jahr.

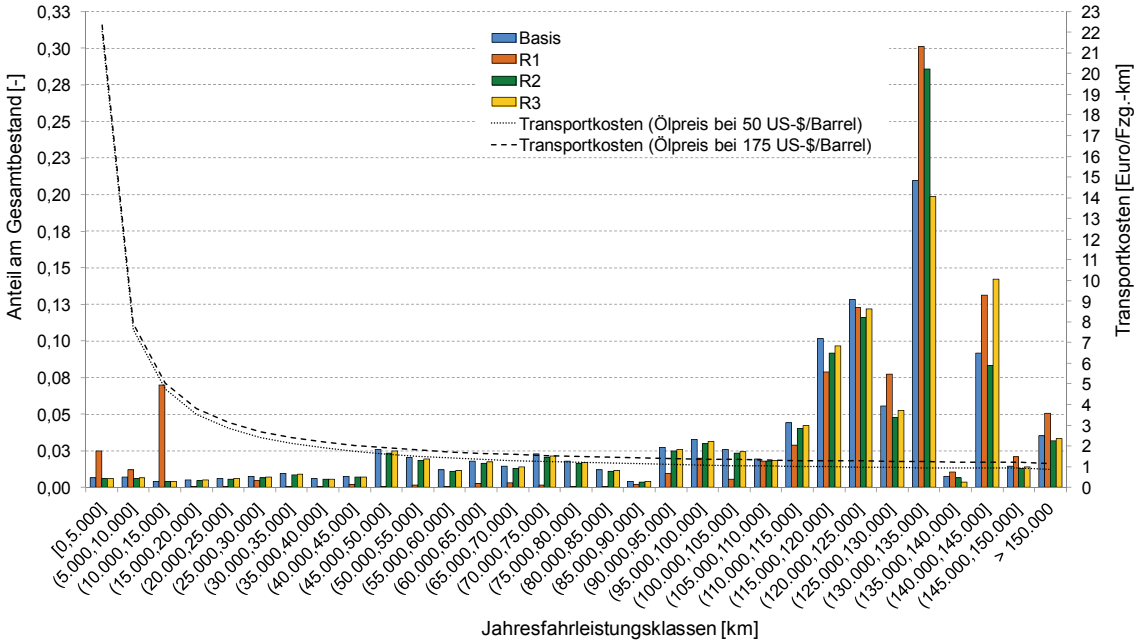


Abbildung 7-8: Verteilung des Nutzfahrzeugbestandes nach Jahresfahrleistungsklassen (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Mit wachsender Fahrleistung sinkt der Fixkostenanteil an den Transportkosten. Nutzfahrzeuge mit einer Fahrleistung von mehr als 130.000 Kilometer pro Jahr führen daher, verglichen mit einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 95.000 Kilometer, zu etwa 0,20 Euro geringeren Kosten pro Fahrzeugkilometer (vgl. Abbildung 7-8). Die Verlagerung auf den Lkw in Szenario R2 und R3 senkt somit durch höhere Auslastung der Fahrzeuge die Transportkosten pro Fahrzeugkilometer.

Mit steigender Fahrleistung sinken nicht nur die Kosten pro Fahrzeugkilometer, sondern auch die Lebensdauer der Nutzfahrzeuge: Eine intensive Nutzung der Lkw erhöht den Verschleiß und führt zu einer früheren Verschrottung. Für die Flotte der Sattelzüge beträgt der Mittelwert der Altersverteilung im Basisszenario 2,24 Jahre. Dies liegt leicht unter dem derzeitigen Altersdurchschnitt aller in Deutschland zugelassen Sattelzugmaschinen (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2013a). Dadurch, dass die Nutzfahrzeuge in Szenario R1 geringere Entfernungen zurücklegen, steigt das Verhältnis zwischen dem Zeitbedarf für Be- und Entladung und der Fahrzeit an. Zudem sinkt die mittlere Transportgeschwindigkeit, da der Anteil von Land- und Kreisstraßen an der gesamten Transportdistanz wächst. Da die Lkw weniger genutzt werden, ist der Verschleiß geringer und die Lebensdauer höher. Dies führt in Folge zu einem größeren Mittelwert der Altersverteilung von 2,43 Jahren. Bei den Szenarien R2 und R3 dreht sich dieser Effekt um: Ein höherer Anteil der weiten Transportentfernungen von und nach Europa senkt den Anteil der Be- und Entladungszeiten an den Gesamtbetriebszeiten der Lkw. Dadurch steigt die jährliche Fahrleistung der Fahrzeuge an. Höhere Fahrleistungen führen zu geringeren Lebensdauern. Dadurch senkt sich das mittlere Flottenalter (Mittelwert) in R2 auf 2,21 Jahre und in R3 auf 2,20 Jahre ab.

Neben den Transportkosten wirkt sich die veränderte Jahresfahrleistung auf die CO_2-Emissionen aus: Im Falle einer Markteinführung von Effizienzmaßnahmen, die den Kraftstoffverbrauch bis zum Jahr 2030 um 20 % senken, verzögern geringe Jahresfahrleistungen die Geschwindigkeit der Diffusion. Im Falle von Szenario R1 bedeutet dies im Flottendurchschnitt (Sattelzüge) für das Jahr 2030 eine im Vergleich zum Basisszenario um ca. 6 Gramm pro Fahrzeugkilometer erhöhte spezifische CO_2-Emission. Die höheren Jahresfahrleistungen in Szenario R2 und R3 haben auf die spezifischen CO_2-Emissionen hingegen eine senkende Wirkung: Hohe Fahrleistungen verkürzen die Nutzungsdauer und beschleunigen die Diffusion von effizienteren Antrieben. Dadurch sinkt im Jahr 2030 bei Szenario R2 der Flottendurchschnitt um ca. 8 Gramm CO_2 pro Fahrzeugkilometer und bei R3 um etwa 5 Gramm CO_2 pro Fahrzeugkilometer. Sämtliche Änderungen bewegen sich im Vergleich zum Basisszenario (Flottendurchschnittsemission: 728 Gramm CO_2 pro Fahrzeugkilometer) im Bereich von -1 % bis +1 %.

7.2.3.3 Nutzfahrzeugbestand nach Emissionsklassen

Neben der Fahrleistung und der Größe der eingesetzten Fahrzeuge leitet sich die Menge der emittierten Luftschadstoffe aus der für die Fahrzeuge gültigen Abgasnorm ab. Die Eingruppierung in Euro-Emissionsklassen erfolgt abhängig von dem jeweiligen Zulassungsjahr des Fahrzeuges. Derzeit können die Fahrzeuge in der deutschen Nutzfahrzeugflotte fünf verschiedenen Euro-Abgasnormen zugeordnet werden. Euro 6 als restriktivste Euro-Abgasnorm gilt seit dem 01.01.2013 für alle neu zugelassenen Lkw. Abbildung 7-9 zeigt die Anteile der Nutzfahrzeuge mit den Euro-Abgasnormen 2 bis 6. Da es derzeit keine konkreten Überlegungen für die Einführung einer Abgasnorm nach Euro 6 gibt, besteht die Flotte bis zum Jahr 2030 nahezu vollständig aus Fahrzeugen, die dieser Abgasnorm genügen. Fahrzeuge, deren Abgasnachbehandlung nach den Abgasnormen Euro 2 bis Euro 5-Normen zertifiziert sind, scheiden durch die erreichten Fahrleistungen von im Mittel 1,5 Millionen Fahrzeugkilometer bis zum Jahr 2030 nahezu komplett aus der Flotte aus. Die Regionalisierungsszenarien haben demnach keinen Einfluss auf die Diffusion der Abgasnormen; es gibt folglich keine Unterschiede bei den spezifischen Luftschadstoffemissionen in den Szenarien Basis, R1, R2 und R3. Allerdings würde im Falle der Einführung einer neuen Abgasnorm nach dem Jahr 2015 die geringere Fahrleistung der Fahrzeuge in Szenario R1 und die damit verbundenen längeren Nutzungszeiträume zu einer verzögerten Diffusion führen. Umgekehrt gilt dies für die Szenarien R2 und R3.

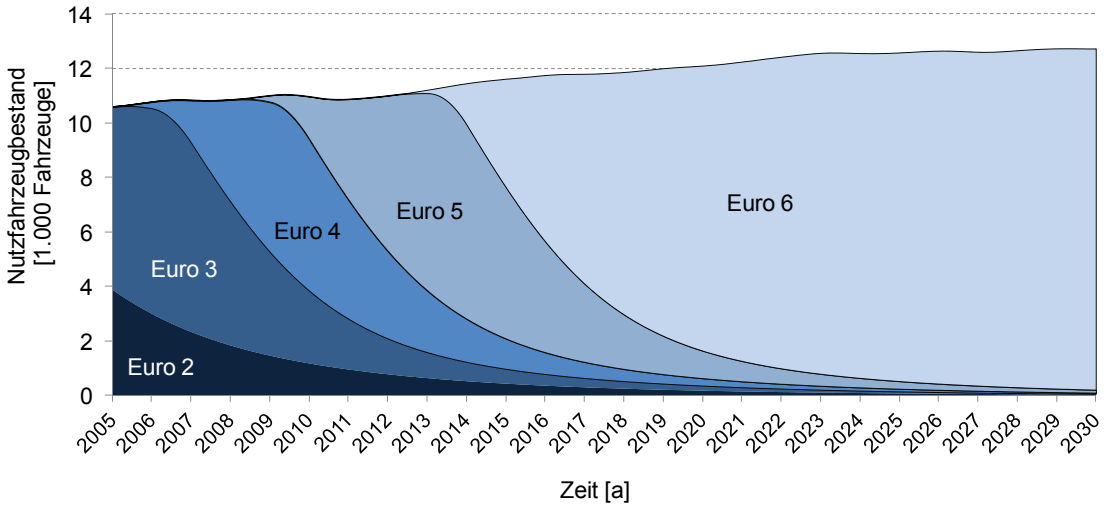


Abbildung 7-9: Zusammensetzung der Nutzfahrzeugflotte nach Schadstoffnormen (Modellergebnisse)

Zusammenfassung zu Effekten auf die Nutzfahrzeugflotte

Die reduzierten Transportentfernungen führen in allen drei Szenarien zu einer Verringerung der Summe der Güterbeförderungsleistung über alle Verkehrsträger. In den Szenarien R2 und R3 werden zudem Transporte zwischen den Verkehrsträgern verlagert. Im Falle der Standortverlagerung von Tier-1-Zulieferern in OEM-werksnahe Zulieferparks in Szenario R1 geht die Fahrleistung im Straßengüterverkehr zurück. Durch niedrigere Jahresfahrleistungen entstehen höhere spezifische Transportkosten und die Lebensdauer der Fahrzeuge steigt an. Eine höhere Lebensdauer verlangsamt die Diffusion von Kraftstoffreduktionsmaßnahmen in die Flotte. Eine Verlagerung der ausländischen Produktion nach Europa (Szenario R2 und R3) führt zu einem Anstieg der Güterbeförderungsleistung im Straßengüterverkehr bei gleichzeitigem Rückgang der Güterbeförderungsleistung der Verkehrsträger Seeschiff, Binnenschiff und Eisenbahn (Hafenhinterlandverkehr). Der Bedarf an Nutzfahrzeugen mit jährlichen Fahrleistungen über 100.000 Kilometer pro Jahr steigt durch die wachsenden Transportentfernungen im Straßengüterverkehr. Damit können Kraftstoffeffizienzmaßnahmen schneller in die Nutzfahrzeugflotte diffundieren und die spezifischen Transportkosten sinken.

7.3 Auswirkungen der Regionalisierung auf CO_2-Emissionen und Transportkosten

Auf Basis der ermittelten Güterbeförderungs- und Fahrleistung und der Flottengröße und -zusammensetzung lassen sich erste ökologische und betriebswirtschaftliche Wirkungen der Regionalisierungsszenarien bestimmen. Zunächst sollen in diesem Unterkapitel die CO_2-Emissionen und die Transportkosten genauer betrachtet werden, da diese häufig in der Öffentlichkeit diskutiert werden (vgl. Kapitel 1). Die übrigen ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen folgen in den nächsten beiden Unterkapiteln. Die Auswertung beinhaltet neben Detailbetrachtungen der Module und Zulieferstufen auch regionale Analysen der OEM-Produktionsstandorte. Da die Produktionsvolumina der OEM-Produktionsstandorte stark variieren (μ_{2014} = 263.574 Pkw/Jahr; σ_{2014} = 174.422 Pkw/Jahr), wurde für die Ergebnisdarstellung eine Normierung der Werte mittels Division durch die am Standort produzierten Pkw vorgenommen.

7.3.1 Regionalisierungsbedingte Veränderungen der CO_2-Emissionen

Die transportbedingten CO_2-Emissionen ergeben sich aus dem Produkt der Fahr- bzw. Güterbeförderungsleistung und den in Unterkapitel 5.2.2.1 beschriebenen verkehrsmittelspezifischen Emissionsfaktoren. Im Jahr 2014 lag der transportbedingte CO_2-

Ausstoß im Mittel über alle OEM-Produktionswerke bei etwa 337 Kilogramm CO_2 pro produziertem Pkw (Modellergebnisse). Unter der Annahme, dass bis zum Jahr 2030 die Nutzfahrzeuge 10 % weniger Kraftstoff verbrauchen und die CO_2-Emissionen bei der Erzeugung von Strom für den Schienengüterverkehr bis dahin auf 530 g CO_2 pro Kilowattstunde sinken (vgl. Emissionen der Verkehrsmittel in Kapitel 5.2.2) ergibt sich für das Jahr 2030 ein Wert von etwa 332 Kilogramm CO_2 pro produzierten Pkw. Besonders hohe transportbedingte Emissionen weisen die Produktionsstandorte mit geringen Produktionsmengen auf. Namentlich sind dies die Volkswagenstandorte Osnabrück und Dresden. Der Grund dafür liegt darin, dass durch die geringe Produktionsmenge vermehrt kleinere Fahrzeuge im innerdeutschen Transport zum Einsatz kommen. Diese Fahrzeuge weisen höhere Emissionen pro transportierter Tonne auf, so dass insgesamt die Emissionen über den Werten von Werken mit großer Produktionsmengen liegen, da dort eher großvolumige Transportgefäße eingesetzt werden. Insgesamt spielt die Lage der Produktionsstandorte und die damit verbundenen Transportentfernungen zwischen den Zulieferern eine entscheidende Rolle: Standorte mit kurzen Entfernungen zu den Nordseehäfen weisen überdurchschnittliche Transportentfernungen ins europäische Ausland auf. Standorte im Südwesten Deutschlands (Rastatt, Saarlouis, Sindelfingen) sind sowohl von den Nordseehäfen als auch von Produktionsstandorten in Osteuropa überdurchschnittlich weit entfernt.

In Bezug auf die ökologischen Wirkungen kann folgende Aussage abgeleitet werden: Alle drei Regionalisierungsszenarien führen zu einer signifikanten Reduktion der CO_2-Emissionen über deutschem Boden. Die stärkste Absenkung lässt sich für die Mehrzahl der Produktionswerke mittels Umsetzung von Szenario R1 realisieren. Das Szenario R3 beinhaltet das geringste Reduktionspotential. In Abbildung 7-10 werden die absoluten CO_2-Emissionen und Abweichungen der Szenarien zum Basisszenario für alle OEM-Produktionswerke dargestellt. Im Mittel (Median) über alle OEM-Produktionswerke wird der spezifische CO_2-Ausstoß pro Fahrzeug in Szenario R1 auf etwa 293 Kilogramm CO_2 pro Pkw abgesenkt. Die Werte für Szenario R2 und R3 liegen zwar mit 294 Kilogramm CO_2 pro Pkw bzw. 309 Kilogramm CO_2 pro Pkw leicht höher, jedoch auch deutlich unter dem Wert des Basisszenarios mit etwa 332 Kilogramm CO_2 pro produzierten Pkw. Durch die Reduktion der Transportentfernungen in Szenario R1 auf einheitliche Werte zwischen 0 km und 5 km reduziert sich nicht nur der Median, sondern auch die Varianz der Verteilung der spezifischen CO_2-Emissionen der Produktionswerke gegenüber den übrigen Szenarien.

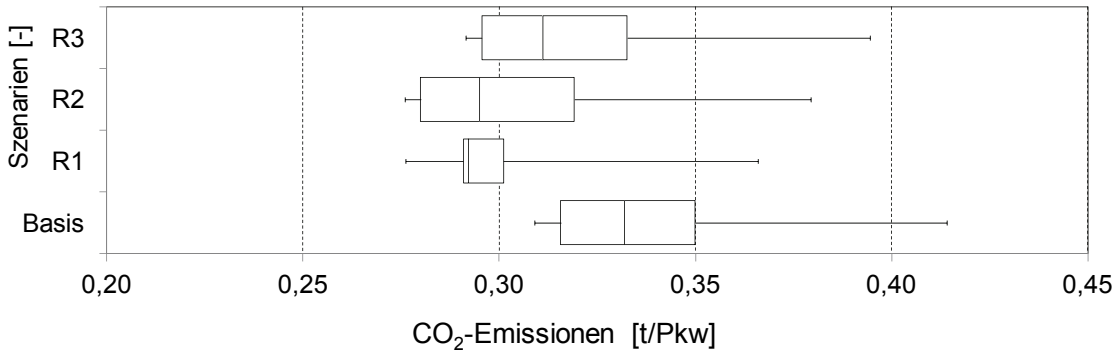


Abbildung 7-10: CO_2-Emissionen der gesamten Lieferkette (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – 10 % effizientere Lkw)

Während die Rangfolge des CO_2-Reduktionspotentials auf aggregierter Ebene der Zulieferstufen klar erkennbar ist, ergibt sich für die Produktionswerke, wie in Abbildung 7-11 dargestellt, eine deutlich stärkere Heterogenität der Ergebnisse: Bei den OEM-Produktionsstandorten im Süden und Südosten Deutschlands führt eine Verlagerung der Zulieferer nach (Ost-) Europa in den Szenarien R2 und R3 zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen von etwa 12 % bzw. 7 %. Die Differenz zum Basisszenario bei den Standorten in Nord- und Mitteldeutschland fällt durch die geringere Transportdistanz im Hafenhinterlandverkehr und die höhere Distanz zu den Produktionsstandorten in (Ost-) Europa etwas niedriger aus. Durch die Umsetzung des Regionalisierungsszenarios R1 können bei einigen OEM-Produktionsstandorten besonders hohe CO_2-Reduktionspotentiale realisiert werden. Dies hängt entscheidend davon ab, wie regional bzw. lokal die Beschaffung der jeweiligen Standorte im Basisszenario ausgestaltet ist. Je stärker dies ausgeprägt ist, desto geringer sind die durch das Szenario R1 erzeugbaren Effekte. Bei Produktionsstandorten wie Rastatt (Daimler), Ingoldstadt (Audi), Neckarsulm (Audi) und Zwickau (VW), in deren Nähe bereits heute Zulieferparks betrieben werden, ändert sich die Rangfolge des Reduktionspotentials, und die Effekte fallen geringer aus als bei Szenario R2.

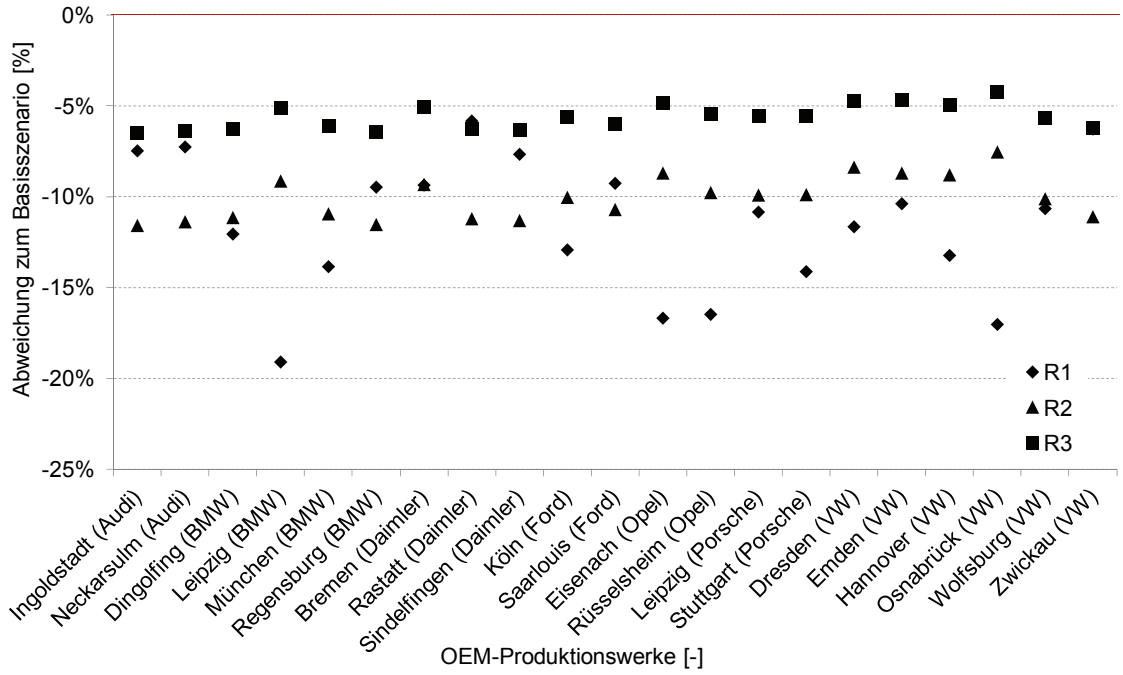


Abbildung 7-11: Transportbedingte CO_2-Emissionen der gesamten Lieferkette nach OEM-Produktionsstandorten (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – 10 % effizientere Fahrzeuge)

Kumuliert für alle Verkehrsträger ergeben sich für die Szenarien die in Abbildung 7-12 dargestellten Verläufe der gesamten transportbedingten CO_2-Emissionen. Durch die kontinuierliche Verlagerung der Produktion nach Europa werden die Emissionen in Szenario R2 und R3 bereits ab dem Jahr 2016 gesenkt. Das bereits beschriebene höhere Reduktionspotential von Szenario R2 führt dazu, dass über den gesamten Verlauf bis zum Jahr 2030 die CO_2-Emissionen in Szenario R2 geringer ausfallen als in Szenario R3. Die Bindung der Standortverlagerung an die Modellzyklen führt in Szenario R1 hingegen dazu, dass erst ab dem Jahr 2018 eine messbare Reduktion der CO_2-Emissionen eintritt. Da mit jedem Modellwechsel eine festgelegte Anzahl der Zulieferer (vgl. Unterkapitel 7.1.1) in unmittelbarer Nähe zum OEM-Produktionswerk angesiedelt wird, unterscheidet sich der Verlauf der Emissionskurven vom kontinuierlichen Reduktionspfad in Szenario R2 und R3. Insgesamt werden in allen Szenarien die transportbedingten CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2030 signifikant reduziert. Im Vergleich zu Emissionen von etwa 2,0 Millionen Tonnen CO_2 im Jahr 2030 im Basisszenario lassen sich diese durch die Szenarien R1 und R2 um etwa 12 % absenken. Auch das Szenario R3 reduziert die jährlichen Emissionen um knapp 7 %.

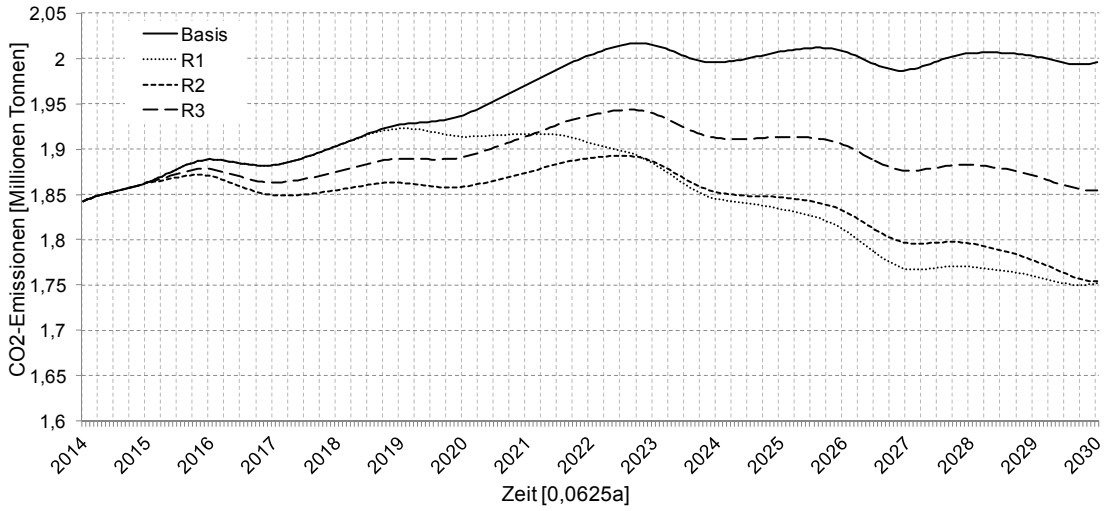


Abbildung 7-12: Entwicklung der transportbedingten CO_2-Emissionen in den Szenarien im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse)

Die Verweildauer des Gases CO_2 in der Atmosphäre von deutlich über 50 Jahren (vgl. Förstner 2004, S. 102) erfordert neben der Betrachtung von jährlichen Emissionen auch die Analyse von kumulierten Werten über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die in Abbildung 7-12 beschriebene Äquivalenz der Ergebnisse der Szenarien R1 und R2 lässt sich bei der in Abbildung 7-13 dargestellten kumulierten Betrachtung nicht bestätigen. Das verzögerte Einsetzen der Regionalisierung in Szenario R1 führt zu einer im Vergleich zu Szenario R2 0,5 Prozentpunkten geringeren Reduktion der kumulierten Emissionen bis zum Jahr 2030. Die linearen Verläufe der Produktionsverlagerung in Szenarien R2 und R3 finden sich im Verlauf der Emissionskurven wieder. Die modellzyklusabhängige Verlagerung der Produktionsstandorte führt hingegen zu einem nichtlinearen Verlauf, der stets oberhalb der linearen Kurve aus Szenario R2 verläuft.

Insgesamt lassen sich durch die Regionalisierungsszenarien auch die kumulierten CO_2-Emissionen deutlich reduzieren. Das Szenario R3 erreicht Werte, die um etwa 3,5 % unter denen des Basisszenarios liegen. In Szenario R1 lässt sich ein Reduktionspotential von etwa 5,5 % bis zum Jahr 2030 erkennen. R2 erreicht mit knapp 6,2 % die höchste negative Abweichung zum Basisszenario. Bedingt durch den Verlauf der Regionalisierung wirken diese Werte im Vergleich zur Abweichung der absoluten Emissionen im Jahr 2030 relativ gering. Allerdings muss ergänzend angemerkt werden, dass die kumulierte Abweichung nach dem Jahr 2030 weiter ansteigen wird, während die Abweichung der jährlichen Emissionen mit abgeschlossener Regionalisierung nach dem Jahr 2030 stagnieren würde.

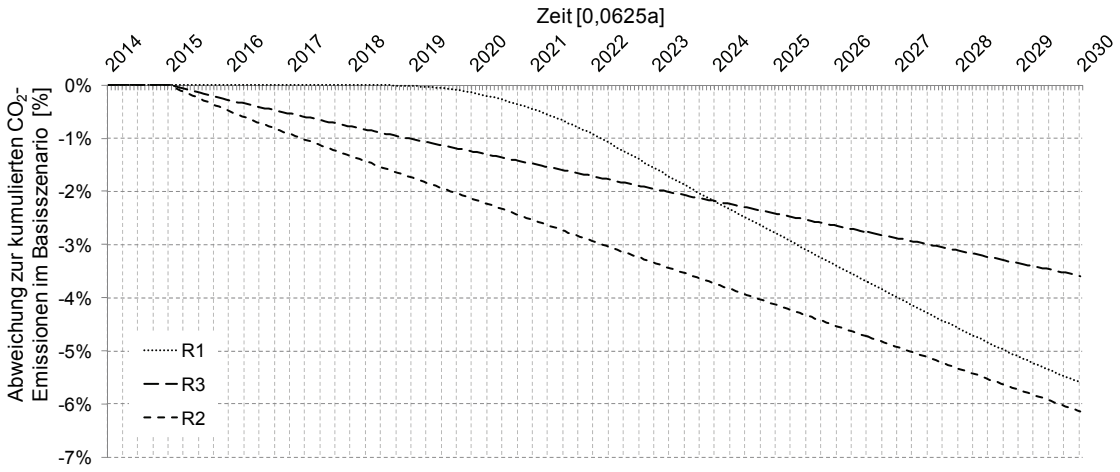


Abbildung 7-13: Entwicklung der kumulierten transportbedingten CO_2-Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 2014 (Modellergebnisse)

Mit Blick auf die CO_2-Emissionen können alle drei Szenarien als vorteilhaft beschrieben werden. Wenngleich sich die gesamten jährlichen CO_2-Emissionen bei Szenario R1 und R2 im Jahr 2030 kaum unterscheiden, weist R2 bei kumulierter Betrachtung leichte Vorteile auf. Die Effekte einer Regionalisierung der Tier-3-Zulieferstufe fallen hingegen - sowohl kumuliert als auch jährlich - deutlich geringer als in den Szenarien R1 und R2 aus.

7.3.2 Regionalisierungsbedingte Veränderungen der Transportkosten

In den Unternehmen sind in den überwiegenden Fällen weniger die ökologischen Wirkungen in Form von CO_2-Emissionen, sondern die betriebswirtschaftlichen Wirkungen die Treiber für Entscheidungen. Daher werden im Folgenden die Effekte der Regionalisierungsszenarien auf die Transportkosten analysiert. Analog zum Vorgehen bei Betrachtung der CO_2-Emissionen werden die Transportkosten sowohl aggregiert in den Zulieferstufen als auch nach Produktionsstandorten differenziert analysiert.

Durch den Transport in der Beschaffungslogistik entstehen im Mittel (Median) über alle OEM-Produktionswerke Transportkosten in Höhe von etwa 221 Euro pro produziertem Pkw. Dieser Wert steigt im Basisszenario unter Berücksichtigung einer Rohölpreissteigerung auf 112 US-Dollar pro Barrel auf 234 Euro pro produziertem Pkw. In Abbildung 7-14 werden die Werte für die drei Szenarien dem Basisszenario gegenübergestellt. Die Standortverlagerungen in Szenario R1 führen zu signifikant niedrigeren Transportkosten von 181 Euro pro produziertem Pkw. Im Gegensatz dazu erhöhen sich durch die Verlagerung der Produktion in den Szenarien R2 und R3 die Transportkosten im

Vergleich zum Basisszenario auf knapp 254 Euro (R2) bzw. 245 Euro (R3) pro produziertem Pkw. Die Transportkostensteigerungen entstehen durch die Verlagerung der Transporte vom See- / Binnenschiff bzw. der Eisenbahn auf den Lkw und den damit verbundenen höheren Transportkosten pro Tonnenkilometer.

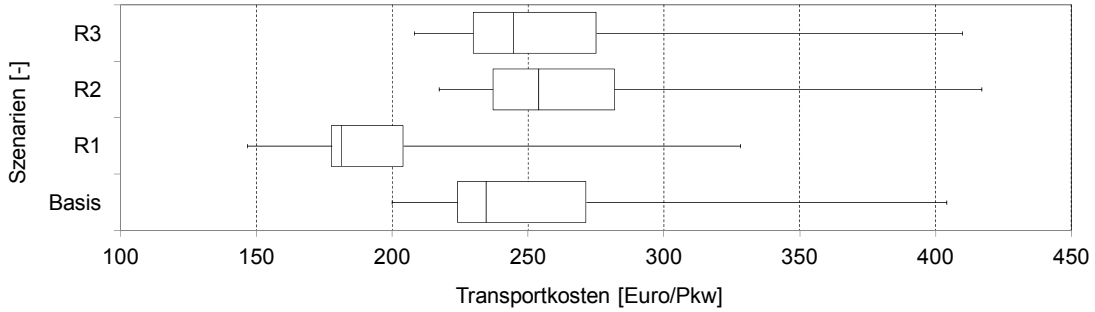


Abbildung 7-14: Transportkosten der gesamten Lieferkette (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – Ölpreis 112 US-Dollar/Barrel; 10 % effizientere Lkw)

Wie in Abbildung 7-15 dargestellt, steigt die Stärke dieser negativen betriebswirtschaftlichen Wirkung mit sinkendem Abstand der OEM-Produktionswerke zu den Nordseehäfen. Somit entstehen für die Werke Bremen (Daimler), Wolfsburg und Emden (VW) mit etwa 9 % in Szenario R2 bzw. 5 % in Szenario R3 die höchsten und für die Werke Dingolfing (BMW) und Dresden (VW) mit etwa 3 % (R2) bzw. 1 % (R3) die geringsten Transportkostensteigerungen.

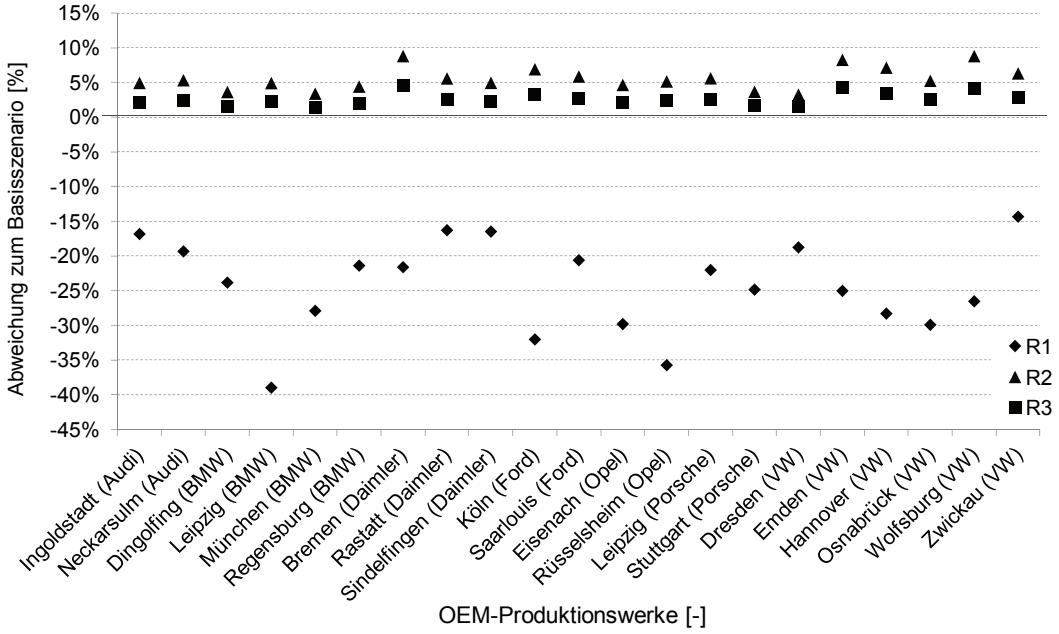


Abbildung 7-15: Transportkosten der gesamten Lieferkette nach OEM-Produktionsstandorten (Modellergebnisse für das Jahr 2030 – Ölpreis 112 US-Dollar/Barrel; 10 % effizientere Fahrzeuge)

7.3.3 Vereinbarkeit ökologischer und betriebswirtschaftlicher Ziele bei einer Regionalisierung - Break-Even-Transportentfernungen

Die Ergebnisse der beiden vorangegangenen Unterkapitel zeigen, dass durch eine Regionalisierung reduzierte Transportentfernungen nicht zwangsläufig ökologische und betriebswirtschaftliche Wirkungen senken. Die Stärke und das Vorzeichen der Effekte hängen von der Zulieferstufe und der Art des Moduls ab.

In Tabelle 7-3 werden die Mediane für die CO_2-Emissionen und Transportkosten aller OEM-Produktionsstandorte gegenübergestellt. Zusätzlich zu den Gesamtergebnissen werden die Anteile der Zulieferstufen ausgewiesen. Im Mittel (Median) werden im Status-Quo (Stand 2014) durch den Transport in der Beschaffungslogistik pro produzierter Pkw-Einheit etwa 370 kg CO_2 emittiert. Die durch den Transport entstehenden Kosten belaufen sich auf etwa 221 Euro pro produzierter Pkw-Einheit (Median).

Tabelle 7-3: Durchschnittliche CO_2-Emissionen und Transportkosten in den Zulieferstufen (Modellergebnisse für das Jahr 2014)

Zulieferstufe	*CO_2-Emissionen* [t CO_2/Pkw]	*Transportkosten* [Euro/Pkw]
Tier-1	0,08 (22 %)	106 (48 %)
Tier-2	0,17 (46 %)	79 (36 %)
Tier-3	0,08 (22 %)	23 (10 %)
Tier-n	0,04 (10 %)	13 (6 %)
Gesamte Lieferkette	**0,37 (100 %)**	**221 (100 %)**

Bezüglich der Anteile der Zulieferstufen an den gesamten Transportkosten ist auffällig, dass den Transporten zwischen OEM und Tier-1 etwa 40 % bis 50 % der gesamten Transportkosten zugeordnet werden können. Weitere 36 % entfallen auf die Tier-2-Zulieferstufe. Im Gegensatz dazu entstehen durch die Transporte vom Tier-1-Zulieferer zum OEM nur etwa 20 % bis 25 % der gesamten CO_2-Emissionen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Transporte mit Lkw verglichen mit anderen Verkehrsträgern relativ hohe spezifische Transportkosten aufweisen, die spezifischen CO_2-Emissionen aber nicht in gleichem Maße höher liegen. Besonders deutlich wird dies durch den Vergleich von Seeschiff und Lkw (siehe auch Abbildung 7-16).

Nach Betrachtung der Wirkungen einer Regionalisierung auf Transportkosten und CO_2-Emissionen stellt sich die Frage nach den Gründen für die unterschiedlichen Vorzeichen der Effekte in den Szenarien R1 und R2/R3: Während die Verlagerung weltweiter

Produktionsstandorte nach Europa zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen führt, steigen gleichzeitig die Transportkosten an. Der Unterschied zwischen den Szenarien R2 bzw. R3 und R1 besteht darin, dass eine Verlagerung innerdeutscher Tier-1-Produktionsstandorte in unmittelbarer Nähe zum OEM-Produktionsstandort zu einer Reduktion der Fahrleistung im Straßengüterverkehr führt. Eine Verlagerung der Produktion nach Europa impliziert jedoch neben der Verkürzung der Transportentfernungen einen Wechsel der Verkehrsträger: Während Waren aus Übersee mit Seeschiffen und Bahn/Binnenschiff im Hafenhinterlandverkehr transportiert werden, wird der innereuropäische Transport überwiegend mit dem Lkw abgewickelt. Abbildung 7-16 stellt die transportkettenspezifischen Unterschiede zwischen der inner- und außereuropäischen Beschaffungslogistik dar. Entscheidend für die Unterschiede zwischen den ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen sind die spezifischen Transportkosten und Emissionen beim Seeschiff. Während die spezifischen CO_2-Emissionen von Seeschiffen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Faktoren für Binnenschiffe oder dem Schienengüterverkehr liegen, fallen die spezifischen Transportkosten um den Faktor 500 bis 800 niedriger als beim Transport mit der Eisenbahn oder dem Lkw aus. Folglich ergeben sich trotz der sehr hohen Transportentfernungen von d_{TW1} = 15.000 km bei der Verlagerung unter der zugrunde gelegten Verkehrsverteilung keine positiven betriebswirtschaftlichen Effekte.

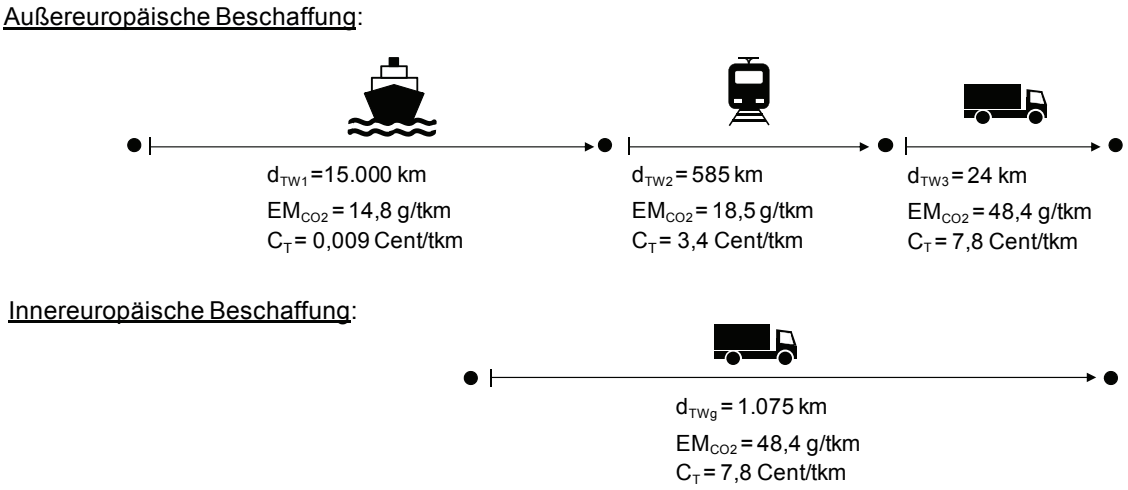


Abbildung 7-16: Unterschiede der Emissionen (EM) und Transportkosten (C_T) (Tier-2) zwischen außereuropäischer und innereuropäischer Beschaffung (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Auf Grundlage dieser Abschätzung stellt sich die Frage, wie stark die Transportentfernungen d_{TWg} in Szenario R2 und R3 sinken müssen, damit positive betriebswirtschaftliche Wirkungen entstehen. Die Break-Even-Transportdistanz gibt die Distanz zwischen den Zulieferern an, bei der die CO_2-Emissionen bzw. die Transportkosten im Basisszе-

nario und in den Szenarien R2 und R3 gleich sind. Alle Konfigurationen von Produktionsstandorten, die geringere Transportentfernungen zur Folge haben, führen zu positiven ökologischen oder betriebswirtschaftlichen Effekten und vice versa. Die in Tabelle 7-4 dargestellten Break-Even-Transportentfernungen unterscheiden jeweils zwischen der Tier-2- und der Tier-3-Zulieferstufe. Die entstehenden Abweichungen ergeben sich durch die unterschiedlichen Fahrleistungsintensitäten in den Zulieferstufen, welche die Fahrleistungen der Transportmittel und in der Folge die Kosten und Emissionen beeinflussen.

Die für die OEM-Produktionsstandorte dargestellten Break-Even-Entfernungen zeigen einerseits, dass sowohl zwischen den CO_2-Emissionen und den Transportkosten als auch unter den Produktionsstandorten erhebliche Abweichung auftreten. Während eine Verlagerung nach Europa auf Grundlage der CO_2-Emissionen im Mittel (Mittelwert) in der Tier-2-Zulieferstufe ab einer Transportdistanz von 2.316 km zwischen Tier-1-und Tier-2-Zulieferer zu positiven ökologischen Effekten führt, muss die Distanz nach Verlagerung im Mittel kleiner als 194 km sein, um betriebswirtschaftliche Vorteile zu erzielen. Bedingt durch geringere Fahrleistungsintensitäten fallen diese Werte in der Tier-3-Zulieferstufe um etwa 20 % höher aus.

Tabelle 7-4: Break-Even-Transportentfernungen bei der Verlagerung der Produktion nach Europa (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Produktions-werke	Tier 2 → Tier 1				Tier 3 →Tier 2			
	CO_2-Emissionen		Transportkosten		CO_2-Emissionen		Transportkosten	
	Median	Standard-abweichung	Median	Standard-abweichung	Median	Standard-abweichung	Median	Standard-abweichung
	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]	[km]
Ingoldstadt (Audi)	2.369	8,3	271	6,5	2.890	8,7	339	1,0
Neckarsulm (Audi)	2.341	9,3	230	9,6	2.856	8,7	287	0,9
Dingolfing (BMW)	2.383	8,0	293	5,1	2.907	8,8	366	1,1
Leipzig (BMW)	2.299	12,3	161	17,5	2.801	8,5	201	0,6
München (BMW)	2.386	7,8	298	4,0	2.911	8,8	372	1,1
Regensburg (BMW)	2.367	8,4	269	6,7	2.888	8,7	337	1,0
Bremen (Daimler)	2.280	83,1	144	128,2	2.714	8,2	63	0,2
Rastatt (Daimler)	2.345	8,8	236	8,1	2.861	8,7	295	0,9
Sindelfingen (Daiml	2.355	8,3	250	6,3	2.873	8,7	313	0,9
Köln (Ford)	2.288	18,4	145	27,4	2.788	8,4	181	0,5
Saarlouis (Ford)	2.340	9,7	228	10,4	2.855	8,9	285	0,9
Eisenach (Opel)	2.292	11,9	153	17,3	2.795	8,5	191	0,6
Rüsselsheim (Opel)	2.316	10,0	187	13,1	2.823	8,5	234	0,7
Leipzig (Porsche)	2.297	11,7	161	16,1	2.801	8,5	201	0,6
Stuttgart (Porsche)	2.352	8,3	246	6,7	2.870	8,7	308	0,9
Dresden (VW)	2.319	11,3	195	13,6	2.829	8,6	244	0,7
Emden (VW)	2.309	87,0	183	134,0	2.720	8,2	74	0,2
Hannover (VW)	2.245	19,4	75	28,2	2.732	8,3	93	0,3
Osnabrück (VW)	2.247	19,9	77	29,4	2.734	8,3	96	0,3
Wolfsburg (VW)	2.258	17,7	96	25,2	2.749	8,3	119	0,4
Zwickau (VW)	2.313	10,9	186	13,3	2.821	8,5	233	0,7
Mittelwert	**2.319**	**18,6**	**194**	**25,1**	**2.820**	**8,5**	**230**	**0,7**

Aus Tabelle 7-4 lässt sich folgender Zusammenhang ableiten: Die Break-Even-Transportdistanz sinkt mit abnehmender Distanz zwischen den Produktionswerken und den Nordseehäfen. Dies liegt daran, dass durch die verkürzten Wege im Hafenhinterlandverkehr weniger Transportkosten und CO_2-Emissionen entstehen und somit die Transportentfernungen bei einer Verlagerung auf den innereuropäischen Straßengüterverkehr geringer ausfallen müssen, um betriebswirtschaftlich und ökologisch positive Effekte erzielen zu können. Eine Unterschreitung der Break-Even-Transportentfernungen ist für die Produktionsstandorte in Mitteldeutschland mit einer Beschaffung im Inland verbunden. Lediglich Produktionsstandorten am geografischen Rand Deutschlands weisen Entfernungen ins Europäische Ausland auf, die unter den Break-Even-Transportentfernungen von 194 km in der Tier-2-Zuleiferstufe bzw. 230 km in der Tier-3-Zulieferstufe liegen. Für den Großteil der Produktionswerke lässt sich folglich eine Verlagerung weltweiter Produktionsstandorte nach Europa nur unter der

Inkaufnahme von höheren Transportkosten realisieren. Im Gegensatz dazu erreichen in der Modellsimulation alle Break-Even-Transportentfernungen Werte, die selbst dezentral gelegenen Produktionsstandorten eine Verlagerung nach Europa mit einer damit verbundenen Einsparung der CO_2-Emissionen erlaubt. Somit ergeben sich bei den Szenarien R2 und R3 nur unter wenigen Rahmenbedingungen (sehr weite Transportentfernungen ins europäische Ausland und gleichzeitig geringe Entfernungen zu den Nordseehäfen) negative ökologische Effekte. Betriebswirtschaftlich positive Effekte lassen sich jedoch für die Mehrzahl der Produktionsstandorte nur durch eine Verlagerung nach Deutschland erzielen.

7.3.4 Sensitivitäten der Ergebnisse durch Unsicherheiten bei der Entwicklung von CO_2-Emissionen und Transportkosten

Sowohl die CO_2-Emissionen als auch die Transportkosten hängen von der Entwicklung zukünftiger Effizienztechnologien zur Kraftstoffeinsparung ab. Die Transportkosten werden zu etwa einem Drittel durch die Ölpreisentwicklung beeinflusst. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, sollen in diesem Unterkapitel die Sensitivitäten der Ergebnisse gegenüber Änderungen bei Fahrzeugeffizienz und Ölpreis geprüft werden. Für den Ölpreis kann für das Jahr 2030 ein Wertebereich zwischen 50 US-Dollar und 175 US-Dollar pro Barrel angenommen werden (vgl. Kapitel 5.2.3.1.1). Wobei keinerlei Aussagen über eine Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Werte getroffen werden kann und daher keine Dichtefunktion für die Verteilung des Parameters Ölpreis vorliegt. Ergänzend dazu können den Effizienzgewinnen für Nutzfahrzeuge im Straßengüterverkehr derzeit (Stand 2014) für das Jahr 2030 Werte zwischen 0 % und -20 % zugeordnet werden (vgl. Kapitel 5.2.2.1). Auch hierbei sind Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten einzelner Werte nur schwer zu treffen. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf eine dichtefunktionsbasierte Parametersensitivität verzichtet und lediglich ein potentiell möglicher Lösungsraum angegeben.

7.3.4.1 Auswirkung einer Variation der Kraftstoffverbrauchsreduktion auf die CO_2-Emissionen

Um die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich Parametervariationen zu analysieren, werden in den folgenden Abbildungen immer die relativen Abweichungen zwischen Basisszenario und R1, R2 sowie R3 dargestellt (vgl. Abbildung 7-17). In den Szenarien R1 und R2 werden die CO_2-Emissionen im Vergleich zum Basisszenario um etwa 12 % reduziert. Die Regionalisierung in Szenario R3 führt zu etwa 6 % geringeren CO_2-Emissionen.

Die Verlagerung der Produktion nach (Ost-) Europa in den Szenarien R2 und R3 führt zu Lkw-Fahrten über weite Entfernungen. Der geringe Anteil an Be- und Entladevorgängen über die Lebenszeit eines Lkw bei langen Transportentfernungen führt zu höheren jährlichen Fahrleistungen (vgl. Abbildung 7-8) und zu einer schnelleren Ausmusterung der Fahrzeuge aus der Flotte. Kürzere Wiederbeschaffungszyklen beschleunigen die Diffusion von Effizienztechnologien und senken somit den Flottendurchschnittsverbrauch schneller ab. Für die Szenarien wurde ein Effizienzgewinn der Lkw von 10 % bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 2014 unterstellt. Steigt dieser Effizienzgewinn an, so diffundieren in den Szenarien R2 und R3 bedingt durch die hohen Fahrleistungen diese Verbesserungen beim Kraftstoffverbrauch schneller in die Flotte. Dadurch steigt mit wachsenden Kraftstoffverbrauchsreduktionen die Differenz der CO_2-Emissionen zwischen den Szenarien R2 und R3 und dem Basisszenario an. Umgekehrt verlängert in Szenario R1 ein größerer Anteil von Fahrzeugen mit niedrigen Fahrleistungen die Wiederbeschaffungszyklen und verlangsamt die Diffusion von Effizienztechnologien. Im Gegensatz zur Differenz zwischen den Emissionen in Szenario R1 und dem Basisszenario nimmt die Differenz zwischen dem Basisszenario und den Szenarien R2 bzw. R3, wie in Abbildung 7-17 dargestellt, mit zunehmender Kraftstoffverbrauchsreduktion zu. Insgesamt variiert die Abweichung der Ergebnisse durch Veränderung des Parameters Kraftstoffverbrauch in einem Bereich von +/- 2 Prozentpunkten.

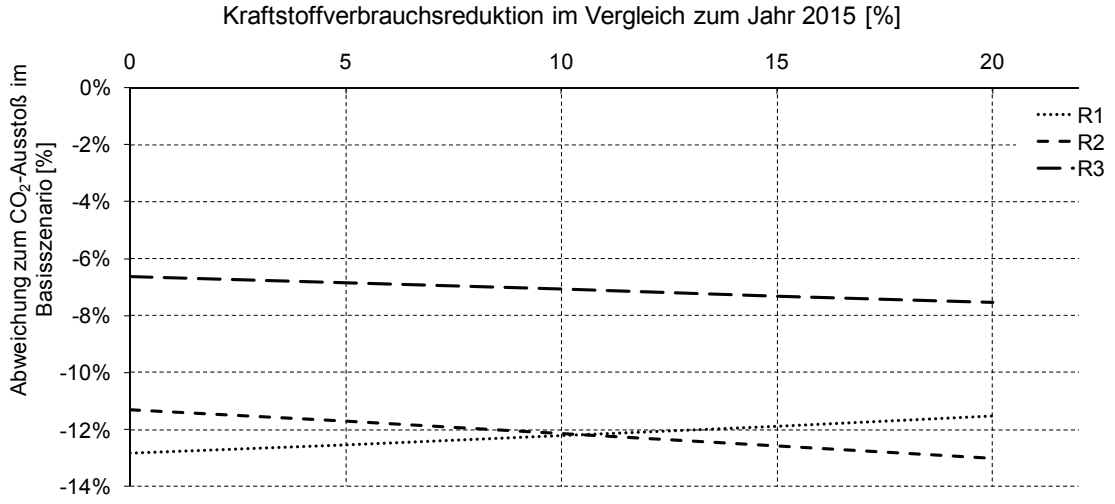


Abbildung 7-17: Sensitivitäten des CO_2-Ausstoßes bezüglich der Kraftstoffverbrauchsreduktion (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

7.3.4.2 Auswirkungen einer Variation des Rohölpreises auf die Transportkosten

Im Gegensatz zu den CO_2-Emissionen stellt sich bei der Sensitivität der Transportkosten bezüglich des Rohölpreises bei allen Szenarien mit Zunahme des Rohölpreises eine größere relative und absolute Differenz zwischen Basisszenario und den drei Regionalisierungsszenarien ein (vgl. Abbildung 7-18).

Die Abweichung zwischen dem niedrigsten angenommenen Rohölpreis von 50 US-Dollar pro Barrel und dem höchsten Preis von 175 US-Dollar pro Barrel beträgt im Szenario R1 wie im Szenario R2 lediglich etwa 0,25 Prozentpunkte. In Szenario R3 lassen sich Abweichungen von etwa 0,1 Prozentpunkten identifizieren (vgl. Abbildung 7-18). Die absolut konstanten Steigerungen von jeweils 10 Dollar pro Berechnungsschritt führen bei der Darstellung der relativen Werte bei allen drei Differenzkurven zu einem schwachen konvexen Verlauf. Insgesamt können die Sensitivitäten der Transportkosten bezüglich des Rohölpreises als gering bezeichnet werden.

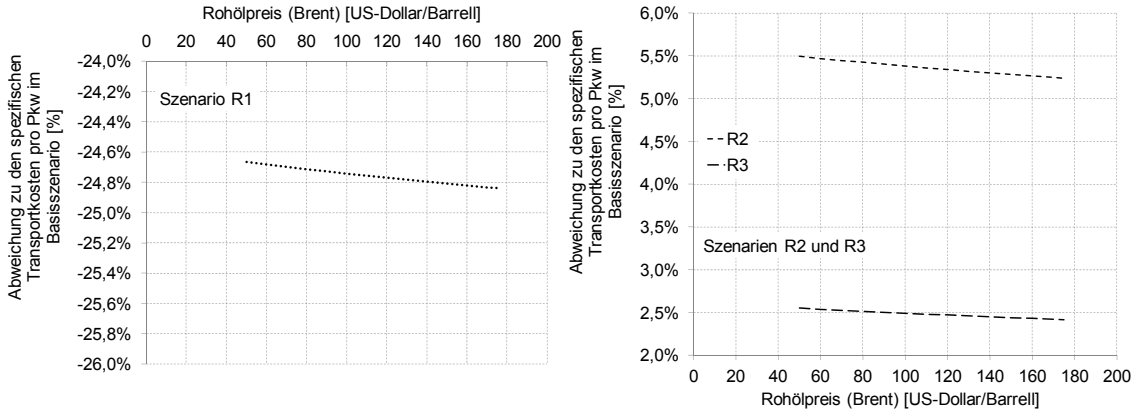


Abbildung 7-18: Sensitivitäten der Transportkosten bezüglich des Rohölpreises (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

7.3.4.3 Auswirkungen einer Variation der Fahrpersonalkosten auf die Transportkosten

Neben den Effizienzsteigerungen von Motoren und der Ölpreisentwicklung unterliegen auch die Fahrerkosten im Straßengüterverkehr einer gewissen Sensitivität. Aufgrund der strengen Ruhepausenvorschriften und des gewerkschaftlich geprägten Lohngefüges in Deutschland wird zukünftig die Variation der Lohnkosten bei innerdeutschen Verkehren gering sein. Transporte aus europäischen Nachbarländern werden jedoch vermehrt durch Fahrer ausgeführt, die nicht nach dem deutschen Lohniveau vergütet

werden. Verschieben sich die Kosten für das Fahrpersonal bei grenzüberschreitenden Transporten, so beeinflusst dies die Ergebnisse für die Transportkosten in den Szenarien R2 und R3. Zwar reduziert sich die Differenz zwischen den Transportkosten im Basisszenario und in den Szenarien R2 und R3, allerdings fallen diese auch bei einer Reduktion der Fahrpersonalkosten um 50 % stets höher aus als im Basisszenario. Die Grundaussage, dass die Transportkosten in den Szenarien R2 und R3 ansteigen, bleibt folglich bestehen.

7.3.4.4 Zusammenfassung der Sensitivitäten

Insgesamt lässt sich für alle Szenarien eine Robustheit der Ergebnisse gegenüber einer Variation der Parameter Rohölpreis, Effizienzsteigerungen beim Kraftstoffverbrauch und Fahrpersonalkosten feststellen: Alle drei Szenarien führen stets zu einer Absenkung der CO_2-Emissionen. Während in Szenario R1 die Transportkosten abgesenkt werden können, erhöhen sich diese aufgrund des Lkw-Transports auch bei einem Ölpreis von 50 Dollar pro US-Barrel und im Vergleich zu heute halbierten Fahrpersonalkosten für den Straßengüterverkehr in den Szenarien R2 und R3.

7.4 Auswirkungen der Regionalisierung auf Luftschadstoff- und Geräuschemissionen sowie die Schädigungen des Straßenoberbaus

Bisher konnte festgestellt werden, dass sich in allen drei Szenarien der Regionalisierung die CO_2-Emissionen reduzieren. Die Beschleunigung des Treibhauseffektes durch den Ausstoß von CO_2-Emissionen stellt allerdings nur eine Umweltwirkung des Transports dar. Durch die Überbrückung von Entfernungen mit motorisierten Transportgefäßen entstehen, wie bereits in Kapitel 3 ausführlich beschrieben, Luftschadstoffe, Geräuschemissionen, Schädigungen des Straßenoberbaus sowie straßengüterverkehrsbedingte Unfälle.

7.4.1 Luftschadstoffe

Die Steuerungsgrößen für die Menge der emittierten Luftschadstoffe sind die Fahrleistung der Transportgefäße, deren Kraftstoffverbrauch sowie die durch die Euro-Abgasnorm bestimmte Intensität der Abgasnachbehandlung. Da sich die Flottenzusammensetzung bezüglich der Abgasnormen (vgl. Abbildung 7-9) nicht zwischen den Szenarien ändert, beschränken sich die Einflussfaktoren auf die Fahrleistung und den Kraftstoffverbrauch der Transportgefäße. Der Einfluss von Anpassungen bei den jährlichen Fahrleistungen und den damit verbundenen beschleunigten oder verlangsamten Diffusionsprozessen von Effizienztechnologien führt nur zu marginalen Auswir-

kungen. Die in Abbildung 7-19 dargestellten Abweichungen zwischen den Szenarien entstehen durch regionalisierungsbedingte Anpassungen bei der Fahrleistung.

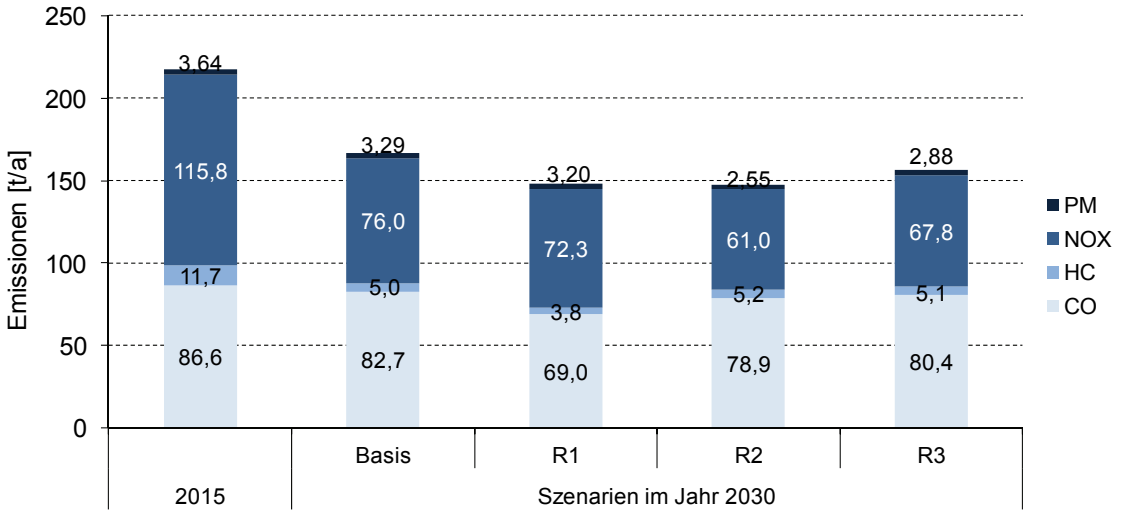


Abbildung 7-19: Jährliche Emission von Luftschadstoffen in den Szenarien (Modellergebnisse)

Entscheidend für die Menge der emittierten Luftschadstoffe ist folglich nicht nur die Höhe der gesamten Güterbeförderungsleistung, sondern auch die Fahrleistung der Verkehrsmittel. Das Seeschiff weißt geringere spezifische Emissionen von CO und HC auf, während im Straßengüterverkehr geringere NO_x- und PM-Emissionen pro transportiertem Tonnenkilometer anfallen.

Durch eine Regionalisierung der Zulieferstruktur sinkt der Ausstoß von Luftschadstoffen in Szenario R1 verglichen mit dem Basisszenario im Mittel um 11,9 %. Während die Schadstoffe Kohlemonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) überdurchschnittlich reduziert werden, ergeben sich für Stickstoffoxide (NO_x) und Partikelemissionen (PM) unterdurchschnittliche Rückgänge. Die Stärke des Rückgangs ist abhängig von der Ab- bzw. Zunahme der Güterbeförderungsleistung und den Emissionsfaktoren des jeweiligen Verkehrsträgers (vgl. Tabelle 5-5). Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Szenarien R2 und R3 ergibt sich analog zu den Ergebnissen bezüglich der CO_2-Emissionen ein Rückgang gegenüber dem Basisszenario. Die Verlagerung der Produktionsstätten nach Europa führt zu einer Verlagerung von den Verkehrsträgern Schiene und Binnenschiff auf die Straße. Durch den vermehrten Einsatz von Lkw, die pro Tonnenkilometer im Vergleich zu Eisenbahn mehr PM und NO_x ausstoßen, reduzieren sich diese Luftschadstoffe weniger stark. Im Mittel fallen in den Szenarien R2 und R3 die Gesamtmenge der Luftschadstoffe um 10,6 % bzw. 6,0 % geringer aus.

Aus globaler Betrachtungsperspektive reduziert sich durch die geringere Güterbeförderungsleistung die Gesamtmenge der Luftschadstoffe in allen drei Szenarien deutlich. Lokal ergeben sich für die Szenarien unterschiedliche Ergebnisse: Während durch Umsetzung des Szenarios R1 die Emissionen von Luftschadstoffen im Straßengüterverkehr reduziert werden und es nur zu geringen Mehremissionen bei den Verkehrsträgern Binnenschiff und Eisenbahn (durch Verlängerung der Transportentfernungen zwischen Tier-2- und Tier1-Zulieferer) kommt, wird in Szenarien R2 und R3 die Emissionsminderung durch eine Verlagerung auf den Verkehrsträger Straße begleitet. Während Seeschiffe einen Großteil der Luftschadstoffe auf dem offenen Meer und damit in deutlicher räumlicher Distanz zu bewohnten Gebieten ausstoßen, werden die Luftschadstoffe im Straßengüterverkehr, bedingt durch die räumliche Nähe der Infrastruktur zu menschlichen Siedlungen, oftmals in geringer räumlicher Distanz zu menschlichen Organismen emittiert. Somit sinken die absoluten Emissionen in den Szenarien, aber die Immission von Luftschadstoffen in den Szenarien R2 und R3 fallen lokal betrachtet deutlich höher aus. Anders als bei den Ergebnissen zu den CO_2-Emissionen lassen sich folglich für die Szenarien R2 und R3 zwar global positive, aber lokal negative ökologische Wirkung ableiten.

7.4.2 Geräuschemissionen

Ähnlich wie bei den Luftschadstoffen spielen auch bei den Geräuschemissionen die lokalen Auswirkungen die entscheidende Rolle. Punktuelle Geräuschemissionen wie bei der Ein- und Ausfahrt von Seeschiffen in/aus Häfen und die dazugehörigen Umschlaggeräusche stehen den linienartigen Geräuschquellen der Binnenschiffe, des Schienengüterverkehrs im Hafenhinterlandverkehr und des Straßenverkehrs entlang von Autobahnen und Bundes-/Kreisstraßen gegenüber.

Voraussetzung für eine Entlastung im Zu- und Ablauf zu den OEM-Produktionswerken und der damit verbundenen Reduktion der Geräuschemissionen in Szenario R1 ist, dass der Zulieferpark an das OEM-Produktionswerk angeschlossen ist und der Transport über innerbetriebliche Transportmittel (z. B. Elektrohängebahn) abgewickelt werden kann. Befindet sich der Lieferantenpark in unmittelbarer Nähe zum OEM-Produktionswerk und sind diese über das öffentliche Straßennetz miteinander verbunden, so ändert sich die Anzahl der Lkw-Fahrten pro Tag nicht. Die in Abbildung 7-20 dargestellte Anzahl Lkw-Fahrten im Zulauf der OEM-Produktionswerke zeigt das Geräuschemissionsreduktionspotential von einer vermehrten Ansiedlung der Lieferanten im Zulieferpark (Szenario R1): An den direkt mit den Zulieferparks verbundenen OEM-Produktionswerken Neckarsulm, Leipzig, Rastatt, Köln, Rüsselsheim und Emden lässt sich dadurch die Anzahl der Lkw-Fahrten pro Tag im Mittel um 50 % bis 70 % reduzieren. Diese Reduktionspotentiale entstehen durch die unterschiedlichen Fahr-

leistungsintensitäten der Module und Komponenten in den Zulieferstufen Tier-1 und Tier-2.

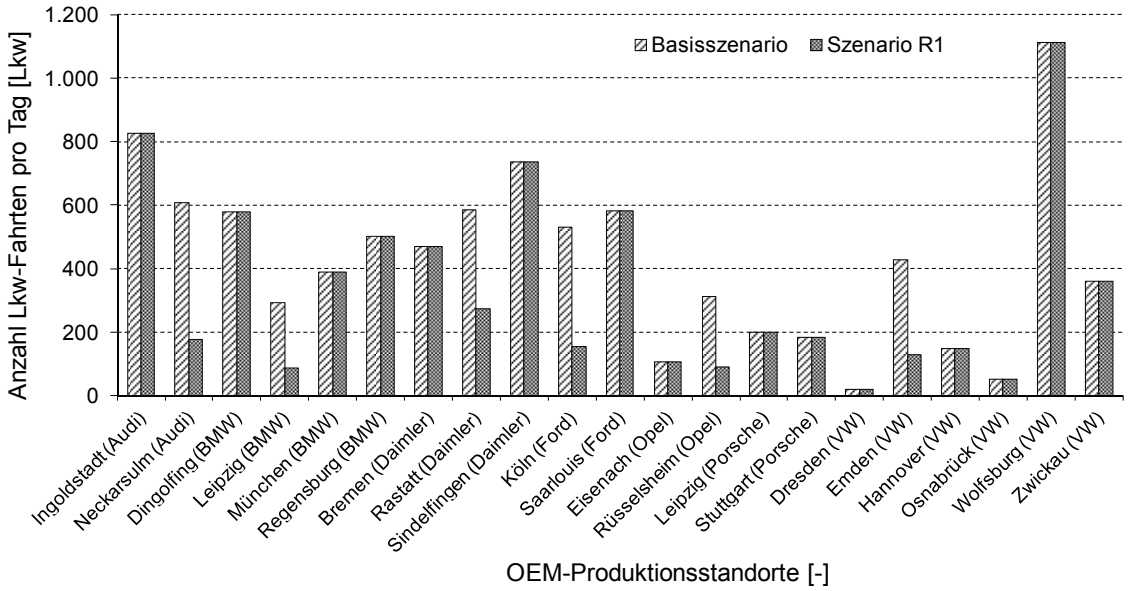


Abbildung 7-20: Vergleich der Anzahl täglicher Lkw-Fahrten im Zielverkehr zu den Produktionsstandorten der OEM in den Szenarien Basis und R1 (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Bei der mittleren maßgeblichen Verkehrsstärke auf deutschen Landstraßen von 200 bis 500 Kraftfahrzeuge pro Stunde (vgl. Arnold et al. 2013, S. 15) würden die genannten Verringerungen der Lkw-Fahrten zur einer Reduktion des Mittelungspegels im Quell- und Zielverkehr der OEM-Produktionsstandorte von etwa 1 dB(A) bis 3 dB(A) führen (Berechnungen basieren auf Abbildung 5-24). Eine Verringerung der Transportentfernungen führt jedoch nicht nur im Quell- und Zielverkehr der OEM-Produktionswerke zu einer Reduktion der Lkw-Fahrten. Die Effekte auf die Verkehrsstärke erstrecken sich vielmehr auf das gesamte Straßennetz.

Die Emission von Geräuschen entsteht durch Motoren- und Abrollgeräusche der Transportmittel. Neben der Stärke der Schalldruckpegel wird die Intensität der Belastung durch Geräuschemissionen auch durch die Einwirkungsdauer bestimmt. Aus diesem Grund sind in Abbildung 7-21 die Betriebsstunden der Lkw in den Szenarien gegenübergestellt. Da die Stärke der Immission von Verkehrsgeräuschen vom Abstand zum Emittenten und der baulichen Beeinflussung der Ausbreitung (z. B. Lärmschutzwände) abhängt, wird bei der Verortung der Geräuschemittenten zwischen Kreis-, Landes- und Bundesstraßen sowie Autobahnen unterschieden. Autobahnen weisen im Vergleich zu Kreis-, Landes- und Bundesstraßen eine höhere Distanz zur Wohnbebauung und Lebensräumen von Tieren auf und sind häufiger mit Lärmschutzwänden

gesäumt (vgl. Lärmschutz-Richtlinien-StV). Gleichzeitig steigen mit wachsender Geschwindigkeit die Abrollgeräusche, so dass der Verkehr auf Autobahnen stärkere Schalldruckpegel aufweist als der langsamere Verkehr auf den übrigen Straßenkategorien. Da das in dieser Arbeit erstellte systemdynamische Modell kein Netzmodell enthält, lässt sich der Einfluss zusätzlicher oder wegfallender Lkw-Fahrten auf die gesamten Geräuschemissionen auf einzelnen Streckenabschnitten nicht final bestimmen. Allerdings zeigen die Ergebnisse für die Szenarien, dass sich in den Szenarien R2 und R3 die Anzahl der Betriebsstunden auf allen Straßenkategorien durch die gesteigerte Lkw-Fahrleistung um etwa 100.000 Stunden vergrößert. Die im Vergleich zu den übrigen Zulieferstufen geringere mittlere Transportentfernung von 104 km zwischen OEM und Tier-1-Zulieferer führt zum Großteil über Kreis,- Landes- und Bundesstraßen. Dadurch fällt der Rückgang der Betriebsstunden auf diesen Straßenkategorien höher aus als der Rückgang auf Autobahnen. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Ausführungen kann dies dazu führen, dass sich die Geräuschemissionen für Siedlungen von Menschen und Tieren in unmittelbarer Nähe von Autobahnen um maximal 20 % und in der Umgebung von Kreis-, Landes- und Bundesstraßen um maximal 40 % reduzieren. Wie sich dies auf die Geräuschimmissionen auswirkt, kann an dieser Stelle nicht final beantwortet werden, da geografische Informationen, welche die Ausbreitung beeinflussen, bei der Erstellung dieser Arbeit nicht vorlagen.

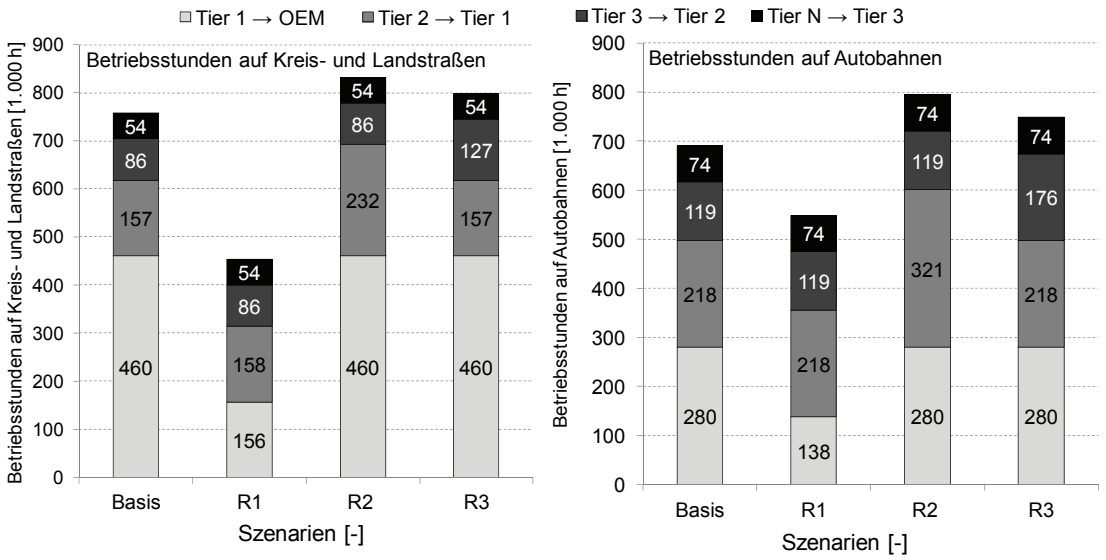


Abbildung 7-21: Straßengüterverkehrsbedingte Betriebsstunden von Sattelzügen in den Szenarien Basis, R1, R2 und R3 (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Insgesamt ergibt sich für die Bewertung der Geräuschemissionen in den Szenarien R2 und R3 ein uneinheitliches Bild: Durch die Verlagerung der Produktion nach Europa (R2 und R3) steigt die Fahrleistung im Straßengüterverkehr deutlich an. Dadurch

steigen auch die Betriebsstunden der Lkw auf allen Straßenkategorien, gleichzeitig reduziert sich der Schienenverkehr auf den Relationen zwischen den Seehäfen und dem Hafenhinterland. Durch die höheren Ladekapazitäten eines Güterzuges im Vergleich zum Lkw reduziert sich die Anzahl der Betriebsstunden von Güterzügen nicht in gleichem Umfang wie diese im Straßengüterverkehr ansteigt.

Auf Basis der genannten Erkenntnisse kann zusammenfassend festgestellt werden, dass es in Szenario R1 zu einer Entlastung und in den Szenarien R2 und R3 zu einer Mehrbelastung der Bevölkerung durch Geräuschemissionen kommt. Aussagen zu lokalen Wirkungen lassen sich in der vorliegenden Arbeit nur für den direkten Quell- und Zielverkehr der OEM-Produktionswerke treffen.

7.4.3 Schädigung des Straßenoberbaus

Die Belastung der Straßeninfrastruktur und die damit einhergehende Schädigung des Straßenoberbaus entwickelt sich in den Szenarien ähnlich wie die straßengüterverkehrsbedingten Unfälle (siehe Abbildung 7-22): Während in den Szenarien R2 und R3 mit steigender Fahrleistung im Straßengüterverkehr die Belastung und damit die Schädigung des Straßenoberbaus zunimmt, kann in Szenario R1 diese im Vergleich zum Basisszenario gesenkt werden. Verglichen mit der Abnahme der Fahrleistung (vgl. Abbildung 7-5) fällt dieser Rückgang prozentual geringer aus, so dass gerade eben das Niveau aus dem Jahr 2014 erreicht wird. Dies liegt daran, dass bei Transporten zwischen Tier-1-Zulieferern und den OEM-Produktionsstandorten aufgrund der geringen Dichte der Ladeeinheiten im Mittel (Median) die Nutzlast nur zu 50 % ausgelastet werden kann. Im Vergleich zu Transporten in den Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n fällt damit die aus der Achslast abgeleitete spezifische Belastung des Straßenoberbaus pro Fahrzeugkilometer geringer aus. Während die Fahrzeugkilometer in Szenario R1 im Vergleich zum Basisszenario um etwa 27 % zurückgehen, sinkt das Schädigungspotential des Straßenoberbaus lediglich um etwa 11 %.

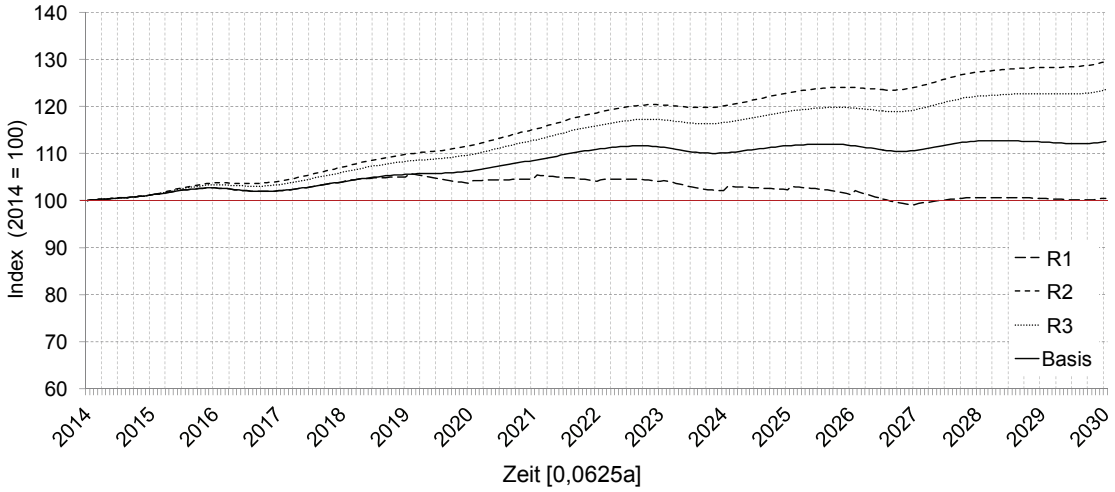


Abbildung 7-22: Schädigungsindex für den Straßenoberbau (Modellergebnisse)

Analog zur Steigerung der Fahrleistung in den Szenarien R2 und R3 wächst auch die Belastung der Straßeninfrastruktur. Steigerungen der Fahrleistung von 13 % in Szenario R2 bzw. 7 % in Szenario R3 stehen Zunahmen der Belastung des Straßenoberbaus von 15 % (R2) bzw. 10 % (R3) gegenüber. Die abnehmende Differenz zwischen Schädigungspotential und Fahrleistung lässt sich mit der höheren Auslastung der Nutzlast in der Tier-3-Zulieferstufe, verglichen mit dem Transport von Komponenten (Tier-2), erklären. Während also die Zunahme der Fahrleistung in den Tier-2- und Tier-3-Zulieferstufen die Schädigung des Straßenoberbaus nahezu in gleichem Maße verstärkt, führt der Rückgang der Fahrleistung im Szenario R1 zu einem relativ geringeren Absinken des Schädigungspotentials. Im Vergleich zu den übrigen ökologischen Wirkungen wie Luftschadstoffe, CO_2-Emissionen und Unfälle fällt damit der positive Effekt in Szenario R1 am geringsten aus.

7.5 Auswirkungen der Regionalisierung auf Logistikkosten und Supply-Chain-Risiken

Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit sind neben ökologischen Wirkungen auch betriebswirtschaftliche Vor- und Nachteile der Regionalisierung zu untersuchen. Zusätzlich zu den bereits analysierten Auswirkungen auf die Transportkosten soll sich in diesem Unterkapitel den Änderungen der sonstigen distanzabhängigen Logistikkosten (Behälter- und Lagerkosten) und Supply-Chain-Risiken gewidmet werden. Ziel dieses Unterkapitels ist es, die betriebswirtschaftlichen Wirkungen vollständig zu beschreiben und nach Möglichkeit zu monetarisieren. Behälter- und Lagerkosten lassen sich relativ erfassen. Die Quantifizierung und Monetarisierung von Supply-Chain-Risiken ist mit weit größeren Unsicherheiten behaftet.

7.5.1 Behälterkosten

Behälter oder Ladungsträger werden eingesetzt, um Güter vor Transportschäden zu schützen und das maschinelle Be- und Entladen der Transportgefäße zu beschleunigen. Die Behälterkosten sind Kosten, die durch Anschaffung und Austausch der benötigten Ladungsträger entstehen. Der Wert aller eingesetzten Transportbehälter lässt sich mittels Multiplikation der Anzahl aller Behälter mit dem zugehörigen Behälterwert bestimmen. Ausschlaggebend für den Behälterbedarf sind die Zuladungskapazitäten der Ladungsträger. Dieser variiert stark zwischen der Europalette, mit der eine Vielzahl von Moduläquivalenten transportiert werden kann, und dem Spezialladungsträger mit nur einem Modul als mögliche Zuladung. Zusätzlich dazu weichen die Kosten für die Behälter deutlich voneinander ab: Während der Preis für eine Europalette je nach Abnahmemenge deutlich unter 10 Euro liegt, können Spezialladungsträger das 10- bis 50-fache kosten (vgl. Tabelle 5-11 in Unterkapitel 5.2.3.1.3).

In allen drei Szenarien führt die Regionalisierung des Beschaffungsnetzwerkes zu kürzeren Transportentfernungen und damit zu geringeren Umlaufzeiten der Behälter. Dies führt dazu, dass die Anzahl der benötigten Behälter in allen drei Szenarien im Vergleich zum Basisszenario zurückgeht. Den stärksten Rückgang der Behälteranzahl verzeichnen durch die hohe Transportentfernungsreduktion von etwa 2.000 km bzw. etwa 3.000 km die Szenarien R2 und R3. Obwohl beim Transport von Modulen (Tier-1) Spezialladungsträger mit geringen Zuladungskapazitäten zum Einsatz kommen, fällt der Behälterbedarf durch Umlaufzeiten von maximal ein bis drei Tagen deutlich geringer als bei den Zulieferstufen Tier-2 und Tier-3 aus (vgl. Abbildung 7-23).

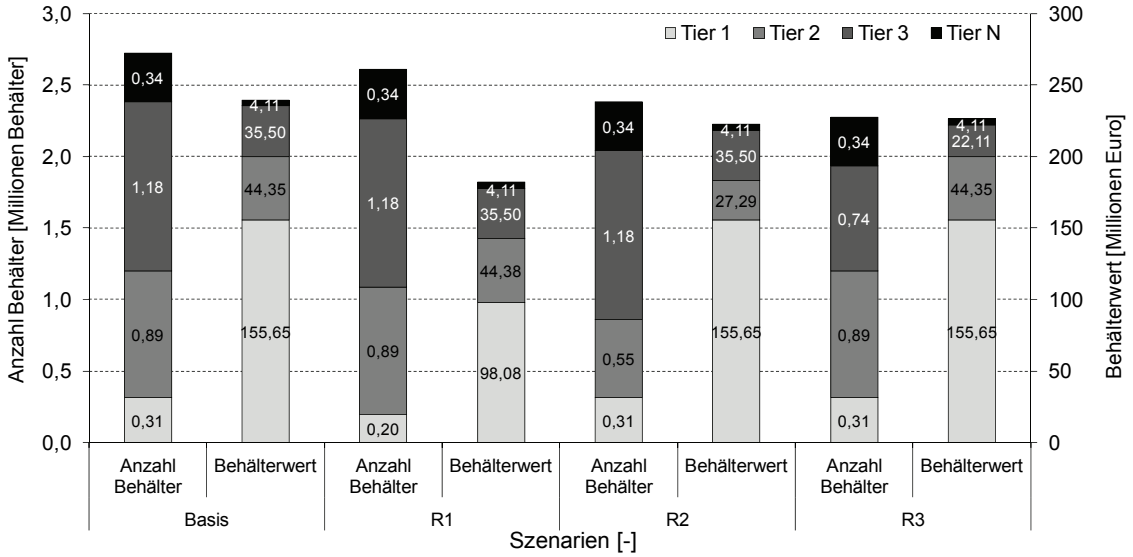


Abbildung 7-23: Anzahl der zum Transport benötigten Ladungsträger und deren Behälterwert im Jahr 2030 (Modellergebnisse)

Bei der Ermittlung des zugehörigen Behälterwertes verändert sich diese Rangfolge. Der Einsatz der teuren Spezialbehälter führt dazu, dass der Behälterwert aller eingesetzten Ladungsträger in Szenario R1 am geringsten ausfällt. Im Vergleich zum Basisszenario bedeutet dies ein Rückgang um etwa 100.000 Ladungsträger, was einem Wert von knapp 50 Millionen Euro entspricht. In Szenario R2 fällt der Rückgang von knapp 300.000 Ladungsträgern mit etwa 17 Millionen Euro geringer aus. Die Anzahl der benötigten Euro-Paletten geht in Szenario R3 um etwa 400.000 Einheiten zurück. Dies entspricht einem Wert von etwa 13 Millionen Euro.

Der Wert der sich im Umlauf befindenden Ladungsträger kann jedoch nicht mit den Behälterkosten gleichgesetzt werden. Diese setzen sich einerseits aus der Kapitalbindung durch den Besitz der Ladungsträger und andererseits aus den regelmäßigen Neubeschaffungen nach Ausmusterung zusammen. Die Kapitalbindung hängt vom Marktzins ab. Da ein angenommener Zinssatz von 5 % zu jährlichen Kapitalkosten in einer Höhe von lediglich etwa 2 bis 3 Euro pro produziertem Pkw führen, wird sich die Betrachtung in dieser Arbeit auf die Kosten, welche durch den Ersatz bestehender Ladungsträger entstehen, beschränken. Bei einer Lebensdauer der Ladungsträger von zehn Jahren, beträgt der Median der spezifischen Behälterkosten über alle OEM-Produktionswerke im Basisszenario etwa 62 Euro pro produziertem Pkw. Analog zur Anzahl der Behälter und dem Behälterwert sinken in allen drei Regionalisierungsszenarien die spezifischen Behälterkosten. Die größten Einsparungen können mit etwa 16 Euro pro produziertem Pkw in Szenario R1 realisiert werden. In den Szenarien R2 und R3 sinken die spezifischen Behälterkosten auf etwa 58 Euro pro produziertem Pkw ab (alle Werte für das Jahr 2030 - vgl. Abbildung 7-25).

7.5.2 Lagerkosten

Die Kosten für die Lagerung von Gütern richten sich nach dem Bedarf an Lagerflächen. Die Anpassungsgeschwindigkeit der Lagerkapazität an den tatsächlichen Bestand hängt von der Verfügbarkeit von Lagerflächen und der Länge und Flexibilität der Mietverträge ab. Zusätzlich zu den Kosten für Hallenmiete fallen Personal- und Betriebskosten an (vgl. Hartmann und Barwig 2012, S. 73). Auch bei diesen Kostenkomponenten sind durch Vertragsmodalitäten verzögerte Anpassungen denkbar. Um diese Effekte zu berücksichtigen, wurde im Modell für die Lagerdimensionierung beispielhaft der maximale Bestand in den vorangegangenen zwölf Monaten zu Grunde gelegt (siehe Abbildung 7-24).

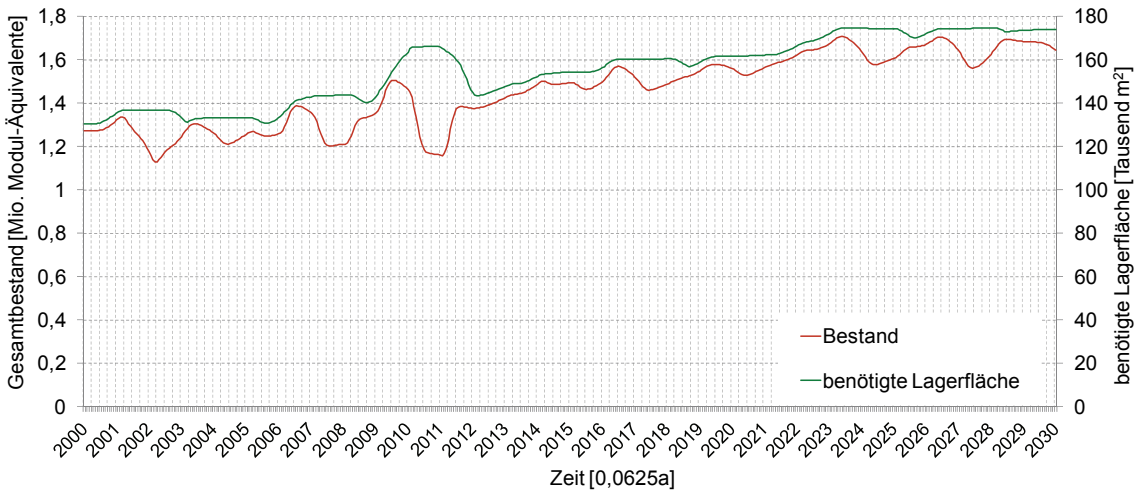


Abbildung 7-24: Entwicklung der Gesamtbestände aller Zulieferstufen und der benötigten Lagerfläche (Modellergebnisse)

Für den Zusammenhang zwischen benötigter und tatsächlicher Lagerfläche konnte festgestellt werden, je volatiler der Verlauf der Bestandsmenge ist, desto größer fällt die mittlere Differenz zwischen diesen beiden Größen aus. Unter Berücksichtigung eines spezifischen Lagerkostensatzes von etwa 26 Euro pro Quadratmeter (vgl. Hartmann und Barwig 2012, S. 73) und der Annahme, dass dieser bis zum Jahr 2030 konstant bleibt, entstehen im Jahr 2030 mittlere spezifische Lagerkosten in Höhe von etwa 134 Euro pro produziertem Pkw. Unter Berücksichtigung von Transport- und Behälterkosten lassen sich die gesamten distanzrelevanten Logistikkosten der vier Szenarien ableiten (vgl. Abbildung 7-25). Die Lagerkosten zur Aufbewahrung des Sicherheitsbestandes variieren zwischen den Szenarien nicht, da das Modell zwischen der Höhe des Sicherheitsbestandes und den Transportentfernungen keinen Zusammenhang annimmt. Somit entfallen im Basisszenario und den Szenarien R2 und R3 etwa ein Drittel der Kosten auf die Lagerkosten. Geringere Transportkosten in Szenario R1 erhöhen diesen Anteil auf 37 %.

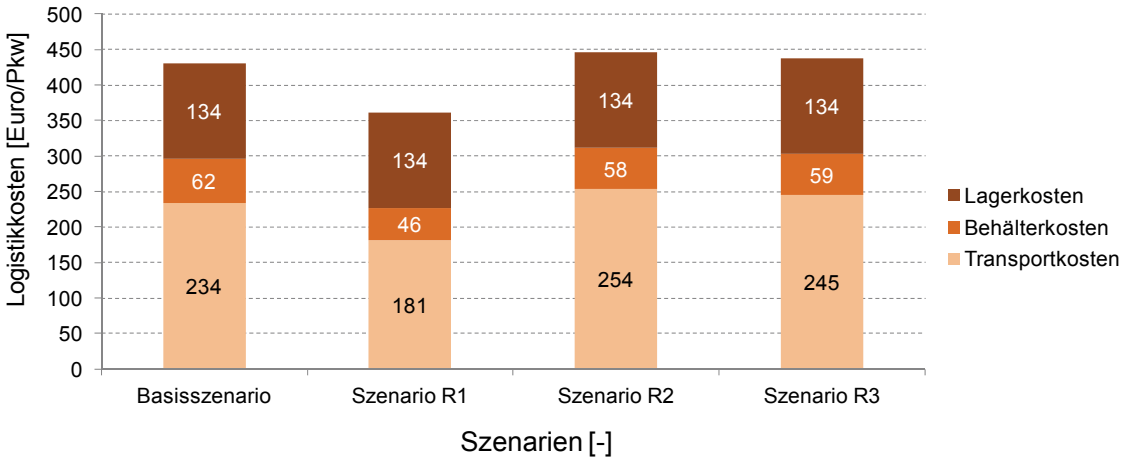


Abbildung 7-25: Mittlere Logistikkosten in den Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Unter Berücksichtigung dieser drei Kostenkomponenten entstehen im Basisszenario Logistikkosten in Höhe von etwa 430 Euro pro produziertem Fahrzeug. Diese Summe entspricht jedoch nicht den Vollkosten. Weitere Kostenkomponenten, wie beispielsweise Handlingskosten, wurden nicht berücksichtigt, da es im Laufe der Arbeit nicht gelungen ist, eine empirisch bestätigte Abhängigkeit dieser Kosten von der Transportentfernung nachzuweisen.

7.5.3 Supply-Chain-Risiken

Im Verlauf dieser Arbeit konnte nicht nur für die Logistik sondern auch für die Supply-Chain-Risiken eine Abhängigkeit von den Transportentfernungen nachgewiesen werden. Der Lieferverzug des OEM an den Endkunden wurde als die häufigste Wirkung von Störungen in der Lieferkette identifiziert (vgl. Kapitel 5.2.3.2). Transportdistanzabhängige Ursachen für den Lieferverzug stellen die Transportrisiken (Unfälle und Fahrzeugausfälle) sowie die Transportdauer dar. Gemäß Kersten et al. (2006, S. 6) können die betriebswirtschaftlichen Folgen des Lieferverzuges in Form eines Ausfalls erzielbarer Deckungsbeiträge entweder getragen oder vermieden werden. Bei der Bewertung von Supply-Chain-Risiken wird im Folgenden deshalb zwischen Vermeidungskosten und Schadensausmaß unterschieden. Als Vermeidungskosten werden im Kontext dieser Arbeit Kosten verstanden, die einen Lieferverzug vermeiden (vgl. Kapitel 5.2.3.2). Die Wirkung des Lieferverzuges wird als Schadensausmaß bezeichnet. Liegen diese über den Vermeidungskosten, so entsprechen die Schadenskosten den Vermeidungskosten und vice versa.

Für den Lieferverzug wurden in Kapitel 5.2.3.2 drei mögliche Ursachen analysiert. Während die Produktionsstörung am Montageband des OEM keine Distanzabhängigkeit aufweist, stehen die verspätete Bereitstellung der Teile durch den Zulieferer und

transportbedingte Risiken (z. B. Unfall, Fahrzeugausfall) in Zusammenhang mit dem räumlichen Abstand zwischen OEM/Zulieferer und Zulieferer. Zur Vermeidung der durch diese Störungen verursachten Schäden werden folgende Strategien untersucht:

- Anpassung der Sicherheitsbestände zur Einhaltung der Liefertreue bei Störungen im Transport,
- Eilfahrten zur Minimierung des Schadensausmaßes bei Produktionsunterbrechungen der Zulieferer.

Die Anpassung des Sicherheitsbestandes stellt eine Maßnahme dar, um den Verlust von Modulen, Komponenten und Einzelteilen durch Transportrisiken mit einer Belieferung aus Sicherheitsbeständen kompensieren zu können. Daneben lassen sich durch eine Steigerung der Transportgeschwindigkeit (Eilfahrten) die Schäden durch verspätete Bereitstellung der Teile durch den Zulieferer vermindern. Beide Maßnahmen führen zu Vermeidungskosten.

7.5.3.1 Auswirkungen regionalisierter Zuliefernetzwerke auf den Sicherheitsbestand

Der Sicherheitsbestand garantiert mit seiner Reichweite die Fortführung der Produktion trotz etwaiger Störungen in der Lieferkette. Eine kostenoptimale Bestimmung der Größe des Sicherheitsbestandes berücksichtigt sowohl die Bestands- und Lagerkosten als auch die Schadenskosten durch einen induzierten Produktionsausfall aufgrund von Lieferengpässen und den damit verbundenen Mali (vgl. Gudehus 2012, S. 358). Das Ishikawa-Diagramm in Abbildung 5-29 zeigt die möglichen Ursachen für einen Lieferverzug. Eine klare Abhängigkeit von den Transportentfernungen weisen die transportbezogenen Risiken auf. Dazu zählen Unfälle der Transportgefäße und technisch bedingte Ausfälle. Um Supply-Chain-Risiken zu quantifizieren, soll stellvertretend für die Menge aller Transportrisiken im Folgenden der Einfluss von Unfällen auf die Höhe des Sicherheitsbestands untersucht werden.

Veränderungen des Sicherheitsbestandes durch die Berücksichtigung transportbedingter Unfälle

Bei den in dieser Arbeit bisher dargestellten Ergebnissen zu den Lagerkosten wurden keine Supply-Chain-Risiken berücksichtigt. Deshalb soll nun zunächst auf Grundlage des Basisszenarios analysiert werden, ob die Berücksichtigung von Transportrisiken zu Änderungen der Bestandshöhe und Anpassungen der Lagerfläche führt. Die Abbildung 7-26 zeigt den Verlauf der Sicherheitsbestände aller Zulieferstufen im Basisszenario mit und ohne Berücksichtigung von Transportrisiken (Unfälle).

Der unvorhersehbare Eintritt eines Unfalls und der damit verbundene Verlust der Ladung erfordert eine Ersatzproduktion und führt in der Folge zu einer Erhöhung der mittleren Abweichung zwischen Prognose der Produktionsmenge und tatsächlicher Auslieferungsmenge. Auf die Erhöhung der Produktion folgt ein Anstieg des mittleren Sicherheitsbestandes zur Einhaltung der Liefertreue. Neben dem Anstieg des mittleren Sicherheitsbestandes wird dessen Entwicklung volatiler. Diese Effekte verstärken sich mit zunehmendem Rang der Zulieferstufe. Während die Sicherheitsbestände in der Tier-2-Zulieferebene durch unfallbedingte Güterverluste kaum Veränderungen aufweisen, zeigt sich in der Tier-n-Zulieferstufe eine deutliche Abweichung zwischen der Betrachtung mit und ohne unfallbedingten Transportschäden.

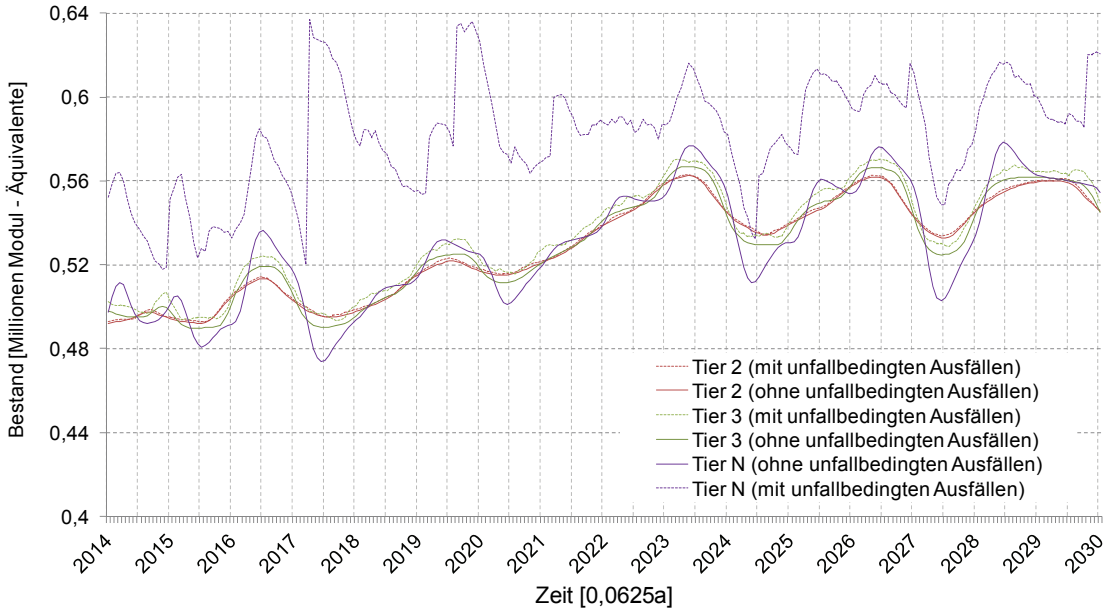


Abbildung 7-26: Entwicklung des Sicherheitsbestandes im Basisszenario mit und ohne Berücksichtigung von Transportrisiken (Modellergebnisse)

Durch die stärkere Volatilität der Bestandsmengen ergibt sich ein höherer mittlerer Lagerflächenbedarf. Im Vergleich zur Betrachtung ohne unfallbedingte Transportschäden steigt dieser im Mittel über alle Zulieferstufen zwischen den Jahren 2014 und 2030 Im Basisszenario um 2,4 % an. Der Einbezug von Transportrisiken führt demzufolge immer gegenüber einer Betrachtung ohne Transportrisiken zu einer Vergrößerung des Sicherheitsbestandes.

Regionalisierungsbedingte Auswirkungen auf die Sicherheitsbestände

Da die veränderten Transportentfernungen in den Szenarien R1 bis R3 die entfernungsabhängigen Transportrisiken beeinflussen, werden im weiteren Verlauf die

Auswirkungen der Regionalisierung auf die Größe der Sicherheitsbestände untersucht. Exemplarisch für alle Transportrisiken werden im Folgenden die Unfälle betrachtet.

Die in Abbildung 7-27 dargestellte Anzahl der Unfälle pro Zeitperiode (t = 1/16 a) für die Szenarien Basis und R1 zeigt den Einfluss der Transportentfernungsreduktion und der damit verbundenen Absenkung der Fahrleistung in Szenario R1 auf die Anzahl der Fahrzeugkollisionen. Mit verstärkter Regionalisierung nach dem zweiten Modellwechsel ab dem Jahr 2023 entstehen in Szenario R1 sowohl im Mittel als auch in der Spitze signifikant weniger Unfälle. In der Folge treten somit, verglichen mit dem Basisszenario, weniger unfallbedingte Transportschäden auf.

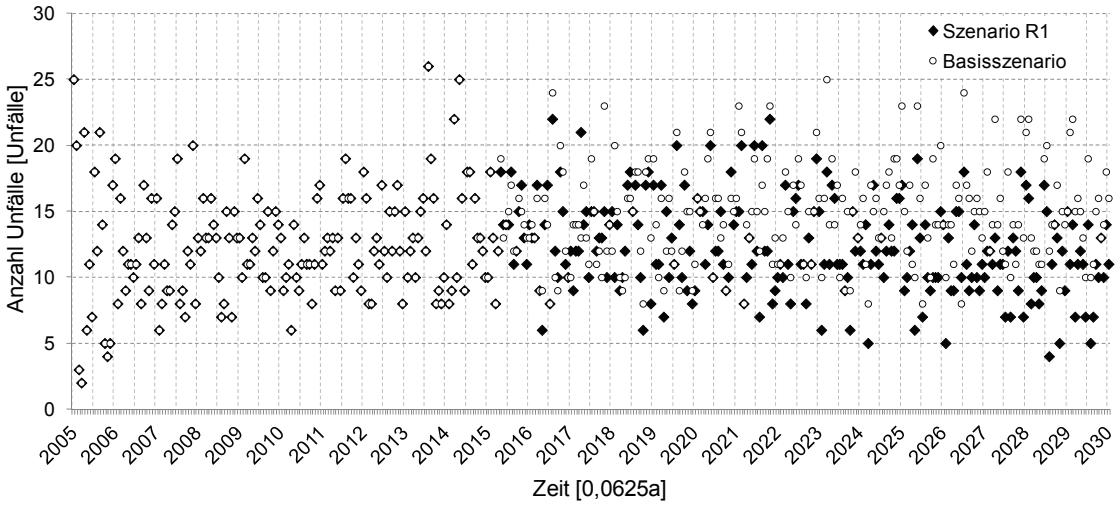


Abbildung 7-27: Anzahl der Unfälle je Zeitperiode in den Szenarien Basis und R1 (Modellergebnisse)

Mit sinkender Anzahl der Unfälle geht das Volumen für die Ersatzproduktion der beschädigten Module, Komponenten, Teile und Rohstoffe zurück. Dies wirkt sich direkt auf die Höhe des Sicherheitsbestandes aus. Die Stärke der Wirkung auf den Sicherheitsbestand variiert zwischen den Szenarien: Abbildung 7-28 stellt die in den Szenarien auftretenden Abweichungen der Bestände in Modul-Äquivalenten dar.

Mit steigendem Rang des Zulieferers und der damit verbundenen abnehmenden Fahrleistungsintensität steigt die Produktionsreichweite einer Lkw-Ladung an. Vice versa bedeutet dies, je höher die Fahrleistungsintensität ist, desto geringer fällt der mengenmäßige Verlust bei Kollision eines Lkw aus. Der Impuls eines Unfalls auf die Produktion und die damit verbundene Ersatzproduktion nimmt folglich mit abnehmendem Rang der Zulieferstufe zu. Dies führt dazu, dass die Abweichung zwischen den absoluten Beständen der Zulieferstufe Tier-n in Szenario R2 etwa 20-mal so hoch ausfällt wie in Szenario R1.

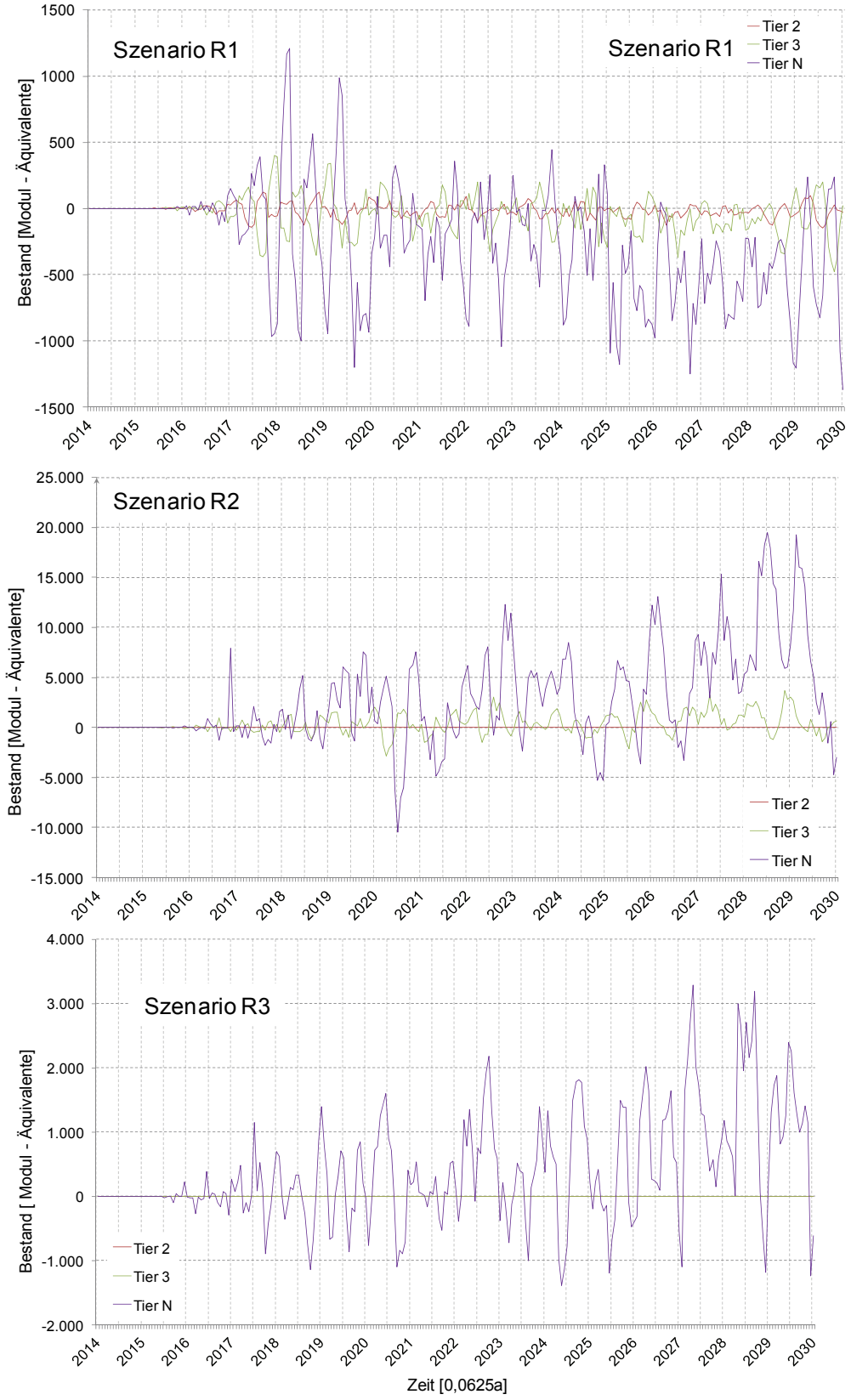


Abbildung 7-28: Differenz (Szenario R_n – Basis) der Bestände (Modellergebnisse)

Die aus Abbildung 7-28 abgeleiteten Folgen für den Bedarf an Lagerflächen können allerdings als marginal bezeichnet werden. Die regionalen Zulieferstrukturen in Szenario R1 reduzieren die benötigten Lagerflächen zur Lagerung des Sicherheitsbestandes in den Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n im Jahr 2030 um etwa 0,17 % (Modellergebnisse mit einer Reichweite des Sicherheitsbestandes von einem Tag). Eine Erhöhung der Reichweite des Sicherheitsbestandes verringert die Differenz zwischen Basisszenario und R1, so dass diese bei einer Reichweite von 10 Tagen auf 0,14 % absinkt. Durch die geringere Fahrleistungsintensität steigt die Produktionsreichweite einer Lkw-Ladung im zunehmenden Rang des Zulieferers an. Dies bedeutet, dass die Anzahl der nachzuproduzierenden Komponenten und Teile höher ausfällt als bei Unfällen im Tier-1-Zuliefernetzwerk. Durch die Verlagerung der Produktion nach Europa steigt die absolute Fahrleistung im Straßengüterverkehr und damit die absolute Anzahl der Unfälle. Zusammen mit der sinkenden Fahrleistungsintensität führt dies zu höheren Schwankungen der Sicherheitsbestände und in der Folge zu einem um etwa 2,38 % (Szenario R2) bzw. 0,44 % (Szenario R3) erhöhten Lagerflächenbedarf. Insgesamt wirkt sich dies jedoch kaum auf die spezifischen Lagerkosten pro produziertem Pkw aus, so dass davon ausgegangen werden kann, dass regionalisierte Zuliefernetzwerke zwar zu messbaren Änderungen bei den Sicherheitsbeständen führen, diese allerdings nur in einem sehr geringen Maße kostenwirksam in die Lagerkosten eingehen. Selbst unter Einbezug weiterer Störungsquellen wie beispielsweise einem technischen Ausfall des Fahrzeuges, der jedoch nicht zwangsweise zur Beschädigung der zu transportierenden Ware führen muss, erhöhen sich die spezifischen Lagerkosten um maximal 1 Euro bis 3 Euro pro produziertem Fahrzeug. Dies entspricht einer Steigerung der gesamten Logistikkosten um weniger als 1 %. Die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen einer Regionalisierung der Zulieferstruktur auf die Lagerkosten können somit als vernachlässigbar bezeichnet werden.

7.5.3.2 Auswirkungen regionalisierter Zuliefernetzwerke auf Schadens- und Vermeidungskosten

Neben dem Sicherheitsbestand beeinflusst die Länge der Transportwege auch die Schadens- und Vermeidungskosten im Nachlauf einer Produktionsstörung. Ausschlaggebend für die Gesamtdauer des Produktionsausfalls ist zusätzlich zu der eigentlichen Störung beim Zulieferer die Dauer bis zur Normalisierung der Produktion beim rangniedrigeren Zulieferer oder OEM. Die Transportentfernungen bestimmen die Transportdauer. Auf Basis der Transportentfernungen ergibt sich der Median der Fahrzeit zwischen den OEM-Produktionswerken und den Tier-1-Zulieferern. Dieser liegt im Basisszenario bei etwa 5,6 Stunden. Dies entspricht dem Zeitverzug zwischen Wiederaufnahme der Produktion beim Tier-1-Zulieferer und dem Anlaufen der Produktion

beim OEM. Durch den Einsatz von Fahrzeugen der Klasse G1 (Kleintransporter) lässt sich die Überbrückung der Transportdistanz beschleunigen. Der Zeitverzug sinkt damit auf etwa 3,7 Stunden. Dies ergibt sich durch eine um etwa 50 % höheren möglichen Durchschnittsgeschwindigkeit und einem geringeren Zeitaufwand für die Be- und Entladung. Den damit reduzierten Schadenskosten stehen Vermeidungskosten durch den Einsatz von Kleintransportern gegenüber. Wie in Abbildung 7-29 dargestellt, können durch den Einsatz der Kleintransporter die Schadenskosten im Mittel auf die Hälfte reduziert werden. Die darin enthaltenen Vermeidungskosten für den Einsatz der Kleintransporter betragen abhängig von der Fahrleistungsintensität der Module maximal 10 % der gesamten Schadenskosten. Der Einsatz von kleineren Transportgefäßen mit größeren Transportgeschwindigkeiten und höheren spezifischen Kosten führt demnach immer zu geringeren Schadenskosten.

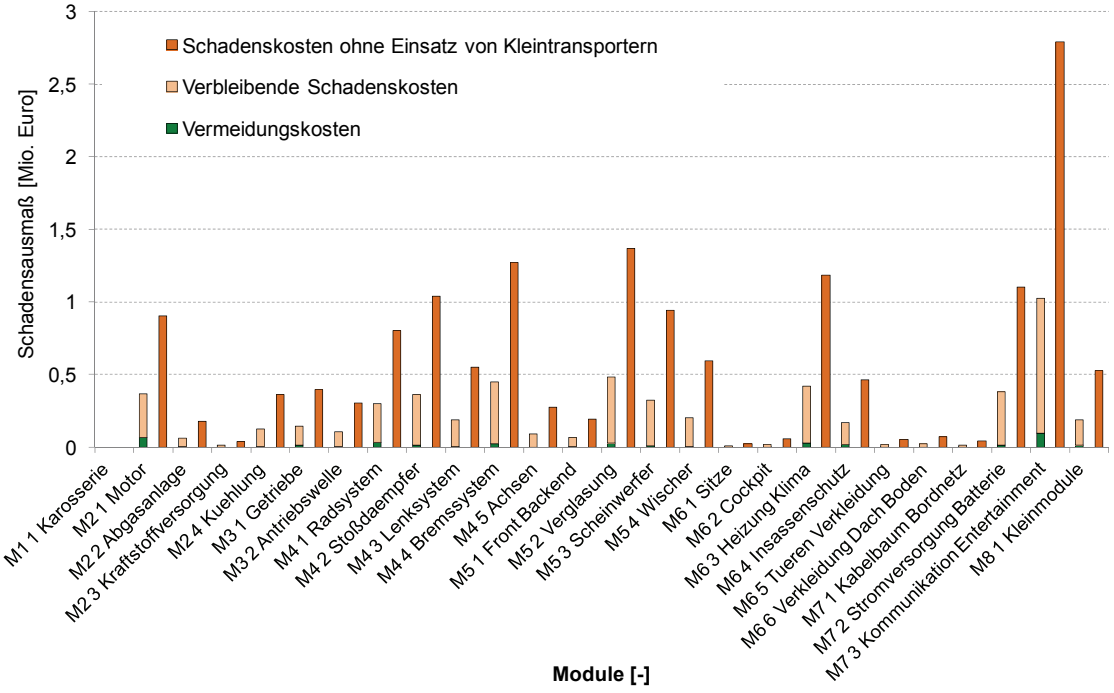


Abbildung 7-29: Schadensausmaß mit und ohne Einsatz von Kleintransportern im Basisszenario auf der Relation Tier-1 - OEM (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Für die 27 betrachteten Module bedeutet dies, dass Störungen bei zentral produzierten Modulen mit weiten Transportentfernungen, wie beispielsweise das Modul M7.3 (Kommunikation und Entertainment), überdurchschnittlich hohe Schadens- und Vermeidungskosten erzeugen. Für sechs der 27 Module liegen im Basisszenario die Schadenskosten über 1 Million Euro pro Produktionsstörung.

Die regionalen Zulieferstrukturen in Szenario R1 reduzieren den Median der Transportdauer zwischen Tier-1-Zulieferern und den OEM-Produktionsstandorten auf unter eine Stunde (siehe Abbildung 7-30).

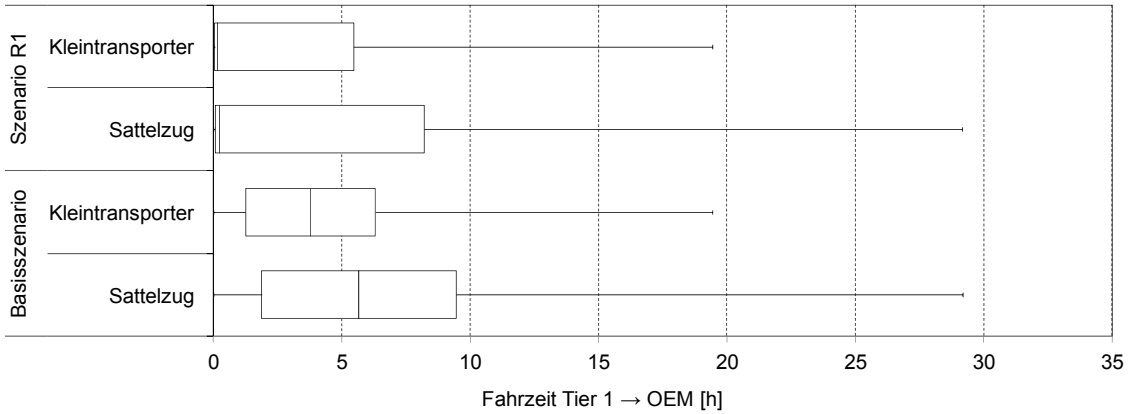


Abbildung 7-30: Fahrzeiten zwischen Tier-1-Zulieferer und den OEM Produktionsstandorten (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Damit sinken für die nun regional produzierten Module die Schadenskosten im Mittel auf knapp 2.000 Euro pro Produktionsstörung. Allerdings betrifft dies zumeist Module, die ohnehin bereits heute durch dezentrale Produktionsstandorte geringe bis mittlerer Entfernungen zum OEM-Produktionsstandort aufweisen. Lieferverzüge bei zentral produzierten Modulen, wie beispielsweise Kommunikation und Entertainment (M7.3) oder Verglasung (M5.2), welche heute die größten Schadenskosten verursachen, sind nicht von der Regionalisierung betroffen und tragen somit weiterhin maßgeblich zu den gesamten Schadenskosten bei (vgl. Abbildung 7-31).

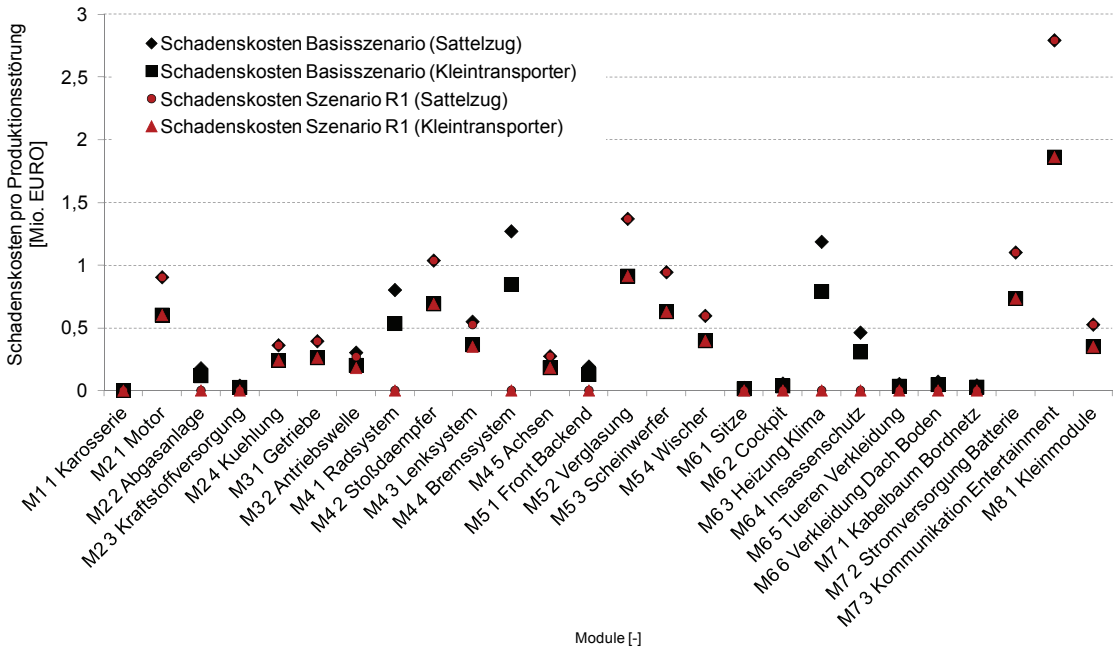


Abbildung 7-31: Schadenskosten im Basisszenario und in Szenario R1 (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Die Differenz der Transportzeitvorteile durch den Einsatz von Kleintransportern (Klasse G1) sinkt in Szenario R1 im Mittel (Median) durch die geringen Transportentfernungen zwischen den Tier-1-Zulieferparks und den OEM-Produktionsstandorten auf unter eine Stunde ab. Damit können die Schadenskosten bei Störungen der Modulproduktion in Zulieferparks durch Eiltransporte kaum gemindert werden. Die Maxima der Fahrzeitverteilung werden auch in Szenario R1 durch zentral produzierte Module (z. B. Verglasung, Kommunikation) bestimmt und bleiben damit unverändert.

Die Ergebnisse für die Produktionsstandorte hängen von den Deckungsbeiträgen pro produziertem Fahrzeug ab. Diese Werte sind markenspezifisch. Bei Herstellern mit überdurchschnittlich hohen spezifischen Deckungsbeiträgen wie Porsche und Audi führen Störungen im Zuliefernetzwerk zu überdurchschnittlich hohen Schadenskosten. Deshalb fallen die höchsten Schadenskosten pro Störung bei Porsche in Leipzig und Stuttgart sowie bei Audi in Ingoldstadt an. Diese Werke profitieren dementsprechend überdurchschnittlich stark von der Verlagerung der Tier-1-Zulieferer in die Lieferantenparks (vgl. Abbildung 7-32).

Der Deckungsbeitrag beeinflusst die Schadenskosten stärker als die Transportentfernungen: Der Porsche-Produktionsstandort in Stuttgart hat beispielsweise mit einem Median der Transportdistanz zwischen dem OEM-Werk und den Tier-1-Zuliefereren von 197 km einen um etwa 100 km geringeren Wert als die Ford-Werke in Saarlouis. Der Produktionsoutput der Ford-Werke ist zudem etwa dreimal so hoch wie bei Por-

sche in Stuttgart. Die Schadenskosten pro Störung fallen dennoch bei Porsche etwa 750 % höher aus als in Saarlouis. Dies weist darauf hin, dass die Schadenskosten deutlich stärker mit der Höhe des Deckungsbeitrages korrelieren und weniger stark mit der Transportdistanz.

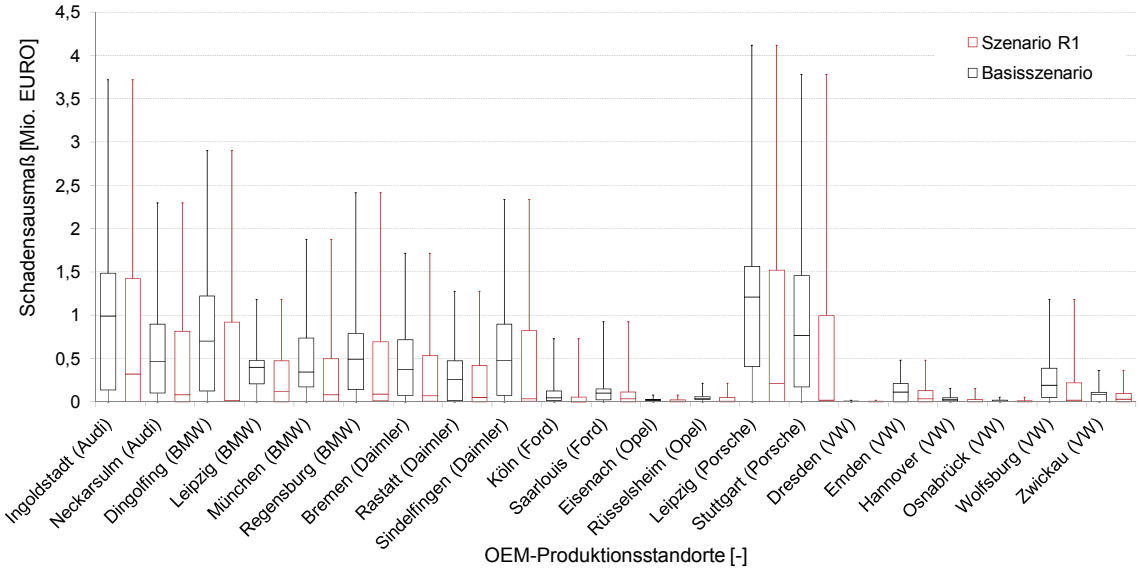


Abbildung 7-32: Schadensausmaß in den OEM-Produktionswerken in den Szenarien Basis und R1 (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Sämtliche Aussagen beziehen sich auf die Tier-1-Zulieferstufe. Die dargestellten Ergebnisse lassen sich teilweise auf die Zulieferstufen der Ränge 2 bis n übertragen: Mit abnehmenden Transportentfernungen sinken die Schadenskosten unabhängig von der Zulieferstufe. Die spezifischen Vermeidungskosten pro Modul, Komponente und Einzelteil steigen mit wachsender Fahrleistungsintensität. Da aber die Vermeidungskosten in der Tier-1-Zulieferstufe nur einen Anteil von weniger als 10 % an den gesamten Schadenskosten haben, kann davon ausgegangen werden, dass diese selbst beim Einsatz von Kleinflugzeugen in der Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n immer weniger als 50 % zum Gesamtschaden beitragen. Die Verkürzung der Lieferverzüge durch Eiltransporte wird daher immer zu günstigeren Schadenskosten führen.

Insgesamt lassen sich für die Wirkung von regionalisierten Zuliefernetzwerken auf Supply-Chain-Risiken aus den Simulationsergebnissen nur begrenzt Aussagen ableiten. Zwar sinken mit den Transportentfernungen auch die Transportrisiken, deren Einfluss auf die Sicherheitsbestände fällt, verglichen mit den Änderungen bei den Transportkosten, aber gering aus. Die Verkürzung der Transportentfernungen reduziert zwar die Transportdauer, die nach einer Produktionsstörung beim Zulieferer den

Lieferverzug verlängert, der daraus entstehende Schaden für die OEM lässt sich aufgrund der starken Variation der Deckungsbeiträge nur schwer vergleichend gegenüberstellen.

7.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Umsetzungswahrscheinlichkeit einer regionalen Zulieferstruktur

Insgesamt steigt in Folge wachsender weltweiter Nachfrage die Pkw-Produktion an deutschen Standorten zwischen den Jahren 2014 und 2030 um etwa 12 % auf 6,425 Millionen Einheiten an. Dies entspricht einem Transportaufkommen in Beschaffungs- und Distributionslogistik von etwa 84,5 Millionen Tonnen im Jahr 2030. Für die Zulieferstufen entsteht ein unspezifisches Bild: 75 % des Transportaufkommens in der Beschaffungslogistik entfallen auf die Relationen zwischen Tier-1-Zulieferer und OEM. Dieser hohe Anteil begründet sich durch den Einsatz von Spezialladungsträgern mit geringen Zuladungskapazitäten und hohem Gewicht zum Transport der Module. Die verbleibenden 25 % des Transportaufkommens entstehen in den Zulieferstufen der Ränge 2 bis n. Die BTF-Produktionsstrategien dieser Zulieferstufen führen dazu, dass sich mit steigendem Rang die Volatilität des Transportaufkommens vergrößert (Bullwhip-Effekt).

Eine detaillierte Betrachtung der Zulieferstufen zeigt, dass die Fahrleistungsintensität (Verhältnis zwischen Fahrleistung und Güterbeförderungsleistung) mit steigendem Rang des Zulieferers abnimmt. Die Verteilung der Fahrleistungsintensitäten in den Zulieferstufen unterscheidet sich nicht nur durch die Höhe des Medians, sondern auch innerhalb der Zulieferstufe: Die Fahrleistungsintensität variiert beim Transport der 27 betrachteten Module in der Zulieferstufe ersten Ranges mit einer Standardabweichung von 0,024 Fahrzeugkilometer pro Modul-Äquivalent-Kilometer mindestens sechsmal so stark wie in den übrigen Zulieferstufen. Besonders Module mit geringer Dichte wie beispielsweise Sitze, Cockpits und Kraftstoffversorgung weisen eine überdurchschnittliche Fahrleistungsintensität auf.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse lassen sich zusammen mit Informationen zur geografischen Verortung der Produktionsstandorte in den Zulieferstufen Szenarien der Regionalisierung definieren. In Szenario R1 werden aufgrund der starken Variation der Fahrleistungsintensitäten die Produzenten von Modulen mit einer Fahrleistungsintensität größer gleich 0,003 Fahrzeugkilometer pro Modul-Äquivalent-Kilometer, die bereits heute an mehr als zwei innerdeutschen Standorten produzieren, in werksnahe Zulieferparks verlagert. In Szenario R2 und R3 wird die Hälfte der außereuropäischen Produktionsstandorte nach Europa verlagert. Die geringe Variation der Fahrleistungsin-

tensität in den Zulieferstufen mit den Rängen 2 bis n erlaubt eine aggregierte Betrachtung aller Komponenten, Teile und Rohstoffe.

Sowohl hinsichtlich der betriebswirtschaftlichen als auch der ökologischen Wirkungen weisen die Szenarien heterogene Ergebnisse auf: Alle drei Szenarien reduzieren die CO_2-Emissionen gegenüber dem Basisszenario. Die jährlichen Treibhausgasemissionen sinken im Jahr 2030 in den Szenarien R1 und R2 um etwa 12 % und in Szenario R3 um etwa 7 %. Die Simulationen von Szenario R3 führen damit stets zu geringeren Emissionsminderungen als bei den Szenarien R1 und R2. Eine Variation der Effizienzsteigerungen beim Kraftstoffverbrauch bestätigt diese Rangfolge.

Die Stärke aller übrigen ökologischen Wirkungen (Luftschadstoffe, Geräuschemissionen, Unfälle sowie Belastung des Straßenoberbaus) steht in engem Zusammenhang mit der Entwicklung von Güterbeförderungs- und Fahrleistung der Verkehrsträger. Die Verlagerungen von den Verkehrsträgern See- und Binnenschiff bzw. Schiene auf die Straße in den Szenarien R2 und R3 führen bei den Geräuschemissionen sowie der Belastung des Straßenoberbaus zu einer Mehrbelastung. Bei der regionalisierungsbedingten Reduktion von Luftschadstoffen fallen die Effekte ebenfalls bei den Szenarien R1 und R2 am stärksten aus. Die übrigen Umweltwirkungen wie Geräuschemissionen und Belastungen der Straßeninfrastruktur können nur in Szenario R1 reduziert werden. Dies hängt damit zusammen, dass in den Szenarien R2 und R3 durch die Verlagerung der Produktion der Güterbeförderungsleistung im Hafenhinterlandverkehr (Bahn, Binnenschiff) zurückgeht, gleichzeitig aber die Fahrleistung im Straßengüterverkehr um circa 13 % in Szenario R2 bzw. 7 % in Szenario R3 ansteigt. In der Summe führt dies in Szenario R2 im Jahr 2030 zu einer um 15 % stärkeren Belastung des Straßenoberbaus. In Szenario R3 steigt dieser Wert um 10 % an. Zudem steigen die Betriebsstunden im Straßengüterverkehr im Durchschnitt in Szenario R2 um 12 %. Diese Erhöhung fällt in Szenario R3 mit 6 % nur halb so hoch aus. Eine Übersicht über alle Ergebnisse im Detail ist in Tabelle 7-5 dargestellt.

Ein ähnliches Bild zeichnet sich auch bei den betriebswirtschaftlichen Wirkungen ab: In Szenario R1 lassen sich durch geringe Fahrleistungen im Straßengüterverkehr die Transportkosten um etwa 22 % senken. Zusätzlich dazu verringert sich der Behälterbedarf und ergo die Behälterkosten. Insgesamt sinken so die Logistikkosten in Szenario R1 um etwa 16 %. Durch die Verkürzung der Behälterumlaufzeiten fallen die Behälterkosten auch in den Szenarien R2 und R3 geringer als im Basisszenario aus. Durch die Verlagerung der Güterbeförderungsleistung von Seeschiff und Hafenhinterlandverkehr auf die Straße steigen allerdings die Transportkosten um 8 % (R2) bzw. 4 % (R3). Insgesamt liegen die Logistikkosten in Szenario R2 (R3) etwa 3 % (2 %) über den Kosten im Basisszenario. Der Einbezug von Supply-Chain-Risiken zeigt,

dass Transportrisiken wie Unfälle kaum zu einem Anstieg der Vermeidungskosten führen. Zwar wächst durch unfallbedingte Totalschäden von Modulen, Komponenten und Einzelteilen die Volatilität des Sicherheitsbestandes; insgesamt kann die maximale Änderung der Lagerfläche im Vergleich zum Basisszenario mit 2,4 % jedoch als gering bezeichnet werden. Durch Berücksichtigung der Schadensmehrkosten nach einer Produktionsstörung entstehen deutlich messbare Effekte: Die verringerten Transportentfernungen in Szenario R1 führen zu geringeren Fahrzeiten zwischen den Tier-1-Zulieferern und den OEM-Produktionsstandorten. So lassen sich die Produktionsausfälle im Mittel (Median) um etwa 5 Stunden verkürzen. Bei einem mittleren Deckungsbetrag von 3.000 Euro pro Pkw und einem jährlichen Produktionsoutput von 300.000 Pkw entspricht dies einer Reduktion des Schadensausmaßes pro Produktionsstörung um etwa 1 Million Euro. Im Mittel wird das Schadensausmaß pro Störung in Szenario R1 um etwa 280.000 Euro reduziert. Eilfahrten mit Kleintransporten können diese Differenz unter Berücksichtigung der Vermeidungskosten auf etwa die Hälfte absenken. Sämtliche Ergebnisse weisen allerdings eine starke Abhängigkeit von der Höhe der markenspezifischen Deckungsbeiträge pro produziertem Fahrzeug auf.

Tabelle 7-5: Überblick über ausgewählte Kennzahlen in den Szenarien (Modellergebnisse für das Jahr 2030)

Kennzahl		Basis	Szenario R1		Szenario R2		Szenario R3	
		absolut	absolut	(R1 - Basis) / Basis	absolut	(R2 - Basis) / Basis	absolut	(R3 - Basis) / Basis
Durchschnittliche Transportentfernungen								
Tier 1 → OEM	[km]	104	57	-45,19%	104	0,00%	104	0,00%
Tier 2 → Tier 1	[km]	4365	4366	0,02%	2476	-43,28%	4365	0,00%
Tier 3 → Tier 2	[km]	5664	5664	0,00%	5664	0,00%	2476	-56,28%
Tier N → Tier 3	[km]	3913	3913	0,00%	3913	0,00%	3913	0,00%
Güterbeförderungsleistung (Summe aller Verkehrsträger)								
Tier 1 → OEM	[Mrd. tkm]	4,32	2,36	-45,33%	4,32	0,00%	4,32	0,00%
Tier 2 → Tier 1	[Mrd. tkm]	59,99	60,00	0,02%	34,02	-43,29%	59,99	0,00%
Tier 3 → Tier 2	[Mrd. tkm]	27,13	27,13	0,00%	27,13	0,00%	13,78	-49,21%
Tier N → Tier 3	[Mrd. tkm]	15,40	15,40	0,00%	15,40	0,00%	15,40	0,00%
Gesamt	[Mrd. tkm]	106,84	104,89	-1,83%	80,87	-24,31%	93,49	-12,50%
Fahrleistung im Straßengüterverkehr								
Tier 1 → OEM	[Mrd. Fzg.-km]	0,51	0,15	-71,69%	0,51	0,00%	0,51	0,00%
Tier 2 → Tier 1	[Mrd. Fzg.-km]	0,56	0,56	0,42%	0,73	30,63%	0,56	0,00%
Tier 3 → Tier 2	[Mrd. Fzg.-km]	0,18	0,18	0,00%	0,18	0,00%	0,27	53,85%
Tier N → Tier 3	[Mrd. Fzg.-km]	0,10	0,10	0,00%	0,10	0,00%	0,10	0,00%
Gesamt	[Mrd. Fzg.-km]	1,35	0,98	-27,38%	1,52	12,63%	1,44	6,70%
Ökologische Wirkungen								
CO_2-Ausstoß	[Mio. t]	2,00	1,75	-12,20%	1,75	-12,13%	1,85	-7,07%
Emission vonLuftschadstoffen	[t]	167,0	148,4	-11,14%	147,7	-11,54%	156,2	-6,44%
Schädigung Straßenoberbau	[Mio.]	55,1	49,2	-10,70%	63,4	15,10%	60,5	9,76%
Lärm - Betriebsstunden Land- und Kreisstraßen	[1.000 h]	757,5	453,4	-40,14%	831,8	9,81%	798,7	5,44%
Lärm - Betriebsstundene Autobahn	[1.000 h]	691,3	549,2	-20,55%	794,2	14,89%	748,4	8,26%
Ökonomische Wirkungen								
Transportkosten	[Euro/Pkw]	234,52	181,4	-22,65%	253,87	8,25%	244,56	4,28%
Anzahl Behälter	[Mio. Behälter]	2,72	2,6	-4,21%	2,38	-12,52%	2,28	-16,39%
Behälterkosten	[EURO/Pkw]	62,3	46,0	-26,11%	57,9	-7,06%	58,8	-5,63%
Anzahl Unfälle Lkw	[Unfälle]	858	684	-20,33%	944	9,98%	906	5,54%
Lagerfläche	[1.000 m^2]	178,3	178,0	-0,17%	182,5	2,38%	179,0	0,44%
mittleres Schadensausmaß pro Störung	[tsd. Euro/Störung]	339,4	58,6	-82,73%	-	-	-	-

Umsetzungswahrscheinlichkeit der Regionalisierungsszenarien

Aus den beschriebenen Ergebnissen lassen sich Wahrscheinlichkeiten für die Umsetzung der Szenarien ableiten. Dazu muss zunächst geklärt werden, welche Szenarien ökologisch positive Effekte entwickeln und demnach aus Sicht der Gesellschaft umsetzungswert sind. Danach gilt es, betriebswirtschaftliche Vorteile und daraus entstehen-

de Anreize zur Umsetzung der Szenarien für die produzierenden Unternehmen zu identifizieren.

Wenngleich in Szenario R2 ein ähnlich hohes CO_2-Reduktionspotential wie in Szenario R1 erreicht wird, so sind der Anstieg des Straßengüterverkehrs und die damit zusammenhängende Mehrbelastung durch Geräuschemissionen und Schädigung des Straßenoberbaus kritisch zu betrachten. Die Verlagerung von den im Hafenhinterlandverkehr genutzten Verkehrsmitteln Binnenschiff und Eisenbahn auf den Lkw führt zudem dazu, dass die Luftschadstoffe vermehrt in räumlicher Nähe zu bebauten Flächen emittiert werden und somit direkt auf Menschen und Tiere wirken. Für die ökologischen Wirkungen ist demnach nicht nur die absolute Höhe der Güterbeförderungsleistung maßgeblich, sondern die Aufteilung auf die Verkehrsträger. Mit wachsendem Anteil des Straßengüterverkehrs steigen die Umweltwirkungen pro Tonnenkilometer. Aus ökologischer Sicht kann deshalb nur die Umsetzung des Szenarios R1 als uneingeschränkt vorteilhaft bezeichnet werden.

Die Verlagerung von den Verkehrsmitteln See- bzw. Binnenschiff und Eisenbahn auf den Lkw führt in den Szenarien R2 und R3 zu einer Steigerung der Transportkosten. Es entstehen somit in diesen Szenarien keine ökonomischen Anreize zur Verlagerung der Produktion nach (Ost-) Europa. Einzig die Reduktion der Schadensmehrkosten könnte für die Unternehmen Gründe bieten, die Produktionsverlagerung nach Europa zu forcieren. Die kürzeren Transportentfernungen führen dazu, dass nach einer Betriebsunterbrechung die Produktion schneller normalisiert werden kann. Inwiefern die Zulieferer heute bereits zeitliche Puffer einplanen, um transportbedingte Verzögerung in der Produktion zu vermeiden, lässt sich nur schwer abschätzen. Im Gegensatz dazu lassen sich die positiven betriebswirtschaftlichen Effekte durch eine Verlagerung der Tier-1-Zulieferer in werksnahe Zulieferparks direkt messen: Sowohl die Transportkosten als auch sämtliche weitere logistikbedingten Kosten nehmen durch die Reduzierung der Transportentfernungen ab.

Somit scheint mit Szenario R1 die höchste Umsetzungswahrscheinlichkeit verbunden zu sein. Zusätzlich zu den betriebswirtschaftlichen Vorteilen könnten die produzierenden Unternehmen dann durch die Veröffentlichung von ökologischen Kennzahlen der Logistik in den Umweltberichten eine positive Außenwirkung erzielen.

7.7 Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Förderung von regionalen Zulieferstrukturen

Die Analyse der ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen der drei Regionalisierungsszenarien ergibt für Szenario R1 die größte Chance für eine Umsetzung. Die bisherigen Entwicklungen in der deutschen Automobilindustrie zeigen allerdings, dass eine Regionalisierung der Zulieferstruktur nicht vorauszusetzen ist. Um dennoch eine Reduktion der Transportentfernungen einzuleiten, sollen an dieser Stelle Handlungsempfehlungen aus den durch die Wirkungsanalyse und Modellsimulationen gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet werden.

Handlungsempfehlungen richten sich immer an handelnde Personen, die als Akteure bezeichnet werden. Im System „Automobilindustrie“ lassen sich zwei Akteursgruppen identifizieren, die den Prozess der Regionalisierung analog zu Szenario R1 beeinflussen können. Dazu zählen einerseits die produzierenden Unternehmen in der Tier-1-Zulieferstufe sowie die OEM und andererseits staatliche Institutionen, welche in der Lage sind, die Wahl der Produktionsstandorte zu beeinflussen. Für beide Akteursgruppen ergeben sich zur Unterstützung des Aufbaus regionaler Zulieferstrukturen Handlungsempfehlungen.

Die wichtigste Akteursgruppe stellen die produzierenden Unternehmen dar. Diese bestimmen durch ihre Standortwahl, wo die Module, Komponenten, Einzelteile und Rohstoffe hergestellt werden. Die Ergebnisse für Szenario R1 zeigen, dass regionale Zulieferstrukturen zu betriebswirtschaftlichen Vorteilen führen. Diese Vorteile müssten von den Unternehmen zunächst erkannt werden, um den Handlungsdruck zu identifizieren. Dazu müsste ein lückenloses Reporting der Kosten innerhalb der Lieferkette erfolgen. Die Herausforderung besteht in der modulscharfen Zuordnung der Logistikkosten, um Regionalisierungspotentiale im Detail analysieren zu können. Fremdvergaben von Lagerung, Kommissionierung und Transport an Logistikdienstleister erschweren allerdings die Erfassung und Zuordnung von Kostenkomponenten (Transport-, Behälter- und Lagerkosten). Zur transparenten Kostenerfassung gehört auch die Berücksichtigung von durch Supply-Chain-Risiken verursachte Vermeidungs- und Schadenskosten im Falle von Produktionsausfällen.

Neben der Senkung von Kosten bietet die Regionalisierung der Zulieferstruktur für die OEM auch die Chance, die Lieferkette robuster gegen Störungen in der Supply-Chain zu gestalten. Zudem kann die räumliche Nähe ein Austausch in der Entwicklung und bei der Behebung von Schadensfällen und Qualitätsproblemen in der Produktion beschleunigen. Um diese Vorteile bei der Vergabe der Produktionsleistung berücksich-

tigen zu können, muss jedoch eine Sensibilisierung der zuständigen Abteilungen über die reinen Einkaufskosten hinaus erfolgen.

Die Identifikation von Modulen, bei denen eine Regionalisierung der Zulieferstruktur zu überdurchschnittlichen Kostensenkungen führt, bildet einen wichtigen ersten Schritt zur Umsetzung von regionalen Beschaffungsnetzwerken. Der Identifikation des Potentials muss die Umsetzung der Regionalisierung folgen. Dafür sollte von den OEM die Strategie verfolgt werden, vermehrt Tier-1-Zulieferer in lokalen Zulieferparks anzusiedeln. Da die Mehrheit der Zulieferer aus Kostengründen die Produktion an bestehenden Standorten favorisieren wird, könnte die Standortverlagerung vertraglich mit Vergabe der Produktionsleistung an den Zulieferer geregelt werden. Analog zu bereits bestehenden Vertragsklauseln bezüglich der maximalen Distanz zwischen OEM und Tier-1-Zulieferern lassen sich auch dezidierte Anforderungen zur geografischen Verortung der Produktionsstätte vertraglich festlegen. Übernimmt der OEM die Betreiberfunktion des Lieferantenparks (Beispiel: BMW im Innovationspark Wackersdorf), so kann dies die Prozesse und Verhandlungen mit den entsprechenden Zulieferer beschleunigen und vereinfachen. Da sich die Vertragslaufzeiten bei der Vergabe von Modulen an den Modellzyklen orientieren und damit langfristiger als bei Komponenten und Einzelteilen sind (vgl. Göpfert und Grünert 2012, S. 168), lässt sich der Betrieb des Zulieferparks stabiler planen und organisieren.

Die Einrichtung von Zulieferparks erfordert nicht nur eine Kooperation zwischen Tier-1-Zulieferern und OEM, sondern auch eine enge Zusammenarbeit mit den zuständigen Städten, Gemeinden und Landkreisen. Auch für diese Akteursgruppe ergeben sich durch die regionalisierungsbedingte Vermeidung von Verkehr positive Wirkungen: Durch regionale Zulieferstrukturen lassen sich nicht nur die CO_2-Emissionen reduzieren. Eine geringere Fahrleistung der Nutzfahrzeuge führt zu einer Reduktion der Luftschadstoffe. Ebenso sinken die Geräuschemissionen, die Anzahl der Unfälle und die Belastung der Straßeninfrastruktur. Aus Sicht der politischen Instanzen kann so die Lebensqualität in Städten und Gemeinden erhöht werden.

Die Bereitstellung von geeigneten Flächen für die Errichtung der in Szenario R1 enthaltenen lokalen Zulieferparks kann in den wenigsten Fällen durch die produzierenden Unternehmen selbst erfolgen. Der Ankauf benötigter Flächen durch die Tier-1-Zulieferer oder den OEM setzt ein gewerbliches Nutzungsrecht voraus. Die zuständige Verwaltungsebene zur Klärung von raumordnungstechnischen Fragestellungen ist in Deutschland je nach Größe der Gemeinde die Gemeinde selbst oder der Landkreis. Sie stellt unter Berücksichtigung von städtebaulichen Belangen einen Flächennutzungsplan auf (§ 5 Baugesetzbuch). Dieser Plan weist dem gesamten Gemeindegebiet Nutzungsformen zu (z. B. gewerbliche Bauflächen, Wohnbauflächen). Aus den

Flächennutzungsplänen leiten sich Bebauungspläne ab. Diese regeln nach § 9 des Baugesetzbuches für die Bodennutzungen die bauliche Nutzung. Darin enthalten sind u. a. Angaben über einzuhaltende Abstände zwischen Bebauungen und die benötigte Erschließungsinfrastruktur. Die Kombination aus Flächennutzungs- und Bebauungsplan legt somit die Gestaltung der Gemeindefläche rechtsverbindlich fest.

Die Einrichtung von Zulieferparks als zentraler Bestandteil des Szenarios R1 setzt die Ausweisung von gewerblichen Bauflächen im Flächennutzungsplan voraus. Sollten die bestehenden Flächennutzungspläne gewerbliche Flächen in der erforderlichen Größe im lokalen Umfeld der OEM-Produktionswerke derzeit nicht ausweisen, so müssen die Flächennutzungspläne dementsprechend angepasst werden. Die entscheidenden Akteure in diesem Prozess sind die Gemeinden, auf deren Gemarkung die OEM produzieren. Der unmittelbare Handlungsbedarf der betroffenen Gemeinden besteht darin, die Anpassung der Flächennutzungspläne entsprechend voranzutreiben und Anhörungsprozesse betroffener Anrainer durchführen. Selbiges gilt für die Erstellung des Bebauungsplans. Dieser stellt eine zwingende Voraussetzung für den Baubeginn der Produktionshallen und Infrastruktur des Zulieferparks dar. Die obligatorische Umweltverträglichkeitsprüfung vor der Erstellung von Bebauungsplänen (vgl. § 17 Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung) kann den Prozess bis zur Erlaubnis des Baubeginns verzögern. Da sowohl Änderungen im Flächennutzungsplan als auch die Erstellung eines Bebauungsplans Anhörungs- und Einspruchsverfahren nach sich ziehen können (vgl. Baugesetzbuch § 6 und § 10), muss, um die Einrichtung von lokalen Zulieferparks bis zum Jahr 2026 vollständig umsetzen zu können, sofort mit den Planungsprozessen begonnen werden.

Durch die Einrichtung von lokalen Zulieferparks entstehen im direkten Umfeld der OEM-Produktionswerke unterschiedlich große Flächenbedarfe (siehe Abbildung 7-33). Je nach Größe der Produktionswerke variieren diese zwischen 5.000 m^2 beim Volkswagenstandort Dresden und knapp 300.000 m^2 in Wolfsburg. Diese Werte beziehen sich auf die Flächen der Produktionshallen. Unter Berücksichtigung sämtlicher Außenflächen steigt dieser Flächenbedarf um etwa das 3,5-fache an (vgl. Schraft und Westkämper 2005, S. 57ff.). Der in Abbildung 7-33 dargestellte Bedarf an Produktionsflächen beinhaltet auch die bereits umgesetzten Zulieferparks in Ingoldstadt, Neckarsulm, Leipzig, Rastatt, Köln, Saarlouis, Rüsselsheim und Emden. Deren Größe bildet bereits eine gute Ausgangslage für die Produktion der 12 vorgeschlagenen Module. In sechs der acht Fälle müssen die Flächen maximal verdoppelt werden; in Leipzig würde die bereits bestehende Fläche ausreichen. In Dresden ist die ökologische Wirkung einer Regionalisierung bedingt durch die stark unterdurchschnittliche Produktionsmenge gering. Die heutige Größe bietet allerdings einen guten Ausgangspunkt um regionale Zulieferstrukturen mit geringem Aufwand umzusetzen und kann

daher eine Basis für ein ökologisch und ökonomisch nachhaltiges Wachstum der Produktion darstellen.

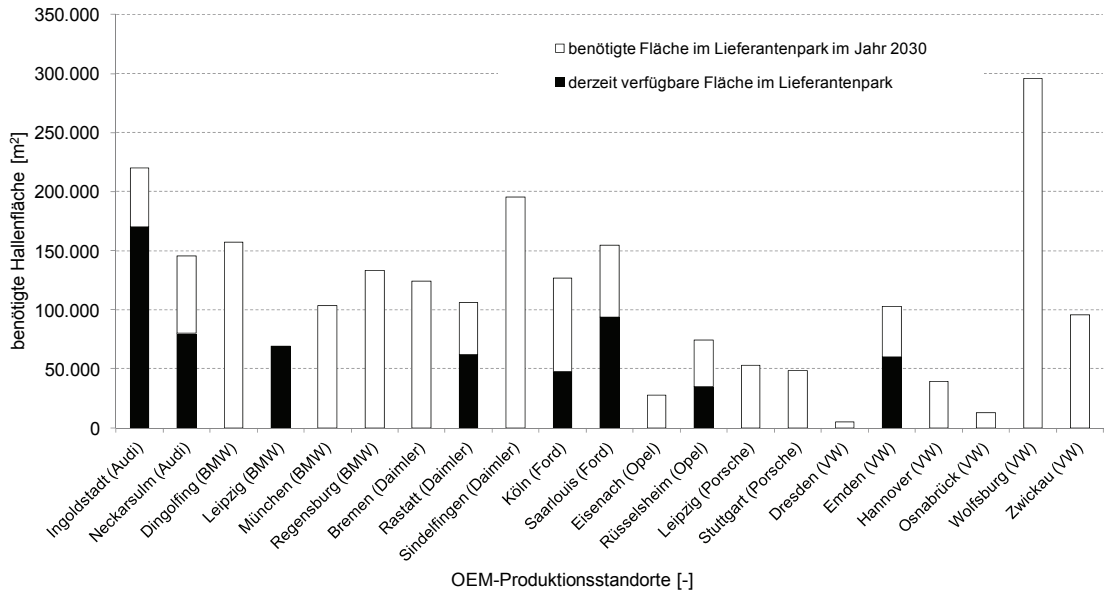


Abbildung 7-33: Benötigte und vorhandene Hallenfläche in den Lieferantenparks (Modellergebnisse für das Szenario R1 im Jahr 2030 unter Berücksichtigung der Angaben in Schraft und Westkämper 2005, S. 57ff.)

Der hohe Flächenbedarf in unmittelbarer Umgebung der OEM-Produktionswerke in Sindelfingen und Wolfsburg stellt allerdings eine Herausforderung für die Flächenplanung dar, da dort auf keine bestehenden Zulieferparks aufgebaut werden kann. Besonders im stark verdichteten Großraum von Stuttgart wird ein Flächenbedarf in dieser Größenordnung vermutlich zu Interessenskonflikten führen.

Fazit zu den Handlungsempfehlungen

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass sich aus den Ergebnissen für zwei Akteursgruppen Handlungsempfehlungen zur Umsetzung von regionalen Zuliefernetzwerken ableiten lassen: Die OEM sollten alle Module auf Eignung zur Regionalisierung prüfen. Dies beinhaltet die transparente Erfassung aller für die Lieferkette relevanten Kosten. Dazu zählen auch durch Supply-Chain-Risiken bedingte Schadens- und Vermeidungskosten. Auf Basis dieser Analyse kann die Verlagerung von Tier-1-Zulieferer in werksnahe Zulieferparks forciert werden. Dazu müssen in die langlaufenden Verträge mit den Zulieferern Anforderungen an die Standortwahl mit aufgenommen werden. Die Umsetzung von werknahen Lieferantenparks lässt sich jedoch nur mit Unterstützung der zuständigen Behörden (Gemeinden, Landkreise) umsetzen, deren

Bürger von der Verringerung transportbedingter Umweltwirkungen profitieren. Flächennutzungs- und Bebauungspläne für die relevanten Flächen sind in diesem Zusammenhang möglichst umgehend abzuändern bzw. neu zu erstellen.

8 Zusammenfassung der Arbeit und Beantwortung der Forschungsfrage

Auf Grundlage der Zielsetzung der Arbeit, Bereiche im Beschaffungsnetzwerk der deutschen Automobilindustrie zu identifizieren, deren Regionalisierung sowohl positive ökologische als auch positive betriebswirtschaftliche Wirkungen erzeugen, wurde ein systemdynamisches Gestaltungsmodell zur Simulation von drei verschiedenen Szenarien der Regionalisierung erstellt.

Als theoretische Grundlage wurde zunächst der systemische Charakter der Automobilindustrie als Voraussetzung für die Notwendigkeit des Einsatzes eines systemdynamischen Modells begründet. Die systemtheoretischen Ausführungen zeigten, dass sich alle Objekte durch Abgrenzung von der Umwelt als System definieren lassen. Demzufolge lässt sich auch die deutsche Automobilindustrie durch Abgrenzung von anderen Industriezweigen als System betrachten. Die deutsche Automobilindustrie beinhaltet eine Vielzahl von Wirkungszusammenhängen (Relationen) und Elemente. Durch die Identifikation unterschiedlicher Systemzwecke lassen sich innerhalb der Automobilindustrie Subsysteme abgrenzen, die wiederum durch Relationen miteinander verbunden sind. Die Größe der als Kombination von Elementen und Relationen definierten Systemstruktur macht das System kompliziert. Die komplizierte Struktur des Systems „Automobilindustrie“ beinhaltet neben linearen Zusammenhängen auch Zirkularitäten. Diese Rückkopplungen führen zu komplexem Systemverhalten.

Eine Regionalisierung der Zulieferstruktur verändert die Parameter innerhalb des Subsystems BESCHAFFUNG und beeinflusst so den Systemzustand. Zustandsänderungen in Systemen wirken sich auf das Systemverhalten aus. Um die Auswirkung einer Regionalisierung der Zulieferstruktur auf das komplexe Systemverhalten analysieren zu können, bedarf es des Einsatzes von Modellen. Einfache Erklärungsmodelle erfüllen durch ihren beschreibenden Charakter diese Bedingungen nicht hinreichend. Die Modellklasse der Gestaltungsmodelle erlaubt es hingegen, ein durch veränderte Systemzustände induziertes Systemverhalten zu simulieren.

Modelle bilden die Wirkungszusammenhänge des Realsystems in verkürzter Form ab. Die Wirkungsanalyse stellt nach Bossel (2004) eine Möglichkeit dar, um Systeme und die darin enthaltenen Wirkungszusammenhänge in Modelle zu überführen. In Abhängigkeit von der Zielsetzung dieser Arbeit wurde der Wirkungszusammenhang zwischen der Modularisierung der Produktion und der Transportlogistik als besonders bedeutend identifiziert. Die Aggregation der zu produzierenden standardisierten Module werden von den OEM seit einigen Jahren genutzt, um trotz steigender Variantenvielfalt Skalenerträge in Einkauf und Produktion zu erzielen. Die Anforderungen des Transports

von Modulen bezüglich der Transportsicherheit unterscheiden sich deutlich von denen von Komponenten, Einzelteilen und Rohstoffen. Die benötigten Spezialladungsträger für Module weisen geringere Zuladungskapazitäten sowie ein höheres Gewicht und Volumen im Vergleich zu Standardladungsträgern (Europalette, Euro-Gitterbox) auf. Damit sinkt bei Modulen die Zuladungskapazität der Transportgefäße bei gleichzeitig steigender Fahrleistungsintensität (Verhältnis zwischen Güterbeförderungsleistung und Fahrleistung der Nutzfahrzeuge). Die Fahr- und Güterbeförderungsleistung der eingesetzten Verkehrsmittel (Lkw, Seeschiff, Binnenschiff und Eisenbahn) wird neben der Fahrleistungsintensität durch die Länge der Transportentfernungen beeinflusst. Diese variieren sowohl zwischen als auch innerhalb der Zulieferstufen Tier-1 (Module) bis Tier-n (Rohstoffe).

Der Status Quo in der Automobilindustrie lässt keinen Trend zur Regionalisierung erkennen. Eine empirische Erhebung zur geografischen Verortung von Produktionsstandorten ergab, dass etwa 90 % der Tier-1-Zulieferer die Module in Deutschland produzieren. Die mittlere Entfernung zwischen OEM und Tier-1-Zulieferer fällt mit etwa 104 km im Vergleich zu den Zulieferstufen Tier-2 bis Tier-n mit durchschnittlich etwa 3.000 bis 4.000 km gering aus. Seit Anfang der 1990er Jahre lässt sich durch die Einrichtung von fünf Lieferantenparks (vgl. Schraft und Westkämper 2005) eine leichte Tendenz zur Regionalisierung von Tier-1-Zulieferern erkennen. Im Gegensatz dazu zeigen Wareneinfuhrstatistiken (UN-Comtrade), dass der Anteil der Warenwerte, der von ausländischen Produktionsstandorten geliefert wird, in den Zulieferstufen Tier-2 und Tier-3 seit Jahren ansteigt und mittlerweile bei (Stand 2014) über 50 % liegt.

Der Betrieb von Transportgefäßen aller Verkehrsträger impliziert ökologische Wirkungen: Die Verbrennungsprozesse in den Antriebsaggregaten erzeugen CO_2-Emissionen, welche den Treibhauseffekt verstärken. Laufen Verbrennungsprozesse unvollständig ab oder sind die Kraftstoffe verunreinigt, so entstehen Luftschadstoffe. Bei den Diesel-Motoren in Schiffen, Lkw und Lokomotiven sind dies im Besonderen Ruß und NO_x. Neben Luftschadstoffen und Treibhausgasemissionen schädigt der Betrieb von Nutzfahrzeugen die Straßeninfrastruktur. Zudem wird der Güterverkehr häufig als störende Lärmquelle wahrgenommen. Die Stärke der ökologischen Wirkung hängt vom eingesetzten Verkehrsmittel ab.

Transport führt neben Umweltnutzung und Ressourcenverbrauch zu Kosten. Die betriebswirtschaftlichen Wirkungen veränderter Transportentfernungen gehen über die reinen Transportkosten hinaus. Weitere Logistikkosten wie Lager- und Behälterkosten weisen ebenfalls eine Abhängigkeit von der Länge der Transportdistanz auf. Während diese Kosten bei ausreichender Information kalkulierbar sind, führen unvorhersehbare Störungen in der Lieferkette zu Supply-Chain-Risiken. Für industrielle Unternehmen

stellen Risiken in der Beschaffung und der damit verbundene Lieferverzug derzeit das größte Geschäftsrisiko dar. Die dadurch entstehenden Schadenskosten durch entgangene Deckungsbeiträge stehen Vermeidungskosten zur Verhinderung des Lieferverzugs gegenüber.

Die Ausführungen zu den ökologischen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen von Transporten legen die Hypothese nahe, dass sich durch eine Reduktion der Transportentfernungen sowohl ökologisch als auch betriebswirtschaftlich positive Effekte ergeben. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden drei Szenarien zur Regionalisierung der Zulieferstruktur definiert:

- Regionale Zulieferstrukturen durch Verlagerung der Tier-1-Zulieferer in lokale Zulieferparks (**R1**)
- Reduktion der Transportentfernungen innerhalb der Tier-2-Zulieferebene durch Verlagerung der außereuropäischen Produktion nach (Ost-) Europa (**R2**)
- Reduktion der Transportentfernungen innerhalb der Tier-3-Zulieferebene durch Verlagerung der außereuropäischen Produktion nach (Ost-) Europa (**R3**)

Szenario R1 unterstellt eine Standortverlagerung von Tier-1-Zulieferern, die bereits heute dezentral produzieren und deren Produktionsoutput eine Fahrleistungsintensität von 0,002 Fahrzeugkilometer pro Modul-Äquivalent-Kilometer aufweist in werksnahe Zulieferparks. In Szenario R2 und R3 wird die Hälfte der außereuropäischen Produktionsstätten nach Europa verlagert. Eine Verlagerung nach Deutschland würde zwar die Transportentfernungen weiter senken, die Lohnkostenvorteile der Produktion außerhalb Deutschlands als Motivation für die Produktionsverlagerung sprechen allerdings eher für eine Verlagerung ins europäische Ausland (vgl. Zanker et al. 2013, S. 9).

Bei der modellbasierten Simulation der Systemzustände aller drei Szenarien ergeben sich gegenüber dem Status-Quo (Basisszenario) im Jahr 2030 geringere CO_2-Emissionen. Bei einer Verlagerung der Produktionsstätten der Tier-3-Zulieferer sinken die jährlichen Emissionen um etwa 7 %. Zwischen den Ergebnissen für die Szenarien R1 und R2 ergeben sich keine Unterschiede: Die Regionalisierung in den Tier-1 und Tier-2-Zulieferstufen führt in beiden Fällen zu einer Reduktion der jährlichen CO_2-Emission im Jahr 2030 von jeweils etwa 12 %. Auch bei geringeren Effizienzgewinnen von Lkw ergeben sich in allen Szenarien niedrigere CO_2-Emissionen als im Basisszenario. Die Sensitivitätsanalysen zeigen somit die Unabhängigkeit der aus den Ergebnissen ableitbaren Aussagen von der Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs der Lkw. Die in Kapitel 1 aufgestellte Hypothese, dass die Verlagerung von Zulieferunternehmen in Zulieferparks sich in der gesamten Wertschöpfungskette transportreduzierend

auswirken und somit die transportbedingten Umweltwirkungen gesenkt werden, hat sich dadurch bestätigt.

Während in Szenario R1 neben den Treibhausgasemissionen auch alle weiteren Umweltwirkungen zurückgehen, steigen in den Szenarien R2 und R3 die Geräuschemissionen und die Belastung der Straßeninfrastruktur im Vergleich zum Basisszenario an. Dieser Anstieg lässt sich auf die Verlagerung zwischen den Verkehrsträgern zurückführen: Während in Szenario R1 die Fahrleistung im Straßengüterverkehr um etwa 27 % sinkt, führt die Verlagerung der Produktion nach Europa zu einem Anstieg von etwa 13 % (R2) bzw. 7 % (R3). Dies begründet sich durch eine veränderte Transportkette: Weltweit produzierte Güter werden zunächst mit dem Seeschiff und dann im Hafenhinterlandverkehr mit der Eisenbahn oder dem Binnenschiff sowie für die Feinverteilung mit dem Lkw transportiert. Werden diese Produktionsstandorte nach Europa verlagert, so ändert sich die Transportkette. Die innereuropäischen Entfernungen zwischen dezentralen Produktionsstandorten werden in der Regel mit dem Lkw zurückgelegt.

Die Verlagerung der Güterbeförderungsleistung von den Verkehrsmitteln Schiff und Eisenbahn auf den Lkw beeinflusst auch die betriebswirtschaftlichen Wirkungen. Während in Szenario R1 Transportkosteneinsparungen von etwa 22 % erwartet werden, steigen die Transportkosten in Szenario R2 um 8 %. Diese Steigerung fällt in Szenario R3 mit etwa 5 % knapp halb so hoch aus. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass auch bei einer Variation des Ölpreises zwischen 50 US-Dollar pro Barrel und 175 US-Dollar pro Barrel das Szenario R1 stets zu günstigeren Transportkosten als im Basisszenario führt. Zwar sinken in allen drei Szenarien durch verkürzte Umlaufzeiten die Behälterkosten, insgesamt ergeben sich jedoch für die Szenarien R2 und R3 keine geringeren Logistikkosten.

Der Lkw stellt bezogen auf die Tonnenkilometer das Verkehrsmittel mit den höchsten Unfallraten im Güterverkehr dar. Durch eine Verlagerung des Gütertransports auf den Lkw steigt demnach die Anzahl der Unfälle. Ein Unfall kann zum Totalverlust oder zur Beschädigung der Ladung führen und erhöht das Risiko eines Lieferverzuges. Die Vermeidungskosten durch Anpassung des Sicherheitsbestandes zur Kompensation von unfallbedingten Lieferausfällen können allerdings als marginal bezeichnet werden. Demgegenüber können die Schadenskosten durch eine Verringerung der Transportentfernungen deutlich reduziert werden. Nach Produktionsstörungen beim Zulieferer reduzieren regionale Zuliefernetzwerke im Fall von Szenario R1 die Zeit bis zur Wiederaufnahme der Produktion beim OEM im Median um etwa 5 Stunden. Je nach Produktionsoutput kann dies eine Verringerung des Schadensausmaßes pro Produktionsstörung um über 1 Million Euro bedeuten.

Bei der Beantwortung der Forschungsfrage nach der Vereinbarkeit von ökologischen und betriebswirtschaftlichen Zielsetzungen bei einer Regionalisierung der Zulieferstruktur zeigt sich ein differenziertes Bild: Während die Standortverlagerungen in Lieferantenparks in Szenario R1 sowohl zu einer Reduktion der Umweltnutzung und des Ressourcenverbrauchs als auch zu positiven betriebswirtschaftlichen Effekten führt, lassen sich durch eine Verlagerung außereuropäischer Produktionsstätten nach Europa zwar Luftschadstoffe und CO_2-Emissionen reduzieren, aber die Kosten steigen.

Szenario R1 ist das einzige Szenario, das die Vereinbarkeit von ökologischen und ökonomischen Zielen ermöglicht, daher wird diesem Szenario die höchste Umsetzungswahrscheinlichkeit verortet. In den Szenarien R2 und R3 entstehen zwar positive ökologische Effekte, die Verlagerung der außereuropäischen Produktion nach (Ost-) Europa erhöht jedoch die Logistikkosten aufgrund der Verlagerung der Transporte vom Binnenschiff und der Eisenbahn auf den Lkw. Somit führt die Umsetzung einer Regionalisierung analog zu den Szenarien R2 und R3 aus gesellschaftlicher Sicht zu positiven Effekten, die betriebswirtschaftlichen Anreize für die Unternehmen sind dagegen nicht gegeben.

Voraussetzungen für eine Regionalisierung in der ersten Zulieferstufe (R1) sind, dass einerseits die Unternehmen als wichtigste Akteursgruppe die Bildung und den Ausbau von Lieferantenparks in ihrer Beschaffungsstrategie forcieren und Beschaffungsverträge an Standortvorgaben knüpfen. Von Seiten der öffentlichen Akteure (Kreise und Gemeinden) müssen andererseits raumordnungspolitische Voraussetzungen durch Anpassungen von Raumordnungsplänen in naher Zukunft geschaffen werden.

9 Zukünftige Entwicklungen in der Automobilindustrie und weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit quantifiziert die wesentlichen ökologischen und betriebswirtschaftlichen Effekte einer Regionalisierung der Zulieferstrukturen in der Automobilindustrie. Der zukünftige Forschungsbedarf leitet sich einerseits aus den Entwicklungen in der Automobilindustrie über die zeitliche Abgrenzung der Betrachtung im Jahr 2030 hinaus ab. Andererseits ergeben sich aus der Abgrenzung und Detailtiefe des in dieser Arbeit betrachteten Systems Fragen, die über die räumlichen und sachlichen Systemgrenzen hinausgehen.

9.1 Veränderungen in der Automobilindustrie ab dem Jahr 2025

Das in dieser Arbeit betrachtete System ist zeitlich bis zum Jahr 2030 begrenzt. Derzeit lassen sich im Kontext der Zielsetzung dieser Arbeit zwei Entwicklungen identifizieren, die das System „Automobilindustrie“ in den nächsten Jahrzehnten verändern könnten. Dazu zählen die steigende Nachfrage nach alternativ angetriebenen Pkw sowie die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung der Produktion. Beide Entwicklungen könnten nach derzeitigem Stand der Forschung (vgl. Peters et al. 2013, S. 78ff. und Hagl 2015, S. 7ff.) im Zeitraum zwischen den Jahren 2025 und 2030 die Produktion und Beschaffung in der Automobilindustrie in einem Umfang beeinflussen, der eine Überprüfung der Gültigkeit der Ergebnisse dieser Arbeit notwendig macht.

9.1.1 Einfluss einer wachsenden Nachfrage nach alternativen Antriebskonzepten auf die Beschaffungsstrukturen

Carl Benz legte im Jahr 1886 mit der Anmeldung des Patentes für ein „Fahrzeug mit Gasmotorenbetrieb“ (vgl. Lang 2011, S. 8) die Grundlage für die Automobilproduktion. Bis zum heutigen Zeitpunkt hat sich der Antrieb des Automobils nicht grundlegend geändert. Über 95 % der neu zugelassenen Fahrzeuge werden durch einen konventionellen Verbrennungsmotor angetrieben (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2015d). Bei sinkenden gesetzlich geregelten Emissionsgrenzwerten für neu zugelassene Pkw könnte sich der Druck auf die OEM erhöhen, alternative Antriebstechnologie mit geringeren Emissionen zu entwickeln und zu produzieren (vgl. Schramm und Koppers 2014, S. 17ff.). Neben legislativen Rahmenbedingungen zeichnet sich besonders bei gut gebildeten Autokäufern mittleren Alters ein wachsender Einfluss von Umweltfreundlichkeit auf die Kaufentscheidung ab (vgl. Peters et al. 2013, S. 222ff.).

Gesetzliche Rahmenbedingungen und ein verändertes Kaufverhalten können zukünftig die Nachfrage nach alternativ angetriebenen Pkw erhöhen. Selbst unter optimistischen Annahmen, wie einem hohen Ölpreis und sinkenden Kaufpreisen für alternativ angetriebene Pkw, werden vorrausichtlich bis zum Jahr 2020 jährlich in Deutschland nur etwa 200.000 elektrisch betriebene Pkw verkauft (vgl. Gnann et al. 2015, S. 102). Dies entspricht einem Anteil an den Neuzulassungen von deutlich unter 10 %. Das größte Hemmnis für die Diffusion alternativer Antrieb sind die Mehrkosten beim Kauf im Vergleich zu konventionell angetriebenen Pkw (vgl. Peters et al. 2013, S. 202f.). Sinkende Kosten für Batterien und eine wachsende Mehrpreisbereitschaft der Käufer für umweltfreundliche Technologien (vgl. Gnann et al. 2015, S. 103ff.) könnten ab dem Jahr 2025 die Diffusion von alternativen Antrieben in Deutschland deutlich beschleunigen (vgl. Peters et al. 2013, S. 78). Auch weltweit betrachtet ergibt sich bis auf wenige Ausnahmen wie beispielsweise Kalifornien oder Norwegen ein ähnlicher zeitlicher Pfad (vgl. Schade et al. 2014, S. 175ff.).

Die Produktion alternativ angetriebener Pkw verändert die Anforderungen an den Fahrzeugbau. Die Definition der Szenarien sowie die Simulation der Systemzustände und damit sämtliche Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf der derzeitigen Modulstruktur im Fahrzeugbau (vgl. Wyman 2012, S. 47). Veränderte Antriebstechnologien können zukünftig zu Anpassungen dieser Modulstruktur führen. Ein Beispiel dafür stellt die Produktion von batterieelektrischen Fahrzeugen dar. Die Produktion dieser Fahrzeuge zeichnet sich durch den veränderten Einsatz von Modulen aus. Die Verbrennungskraftmaschine wird durch einen Elektromotor ersetzt (vgl. Wyman 2012, S. 23), welcher nicht mehr zwangsweise zentral verbaut sein muss, sondern dezentral in Form von mehreren Radnabenmotoren in die Karosseriestruktur integriert werden kann. Darüber hinaus wird das Kraftstoffsystem durch eine Traktionsbatterie ersetzt und ein einfacheres zweistufiges Getriebe verwendet (vgl. Wallentowitz et al. 2010, S. 138f.). Eine neue Anordnung der Elektromotoren erlaubt auch Anpassungen des Fahrzeugdesigns bis hin zu völligen Neukonstruktionen (vgl. Dirschmid 2014, S. 218ff.). Der Automobilhersteller BMW stellte mit Einführung der Elektromobilität zudem eine neue Karosseriestruktur in Serienfertigung vor: Das üblicherweise verwendete Stahlblech wurde durch kohlenstoffverstärkten Kunststoff (CFK) ersetzt (vgl. Dirschmid 2014, S. 218). Die Anpassung oder völlige Neukonstruktion einzelner Module beeinflusst die Beschaffungsstrategie: Neue Zulieferer können in den Markt eintreten. Der Anteil der Eigenleistung der OEM an den Modulen kann sich vergrößern oder verkleinern. Beispielsweise könnten die zentral durch den OEM produzierten Motoren zukünftig dezentral durch Zulieferer gefertigt werden. In diesem Fall würden zwar die Transportentfernungen verkürzt, aber durch die dezentrale Fertigung die Transporte auf die Straße verlagert. Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Effekten auf die Logistik wird

eine verstärkte Produktion von Elektrofahrzeugen zu Umbrüchen in der Lieferkette führen. Entscheidend dafür sind die eingesetzten Komponenten und Module, deren Packdichten sowie die damit verbundenen Beschaffungsstrategien. Bei geringem Grad der Fremdvergabe besteht die Möglichkeit zur Senkung der Güterbeförderungsleistung. Da aber eher davon auszugehen ist, dass der Anteil der fremdvergebenen Produktionsleistungen über dem der konventionellen Module liegt (vgl. Wyman 2012, S. 45), scheint ein Anstieg der Güterbeförderungsleistung derzeit wahrscheinlicher. Die verstärkte Produktion von Elektrofahrzeugen bietet folglich Chancen zur Neuorganisation der Zulieferstruktur. Ob diese Umstrukturierungen zu regionaleren Produktionsnetzwerken führen, ist derzeit schwer abschätzbar und hängt auch in erheblichem Umfang von den Produktions- und Beschaffungsstrategien der OEM ab.

Die Gestaltungsmöglichkeiten für die Akteure ergeben sich aus der Beeinflussung der Standorte neuer Zulieferer und der Batterie- und Motorenproduktion der OEM. Im Falle des Neuaufbaus von Produktionsstandorten können ökologische und betriebswirtschaftliche Ziele verfolgt werden, um die Transportentfernungen zu verkürzen. Dies erfordert bereits im frühen Stadium der Produktionsplanung ein ganzheitliches Monitoring aller relevanten Kosten und Umweltwirkungen.

9.1.2 Veränderung der Standortwahl durch Digitalisierung und Automatisierung der Produktion (Industrie 4.0)

Neben der Beeinflussung der Modulstrukturen im Pkw-Bau könnten weitere technologische Entwicklungen die Produktion und Beschaffungslogistik in der Automobilindustrie verändern. Der Begriff „Industrie 4.0“ entstand im Zuge eines Forschungsprojektes innerhalb der Hightech-Strategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2015) und umfasst die Digitalisierung und Automatisierung der Produktion (Bauernhansl 2014, S. 33). Dieser Entwicklungsschritt der Industrie beinhaltet u. a. die vernetzte Nutzung der 3D-Drucktechnologie und der Robotik zur vollautomatisierten Produktion (vgl. Kleinemeier 2014, S. 576 und Steegmüller 2014, S. 103). Beide Technologien werden aller Wahrscheinlichkeit nach das Beschaffungsnetzwerk zukünftig deutlich verändern.

Das computerbasierte automatisierte Reproduzieren von Teilen und Komponenten mit 3D-Druckern erlaubt eine dezentrale Produktion mit geringen Fixkosten und demzufolge das Erreichen von Skalenerträgen schon bei geringeren Mengen. Ursprünglich wurde die dreidimensionale Drucktechnik für das Rapid Prototyping entwickelt (vgl. Hagl 2015, S. 8). Wie der Name schon sagt, konnten durch den Einsatz dieser Technologie schnell Vorab- oder Versuchsmodelle produziert und angepasst werden. Während derzeit (Stand 2015) die automatisierte Produktion von Teilen durch 3D-Drucker

durch die Möglichkeit, nur ein Material ausdrucken zu können, limitiert ist, könnten Druckköpfe, die sich derzeit in Entwicklung befinden, in den nächsten fünf Jahren sowohl organische als auch anorganische Bau-Materialien wie Keramik, Metalle und Kunststoffe gleichzeitig ausdrucken (vgl. Fastermann 2014, S. 119). Sollten sich diese Entwicklungen als tauglich für den Massenmarkt herausstellen, würde sich das Spektrum der Produktion von Einzelteilen über Komponenten auf Module ausweiten. Während die dreidimensionale Drucktechnologie derzeit lediglich im Motorrennsport eingesetzt wird (vgl. Hagl 2015, S. 46), könnte diese Erweiterung des Einsatzgebietes die Beschaffungslogistik der gesamten Automobilindustrie verändern.

Die Entwicklung der Druckgeräte ermöglicht einen dezentralen Einsatz am oder in unmittelbarer Nähe zum Verwendungsort der Teile und ersetzt damit den physischen Transport zwischen zwei Standorten (vgl. Petschow et al. 2014, S. 24). Aus heutiger Sicht (Stand 2015) würde durch den Einsatz von 3D-Druckern zunächst die Güterbeförderungsleistung in den Zulieferstufen Tier-3 zurückgehen. Die Produktion der Module (Tier-1) und Komponenten (Tier-2) erfordert aufgrund der vielschichtigen Materialverwendung den Einsatz von spezialisierten Druckköpfen. Damit ist zunächst nicht mit einer komplett automatisierten Produktion in den Tier-1 und Tier-2-Zulieferstufen zu rechnen. Die Tier-n-Zulieferstufe könnte durch diese Entwicklungen die direkten Lieferbeziehungen zu den OEM ausbauen, indem sie die Rohstoffversorgung der dreidimensionalen Drucksysteme verantwortet.

Da der 3D-Druck bei der Verwendung unterschiedlicher Materialien und der Produktion von komplexen Bauteilen an seine Grenzen stößt, könnte zukünftig ergänzend zu dieser Technologie bei Modulen und Komponenten die roboterbasierte Produktion zum Einsatz kommen. Der Einsatz von Robotern war in der Produktion bisher jedoch unflexiblen Prozessen vorbehalten. Dort ließen sich durch standardisierte Prozesse eine hohe Produktivität erreichen (vgl. Steegmüller 2014, S. 110). Mit steigender Variantenbildung der Module und Komponenten wachsen die Anforderungen an die Flexibilität der Produktion. Im Zuge der Automatisierung und Digitalisierung der Produktion werden derzeit Fertigungsroboter entwickelt, die in der Lage sind, sensitiv auf Kräfte, die in Interaktion mit Menschen oder beim Einbau von Bauteilen entstehen, zu reagieren (Steegmüller 2014, S. 111ff.). Roboter werden vermutlich zukünftig vermehrt den Arbeitsplatz mit Menschen teilen. Die durch sensitive Robotik verbesserte „Mensch-Maschine-Interaktion“ (Naumann et al. 2014, S. 509) erlaubt auch die Automatisierung der Produktion von komplexen Modulen und Komponenten (vgl. Naumann et al. 2014, S. 520ff.).

Mit wachsender Automatisierung der Produktion sinkt der Anteil der Lohnkosten an den Gesamtkosten. Produktionsstraßen, die heute durch eine hohe Anzahl an Varianten

und der damit verbundenen Flexibilität der Produktion personalintensiv sind, könnten durch die Automatisierung zukünftig nahezu ohne Personal auskommen. Niedrigere Lohnkosten waren in der Vergangenheit die Hauptgründe für eine Verlagerung der Produktion ins Ausland (vgl. Zanker et al. 2013, S. 9). Sinkt der Personalaufwand in der Produktion, könnten zukünftig Standortentscheidungen vermehrt zugunsten Deutschlands gefällt werden. Bei der in den Regionalisierungsszenarien R2 und R3 betrachteten Verlagerung der Produktion nach (Ost-) Europa wäre dann eine Verlagerung nach Deutschland denkbar. Da bei der Rückverlagerung der Produktion nach Deutschland von Unternehmen die Qualität und Flexibilität der Produktion und die Transportkosten als Haupttreiber genannt werden (vgl. Zanker et al. 2013, S. 10 – dargestellt in Anhang A4), ist anzunehmen, dass mit wachsender Automatisierung der Produktion den Transportkosten bei der Standortwahl zukünftig ein höheres Gewicht beigemessen wird. Die Entwicklungen hin zur Industrie 4.0 könnten damit zukünftig durch den Einsatz von Automatisierung und 3D-Druck die Beschaffungsstrukturen verändern und zu regionaleren Zulieferbeziehungen führen.

9.2 Weiterer Forschungsbedarf

Der weitere Forschungsbedarf leitet sich von den Grenzen des Betrachtungsraums, der Detaillierung der Systemanalyse und den zukünftigen Entwicklungen im System „Automobilindustrie“ ab. Technologische Entwicklungen rund um das Thema „Industrie 4.0“ führen dazu, dass die Gültigkeit der Ergebnisse nach dem Jahr 2030 zu prüfen ist. Die Detaillierung der Betrachtung kann durch eine Analyse der Standort- und Verkehrsmittelwahl weiter vertieft werden. Die globale Wirkungsdimension der CO_2-Emissionen legt eine Erweiterung der räumlichen Systemgrenzen nahe, um auch Effekte durch eine Regionalisierung von Zulieferstrukturen an außerdeutschen Produktionsstandorten abschätzen zu können. Sachlich lässt sich die Betrachtung auf andere Industriezweige erweitern. Neben der Übertragbarkeit der Ergebnisse sind bei der Lebensmittelerzeugung auch nicht-transportbedingte ökologische Effekte, wie beispielsweise die temperierte Lagerung, zur berücksichtigen.

Der weitere Forschungsbedarf ergibt sich einerseits aus den beschriebenen zukünftigen Entwicklungen im System „Automobilindustrie“ und andererseits aus den durch die Abgrenzung des Systems nicht betrachteten Fragestellungen im Zusammenhang mit einer Regionalisierung der Beschaffung.

9.2.1 Durch Veränderungen in der Automobilindustrie implizierter Forschungsbedarf

Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf einem Beschaffungsnetzwerk, dessen Dynamik sich durch eine Veränderung der Transportentfernungen (Regionalisierung) ergibt. Die in Kapitel 9.1 beschriebenen technologischen Entwicklungen sind bei der Betrachtung nicht berücksichtigt. Sowohl die gesteigerte Produktion von alternativen Antrieben als auch die automatisierte Produktion verändern den Systemzustand und damit das Systemverhalten. Es stellt sich daher die Frage, ob die Gültigkeit der Ergebnisse durch diese Veränderungen im System erhalten bleibt. Besonders die Szenarien R2 und R3, die bis dato zu keinen positiven betriebswirtschaftlichen Effekten führen, könnten durch die Veränderungen im System für die Unternehmen geringere Kosten zur Folge haben.

Die Auswirkungen dieser technologischen Entwicklungen auf die Produktion und die Beschaffung werden wohl erst gegen Ende des Betrachtungszeitraums in relevantem Maße auftreten. Um die Effekte dieser Veränderungen zu untersuchen, wäre demnach eine Verschiebung der zeitlichen Systemgrenze auf einen Zeitpunkt nach dem Jahr 2030 notwendig. Um valide Ergebnisse zu erzeugen, muss mit der Erweiterung der zeitlichen Systemgrenze die Struktur des Systems auf Beständigkeit nach dem Jahr 2030 geprüft werden. Damit ergibt sich jedoch eine Vielzahl weiterer Forschungsfragen, die u. a. die Diffusion alternativer Antriebe bei Nutzfahrzeugen, wie beispielsweise dem „Oberleitungs-Lkw“ (vgl. Siemens AG 2015) oder autonom fahrende Nutzfahrzeuge (vgl. Flämig 2015a, S. 393ff.), und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Emissionen und Transportkosten betreffen.

9.2.2 Weitere Detaillierung der Systemanalyse

Die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse des Systems „Automobilindustrie“ weist einen Detaillierungsgrad auf, der sich aus der Zielsetzung der Arbeit und der Datenverfügbarkeit ergibt. Der weitere Forschungsbedarf besteht in einer Ausweitung und Validierung der empirischen Datengrundlage zur Beschreibung des Beschaffungsnetzwerkes sowie einer detaillierten Analyse und Identifikation von Einflussfaktoren zur Standortwahl in der Automobilindustrie.

Die Unsicherheiten bei der empirischen Datenerhebung zu den geografischen Standortinformationen durch den in Kapitel 5.1.3 vorgestellten Algorithmus und auf Grundlage der UN-Comtrade beziehen sich auf alle Zulieferstufen. Die Arbeit weist unvermeidbare Unschärfen bei der Erhebung der Produktionsstandorte von Tier-1-Zulieferern im Status-Quo des Beschaffungsnetzwerkes auf. Letztendlich lassen sich

die Zulieferbeziehungen der produzierenden Unternehmen nur vollständig erfassen, wenn unternehmensinterne Informationen des Einkaufs vorliegen. Ebenso lagen beim Verfassen dieser Arbeit keine Informationen zu den Zulieferverflechtungen von Produktionsstandorten außerhalb Deutschlands vor. Ob diese Unsicherheiten zu einem Über- oder Unterschätzen der Ergebnisse für die Szenarien R1 bis R3 führt, kann mit dem derzeitigen Informationsstand nicht beantwortet werden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Analyse der Einflussfaktoren auf die Standortwahl der Zulieferer. Im Falle der Standortverlegung in einen Zulieferpark in Szenario R1 wurde die Standortfestlegung im Zuge der Auftragsvergabe durch den OEM als Maßnahme zur Beeinflussung der Standortwahl beschrieben. Im Gegensatz dazu besteht in den Szenarien R2 und R3 weder ein ökonomischer Anreiz, noch lässt sich durch die heute vorherrschenden kurzen Vertragslaufzeiten die Standortwahl beeinflussen. Es stellt sich also die Frage, ob es für Automobilzulieferunternehmen weitere Einflussfaktoren gibt, welche eine regionale Standortwahl positiv beeinflussen können. Neben dem bereits thematisierten Einfluss von Personalkosten beziehen Zulieferunternehmen auch die Qualität der Produkte und die Flexibilität der Produktion und Auslieferung in Standortentscheidungen mit ein (vgl. Kinkel et al. 2004, S. 27). Interessante Fragen an Forschung und Wissenschaft könnten daher sein, ob neben den Transportkosten und den CO_2-Emissionen die Flexibilität und Qualität der Produkte weitere Treiber für regionale Zuliefernetzwerke darstellen können.

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Umweltnutzung der Verkehrsträger Bahn, Straße und Schiff untersucht. Die drei Verkehrsmittel unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Emissionen und Kosten. Der Ansatz der Verkehrsträgeraffinitäten bietet eine Grundlage, um regionale Zulieferstrukturen auf Potentiale hinsichtlich eines Verkehrsträgerwechsels zu untersuchen. Lieferantenparks können Impulse zur Bündelung der Transporte im Quell- und Zielverkehr geben. Des Weiteren kann die Einrichtung regionaler Lieferantenparks Optionen bieten, die Wahl der Verkehrsmittel regulatorisch zu beeinflussen. Im Zuge weiterer Forschung wäre beispielsweise zu prüfen, ob analog zu den in den Landesbauordnungen verankerten Vorgaben zur Anzahl von Pkw-Stellplätzen bei Neubauten (z. B. § 37 Landesbauordnung Baden-Württemberg) auch Gleisanschlüsse verbindlich vorgeschrieben werden könnten.

Veränderte Verkehrsträgeraffinitäten bei regionalisierten Zuliefernetzwerken können die Ergebnisse für die Szenarien R1, R2 und R3 beeinflussen. Die identifizierten ökologischen und betriebswirtschaftlichen Effekte können sich durch eine veränderte Verkehrsmittelwahl verstärken oder abschwächen. Daher wäre die Belastbarkeit der in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse zu überprüfen und deren Bezug zur Realität zu testen.

9.2.3 Forschungsbedarf außerhalb der räumlichen Systemgrenzen

Der Betrachtungsraum des Beschaffungsnetzwerkes endet in dieser Arbeit bei der ersten Produktionsstätte außerhalb der deutschen Grenzen. Lieferbeziehungen zwischen Zulieferern in der vorgelagerten Wertschöpfungskette werden nicht berücksichtigt. Die globale Dimension der CO_2-Emissionen erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der Lieferkette. Zudem entstehen auch im Ausland Transportkosten, welche in die Produktionskosten eingepreist werden und damit für den OEM relevant sind.

Um außerdeutsche Lieferbeziehungen berücksichtigen zu können, sind detaillierte Informationen zur geografischen Verortung von ausländischen Zulieferstandorten notwendig. Erste Ansätze zur Bestimmung von Produktionsstandorten außerhalb Deutschlands könnten auf regional und sektoral disaggregierte wirtschaftliche Daten, wie Bruttoinlandsprodukt oder Beschäftigung, zurückgreifen.

Bei einer geeigneten disaggregierten Datengrundlage ergibt sich der über den Umfang dieser Arbeit hinausgehende Forschungsbedarf darin, zu untersuchen, ob Zulieferparks für Lieferanten im Ausland auch zu signifikanten ökologischen und betriebswirtschaftlichen Effekten führen. Dabei wäre auch zu prüfen, ob es Konstellationen aus einer innerdeutschen Regionalisierung und einer Regionalisierung an ausländischen Produktionsstandorten gibt, welche die ökologischen und betriebswirtschaftlichen Effekte minimiert. Dies entspricht der Lösung eines Optimierungsproblems über die gesamte Zulieferkette.

9.2.4 Forschungsbedarf außerhalb der sachlichen Systemgrenzen

Abschließend ergibt sich auch aus der gewählten sachlichen Systemabgrenzung weiterer Forschungsbedarf. In dieser Arbeit wird die Automobilindustrie betrachtet. Diese umfasst die in Deutschland produzierenden OEM und die dazugehörigen Zulieferunternehmen. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass eine Regionalisierung der automobilen Zulieferstruktur zu positiven ökologischen und betriebswirtschaftlichen Effekten führen kann. Im Anschluss an diese Forschungsergebnisse stellt sich nun die Frage, ob diese Ergebnisse auf andere Wirtschaftszweige übertragbar sind.

Die Treiber für eine Regionalisierung können in unterschiedlichen Wirtschaftszweigen stark differieren. Es ist dabei zu unterscheiden, ob der Handlungsdruck durch Kostensenkungspotentiale bei den Produzenten oder durch Wünsche der Kunden nach regional produzierten Produkten entsteht (vgl. Ermann 2005, S. 16ff.). Wirtschaftszwei-

ge wie die Elektrotechnik oder der Maschinenbau weisen wie sämtliche Industrieunternehmen ähnliche Beschaffungsstrategien wie die Automobilindustrie auf (vgl. Bretzke und Barkawi 2012, S. 238ff.). Im Gegensatz dazu kann die Beschaffungsstrategie auch durch Kundenwünsche bestimmt werden. Der Wunsch der Kunden nach Regionalität ist in der Lebensmittelbranche besonders ausgeprägt: Bei Befragungen der Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) zum Konsumverhalten gaben in den Jahren 2011 bis 2013 etwa die Hälfte aller Befragten an, bereit zu sein, mehr Geld für regional produzierte Lebensmittel auszugeben (vgl. Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) 2014, S. 1). Da in der Lebensmittelerzeugung - im Gegensatz zur Automobilindustrie - Regionalität immer mit Saisonalität verbunden ist, müssen regionale landwirtschaftliche Erzeugnisse energieaufwändig gelagert werden, um zu jeder Jahreszeit ein ausreichendes Angebot an Produkten anbieten zu können (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2015c). Die dadurch entstehenden ökologischen Wirkungen sind in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Neben der Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit auf den Maschinenbau und die Elektrotechnik ist in Wirtschaftszweigen, in denen Kundenwünsche die Treiber zur Regionalisierung sind, wissenschaftlich zu prüfen, ob es sich dabei lediglich um eine „Romantisierung vorindustrieller Wirtschaftsweisen“ (Ermann 2005, S. 286) oder tatsächlich um eine Strategie für eine nachhaltige Wirtschaftsweise handelt.

Literaturverzeichnis

Aberle, G. (2000): Transportwirtschaft. Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen. 3. Auflage. München u. a.: Oldenbourg.

Absatzwirtschaft (2013): Was die Autobauer pro Fahrzeug verdienen. Online verfügbar unter http://www.absatzwirtschaft.de/was-die-autobauer-pro-fahrzeug-verdienen-16427/, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Adam, D. (1993): Planung und Entscheidung. Modelle - Ziele - Methoden. 3. Auflage. Wiesbaden: Gabler.

Adam Opel AG (2015): Facts & Figures. Year in Review 2014. Online verfügbar unter http://www.opel.com/content/dam/Opel/Europe/master/hq/en/15_ExperienceSection/02_AboutOpel/company/facts_figures/Opel_Facts_and_Figures_2014_EN.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Alfke, G.; Rion, W.W.; Neuwirth, O.S. (2008): Oil Refining. In: Elvers, B. (Hrsg.): Handbook of Fuels. Energy Sources for Transportation. Weinheim: Wiley-VCH, S. 17–95.

Allianz (2014): Allianz-Risk-Barometer-2014. In: Allianz (Hrsg.): Allianz Risk Pulse, 01/2014. München: Allianz.

Andersen, Z.J.; Raaschou-Nielsen, O.; Ketzel, M.; Jensen, S.S.; Hvidberg, M.; Loft, S. et al. (2012): Diabetes Incidence and Long-Term Exposure to Air Pollution: A Cohort Study. In: *Diabetes Care,* 35. Jg. 2012, Nr. 1, S. 92–98.

Arnold, D.; Furmans, K. (2007): Materialfluss in Logistiksystemen. 5. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (2008): Handbuch Logistik. Berlin u. a.: Springer.

Arnold, M.; Kluth, T.; Ziegler, H.; Thomas, B. (2013): Bemessungsverkehrsstärken auf einbahnigen Landstraßen. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verl. für neue Wiss.

AUDI AG (2014): Umwelterklärung 2013. Ingoldstadt: AUDI AG.

AUDI AG (2015): Geschäftsbericht 2014. Ingoldstadt: AUDI AG.

Automobilproduktion (2014): Top 100 Automotive Suppliers. Global Ranking. Landsberg: Verlag moderne Industrie.

Automotive News (2008): Who Suplies Whom in Europe. 2008 Guide to Purchasing. Online verfügbar unter http://www.autonews.com/assets/PDF/CA41440317.PDF, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Baetge, J. (1974): Betriebswirtschaftliche Systemtheorie. Regelungstheoretische Planungs-Überwachungsmodelle für Produktion, Lagerung und Absatz. Opladen: Westdeutscher Verlag.

Balduzzi, F. (1962): Der AASHO-Straßentest. Dokumente und Auswertung. Düsseldorf: Beton-Verlag.

Bank, M. (2000): Basiswissen Umwelttechnik. Wasser, Luft, Abfall, Lärm und Umweltrecht. 4. Auflage. Würzburg: Vogel.

BAST (2014): Baustelleninformationssystem des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter http://www.bast.de/DE/FB-F/Baustelleninformation/baustelleninformation.html, zuletzt geprüft am 18.06.2014.

Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T., Hompel, M. ten und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 5–36.

Becker, H. (2007): Auf Crashkurs. Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb. 2. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Becker, H.-H.; Gebauer-Teichmann, A. (2012): Stand und Trends in der Leichtmetall-Gießereitechnik unter Aspekten der Automobilindustrie. In: Rudow, B. und Neubauer, W. (Hrsg.): Trends in der Automobilindustrie. Entwicklungstendenzen, Betriebsratsarbeit, Steuer- und Fördertechnik, Gießereitechnik, Informationstechnologie und -systeme. München: Oldenbourg, S. 59–84.

Beedgen, R. (1993): "Elemente" der Informatik. Ausgewählte mathematische Grundlagen für Mathematiker und Wirtschaftsinformatiker. Braunschweig u. a.: Vieweg.

Bertalanffy, L. v. (1968): General system theory. Foundations, development, applications. New York: Braziller.

Bickel, P. (2005): Externe Grenzkosten verkehrsbedingter Umwelt- und Gesundheitsrisiken. Eine orts- und situationsabhängige Analyse auf Basis des Wirkungspfadansatzes. Baden-Baden: Nomos.

Blackhurst, J.V.; Scheibe, K.P.; Johnson, D.J. (2008): Supplier risk assessment and monitoring for the automotive industry. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management,* 38. Jg. 2008, Nr. 2, S. 143–165.

BMW AG (2014): Umwelterklärung 2013/2014. BMW Standort München. Werk 01.10, Werk 01.30. München: BMW AG.

BMW AG (2015a): BMW-Werk Dingolfing. Werk in Zahlen. Online verfügbar unter http://www.bmw-werk-dingolfing.de/dingolfing/htdocs/lowband/com/de/index.html, zuletzt geprüft am 16.01.2015.

BMW AG (2015b): BMW-Werk Leipzig. Kennzahlen im Überblick. Online verfügbar unter http://www.bmw-werk-leipzig.de/leipzig/deutsch/lowband/com/de/index.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

BMW AG (2015c): BMW-Werk München. Werk in Zahlen. Online verfügbar unter http://www.bmw-werk-muenchen.de/lowband/com/de/index.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

BMW AG (2015d): BMW-Werk Regensburg. Werk in Zahlen. Online verfügbar unter http://www.bmw-werk-regensburg.de/lowband/com/de/index.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

BMW AG (2015e): Geschäftsbericht 2014. München: BMW AG.

Bossel, H. (1992a): Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme; ein Lehr- und Arbeitsbuch mit Simulations-Software. Braunschweig u. a.: Vieweg.

Bossel, H. (1992b): Simulation dynamischer Systeme. Grundwissen, Methoden, Programme. 2. Auflage. Braunschweig u. a.: Vieweg.

Bossel, H. (2004): Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand.

Braess, H.-H.; Seiffert, U. (2011): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Brähler, H. (2013): Konzeption von Nutzfahrzeugen. In: Appel, W.; Brähler, H.; Breuer, S.; Dahlhaus, U.; Esch, T.; Hoepke, E. et al. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 119–190.

Bratzel, S.; Retterath, G.; Hauke, N. (2015): Automobilzulieferer in Bewegung. Strategische Herausforderungen für mittelständische Unternehmen in einem turbulenten Umfeld. Baden-Baden: Nomos.

Braun, D. (2012): Von welchen Supply-Chain-Management-Maßnahmen profitieren Automobilzulieferer? Eine wertorientierte Analyse an der Schnittstelle zwischen Zulieferer und Automobilhersteller. Wiesbaden: Gabler.

Braun, H. (1984): Risikomanagement. Eine spezifische Controllingaufgabe. Darmstadt: Toeche-Mittler.

Bretzke, W.-R. (2010): Logistische Netzwerke. 2. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Bretzke, W.-R.; Barkawi, K. (2012): Nachhaltige Logistik. Antworten auf eine globale Herausforderung. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.

Breuer, S.; Kopp, S. (2013): Fahrmechanik. In: Appel, W.; Brähler, H.; Breuer, S.; Dahlhaus, U.; Esch, T.; Hoepke, E. et al. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 37–118.

Bücher, K. (1898): Die Entstehung der Volkswirtschaft. Vorträge und Versuche. 2. Auflage. Tübingen: Laupp.

Bühler, G. (2006): Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr. Eine Analyse ordnungs- und preispolitischer Maßnahmen. Heidelberg: Physica.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2015): Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html, zuletzt geprüft am 21.12.2015.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015): Nationale Klimapolitik. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/, zuletzt geprüft am 21.10.2015.

Butz, M.C. (2005): Risikomanagement-Möglichkeiten in der Gefahrlogistik. In: *Internationales Verkehrswesen,* 59. Jg. 2005, Nr. 9, S. 398–402.

Cap, C. H. (1993): Theoretische Grundlagen der Informatik. Wien, New York: Springer.

CE Delft; Infras; Fraunhofer ISI (2011): External Costs of Transport in Europe. Update Study for 2008. Delft: CE Delft.

Clausen, U.; Iddink, U.; Neumann, L. (2007): Klassifikation von Logistiksystemen als Element der Wirtschaftsverkehrsmodellierung. In: Clausen, U. (Hrsg.): Wirtschafts-

verkehr 2007. Modelle - Strukturen - Umsetzung. Dortmund: Verlag Praxiswissen, S. 9–24.

CME Group (2014): Energy Products. Online verfügbar unter http://www.cmegroup.com/trading/energy/, zuletzt geprüft am 29.12.2015.

Dahme, C. (2015): Systemanalyse menschlichen Handelns. Grundlagen und Ansätze zur Modellbildung. 2. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Daimler AG (2013): Aktualisierte Umwelterklärung 2013. Standort Sindelfingen. Sindelfingen: Daimler AG.

Daimler AG (2015a): Geschäftsbericht 2014. Stuttgart: Daimler AG.

Daimler AG (2015b): Mercedes Benz Lkw. Lkw Komplettlösungen. Online verfügbar unter http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/trucks_.flash.skipintro.html, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

Daimler AG (2015c): Standorte Mercedes-Benz Cars. Online verfügbar unter http://www.daimler.com/unternehmen/geschaeftsfelder/mercedes-benz-cars/standorte, zuletzt geprüft am 16.01.2015.

Destatis (2014): Güterbeförderung. Beförderungsmenge nach Verkehrsträgern und Güterabteilungen 2013 (NST-2007). Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/GueterverkehrTabellen/VerkehrstraegerGueterabteilungA.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Deutsche Bahn AG (2014): Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung. Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2013. Frankfurt am Main: Deutsche Bahn AG.

Diez, W. (2012): Automobilwirtschaftliche Vertriebssysteme und die Rolle des Automobilhandels. In: Diez, W., Reindl, S. und Brachat, H. (Hrsg.): Grundlagen der Automobilwirtschaft. 5. Auflage. München: Autohaus, Auto-Business-Verlag, S. 275–308.

Diez, W.; Reindl, S. (2012): Struktur und Bedeutung des Automobilmarktes in Deutschland. In: Diez, W., Reindl, S. und Brachat, H. (Hrsg.): Grundlagen der Automobilwirtschaft. 5. Auflage. München: Autohaus, Auto-Business-Verlag, S. 17–43.

Dirschmid, F. (2014): Die CFK-Karosserie des BMW i8 und deren Auslegung. In: Tecklenburg, G. (Hrsg.): Karosseriebautage Hamburg. 13. ATZ-Fachtagung. Wiesbaden: Springer Vieweg (Proceedings), S. 217–231.

Dittmeyer, R.; Keim, W.; Kreysa, G.; Oberholz, A. (2005): Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH.

Drewes, P. A. (2011): Corporate Sustainability Management (CSM) in der Containerschifffahrt. Bestandsaufnahme, Good-Practice-Fallstudien und Ableitung einer Handlungsempfehlung für Linienreedereien. Münster: Monsenstein und Vannerdat.

Dünnebeil, F.; Reinhard, C.; Lambrecht Udo; Kies, A.; Hausberger, S.; Rexeis, M. (2015): Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen. Texte 32/2015. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

Eberlein, R. L.; Thompson, J. P.; Matchar, D. B. (2012): Chronological Aging in Continuous Time. Paper präsentiert bei der "30th International Conference of the System Dynamics Society". St. Gallen.

Ermann, U. (2005): Regionalprodukte. Vernetzungen und Grenzziehungen bei der Regionalisierung von Nahrungsmitteln. Stuttgart: Steiner.

Esch, T.; Dahlhaus, U. (2013): Motor. In: Appel, W.; Brähler, H.; Breuer, S.; Dahlhaus, U.; Esch, T.; Hoepke, E. et al. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 375–513.

Europäische Kommission (2015): ETIS plus. European Transport Policy Information System. Online verfügbar unter http://www.etisplus.eu/data/Public/Downloads.aspx, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Europäische-Kommission (2012): Report on the Implementation in 2009-2010 of Regulation (EC) No 561/2006 on the Harmonisation of certain Social Legislation relating to Road Transport and of Directive 2002/15/EC on the Organisation of the Working Time of Persons Performing Mobile Road Transport Activities. 26th Report from the Commission on the Implementation of the Social Legislation relating to Road Transport. Brüssel: EU-Kommission.

Eurostat (2015): Regions in the European Union. Nomenclature of Territorial Units for Statistics; NUTS 2013/EU-28. Luxemburg: Europäische Union.

Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G. (2011): Statistik. Berlin u. a.: Springer.

Faltenbacher, M. (2006): Modell zur ökologisch-technischen Lebenszyklusanalyse von Nahverkehrsbussystemen. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart.

Fastermann, P. (2014): 3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert. Berlin u. a.: Springer Vieweg.

Feil GmbH (2015): Sonderladungsträger - Automobilindustrie. Online verfügbar unter http://www.feil.eu/de/ladungstraeger/sonderladungstraeger/automobilindustrie/, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Fischer, J. (1936): Einführung in die Elektrodynamik. Berlin: Springer.

Flämig, H. (2004): Wirtschaftsverkehrssysteme in Verdichtungsräumen. Empirische Analysen, Umsetzungsprozesse, Handlungsempfehlungen. Harburg: Techn. Univ. Hamburg-Harburg.

Flämig, H. (2015a): Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransportes. In: Maurer, M., Lenz, B., Gerdes, J. C. und Winter Hermann (Hrsg.): Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Berlin u.a.: Springer, S. 377–398.

Flämig, H. (2015b): Logistik und Nachhaltigkeit. In: Heidbrink, L., Meyer, N., Reidel, J. und Schmidt, I. (Hrsg.): Corporate Social Responsibility in der Logistikbranche. Anforderungen an eine nachhaltige Unternehmensführung: Erich Schmidt Verlag, S. 25–44.

Fontaras, G.; Rexeis, M.; Hausberger, S.; Kies, A.; Hammer, J.; Schulte, L.-E. et al. (2014): Development of a CO_2-Certification and Monitoring Methodology for Heavy Duty Vehicles. Proof of Concept Report. Luxemburg: Europäische Union.

Ford Motor Company (2015): Delivering Profitable Growth for All. 2014 Annual Report. Dearborn: Ford Motor Company.

Forrester, J. W. (1961): Industrial Dynamics. New York: Wiley.

Förstner, U. (2004): Umweltschutztechnik. Eine Einführung. 5. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Franco, V.; Sánchez, F. P.; German, J.; Mock, P. (2014): Real-World Exhaust Emissions from modern Diesel Cars. A Meta-Analysis of PEMS Emissions Data from EU (EURO 6) and US (Tier 2 Bin 5 / ULEV II) Diesel Passenger Cars. Part 1: Aggregated Results. Peking u.a.: The International Council on Clean Transportation (ICCT).

Frankfurter Allgemeine Zeitung (2015): "Wir haben heute alle zusammen Geschichte geschrieben". Weltklimavertrag angenommen, o. Jg., 12.12.2015.

Fraß, A. (2012): Automobilzulieferindustrie in Deutschland. München u. a.: Hampp.

Frerich, J.; Müller, G. (2006): Seeverkehrs- und Seehafenpolitik, Luftverkehrs- und Flughafenpolitik, Telekommunikations-, Medien- und Postpolitik. München u. a.: Oldenbourg.

Friede, O. F. (2012): Lieferantenparks in der Automobilindustrie. Eine empirische Analyse der Nutzenpotenziale. Saarbrücken: AV Akademikerverlag.

Gebhardt (2015): Ladungsträger für Automobilindustrie. Sonderladungsträger (SLT). Online verfügbar unter http://www.gebhardt.eu/sonderladungstraeger0.0.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Gehr, F.; Hellingrath, B. (Hg.) (2007): Logistik in der Automobilzulieferindustrie. Berlin u. a.: Springer.

Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) (2014): Nachhaltig oder regional? – am besten beides. Consumer Index, Total Grocery 03/2014. Nürnberg: Gesellschaft für Konsumforschung (GfK).

Glaeser, K.-P.; Kaschner, R.; Lerner, M.; Roder, K. C.; Weber, R.; Wolf, A.; Zander, U. (2006): Auswirkung von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes. Schlussbericht, Langfassung. 2. Auflage. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST).

Glendon, L.; Bird, L. (2013): 5th Annual Survey: Supply Chain Resilience 2013. An International Survey to Consider the Origin, Causes and Consequences of Supply Chain Disruption. Caversham: Business Continuity Institute (BCI).

Gnann, T.; Plötz, P.; Kühn, A.; Wietschel, M. (2015): Modelling Market Diffusion of Electric Vehicles with Real World Driving Data. German Market and Policy Options. In: *Transport Research Part A,* o. Jg. 2015, Nr. 77, S. 95–112.

Göpfert, I.; Grünert, M. (2012): Logistiknetze der Zukunft - Das neue Hersteller-Zulieferer-Verhältnis in der Automobilindustrie. In: Göpfert, I. (Hrsg.): Logistik der Zukunft. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 139–178.

Göpfert, I.; Schulz, M.; Wellbrock, W. (2013): Trends in der Automobillogistik. In: Göpfert, I., Braun, D. und Schulz, M. (Hrsg.): Automobillogistik. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 1–26.

Gottschalk, B. (2005): Markenmanagement als zentraler Erfolgsfaktor in der Automobilindustrie. In: Gottschalk, B., Kalmbach, R. und Dannenberg, J. (Hrsg.): Markenmanagement in der Automobilindustrie. Die Erfolgsstrategien internationaler Top-Manager. 2. Auflage. Wiesbaden: Gabler, S. 15–31.

Graf, H.; Ivisic, R. (2005): Innovative Steuerung von Produktions-und Beschaffungsnetzwerken. In: *Logistik für Unternehmen,* 19. Jg. 2005, Nr. 3, S. 28–31.

Granjot, H.-H. (2007): Fuhrparkmanagement. In: Lohre, D. (Hrsg.): Praxis des Controllings in Speditionen. Frankfurt am Main: Bildungswerk Spedition und Logistik (BSH), S. 45–69.

Gudehus, T. (2011): Logistik 1. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 4. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Gudehus, T. (2012): Grundlagen, Verfahren und Strategien. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H. (2012): Produktion und Logistik. 9. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Hagl, R. (2015): Das 3D-Druck-Kompendium. Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.

Haidar, L. (2014): Mit Sprinter und Kleinfahrzeug die Lieferkette sichern. In: *Logistik für Unternehmen,* 28. Jg. 2014, Nr. 6, S. 54–55.

Haken, K.-L. (2011): Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. 2. Auflage. München: Hanser.

Hamburg Port Authority (2012): Hamburg hält Kurs. Hafenentwicklungsplan bis 2025. Hamburg.

Hamm, L.; Peitz, V.; Krautkrämer, B.; Malik, R.; Solfrank, P.; Plank, R. (2013): Werkstoffe und Fertigungsverfahren. In: Braess, H.-H. und Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer, S. 1039–1131.

Handke, M.; Glückler, J. (2010): Märkte und Unternehmen. In: Hänsgen, D., Lentz, S. und Tzschaschel, S. (Hrsg.): Deutschlandatlas. Unser Land in 200 thematischen Karten. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 61–84.

Hartmann, H.; Barwig, U. (2012): Kosten- und Leistungsrechnung in der Spedition. Lehr- und Übungsbuch. München: Oldenbourg,

Herold, L. (2004): Kundenorientierte Prozesssteuerung in der Automobilindustrie. Die Rolle von Logistik und Logistikcontrolling im Prozess vom Kunden bis zum Kunden. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

Heuke, A.; Marx, M. (2006): Mit BlueTec gegen Feinstaub. Keine Angst vor Euro 4 und Euro 5: SCR-Technologie in Mercedes-Benz- und Setra-Omnibussen. In: *Der Nahverkehr,* 24. Jg. 2006, Nr. 7-8, S. 7–13.

Hoepke, E.; Brähler, H. (2013): Einführung in die Nutzfahrzeugtechnik. In: Appel, W., Brähler, H., Breuer, S., Dahlhaus, U., Esch, T., Hoepke, E. et al. (Hrsg.): Nutzfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1–36.

Hoffmann, J. (2014): Risikomanagement in Logistikunternehmen und Logistiknetzwerken. Risikopotenziale erkennen und erfolgreich bewältigen - mit zahlreichen Praxissituationen und Beispielen. Norderstedt: Books on Demand.

Hofmann, E.; Bachmann, H. (2006): Behälter-Management in der Praxis. State-of-the-Art und Entwicklungstendenzen bei der Steuerung von Ladungsträgerkreisläufen. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag.

Holocher, K.H. (2014): Seetransport von Automobilen. Hafeninfrastruktur und Hafeneisenbahnen als logistische Engpässe? In: *Internationales Verkehrswesen,* 66. Jg. 2014, Nr. 3, S. 57–59.

IFEU; Öko-Insitut; IVE/RMCON (2010): EcoTransIT - Ecological Transport Infomation Tool for Worldwide Transports. Methodology and Data. Im Auftrag von DB Schenker Germany und International Union of Railways. Heidelberg u. a.: IFEU.

Ihme, J. (2006): Logistik im Automobilbau. Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau. München: Hanser.

International Energy Agency (IEA) (2000): World Energy Outlook 2000. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2005): World Energy Outlook 2005. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2006): World Energy Outlook 2006. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2008): World Energy Outlook 2008. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2009): World Energy Outlook 2009. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2010): World Energy Outlook 2010. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2011): World Energy Outlook 2011. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2012): World Energy Outlook 2012. Paris: OECD/IEA.

International Energy Agency (IEA) (2013): World Energy Outlook 2013. Paris: OECD/IEA.

IPCC (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J. et al.. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Ishikawa, K. (1994): Introduction to Quality Control. 4. Auflage. London: Chapman & Hall.

Jahns, C.; Schüffler, C. (2008): Logistik - von der Seidenstraße bis heute. Wiesbaden: Gabler.

Jann, B.; Hevenstone, D. (2014): Simulationen. In: Baur, N. und Blasius, J. (Hrsg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer VS, S. 211–222.

Jung, K.-P. (2012): Der Wertbeitrag der Logistik - von der Kostensenkung zur Marktpositionierung. In: Göpfert, I. (Hrsg.): Logistik der Zukunft. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 451–466.

Jüttner, U.; Peck, H.; Christopher, M. (2003): Supply Chain Risk Management: Outlining an Agenda for Future Research. In: *International Journal of Logistics Research and Applications,* 6. Jg. 2003, Nr. 4, S. 197–210.

Kersten, W. (2001): Marktorientiertes Vielfaltsmanagement als Basis für effiziente Produktionssysteme und kontinuierliche Produktinnovation. In: Blecker, T. und Gemünden, H. G. (Hrsg.): Innovatives Produktions- und Technologiemanagement. Festschrift für Bernd Kaluza. Berlin u. a.: Springer, S. 35–54.

Kersten, W.; Böger, M.; Hohrath, P.; Späth, H. (2006): Supply Chain Risk Management: Development of a Theoretical and Empirical Framework. In: Blecker, T. und Kersten, W. (Hrsg.): Complexity Management in Supply Chains. Concepts, Tools and Methods. Berlin: Erich Schmidt, S. 3–17.

Kieser, A.; Kubicek, H. (1978): Organisationstheorien. Stuttgart: Kohlhammer.

Kinkel, S.; Lay, G.; Jung Erceg, P. (2004): Produktionsverlagerung und Auslandsproduktion im deutschen verarbeitenden Gewerbe - Stand, Trend, Motive und Effekte. In: Kinkel, S. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Standortplanung. In- und ausländische Standorte richtig bewerten. Berlin u. a.: Springer, S. 17–31.

Kinkel, S.; Zanker, C. (2007): Globale Produktionsstrategien in der Automobilzulieferindustrie. Erfolgsmuster und zukunftsorientierte Methoden zur Standortbewertung. Berlin u. a.: Springer.

Klaus, P. (2008): Märkte und Marktentwicklungen der weltweiten Logistikdienstleistungswirtschaft. In: Baumgarten, H. (Hrsg.): Das Beste der Logistik. Berlin u. a.: Springer, S. 333–352.

Klein, H. (2013): Logistikkostenrisiken bei Fahrzeugneuprojekten der Volkswagen AG. In: Göpfert, I., Braun, D. und Schulz, M. (Hrsg.): Automobillogistik. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 159–178.

Kleinemeier, M. (2014): Von der Automatisierungspyramide zu Unternehmenssteuerungsnetzwerken. In: Bauernhansl, T., Hompel, M. ten und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 571–579.

Klir, G. J. (1991): Facets of systems science. New York: Plenum.

Kloepfer, M.; Griefahn, B.; Kaniowski, A. M.; Klepper, G.; Lingner, S.; Steinebach, G. et al. (2006): Leben mit Lärm? Risikobeurteilung und Regulation des Umgebungslärms im Verkehrsbereich. Berlin u. a.: Springer.

Klug, F. (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin u. a.: Springer.

Knörr, W.; Heidt, C.; Schacht, A. (2012): Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960 - 2030" (TREMOD, Version 5.3) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: IFEU.

Knörr, W.; Heidt, C.; Schmied, M.; Notter, B. (2013): Aktualisierung der Emissionsberechnung für die Binnenschifffahrt und Übertragung der Daten in TREMOD. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Heidelberg: IFEU.

Knothe, E. (1995): Technischer Bericht zur Untersuchung der Lkw- und Ladegeräusche auf Betriebsgeländen von Frachtzentren, Auslieferungslagern und Speditionen. Wiesbaden: Hess. Landesanst. für Umwelt.

Koch, S. (2012): Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Berlin: Springer Vieweg.

Koch, W. J. (2006): Zur Wertschöpfungstiefe von Unternehmen. Die strategische Logik der Integration. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2007): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2006 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2008): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2007 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2009): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2008 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2010): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2009 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2011): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2010 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2012): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2011 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2013a): Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kfz-Anhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) (FZ 25). Stichtag: 1. Januar 2013. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2013b): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2012 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2014): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD). Güterbeförderung Jahr 2013 VD4. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2015a): Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2015 gegenüber 1. Januar 2014 nach Segmenten und Modellreihen (FZ 12). Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2015b): Bestand in den Jahren 1960 bis 2015 nach Fahrzeugklassen. Online verfügbar unter

http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/b_fzkl_zeitreihe.html?nn=652402, zuletzt geprüft am 19.11.2015.

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2015c): Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2015d): Pressemitteilung Nr. 30/2015 - Fahrzeugzulassungen im November 2015, zuletzt geprüft am 29.12.2015.

Krail, M. (2009): System-Based Analysis of Income Distribution Impacts on Mobility Behaviour. Baden-Baden: Nomos.

Kratky, K.W. (1991): Die "Beherrschbarkeit" komplexer Systeme. In: Kratky, K. W. (Hrsg.): Systemische Perspektiven. Interdisziplinäre Beiträge zu Theorie und Praxis. Heidelberg: Auer, S. 9–16.

Kühn, A. (2015): Ökonomische und ökologische Wirkungen regionalisierter Produktionsstrukturen innerhalb der automobilen Zulieferkette. In: *Zeitschrift für Wirtschaftsgeografie,* 59. Jg. 2015, Nr. 2, S. 91–101.

Kühn, A.; Glöser, S. (2012): System-Based Feedback Analysis of E-mobility Diffusion in China. Konferenzpaper zur "30th International Conference of the System Dynamics Society". Sankt Gallen.

Kühn, A.; Krail, M. (2013): Dynamic Demand Modeling of Freight Fleets. Konferenzpaper zur "31st International Conference of the System Dynamics Society". Cambridge, MA.

Kühn, A.; Novinsky, P.; Schade, W. (2014): GLOMO - Global Mobility Model. Beschreibung und Ergebnisse. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Kummer, S. (2006): Einführung in die Verkehrswirtschaft. Wien: Facultas wuv.

Kummer, S.; Sudy, I. (2007): Management von Transport- und Lagerrisiken in Supply Chains. In: Vahrenkamp, R. und Amann, M. (Hrsg.): Risikomanagement in Supply Chains. Gefahren abwehren, Chancen nutzen, Erfolg generieren. Berlin: E. Schmidt, S. 255–272.

Kurek, R. (2006): Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. Stand der Technik - Entwicklungs- und Innovationspotenziale - Optimierungspotenziale. München u. a.: Hanser.

Lang, T. (2011): Grundlagen der Automobiltechnik. Stuttgart: Motorbuch-Verl.

Lange, J.; Knote, T.; Breitkopf, M. (2008): Ab wann rechnet sich ein Hybridfahrzeug im Linienbetrieb? In: *Der Nahverkehr,* 26. Jg. 2008, Nr. 6, S. 8–14.

Lastauto Omnibus (1985): Katalog 1985. Stuttgart: ETM EuroTransportMedia.

Lastauto Omnibus (1995): Katalog 1995. Stuttgart: ETM EuroTransportMedia.

Lastauto Omnibus (2000): Katalog 2000. Stuttgart: ETM EuroTransportMedia.

Lastauto Omnibus (2006): Katalog 2006. Stuttgart: ETM EuroTransportMedia.

Lastauto Omnibus (2014): Katalog 2014. Stuttgart: ETM EuroTransportMedia.

Laurency, P. (2013): Funktionen wirkungsschwacher Klimaschutzabkommen. Ursachen und Strategien der kontrafaktischen Stabilisierung politischer Zielerwartungen am Beispiel des UN-Klimaschutzregimes. Wiesbaden: Springer VS.

Lehner, F. (1995): Modelle und Modellierung in der Wirtschaftsinformatik. Versuch einer Standortbestimmung. In: Wächter, H. (Hrsg.): Selbstverständnis betriebswirtschaftlicher Forschung und Lehre. Tagung der Kommission Wissenschaftstheorie. Wiesbaden: Gabler, S. 55–86.

Leibniz Universität Hannover (2011): 24h-Mittelungspegel LDEN und nächtlicher Schienen-Güterverkehr. Hannover: AG Qualität Leibniz Universität Hannover.

Lenkewitz, K.; Müller, J. (2005): Technischer Bericht zur Untersuchung der Geräuschemissionen durch Lastkraftwagen auf Betriebsgeländen von Frachtzentren, Auslieferungslagern, Speditionen und Verbrauchermärkten sowie weiterer typischer Geräusche insbesondere von Verbrauchermärkten. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Leonhard, A. (1940): Die selbsttätige Regelung in der Elektrotechnik. Berlin: Springer.

Linz, S.; Dexheimer, V.; Kathe, A. (2003): Hedonische Preismessung bei Gebrauchtwagen. In: Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Wirtschaft und Statistik, 6/2003. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, S. 538–542.

Lohse, D.; Bachner, G.; Dugge, B.; Teichert, H. (1997): Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung). Abschlussbericht zum DFG-Forschungsthema. Dresden: Technische Universität Dresden.

Luhmann, N. (1984): Soziale Systeme. Grundriss einer allgemeinen Theorie. Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Mankiw, N. G. (2004): Principles of Economics. 3. Auflage. Mason, Ohio: Thomson/South-Western.

Maue, J. H.; Hoffmann, H.; Lüpke, A. von (2009): 0 Dezibel + 0 Dezibel= 3 Dezibel. Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms. 9. Auflage. Berlin: Erich Schmidt.

Meadows, D. H.; Meadows, D. L.; Randers, J.; Behrens, W. W. (1972): The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. 2. Auflage. New York: Universe Books.

Meersman, H.; Van de Voorde, E. (2008): The Relationship between Economic Activity and Freight Transport. In: Ben-Akiva, M., Meersman, H. und Van de Voorde, E. (Hrsg.): Recent Developments in Transport Modelling. Lessons for the Freight Sector. Bingley: Emerald, S. 69–92.

Memmler, M.; Merkel, K.; Pabst, J.; Rother, S.; Schneider, S.; Dreher, M. (2013): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

Meyer, J. C.; Sander, U. (2009): Bestände senken, Lieferservice steigern - Ansatzpunkt Bestandsmanagement. 2. Auflage. Aachen: Forschungsinstitut für Rationalisierung e.V. an der RWTH Aachen (FIR).

Mineralölwirtschaftsverband (MWV) (2015): Statistiken - Preise. Online verfügbar unter http://www.mwv.de/index.php/daten/statistikenpreise, zuletzt geprüft am 25.11.2015.

Mollenhauer, K. (2007): Handbuch Dieselmotoren. 3. Aufl. Berlin u. a.: Springer.

Möller, D. (1992): Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme. Berlin u. a.: Springer.

Morello, L.; Rossini, L. R.; Pia, G.; Tonoli, A. (2011): The Automotive Body. Volume I: Components Design. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V.

Mößmer, H.E.; Schedlbauer, M.; Günthner, W.A. (2007): Die Automobile Welt im Umbruch. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität. Berlin: Springer, S. 3–15.

MTU (2014): Packmittelliste. Online verfügbar unter http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/pdf/downloads/MTU-Packmittel.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Müller, M. G.; Haan, P. de (2006): Autokaufentscheid: Treue zur Marke, zum Fahrzeugsegment, zur Treibstoffart und zum Getriebetyp. Deskriptive Auswertung von Transaktionsdaten. Bericht zum Schweizer Autokaufverhalten Nr. 10. Zürich: ETH Zürich.

Nagel, K.; Schreckenberg, M. (1992): A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. In: *J. Phys. I France,* o. Jg. 1992, S. 2221–2229.

Naumann, M.; Dietz, T.; Kuss, A. (2014): Mensch-Maschine-Interaktion. In: Bauernhansl, T., Hompel, M. ten und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 509–523.

Naumann, M.; Oßenbrügge, J. (2010): Staat und Infrastruktur. In: Hänsgen, D., Lentz, S. und Tzschaschel, S. (Hrsg.): Deutschlandatlas. Unser Land in 200 thematischen Karten. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, S. 127–144.

Neumann, K.; Morlock, M. (2004): Operations Research. 2. Auflage. München: Hanser.

Niederländer, F. (2000): Dynamik in der internationalen Produktpolitik von Automobilherstellern. Wiesbaden: Gabler.

Noche, B. (1990): Simulation in Produktion und Materialfluss. Entscheidungsorientierte Simulationsumgebung. Köln: Verlag TÜV Rheinland.

o. V. (2015): BMW-Teilkatalog. Online verfügbar unter http://de.bmwfans.info/parts-catalog, zuletzt geprüft am 15.12.2015.

Ortúzar, J.; Willumsen, L. G. (2001): Modelling transport. 3. Auflage. Chichester, New York: J. Wiley.

Pachauri, R. K.; Meyer, L. (2015): Climate Change 2014. Synthesis Report. Genf: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Peters, A.; Doll, C.; Plötz, P.; Sauer, A.; Schade, W.; Thielmann, A. et al. (2013): Konzepte der Elektromobilität. Ihre Bedeutung für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Berlin: edition sigma.

Petschow, U.; Ferdinand, J.-P.; Dickel, S.; Flämig, H.; Steinfeld, M.; Worobei, A. (2014): Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit. Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0. Berlin: Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung.

Pfohl, H.-C.; Stölzle, W. (1997): Planung und Kontrolle. Konzeption, Gestaltung, Implementierung. 2. Auflage. München: Vahlen.

Philipp, F. (1967): Risiko und Risikopolitik. Stuttgart: Poeschel.

Piller, F. T.; Waringer, D. (1999): Modularisierung in der Automobilindustrie - neue Formen und Prinzipien. Modular Sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitätsmanagements. Aachen: Shaker.

Piontek, J. (1997): Global Sourcing. München: Oldenbourg.

PLANCO Consulting GmbH; Bundesanstalt für Gewässerkunde (2007): Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Bahn und Wasserstraße. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse. Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, vertreten durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost. Essen.

Porsche AG (2014): Nachhaltigkeitsbericht 2013. Stuttgart: Porsche AG.

Porsche AG (2015): Geschäftsbericht 2014. Stuttgart: Porsche AG.

Poulikakos, L.; Arraigada, M.; Morgan, G.; Heutschi, K.; Anderegg, P.; Partl, M.; Soltic, P. (2008): In Situ Measurements of the Environmental Footprint of Freight Vehicles in Switzerland. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* 13. Jg. 2008, Nr. 4, S. 274–282.

Poulikakos, L.; Heutschi, K.; Arraigada, M.; Anderegg, P.; Soltic, P. (2010): Environmental Footprint of Road Freight: Case Studies from Switzerland. In: *Transport Policy,* 17. Jg. 2010, Nr. 5, S. 342–348.

PTV Group (2015): Validate: Verkehrsmodell und Verkehrsdatenlieferant für Deutschland. Karlsruhe. Online verfügbar unter http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/traffic-data/verkehrsmodelle/, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Puls, T. (2007): Verkehrslärm in der Diskussion. Möglichkeiten und Grenzen des Lärmschutzes in Deutschland. Köln: Deutscher Instituts-Verlag.

Radke, S. (Hg.) (2014): Verkehr in Zahlen. Deutschland; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. 43. Jg. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag.

Reichhuber, A. W. (2010): Strategie und Struktur in der Automobilindustrie. Strategische und organisatorische Programme zur Handhabung automobilwirtschaftlicher Herausforderungen. Wiesbaden: Gabler.

Reisig, W. (2010): Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Ricardo, D. (1891): Principles of Political Economy and Taxation. London: Bell.

Robert Bosch GmbH (2004): Dieselmotor-Management. 4. Auflage. Wiesbaden: Vieweg.

Rogall, H. (2002): Neue Umweltökonomie, ökologische Ökonomie. Ökonomische und ethische Grundlagen der Nachhaltigkeit, Instrumente zu ihrer Durchsetzung. Opladen: Leske + Budrich.

Roos, E.; Maile, K. (2008): Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. 3. Auflage. Berlin u. a.: Springer.

Rosenheck, H.; Hofmann, R.; Heutschi, K. (1997): Bericht zum F+E-Projekt "Neues EMPA-Modell für Straßenlärm". Teil Quellenbeschreibung. Dübendorf: EMPA.

Rothengatter, W.; Schaffer, A. (2008): Makro kompakt. Grundzüge der Makroökonomik. 2. Auflage. Heidelberg: Physica.

Rumbaugh, J.; Jacobson, I.; Booch, G. (1999): The Unified Modeling Language Reference Manual. Reading u. a.: Addison-Wesley.

Saatmann, M. (2007): Supra-adaptive Architekturen in der Automobilindustrie – eine Blaupause. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität. Berlin: Springer, S. 139–148.

Schade, W. (2005): Strategic Sustainability Analysis. Concept and Application for the Assessment of European Transport Policy. Baden-Baden: Nomos.

Schade, W.; Zanker, C.; Kühn, A.; Hettesheimer, T. (2014): Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie. Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovationen bis 2030. Unter Mitarbeit von Angela Jäger, Steffen Kinkel und Thomas Schmall. Berlin: edition sigma.

Schmidt, M.; Knörr, W.; Patyk, A.; Höpfner, U. (1998): Evaluierung gängiger Datenmodelle zur Ermittlung verkehrlicher Umweltbelastungen. In: Haasis, H.-D.; Ranze, K.C. (Hrsg.): Umweltinformatik '98: Vernetzte Strukturen in Informatik, Umwelt und Wirtschaft. 12. Internationales Symposium "Informatik für den Umweltschutz" Bremen 1998. Marburg: Metropolis, S. 280–292.

Schmied, M.; Knörr, W. (2013): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistikgemäß DIN EN 16258. Begriffe, Methoden, Beispiele. Bonn: DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.

Schneider, K. (2011): Modernes Sourcing in der Automobilindustrie. Wiesbaden: Gabler.

Schraft, D.; Westkämper, E. (2005): Lieferantenparks in der europäischen Automobilindustrie. Nutzen und Potenziale von integrierten Versorgungsstrukturen wie Lieferantenparks, Industrieparks, Versorgungszentren und ähnlichen Ausprägungsformen für die beteiligten Unternehmen. Düsseldorf: Verlagsgruppe Handelsblatt.

Schramm, D.; Koppers, M. (2014): Das Automobil im Jahr 2025. Vielfalt der Antriebstechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Schröder, C. (2010): Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich. In: *IW-Trends – Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung,* 37. Jahrgang. Jg., 2010, Nr. 03/2010, S. 1–21.

Schröter, M. (2006): Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

Schubert, L. (2013): Preisbildung im Lkw-Ladungsverkehr. Anwendung situativer Ansätze im Spannungsfeld zwischen Kosten- und Marktorientierung. Hamburg: DVV Media Group.

Schubert, M.; Kluth, T.; Neubauer, G.; Ratzenberger, R.; Kotzagiorgis, S.; Butz, B. et al. (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Zusammenfassung der Ergebnisse. Bonn: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Schuh, G.; Hering, N.; Brunner, A. (2013): Einführung in das Logistikmanagement. In: Schuh, G. und Stich, V. (Hrsg.): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, S. 1–34.

Schulz, C. (2012): The Identification of Critical Road Infrastructures - The Case of Baden-Wuerttemberg. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Schulz, M. (2014): Logistikintegrierte Produktentwicklung. Eine zukunftsorientierte Analyse am Beispiel der Automobilindustrie. Wiesbaden: Springer Gabler.

SeaRates (2015): Schedule & Tariff. Online verfügbar unter https://www.searates.com, zuletzt geprüft am 23.10.2015.

Seidel, W. W.; Hahn, F. (2014): Werkstofftechnik. Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung. 10., aktualisierte Auflage. München: Hanser.

Sheffi, Y. (2007): The Resilient Enterprise. Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage. Cambridge (MA) u. a.: MIT Press.

Siemens AG (2015): eHighway. Online verfügbar unter http://www.siemens.com/press/de/feature/2015/mobility/2015-06-ehighway.php, zuletzt geprüft am 29.12.2015.

Singh, A.R.; Mishra, P.K.; Jain, R.; Khurana, M.K. (2012): Design of Global Supply Chain Network with Operational Risks. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 60. Jg. 2012, Nr. 1-4, S. 273–290.

Skorna, A. C. (2013): Empfehlungen für die Ausgestaltung eines Präventionskonzepts in der Transportversicherung : Untersuchung von Transportschäden, Präventionsmaßnahmen und der Präventionsaffinität von Versicherungsnehmern. Dissertation. St. Gallen: Universität St. Gallen.

Sodhi, M. S.; Tang, C. S. (2012): Managing Supply Chain Risk. New York: Springer.

Springer Gabler Verlag (2015a): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Deckungsbeitrag. Online verfügbar unter http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1375/deckungsbeitrag-v6.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Springer Gabler Verlag (2015b): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Szenarien. Online verfügbar unter http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/596505849/szenarien-v2.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien u.a.: Springer.

Stadtler, H. (1988): Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung. Heidelberg: Physica.

Statistisches Bundesamt (2013a): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, Fachserie 3, Reihe 5.1. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Statistisches Bundesamt (2013b): Statistisches Jahrbuch Deutschland 2013. 1. Auflage. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Steegmüller, D. (2014): Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In: Bauernhansl, T., Hompel, M. ten und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 103–120.

Sterman, J. D. (2000): Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill.

Stich, V.; Quick, J.; Cuber, S. (2013): Konfiguration logistischer Netzwerke. In: Schuh, G. und Stich, V. (Hrsg.): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, S. 35–76.

Stockmar, J. (2001): Modulare Bauweise aus Sicht der Lieferanten. In: VDI (Hrsg.): Fahrzeugkonzepte für das 2. Jahrhundert Automobiltechnik. Tagung Wolfsburg, 21. bis 23. November 2001. Düsseldorf: VDI-Verlag (VDI-Berichte, 1653), S. 423–445.

Straube, F.; Pfohl, H.-C. (2008): Trends und Strategien in der Logistik. Globale Netzwerke im Wandel; Umwelt, Sicherheit, Internationalisierung, Menschen. Hamburg: DVV Media Group, Dt. Verkehrs-Verl.

Strohhecker, J. (2008): System Dynamics als Managementinstrument. In: Strohhecker, J. und Sehnert Jürgen (Hrsg.): System Dynamics für die Finanzindustrie. Simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme. Frankfurt am Main: Frankfurt-School-Verlag, S. 17–34.

Strohhecker, J.; Fischer, M.M. (2008): Feedback-Diagramme. In: Strohhecker, J. und Sehnert Jürgen (Hrsg.): System Dynamics für die Finanzindustrie. Simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme. Frankfurt am Main: Frankfurt-School-Verlag, S. 71–104.

Tempelmeier, H. (2012): Bestandsmanagement in Supply Chains. 4. Auflage. Norderstedt: Books on Demand.

Thom, A. : Entwicklung eines Gestaltungsmodells zum Management von Risiken in Produktionsnetzwerken. Ein Beitrag zum Risikomanagement in der Logistik. Dissertation. Berlin: Univ.-Verl. der TU.

Thun, J.-H.; Marble, R.P.; Silveira-Camargos, V. (2007): A Conceptual Framework and EmpiricalResults of the Risk and Potential of Just in Sequence. A Study of the German Automotive Industry. In: *Journal of Operations and Logistics,* 1. Jg. 2007, Nr. 2, S. 1–13.

Transpofix (2014): Spezialtransportgestelle und Sonderladungsträger. Online verfügbar unter http://www.transpofix.de/produkte/spezialtransportgestelle-und-sonderladungstraeger, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Trippner, K. (2006): Systematische Risikobewertung in versorgungslogistischen Systemen in der Automobilindustrie. Analyse internationaler Hersteller in China. Dissertation. Cottbus: Brandenburgische Technische Universität.

Uebach, H. (2005): Automatische Beschaffungslogistik der Achsmodule für Porsche. In: *Logistik für Unternehmen,* 19. Jg. 2005, Nr. 6, S. 48–50.

Umweltbundesamt (UBA) (2010): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs Version 3.1/Januar 2010. Berlin: Umweltbundesamt (UBA).

Umweltbundesamt (UBA) (2014): Abgasgrenzwerte für LKW und Busse (Fahrzeuge ab 2.610 kg; Grenzwerte für die Typ- und Serienprüfungen). Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/420/bilder/dateien/5_tab_grenzwerte-lkw.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Umweltbundesamt (UBA) (2015a): Emissionsentwicklung 1990-2013 für klassische Luftschadstoffe. Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2013. Dessau.

Umweltbundesamt (UBA) (2015b): Emissionsübersichten Treibhausgase Emissionsentwicklung 1990-2013 - Treibhausgase. Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2013. Dessau: Umweltbundesamt (UBA).

Umweltbundesamt (UBA) (2015c): Gut fürs Klima – frisches Obst aus der Region. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/gut-fuers-klima-frisches-obst-aus-der-region, zuletzt geprüft am 30.12.2015.

Umweltbundesamt (UBA) (2015d): Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen, zuletzt geprüft am 21.12.2015.

Umweltbundesamt (UBA) (2015e): Treibhausgas-Emissionen nach Quellkategorien. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland, zuletzt geprüft am 23.11.2015.

Umweltbundesamt (UBA) (2016): Lärmwirkungen. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/laermwirkungen, zuletzt geprüft am 13.01.2016.

Vahrenkamp, R.; Kotzab, H. (2012): Logistik. Management und Strategien. 7. Auflage. München: Oldenbourg.

Varian, H. R. (2003): Intermediate Microeconomics. A Modern Approach. 6. Auflage. New York: Norton.

VDA (2013): Tatsachen und Zahlen. Berlin: VDA.

VDA (2015): Zahlen und Daten. Online verfügbar unter https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Verkehrsrundschau (2014): Neue Maut: 12,5 Cent für Euro-6-LKW. Online verfügbar unter http://www.verkehrsrundschau.de/neue-maut-12-5-cent-fuer-euro-6-lkw-1374276.html, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Vester, F. (1974): Das kybernetische Zeitalter. Neue Dimensionen des Denkens. Frankfurt am Main: Fischer.

Voigt, F. (1953): Verkehrs und Industrialisierung. In: *Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft,* 109. Jg. 1953, S. 193–240.

Volkswagen AG (2013): Umwelterklärung 2013. Wolfsburg. Wolfsburg: Volkswagen AG.

Volkswagen AG (2015): Geschäftsbericht 2014. Wolfsburg: Volkswagen AG.

Wagner, S.M.; Bode, C. (2008): An Empirical Examination of Supply Chain Performance along several Dimensions of Risk. In: *Journal of Business Logistics,* 29. Jg. 2008, Nr. 1, S. 307–325.

Wagner, S.M.; Neshat, N. (2010): Assessing the Vulnerability of Supply Chains using Graph Theory. In: *International Journal of Production Economics,* 126. Jg. 2010, Nr. 1, S. 121–129.

Wagner, S.M.; Silveira-Camargos, V. (2012): Managing Risks in Just-In-Sequence Supply Networks: Exploratory Evidence From Automakers. In: *IEEE Trans. Eng. Manage.,* 59. Jg. 2012, Nr. 1, S. 52–64.

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I. (2009): Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I. (2010): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Wannenwetsch, H. (2010): Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion. 4. Auflage. Heidelberg u. a.: Springer.

Wardecki, M. (2007): Behältermanagement - Dem Bermuda-Dreieck entkommen. In: Gehr, F. und Hellingrath, B. (Hrsg.): Logistik in der Automobilzulieferindustrie. Berlin u.a.: Springer, S. 80–85.

Warnatz, J.; Maas, U.; Dibble, R. W. (2001): Verbrennung. Physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. 3. Auflage. Berlin u.a.: Springer.

Weber, J. (2012): Logistikkostenrechnung. Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.

Weber, J.; Wallenburg, C. M. (2010): Logistik- und Supply Chain Controlling. 6. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Wiedemann, R.; Brilon, W.; Brannolte, U. (1977): Simulation des Verkehrsablaufs auf zweispurigen Landstraßen. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Verkehrswesen.

Wiedemann, R.; Schwerdtfeger, T. (1987): Makroskopisches Simulationsmodell für Schnellstraßennetze mit Berücksichtigung von Einzelfahrzeugen (DYNEMO). Zusammenfassender Ergebnisbericht zu d. Forschungsaufträgen Simulation des Verkehrsflusses in Netzen u. Bewertung e. automatischen Verkehrssteuerung mit Hilfe e. Simulationsmodells, 1. Teil, Bad Godesberg.

Wiener, N. (1952): Mensch und Menschmaschine. Hg. v. Gertrud Walther. Frankfurt am Main: Metzner.

Wienholdt, H. (2011): Dynamische Konfiguration der Ersatzteillogistik im Maschinen- und Anlagenbau. Aachen: Apprimus.

Wildemann, H. (2013): Entwicklungslinien der Produktionssysteme in der Automobilindustrie. In: Göpfert, I., Braun, D. und Schulz, M. (Hrsg.): Automobillogistik. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 136–158.

Winter, F. (2008): Logistik im Zwischenwerksverkehr. Eine systemorientierte Analyse. Wiesbaden: Gabler.

Wittenbrink, P. (2010): Green-Logistik: Trend oder Mode? Chance und Handlungsbedarf für die Schiene. In: *Güterbahnen,* 9. Jg. 2010, Nr. 1, S. 30–34.

Wittenbrink, P. (2011): Transportkostenmanagement im Straßengüterverkehr. Grundlagen - Optimierungspotenziale - Green Logistic. Wiesbaden: Gabler.

Witzig, R. (2011): Wirkungsmodellierung von Maßnahmen zur Reduktion von Energiebedarf und CO_2 - Emissionen im Personenverkehr. Potentialabschätzung von Elektromobilität und Emissionshandel. Dissertation. München: Technische Universität München.

Wolf, A. (2010): Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes. Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.3406002 des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft.

Wyman, O. (2012): FAST 2025. Future Automotive Industry Structure. Berlin: Verband der Automobilindustrie (VDA).

Zahn, A.; Göbel, B. (2013a): Prüfungen an stapelbaren Behältern R-KLT 3215 / R-KLT 3147 nach VDA 4500. Stand Oktober 2012. Würzburg. Online verfügbar unter http://www.auer-packaging.de/pdf/auer-bericht_R3215.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Zahn, A.; Göbel, B. (2013b): Prüfungen an stapelbaren Behältern R-KLT 6429 nach VDA 4500. Stand Oktober 2012. Würzburg. Online verfügbar unter http://www.auer-packaging.de/pdf/auer-bericht_R6429.pdf, zuletzt geprüft am 30.11.2015.

Zanker, C.; Kinkel, S.; Maloca, S. (2013): Globale Produktion von einer starken Heimatbasis aus. Verlagerungsaktivitäten deutscher Unternehmen auf dem Tiefstand. In: Fraunhofer ISI (Hrsg.): Modernisierung der Produktion, Bd. 63, S. 1–12.

Zeitzen, F. (2014): Immer abwärts. In: *Lastauto Omnibus,* 91. Jg. 2014, Nr. 4, S. 10–12.

Ziegenbein, A. (2007): Supply Chain Risiken. Identifikation, Bewertung und Steuerung. Zürich: vdf Hochschulverlag.

Zsidisin, G.A. (2003): A Grounded Definition of Supply Risk. In: *Journal of Purchasing and Supply Management,* 9. Jg. 2003, Nr. 5-6, S. 217–224.

Anhang

A.1: Anhang zur Wirkungsanalyse des Systems „Automobilindustrie“ 274

A.1.1: Segmente des Kraftfahrt-Bundesamtes 274
A.1.2: NUTS-Regionen ab dem Jahr 2013 275
A.1.3: Stichprobe Zulieferbeziehungen zwischen Tier-1-Zulieferen und OEM 285
A.1.4: Handelsdaten 287
A.1.5: Maße, Gewichte und Kapazitäten von Ladungsträgern 288
A.1.6: Nutzfahrzeugbestand nach Aufbauarten 290

A.2: Ausgewählte Parameter des Gestaltungsmodells 291

A.3: Determinanten zur Bestimmung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen 294

A.3.1: Stichprobe Gebrauchtfahrzeuge 294
A.3.2: Kraftstoffpreise 295
A.3.3: Bestimmung der Restwerte von Nutzfahrzeugen 297

A.4: Motive für Produktionsverlagerungen 299

A.1 Anhang zur Wirkungsanalyse des Systems „Automobilindustrie“

A.1.1 Segmente des Kraftfahrt-Bundesamtes

Das Kraftfahrt-Bundesamt teilt sowohl den Bestand an Pkw als auch die Neuzulassungen in Segmente ein. Die Einteilung der Modelle erfolgt anhand „…optischer, technischer und marktorientierter Merkmale.“ (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2015c, S. 5) und lässt sich daher nur schwer anhand technischer Fahrzeugparameter, wie Länge oder Hubraum, nachvollziehen. Die Eingruppierung erfolgt laut Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2015c, S. 5) „..in enger Abstimmung mit Vertretern der Automobilindustrie…“. Demnach lassen sich sämtliche in Deutschland zugelassenen Pkw folgenden 14 Kategorien (vgl. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2015a) zuordnen:

Einteilung des KBA	Einteilung in dieser Arbeit
• Minis • Kleinwagen	→ • Kleinwagen
• Kompaktklasse • Vans / Minivans	→ • Kompaktklasse
• Mittelklasse • obere Mittelklasse • Großraum-Vans	→ • Mittelklasse
• Oberklasse • SUVs • Geländewagen • Sportwagen • Utilities	→ • Oberklasse
• Wohnmobile • Sonstige	

A.1.2 NUTS-Regionen ab dem Jahr 2013

Tabelle A- 1: NUTS-Zonen-Aufteilung DE1 (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DE1	BADEN-WÜRTTEMBERG		
DE11		Stuttgart	
DE111			Stuttgart, Stadtkreis
DE112			Böblingen
DE113			Esslingen
DE114			Göppingen
DE115			Ludwigsburg
DE116			Rems-Murr-Kreis
DE117			Heilbronn, Stadtkreis
DE118			Heilbronn, Landkreis
DE119			Hohenlohekreis
DE11A			Schwäbisch Hall
DE11B			Main-Tauber-Kreis
DE11C			Heidenheim
DE11D			Ostalbkreis
DE12		Karlsruhe	
DE121			Baden-Baden, Stadtkreis
DE122			Karlsruhe, Stadtkreis
DE123			Karlsruhe, Landkreis
DE124			Rastatt
DE125			Heidelberg, Stadtkreis
DE126			Mannheim, Stadtkreis
DE127			Neckar-Odenwald-Kreis
DE128			Rhein-Neckar-Kreis
DE129			Pforzheim, Stadtkreis
DE12A			Calw
DE12B			Enzkreis
DE12C			Freudenstadt
DE13		Freiburg	
DE131			Freiburg im Breisgau, Stadtkreis
DE132			Breisgau-Hochschwarzwald
DE133			Emmendingen
DE134			Ortenaukreis
DE135			Rottweil
DE136			Schwarzwald-Baar-Kreis
DE137			Tuttlingen
DE138			Konstanz
DE139			Lörrach
DE13A			Waldshut
DE14		Tübingen	
DE141			Reutlingen
DE142			Tübingen, Landkreis
DE143			Zollernalbkreis
DE144			Ulm, Stadtkreis
DE145			Alb-Donau-Kreis
DE146			Biberach
DE147			Bodenseekreis
DE148			Ravensburg
DE149			Sigmaringen

Tabelle A- 2: NUTS-Zonen-Aufteilung DE2 Teil 1 (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DE2	BAYERN		
DE21		Oberbayern	
DE211			Ingolstadt, Kreisfreie Stadt
DE212			München, Kreisfreie Stadt
DE213			Rosenheim, Kreisfreie Stadt
DE214			Altötting
DE215			Berchtesgadener Land
DE216			Bad Tölz-Wolfratshausen
DE217			Dachau
DE218			Ebersberg
DE219			Eichstätt
DE21A			Erding
DE21B			Freising
DE21C			Fürstenfeldbruck
DE21D			Garmisch-Partenkirchen
DE21E			Landsberg am Lech
DE21F			Miesbach
DE21G			Mühldorf a. Inn
DE21H			München, Landkreis
DE21I			Neuburg-Schrobenhausen
DE21J			Pfaffenhofen a. d. Ilm
DE21K			Rosenheim, Landkreis
DE21L			Starnberg
DE21M			Traunstein
DE21N			Weilheim-Schongau
DE22		Niederbayern	
DE221			Landshut, Kreisfreie Stadt
DE222			Passau, Kreisfreie Stadt
DE223			Straubing, Kreisfreie Stadt
DE224			Deggendorf
DE225			Freyung-Grafenau
DE226			Kelheim
DE227			Landshut, Landkreis
DE228			Passau, Landkreis
DE229			Regen
DE22A			Rottal-Inn
DE22B			Straubing-Bogen
DE22C			Dingolfing-Landau
DE23		Oberpfalz	
DE231			Amberg, Kreisfreie Stadt
DE232			Regensburg, Kreisfreie Stadt
DE233			Weiden i. d. Opf, Kreisfreie Stadt
DE234			Amberg-Sulzbach
DE235			Cham
DE236			Neumarkt i. d. OPf.
DE237			Neustadt a. d. Waldnaab
DE238			Regensburg, Landkreis
DE239			Schwandorf
DE23A			Tirschenreuth

Tabelle A- 3: NUTS-Zonen-Aufteilung DE2 Teil 2 (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DE24		Oberfranken	
DE241			Bamberg, Kreisfreie Stadt
DE242			Bayreuth, Kreisfreie Stadt
DE243			Coburg, Kreisfreie Stadt
DE244			Hof, Kreisfreie Stadt
DE245			Bamberg, Landkreis
DE246			Bayreuth, Landkreis
DE247			Coburg, Landkreis
DE248			Forchheim
DE249			Hof, Landkreis
DE24A			Kronach
DE24B			Kulmbach
DE24C			Lichtenfels
DE24D			Wunsiedel i. Fichtelgebirge
DE25		Mittelfranken	
DE251			Ansbach, Kreisfreie Stadt
DE252			Erlangen, Kreisfreie Stadt
DE253			Fürth, Kreisfreie Stadt
DE254			Nürnberg, Kreisfreie Stadt
DE255			Schwabach, Kreisfreie Stadt
DE256			Ansbach, Landkreis
DE257			Erlangen-Höchstadt
DE258			Fürth, Landkreis
DE259			Nürnberger Land
DE25A			Neustadt a. d. Aisch-Bad Windsheim
DE25B			Roth
DE25C			Weißenburg-Gunzenhausen
DE26		Unterfranken	
DE261			Aschaffenburg, Kreisfreie Stadt
DE262			Schweinfurt, Kreisfreie Stadt
DE263			Würzburg, Kreisfreie Stadt
DE264			Aschaffenburg, Landkreis
DE265			Bad Kissingen
DE266			Rhön-Grabfeld
DE267			Haßberge
DE268			Kitzingen
DE269			Miltenberg
DE26A			Main-Spessart
DE26B			Schweinfurt, Landkreis
DE26C			Würzburg, Landkreis
DE27		Schwaben	
DE271			Augsburg, Kreisfreie Stadt
DE272			Kaufbeuren, Kreisfreie Stadt
DE273			Kempten (Allgäu), Kreisfreie Stadt
DE274			Memmingen, Kreisfreie Stadt
DE275			Aichach-Friedberg
DE276			Augsburg, Landkreis
DE277			Dillingen a.d. Donau
DE278			Günzburg

Tabelle A- 4: NUTS-Zonen-Aufteilung DE3 bis DE7 (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DE279			Neu-Ulm
DE27A			Lindau (Bodensee)
DE27B			Ostallgäu
DE27C			Unterallgäu
DE27D			Donau-Ries
DE27E			Oberallgäu
DE3	BERLIN		
DE30		Berlin	
DE300			Berlin
DE4	BRANDENBURG		
DE40		Brandenburg	
DE401			Brandenburg an der Havel, Kreisfreie Stadt
DE402			Cottbus, Kreisfreie Stadt
DE403			Frankfurt (Oder), Kreisfreie Stadt
DE404			Potsdam, Kreisfreie Stadt
DE405			Barnim
DE406			Dahme-Spreewald
DE407			Elbe-Elster
DE408			Havelland
DE409			Märkisch-Oderland
DE40A			Oberhavel
DE40B			Oberspreewald-Lausitz
DE40C			Oder-Spree
DE40D			Ostprignitz-Ruppin
DE40E			Potsdam-Mittelmark
DE40F			Prignitz
DE40G			Spree-Neiße
DE40H			Teltow-Fläming
DE40I			Uckermark
DE5	BREMEN		
DE50		Bremen	
DE501			Bremen, Kreisfreie Stadt
DE502			Bremerhaven, Kreisfreie Stadt
DE6	HAMBURG		
DE60		Hamburg	
DE600			Hamburg
DE7	HESSEN		
DE71		Darmstadt	
DE711			Darmstadt, Kreisfreie Stadt
DE712			Frankfurt am Main, Kreisfreie Stadt
DE713			Offenbach am Main, Kreisfreie Stadt
DE714			Wiesbaden, Kreisfreie Stadt
DE715			Bergstraße
DE716			Darmstadt-Dieburg
DE717			Groß-Gerau
DE718			Hochtaunuskreis
DE719			Main-Kinzig-Kreis
DE71A			Main-Taunus-Kreis

Tabelle A- 5: NUTS-Zonen-Aufteilung DE8 und DE9 (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DE71B			Odenwaldkreis
DE71C			Offenbach, Landkreis
DE71D			Rheingau-Taunus-Kreis
DE71E			Wetteraukreis
DE72		Gießen	
DE721			Gießen, Landkreis
DE722			Lahn-Dill-Kreis
DE723			Limburg-Weilburg
DE724			Marburg-Biedenkopf
DE725			Vogelsbergkreis
DE73		Kassel	
DE731			Kassel, Kreisfreie Stadt
DE732			Fulda
DE733			Hersfeld-Rotenburg
DE734			Kassel, Landkreis
DE735			Schwalm-Eder-Kreis
DE736			Waldeck-Frankenberg
DE737			Werra-Meißner-Kreis
DE8	MECKLENBURG-VORPOMMERN		
DE80		Mecklenburg-Vorpommern	
DE803			Rostock, Kreisfreie Stadt
DE804			Schwerin, Kreisfreie Stadt
DE80J			Mecklenburgische Seenplatte
DE80K			Landkreis Rostock
DE80L			Vorpommern-Rügen
DE80M			Nordwestmecklenburg
DE80N			Vorpommern-Greifswald
DE80O			Ludwigslust-Parchim
DE9	NIEDERSACHSEN		
DE91		Braunschweig	
DE911			Braunschweig, Kreisfreie Stadt
DE912			Salzgitter, Kreisfreie Stadt
DE913			Wolfsburg, Kreisfreie Stadt
DE914			Gifhorn
DE915			Göttingen
DE916			Goslar
DE917			Helmstedt
DE918			Northeim
DE919			Osterode am Harz
DE91A			Peine
DE91B			Wolfenbüttel
DE92		Hannover	
DE922			Diepholz
DE923			Hameln-Pyrmont
DE925			Hildesheim
DE926			Holzminden
DE927			Nienburg (Weser)
DE928			Schaumburg
DE929			Region Hannover

Tabelle A- 6: NUTS-Zonen-Aufteilung DE9 und DEA (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DE93		Lüneburg	
DE931			Celle
DE932			Cuxhaven
DE933			Harburg
DE934			Lüchow-Dannenberg
DE935			Lüneburg, Landkreis
DE936			Osterholz
DE937			Rotenburg (Wümme)
DE938			Heidekreis
DE939			Stade
DE93A			Uelzen
DE93B			Verden
DE94		Weser-Ems	
DE941			Delmenhorst, Kreisfreie Stadt
DE942			Emden, Kreisfreie Stadt
DE943			Oldenburg (Oldenburg), Kreisfreie Stadt
DE944			Osnabrück, Kreisfreie Stadt
DE945			Wilhelmshaven, Kreisfreie Stadt
DE946			Ammerland
DE947			Aurich
DE948			Cloppenburg
DE949			Emsland
DE94A			Friesland (DE)
DE94B			Grafschaft Bentheim
DE94C			Leer
DE94D			Oldenburg, Landkreis
DE94E			Osnabrück, Landkreis
DE94F			Vechta
DE94G			Wesermarsch
DE94H			Wittmund
DEA	NORDRHEIN-WESTFALEN		
DEA1		Düsseldorf	
DEA11			Düsseldorf, Kreisfreie Stadt
DEA12			Duisburg, Kreisfreie Stadt
DEA13			Essen, Kreisfreie Stadt
DEA14			Krefeld, Kreisfreie Stadt
DEA15			Mönchengladbach, Kreisfreie Stadt
DEA16			Mülheim an der Ruhr,Kreisfreie Stadt
DEA17			Oberhausen, Kreisfreie Stadt
DEA18			Remscheid, Kreisfreie Stadt
DEA19			Solingen, Kreisfreie Stadt
DEA1A			Wuppertal, Kreisfreie Stadt
DEA1B			Kleve
DEA1C			Mettmann
DEA1D			Rhein-Kreis Neuss
DEA1E			Viersen
DEA1F			Wesel

Tabelle A- 7: NUTS-Zonen-Aufteilung DEA und DEB (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DEA2		Köln	
DEA22			Bonn, Kreisfreie Stadt
DEA23			Köln, Kreisfreie Stadt
DEA24			Leverkusen, Kreisfreie Stadt
DEA26			Düren
DEA27			Rhein-Erft-Kreis
DEA28			Euskirchen
DEA29			Heinsberg
DEA2A			Oberbergischer Kreis
DEA2B			Rheinisch-Bergischer Kreis
DEA2C			Rhein-Sieg-Kreis
DEA2D			Städteregion Aachen
DEA3		Münster	
DEA31			Bottrop, Kreisfreie Stadt
DEA32			Gelsenkirchen, Kreisfreie Stadt
DEA33			Münster, Kreisfreie Stadt
DEA34			Borken
DEA35			Coesfeld
DEA36			Recklinghausen
DEA37			Steinfurt
DEA38			Warendorf
DEA4		Detmold	
DEA41			Bielefeld, Kreisfreie Stadt
DEA42			Gütersloh
DEA43			Herford
DEA44			Höxter
DEA45			Lippe
DEA46			Minden-Lübbecke
DEA47			Paderborn
DEA5		Arnsberg	
DEA51			Bochum, Kreisfreie Stadt
DEA52			Dortmund, Kreisfreie Stadt
DEA53			Hagen, Kreisfreie Stadt
DEA54			Hamm, Kreisfreie Stadt
DEA55			Herne, Kreisfreie Stadt
DEA56			Ennepe-Ruhr-Kreis
DEA57			Hochsauerlandkreis
DEA58			Märkischer Kreis
DEA59			Olpe
DEA5A			Siegen-Wittgenstein
DEA5B			Soest
DEA5C			Unna
DEB	RHEINLAND-PFALZ		
DEB1		Koblenz	
DEB11			Koblenz, Kreisfreie Stadt
DEB12			Ahrweiler
DEB13			Altenkirchen (Westerwald)
DEB14			Bad Kreuznach
DEB15			Birkenfeld
DEB16			Cochem-Zell

Tabelle A- 8: NUTS-Zonen-Aufteilung DEC und DED (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DEB17			Mayen-Koblenz
DEB18			Neuwied
DEB19			Rhein-Hunsrück-Kreis
DEB1A			Rhein-Lahn-Kreis
DEB1B			Westerwaldkreis
DEB2		Trier	
DEB21			Trier, Kreisfreie Stadt
DEB22			Bernkastel-Wittlich
DEB23			Eifelkreis Bitburg-Prüm
DEB24			Vulkaneifel
DEB25			Trier-Saarburg
DEB3		Rheinhessen-Pfalz	
DEB31			Frankenthal (Pfalz), Kreisfreie Stadt
DEB32			Kaiserslautern, Kreisfreie Stadt
DEB33			Landau in der Pfalz, Kreisfreie Stadt
DEB34			Ludwigshafen am Rhein, Kreisfreie Stadt
DEB35			Mainz, Kreisfreie Stadt
DEB36			Neustadt an der Weinstraße, Kreisfreie Stadt
DEB37			Pirmasens, Kreisfreie Stadt
DEB38			Speyer, Kreisfreie Stadt
DEB39			Worms, Kreisfreie Stadt
DEB3A			Zweibrücken, Kreisfreie Stadt
DEB3B			Alzey-Worms
DEB3C			Bad Dürkheim
DEB3D			Donnersbergkreis
DEB3E			Germersheim
DEB3F			Kaiserslautern, Landkreis
DEB3G			Kusel
DEB3H			Südliche Weinstraße
DEB3I			Rhein-Pfalz-Kreis
DEB3J			Mainz-Bingen
DEB3K			Südwestpfalz
DEC	SAARLAND		
DEC0		Saarland	
DEC01			Regionalverband Saarbrücken
DEC02			Merzig-Wadern
DEC03			Neunkirchen
DEC04			Saarlouis
DEC05			Saarpfalz-Kreis
DEC06			St. Wendel
DED	SACHSEN		
DED2		Dresden	
DED21			Dresden, Kreisfreie Stadt
DED2C			Bautzen
DED2D			Görlitz
DED2E			Meißen
DED2F			Sächsische Schweiz-Osterzgebirge

Tabelle A- 9: NUTS-Zonen-Aufteilung DEE und DEF (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DED4		Chemnitz	
DED41			Chemnitz, Kreisfreie Stadt
DED42			Erzgebirgskreis
DED43			Mittelsachsen
DED44			Vogtlandkreis
DED45			Zwickau
DED5		Leipzig	
DED51			Leipzig, Kreisfreie Stadt
DED52			Leipzig
DED53			Nordsachsen
DEE	SACHSEN-ANHALT		
DEE0		Sachsen-Anhalt	
DEE01			Dessau-Roßlau, Kreisfreie Stadt
DEE02			Halle (Saale), Kreisfreie Stadt
DEE03			Magdeburg, Kreisfreie Stadt
DEE04			Altmarkkreis Salzwedel
DEE05			Anhalt-Bitterfeld
DEE06			Jerichower Land
DEE07			Börde
DEE08			Burgenlandkreis
DEE09			Harz
DEE0A			Mansfeld-Südharz
DEE0B			Saalekreis
DEE0C			Salzlandkreis
DEE0D			Stendal
DEE0E			Wittenberg
DEF	SCHLESWIG-HOLSTEIN		
DEF0		Schleswig-Holstein	
DEF01			Flensburg, Kreisfreie Stadt
DEF02			Kiel, Kreisfreie Stadt
DEF03			Lübeck, Kreisfreie Stadt
DEF04			Neumünster, Kreisfreie Stadt
DEF05			Dithmarschen
DEF06			Herzogtum Lauenburg
DEF07			Nordfriesland
DEF08			Ostholstein
DEF09			Pinneberg
DEF0A			Plön
DEF0B			Rendsburg-Eckernförde
DEF0C			Schleswig-Flensburg
DEF0D			Segeberg
DEF0E			Steinburg
DEF0F			Stormarn

Tabelle A- 10: NUTS-Zonen-Aufteilung DEG (Eurostat 2015)

Code	*NUTS 1 (Bundesländer)*	*NUTS 2 (Regierungsbezirke)*	*NUTS 3 (Landkreise)*
DEG	THÜRINGEN		
DEG0		Thüringen	
DEG01			Erfurt, Kreisfreie Stadt
DEG02			Gera, Kreisfreie Stadt
DEG03			Jena, Kreisfreie Stadt
DEG04			Suhl, Kreisfreie Stadt
DEG05			Weimar, Kreisfreie Stadt
DEG06			Eichsfeld
DEG07			Nordhausen
DEG09			Unstrut-Hainich-Kreis
DEG0A			Kyffhäuserkreis
DEG0B			Schmalkalden-Meiningen
DEG0C			Gotha
DEG0D			Sömmerda
DEG0E			Hildburghausen
DEG0F			Ilm-Kreis
DEG0G			Weimarer Land
DEG0H			Sonneberg
DEG0I			Saalfeld-Rudolstadt
DEG0J			Saale-Holzland-Kreis
DEG0K			Saale-Orla-Kreis
DEG0L			Greiz
DEG0M			Altenburger Land
DEG0N			Eisenach, Kreisfreie Stadt
DEG0P			Wartburgkreis

A.1.3 Stichprobe Zulieferbeziehungen zwischen Tier-1-Zulieferen und OEM

Tabelle A- 11: Zulieferbeziehungen zwischen Tier-1-Zulieferer und OEM Teil 1 (eigene Erhebung basierend auf dem in Kapitel 5.1.3 dargestellten Algorithmus)

Name Tier-1-Zulieferer	Anzahl Produktionsstandorte	Anzahl Zulieferbeziehungen je Standort	produziertes Modul	OEM
Akkumulatorenfabrik MOLL	1	21	M7.2 Stromversorgung Batterie	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Alpine Electronics	1	3	M7.3 Kommunikation	Daimler
Audi	1	2	M2.1 Motor	Audi
Audi	2	2	M1.1 Karosserie	Audi
Autoliv	2	21	M6.4 Insassenschutz	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Behr	2	21	M6.3 Heizung und Klima	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Behr	1	21	M2.4 Kühlung	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
BMW	3	4	M2.1 Motor	BMW
BMW	1	4	M3.2 Antriebswelle	BMW
BMW	2	2	M6.2 Cockpit	BMW
BMW	1	2	M5.1 Front- und Backend	BMW
BMW	4	1	M1.1 Karosserie	BMW
Boysen	5	3	M2.2 Abgasanlage	Audi, BMW, Daimler, Porsche
Continental	1	21	M7.3 Kommunikation	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Daimler	3	3	M2.1 Motor	Daimler
Daimler	1	3	M4.5 Achsen	Daimler
Daimler	1	3	M4.3 Lenksystem	Daimler
Daimler	1	3	M2.2 Abgasanlage	Daimler
Daimler	1	3	M3.1 Getriebe	Daimler
Daimler	3	1	M1.1 Karosserie	Daimler
Daimler	1	3	M3.2 Antriebswelle	Daimler
Decoma	1	1	M5.1 Front- und Backend	Ford
Delphi	2	2	M7.1 Kabelbaum Bordnetz	Ford
Denso	2	21	M6.3 Heizung und Klima	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Dräxlmaier	2	3	M6.2 Cockpit	Porsche, BMW
Dräxlmaier	1	1	M6.5 Türen	Porsche
Eberspächer	2	5	M2.2 Abgasanlage	Ford, Opel, VW
Eissmann Group Automotive	1	1	M6.6 Verkleidung (Dach und Boden)	Audi
Faurecia	5	1	M6.2 Cockpit	Ford, Daimler, VW
Faurecia	6	1	M6.5 Türen	Ford, Daimler, VW
Faurecia	4	2	M6.6 Verkleidung (Dach und Boden)	Audi, Daimler, Ford, Porsche
Faurecia	6	2	M5.1 Front- und Backend	Audi, Daimler, Ford, Opel, VW
Faurecia	5	2	M2.2 Abgasanlage	Audi, BMW, Daimler, Ford, VW
Faurecia	8	2	M6.1 Sitze	Audi, BMW, Ford, VW, Opel
Faurecia	1	3	M8.1 Kleinmodule	Audi, Daimler, BMW
Ford	4	2	M2.1 Motor	Ford
Getrag	2	12	M3.1 Getriebe	Audi, BMW, Ford, Opel, Porsche
Grammer	5	1	M6.2 Cockpit	Daimler, Ford, VW
Grupo Antolin	10	2	M6.6 Verkleidung (Dach und Boden)	Audi, BMW, Daimler,Ford, VW
HBPO	4	1	M5.1 Front- und Backend	Audi, BMW, Daimler, VW
Hella	1	21	M5.3 Scheinwerfer	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
HP Pelzer	1	1	M6.5 Türen	BMW
HP Pelzer	1	1	M6.6 Verkleidung (Dach und Boden)	BMW
Inergy Automotive Systems	2	2	M2.3 Kraftstoffversorgung	BMW, Opel, Porsche
Johnson Controls	1	1	M7.2 Stromversorgung Batterie	Daimler
Johnson Controls	3	2	M6.1 Sitze	Daimler, Ford, Porsche, VW
Johnson Controls	2	1	M6.6 Verkleidung (Dach und Boden)	Opel, VW
Johnson Controls	1	1	M6.5 Türen	Opel
Kautex	12	1	M2.3 Kraftstoffversorgung	Audi, BMW, Daimler, Ford, VW
Lear	7	2	M6.1 Sitze	Audi, BMW, Daimler, Opel, Porsche, VW
Leoni	6	1	M7.1 Kabelbaum Bordnetz	Audi, Daimler, Opel, VW
Magna	4	1	M6.6 Verkleidung (Dach und Boden)	Daimler, Porsche
Magna	1	3	M5.1 Front- und Backend	VW
Magna	5	1	M6.5 Türen	BMW, Daimler, Opel
Opel	4	2	M2.1 Motor	Opel
Opel	1	2	M4.5 Achsen	Opel
Opel	2	1	M1.1 Karosserie	Opel
Opel	2	1	M3.2 Antriebswelle	Opel
Otto Fuchs	1	21	M4.1 Radsystem	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Porsche	1	2	M2.1 Motor	Porsche
Porsche	2	1	M1.1 Karosserie	Porsche
Prevent	1	1	M6.6 Verkleidung (Dach und Boden)	Opel
Radsystem GmbH	4	1	M4.1 Radsystem	Daimler, Ford, VW
Rehau	8	2	M5.1 Front- und Backend	Audi, BMW, Daimler, Opel, Porsche
Rehau	2	4	M8.1 Kleinmodule	BMW,Daimler

Tabelle A- 12: Zulieferbeziehungen zwischen Tier-1-Zulieferer und OEM Teil 2 (eigene Erhebung basierend auf dem in Kapitel 5.1.3 dargestellten Algorithmus)

Name Tier-1-Zulieferer	Anzahl Produktionsstandorte	Anzahl Zulieferbeziehungen je Standort	produziertes Modul	OEM
Robert Bosch	1	21	M5.4 Wischer	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Robert Bosch	1	21	M7.3 Kommunikation	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Ronal	2	21	M4.1 Radsystem	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Saint-Gobain Sekurit	3	21	M5.2 Verglasung	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
SAS Autosystemtechnik	5	1	M6.2 Cockpit	BMW, Ford, VW
SCHEDL Automotive System	5	1	M4.1 Radsystem	Audi, BMW, Daimler
Sitech	3	1	M6.1 Sitze	Volkswagen
SMP Deutschland GmbH	9	2	M6.5 Türen	Audi, BMW, Daimler, Porsche, VW
SMP Deutschland GmbH	9	2	M6.2 Cockpit	Audi, BMW, Daimler, Porsche, VW
SMP Deutschland GmbH	11	2	M5.1 Front- und Backend	Audi, BMW, Daimler, Porsche, VW
Takata	2	12	M6.4 Insassenschutz	BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
TechniSat Elektronik Thüringen	1	21	M7.3 Kommunikation	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
tedrive Steering GmbH	1	2	M4.3 Lenksystem	Ford
tedrive Steering GmbH	1	2	M4.5 Achsen	Ford
tedrive Steering GmbH	1	2	M3.2 Antriebswelle	Ford
Tenneco	7	2	M2.2 Abgasanlage	Audi, Daimler, Ford, VW
Tenneco	4	2	M4.2 Stoßdämpfer	Audi, Daimler, Ford, VW
ThyssenKrupp Automotive	3	1	M4.5 Achsen	BMW, Porsche
ThyssenKrupp Presta	2	10	M4.3 Lenksystem	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
TI Automotive	8	1	M2.3 Kraftstoffversorgung	BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
TI Automotive	3	21	M4.4 Bremssystem	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Valeo	1	21	M5.4 Wischer	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Valeo	4	10	M6.3 Heizung und Klima	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
Volkswagen	6	1	M1.1 Karosserie	VW
Volkswagen	1	10	M3.2 Antriebswelle	Audi, Porsche, VW
Volkswagen	1	10	M4.4 Bremssystem	Audi, Porsche, VW
Volkswagen	1	8	M4.3 Lenksystem	Audi, VW
Volkswagen	1	10	M4.5 Achsen	Audi, Porsche, VW
Volkswagen	1	10	M3.2 Antriebswelle	Audi, Porsche, VW
Volkswagen	3	6	M2.1 Motor	VW
Volkswagen	1	6	M3.1 Getriebe	VW
ZF Lenksysteme	2	11	M4.3 Lenksystem	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW
ZF Sachs	2	21	M4.2 Stoßdämpfer	Audi, BMW, Daimler, Ford, Opel, Porsche, VW

A.1.4 Handelsdaten

Die Vereinten Nationen (UN) erfassen auf Basis von 6 Millionen Datensätzen pro Jahr in einer Handelsdatenbank (UN-Comtrade) globale Güterströme. Die Systematik zur Erfassung der Daten bildet das Harmonized System (6-stellige HS Codes). Diese HS-Güterklassifikation beinhaltet derzeit etwa 6.000 verschiedene Güterklassen. Zur Identifikation der Anteile der Zulieferregionen (europäische Länder, Rest der Welt) wurden für diese Arbeit die Handelsdaten für die in der Tabelle A- 13 dargestellten Güterklassen analysiert.

Tabelle A- 13: Im Zuge dieser Arbeit analysierten Codes von Handelsdaten der UN-Comtrade

Code	*Beschreibung*
870710	Bodies (incl. Cabs) for the motor vehicles of 87.03
870790	Bodies (incl. cabs) for the motor vehicles of 87.01, 87.02, 87.04 & 87.05
870810	Bumpers & parts thereof of the motor vehicles of 87.01-87.05
870821	Safety seat belts of the motor vehicles of 87.01-87.05
870829	Parts & accessories of bodies (incl. cabs) of the motor vehicles of 87.01-87.05, n.e.s. in 87.08
870830	Brakes & servo-brakes; parts thereof, of the motor vehicles of headings 87.01 to 87.05.
870840	Gear boxes & parts thereof, of the motor vehicles of headings 87.01 to 87.05.
870850	Drive-axles with differential, whether/not provided with other transmission components, & non-driving axles; parts thereof of the motor vehicles of headings 87.01 to 87.05.
870870	Road wheels & parts & accessories thereof for the motor vehicles of 87.01-87.05
870880	Suspension systems & parts thereof (incl. shock-absorbers) ,of the motor vehicles of headings 87.01 to 87.05
870891	Radiators & parts thereof for the motor vehicles of 87.01-87.05
870892	Silencers (mufflers) & exhaust pipes; parts thereof for the motor vehicles of 87.01-87.05
870893	Clutches & parts thereof for the motor vehicles of 87.01-87.05
870894	Steering wheels, steering columns & steering boxes; parts thereof for the motor vehicles of 87.01-87.05
870895	Safety airbags with inflater system; parts thereof for the motor vehicles of 87.01-87.05
870899	Other parts & accessories for the motor vehicles of 87.01-87.05, exclud. 8708.91/92/93/94/95.

A.1.5 Maße, Gewichte und Kapazitäten von Ladungsträgern

Tabelle A- 14: Maße, Gewichte und Kapazitäten von Ladungsträgern in der Tier-1-Zulieferstufe (eigene Darstellung basierend auf MTU 2014, Transpofix 2014, Feil GmbH 2015 und Gebhardt 2015)

Modul	*Maße der Ladungsträger*			*Gewicht Ladungsträger*	*Zuladungs-kapazität*
	Länge	*Breite*	*Höhe*		
	[mm]	*[mm]*	*[mm]*	*[kg]*	*[Module]*
M1 1 Karosserie	*kein Ladungsträger verfügbar, da zusammengebaute Karosserie nicht transportiert wird*				
M2 1 Motor	2.260	1.460	980	331	6
M2 2 Abgasanlage	2.200	1.200	1.200	325	10
M2 3 Kraftstoffversorgung	2.380	1.385	2.000	340	2
M2 4 Kuehlung	1.335	815	1.462	260	8
M3 1 Getriebe	1.140	995	1.110	140	6
M3 2 Antriebswelle	2.000	900	1.300	331	20
M4 1 Radsystem	1.335	815	1.462	260	1
M4 2 Stoßdaempfer	1.700	1.200	1.500	240	5
M4 3 Lenksystem	1.700	1.200	1.500	240	20
M4 4 Bremssystem	1.140	995	1.110	140	3
M4 5 Achsen	2.260	1.460	2.000	331	4
M5 1 Front Backend	1.800	1.200	1.010	270	1
M5 2 Verglasung	1.865	800	1.250	270	5
M5 3 Scheinwerfer	1.200	1.000	975	63	6
M5 4 Wischer	1.200	1.000	975	63	12
M6 1 Sitze	1.500	800	1.220	135	1
M6 2 Cockpit	1.800	1.200	1.010	270	1
M6 3 Heizung Klima	1.700	1.200	1.450	260	6
M6 4 Insassenschutz	1.700	1.200	1.450	260	2
M6 5 Tueren Verkleidung	1.335	815	1.462	260	1
M6 6 Verkleidung Dach Boden	1.680	1.230	2.450	290	3
M7 1 Kabelbaum Bordnetz	1.200	1.000	975	63	4
M7 2 Stromversorgung Batterie	1.700	1.200	1.450	260	4
M7 3 Kommunikation Entertainment	1.200	1.000	975	63	6
M8 1 Kleinmodule	1.240	835	970	90	6

Tabelle A- 15: Maße, Gewichte und Kapazitäten von Ladungsträgern in der Tier-2-Zulieferstufe (eigene Darstellung basierend auf MTU 2014, Transpofix 2014, Feil GmbH 2015 und Gebhardt 2015)

Modul-Äquivalente	*Maße der Ladungsträger*			*Gewicht Ladungsträger*	*Zuladungs-kapazität*
	Länge	*Breite*	*Höhe*		
	[mm]	*[mm]*	*[mm]*	*[kg]*	*[Module]*
M1 1 Karosserie	2.200	1.200	1.500	130	3
M2 1 Motor	1.200	800	984	60	20
M2 2 Abgasanlage	1.200	800	984	60	20
M2 3 Kraftstoffversorgung	1.200	1.000	1.000	118	15
M2 4 Kuehlung	1.200	800	984	60	20
M3 1 Getriebe	1.200	1.000	1.000	118	10
M3 2 Antriebswelle	1.200	1.000	1.000	118	25
M4 1 Radsystem	1.335	815	1.462	130	12
M4 2 Stoßdaempfer	1.200	1.000	1.000	118	10
M4 3 Lenksystem	1.200	1.000	1.000	118	25
M4 4 Bremssystem	1.295	1.095	600	130	20
M4 5 Achsen	1.200	1.000	975	63	10
M5 1 Front Backend	2.200	1.200	1.500	130	6
M5 2 Verglasung	1.865	800	1.250	270	10
M5 3 Scheinwerfer	1.200	1.000	975	63	12
M5 4 Wischer	1.200	1.000	975	63	16
M6 1 Sitze	2.200	1.200	1.500	130	10
M6 2 Cockpit	2.200	1.200	1.500	130	12
M6 3 Heizung Klima	1.200	800	984	60	20
M6 4 Insassenschutz	1.200	800	984	60	20
M6 5 Tueren Verkleidung	2.200	1.200	1.500	130	20
M6 6 Verkleidung Dach Boden	2.200	1.200	1.500	130	6
M7 1 Kabelbaum Bordnetz	1.200	800	984	60	20
M7 2 Stromversorgung Batterie	1.200	1.000	975	63	10
M7 3 Kommunikation Entertainment	1.200	1.000	975	63	10
M8 1 Kleinmodule	1.240	835	970	90	10

A.1.6 Nutzfahrzeugbestand nach Aufbauarten

Nutzfahrzeuge lassen sich nach unterschiedlichen Aufbauarten differenzieren. Abbildung A- 1stellt die Anteile der Aufbauarten in den sieben Gewichtsklassen des Nutzfahrzeugbestands im Jahr 2013 dar. Anhand der Aufbauart lassen sich Rückschlüsse auf die Nutzungsart zeigen: Während Kippaufbauten zum Transport von Schüttgütern verwendet werden, finden in der Automobillogistik Aufbauarten wie Autotransporter und Seitenplaner Anwendung.

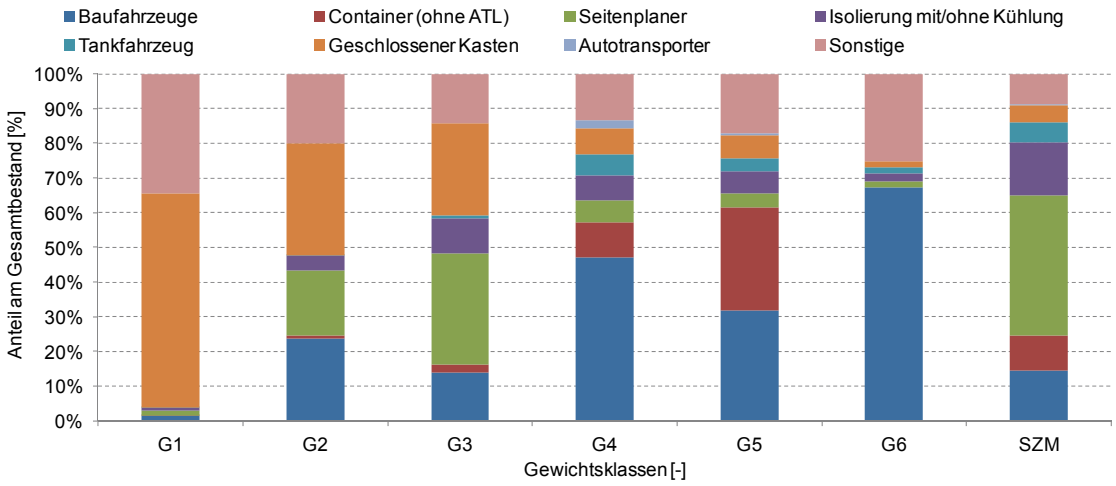


Abbildung A- 1: Nutzfahrzeugbestand (Jahr 2013) nach Aufbauarten (Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) 2013a)

A.2 Ausgewählte Parameter des Gestaltungsmodells

Tabelle A- 16: Materialdichten (vgl. Hamm et al. 2013 und Roos und Maile 2008)

Parameter	*Einheit*	*Wert*
Dichte Nichteisenmetalle	[g/cm^3]	2,7
Dichte Flüssigkeiten	[g/cm^3]	1,0
Dichte Elastomere	[g/cm^3]	1,0
Dichte Glas	[g/cm^3]	2,5
Dichte Stahl	[g/cm^3]	7,9

Tabelle A- 17: Parameter der Investitionsrechnung für Nutzfahrzeuge (vgl. Lastauto Omnibus 2014, Steuergesetzgebung sowie eigene Annahmen)

Parameter	*Gewichts-klasse*	*Einheit*	*Wert 2014*	*Wert 2030*	*Entwicklung*	*Quelle*
Kaufpreis Nutzfahrzeuge (netto)	G1	[Euro]	22.000	22.000	konstant	[2]
	G2	[Euro]	41.000	41.000	konstant	[2]
	G3	[Euro]	51.000	51.000	konstant	[2]
	G4	[Euro]	72.000	72.000	konstant	[2]
	G5	[Euro]	107.500	107.500	konstant	[2]
	G6	[Euro]	120.000	120.000	konstant	[2]
	SZM	[Euro]	102.500	102.500	konstant	[2]
Investitionszinssatz	alle	[%]	3,0	3,0	konstant	[3]
Unternehmenssteuersatz	alle	[%]	35	35	konstant	[3]
durchschnittliche Haltedauer	G1	[Jahre]	8,4	8,4	konstant	[1]
	G2	[Jahre]	8,4	8,4	konstant	[1]
	G3	[Jahre]	8,4	8,4	konstant	[1]
	G4	[Jahre]	8,4	8,4	konstant	[1]
	G5	[Jahre]	8,2	8,2	konstant	[1]
	G6	[Jahre]	6,5	6,5	konstant	[1]
	SZM	[Jahre]	4,25	4,25	konstant	[1]

Quellen: [1] eigene Annahmen baisrend auf dem KBA Nutzfahrzeugbestand (Durchscnittsalter) [2] Lastauto Omnibus 2014 [3] Steuergesetzgebung

Tabelle A- 18: Parameter im Teilmodell TRANSPORT (vgl. Umweltbundesamt (UBA) 2010 Hofmann und Bachmann 2006, Wannenwetsch 2010 und eigene Annahmen)

Parameter	*Zulieferstufe*	*Einheit*	*Wert*	*Quelle*
Standzeit Ladungsträger bis Rückführung	Tier 1	[h]	3	[5]
	Tier 2	[h]	6	[5]
	Tier 3	[h]	6	[5]
	Tier n	[h]	8	[5]
jährliche Austauschrate Ladungsträger	alle	[%]	10	[4]
Durchschnittsgeschwindigkeit Autobahn	alle	[km/h]	65	[3]
Durchschnittsgeschwindigkeit übrige Straßenkategorien	alle	[km/h]	30	[3]
max. Arbeitszeit Logistikdienstleister pro Person	alle	[h/d]	9,8	[1]
max. Arbeitszeit Produktion pro Person	alle	[h/d]	8	[1]
Reichweite Sicherheitsbestand	Tier 2	[d]	1	[2]
	Tier 3	[d]	1	[2]
	Tier n	[d]	1	[2]
Zeitbedarf Entladung (incl. Wartezeit am Werktor)	alle	[h]	0,75	[1]
Zeitbedarf Beladung	alle	[h]	0,50	[1]
durchschnittliche Verfügbarkeitsrate Lkw	alle	[%]	92	[1]
durchschnittliche Verfügbarkeitsrate Binnenschiff	alle	[%]	100	[1]
durchschnittliche Verfügbarkeitsrate Eisenbahn	alle	[%]	100	[1]
durchschnittliche Verfügbarkeitsrate Seeschiff	alle	[%]	100	[1]

Quellen: [1] eigene Annahmen [2] Wannenwetsch 2010 [3] Umweltbundesamt 2010
[4] Hofmann und Bachmann 2006 [5] eigene Annahmen basierend auf Hofmann und Bachmann 2006

Tabelle A- 19: Parameter zur Bestimmung der Transportkosten im Straßengüterverkehr (vgl. Lastauto Omnibus 2014, Wittenbrink 2011, Steuergesetzgebung und eigene Annahmen)

Parameter	*Gewichts-klasse*	*Einheit*	*Wert 2014*	*Wert 2030*	*Entwicklung*	*Quelle*
Rohölpreis	alle	[US-Dollar/Barrel]	46	112	linear	[1]
Kraftstoffverbrauch (Teillast)	G1	[l/100km]	10,8	9,7	linear	[2]
Effiziengewinne zwischen den Jahren 2014 u	G2	[l/100km]	15,8	14,2	linear	[2]
	G3	[l/100km]	18,6	16,7	linear	[2]
	G4	[l/100km]	24,7	22,2	linear	[2]
	G5	[l/100km]	26,3	23,7	linear	[2]
	G6	[l/100km]	37,5	33,8	linear	[2]
	SZM	[l/100km]	34,3	30,8	linear	[2]
Fahrpersonalkosten	alle	[Euro]	47.200	47.200	konstant	[3]
AdBlue-Verbrauch im Bezug zur Kraftstoffmenge	alle	[%]	5,0	5,0	konstant	[2]
Versicherung	G1	[Euro]	3.000	3.000	konstant	[2]
	G2	[Euro]	3.500	3.500	konstant	[2]
	G3	[Euro]	4.000	4.000	konstant	[2]
	G4	[Euro]	4.500	4.500	konstant	[2]
	G5	[Euro]	5.000	5.000	konstant	[2]
	G6	[Euro]	5.600	5.600	konstant	[2]
	SZM	[Euro]	5.600	5.600	konstant	[2]
Kfz-Steuer	G1	[Euro]	135	135	konstant	[4]
	G2	[Euro]	225	225	konstant	[4]
	G3	[Euro]	534	534	konstant	[4]
	G4	[Euro]	556	556	konstant	[4]
	G5	[Euro]	556	556	konstant	[4]
	G6	[Euro]	556	556	konstant	[4]
	SZM	[Euro]	929	929	konstant	[4]

Quellen: [1] eigene Annahmen [2] Lastauto Omnibus 2014 [3] Schubert 2013 [4] Steuergesetzgebung

A.3 Determinanten zur Bestimmung der ökologischen und ökonomischen Wirkungen

A.3.1 Stichprobe Gebrauchtfahrzeuge

Zur Ermittlung der mittleren jährlichen Fahrleistung der Nutzfahrzeuge wurden Fahrzeuge aus der Erhebung Kraftverkehr in Deutschland (KiD) 2010 um eine Stichprobe von gebrauchten Nutzfahrzeugen des Internetportals Truckscout24 ergänzt. Insgesamt umfasste die Stichprobe etwa 6.000 Fahrzeuge. Aus den Informationen bezüglich des Jahres der Zulassung und des Kilometerstands ließ sich die mittlerer jährliche Fahrleistung ermitteln. Die Ergebnisse sind für die Gewichtsklassen in Form einer kumulierten Verteilungskurve in Abbildung A- 2 dargestellt.

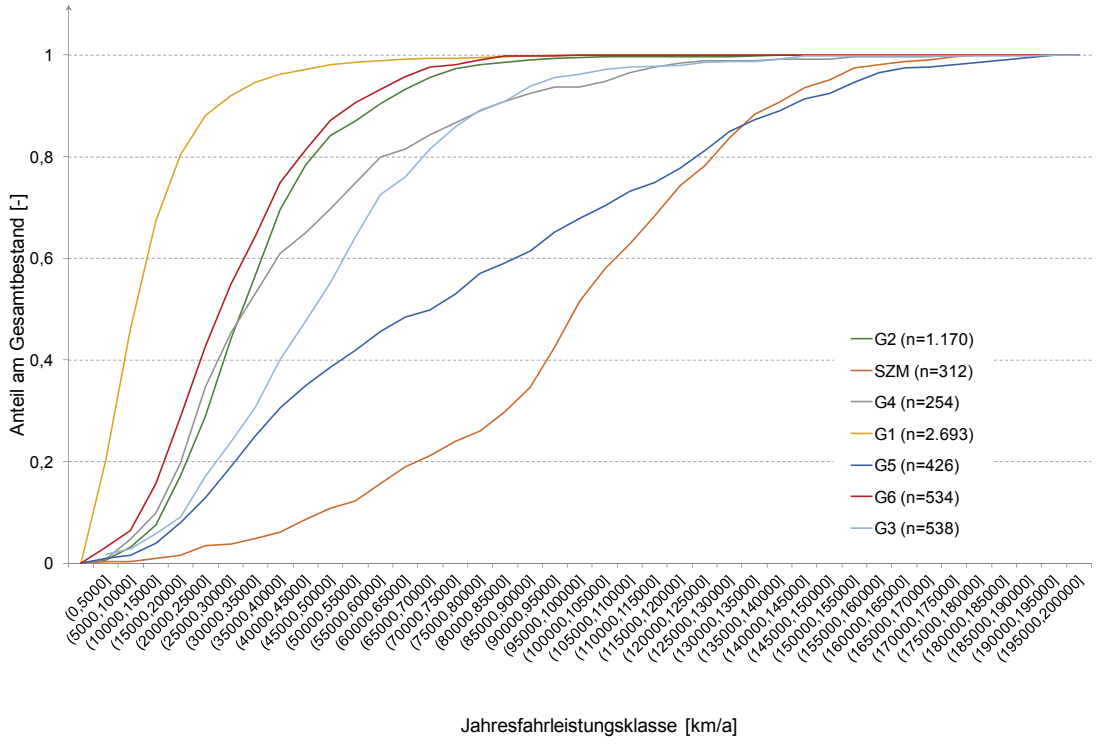


Abbildung A- 2: Kumulierter Anteil von Fahrzeugen nach Jahresfahrleistungsklassen am Gesamtbestand (Fahrzeuge aus der Erhebung Kraftverkehr in Deutschland (KiD 2010) ergänzt um Gebrauchtfahrzeuge von truckscout24 – www.truckscout24.de)

A.3.2 Kraftstoffpreise

Die zukünftige Preisentwicklung der Kraftstoffe wird in dieser Arbeit auf Basis der Rohölpreisprognosen der IEA ermittelt. Um die Preisentwicklungen zu koppeln ist zunächst zu prüfen, ob beide Preisentwicklungen positiv korrelieren. Abbildung A- 3 zeigt die Verläufe der Rohölpreise in Dollar und Euro und der Produktenpreise von Dieselkraftstoff über einen Zeitraum von zehn Jahren.

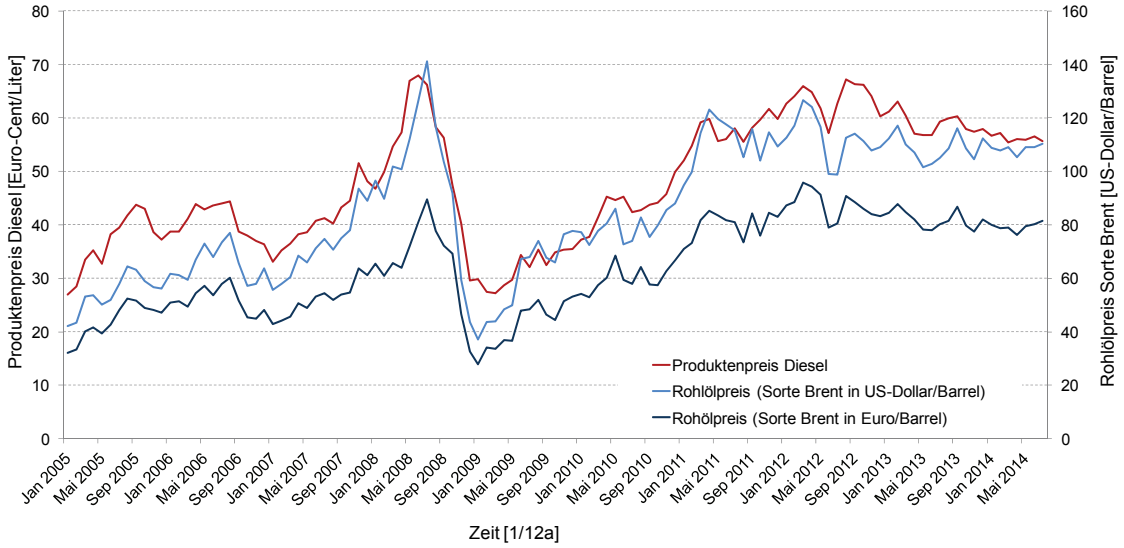


Abbildung A- 3: Entwicklung der nominalen Rohölpreise (Berechnung der Euro-Werte durch den tagesaktuellen Wechselkurs) und des Diesel-Produktenpreis (vgl. Mineralölwirtschaftsverband (MWV) 2015)

Die Ermittlung der Korrelationskoeffizienten zwischen Rohölpreis und Diesel-Produktenpreis ergab folgende Werte:

- *Korrelation zwischen Produktenpreis Diesel (x) und Rohölpreis (US-Dollar) (y): Kor (x,y) = 0,96*
- *Korrelation zwischen Produktenpreis Diesel (x) und Rohölpreis (Euro) (z): Kor (x,z) = 0,95*

Somit korreliert der Produktenpreis des Dieselkraftstoffes sowohl stark positiv mit dem Rohölpreis in Dollar als auch in Euro.

Der nominale Preisverlauf des Netto-Dieselpreises stellt die historische Entwicklung dar. Die Inflation ist ein Maß zur Darstellung von Preissteigerungen. Um herauszufinden, ob die Kraftstoffpreise in den letzen Jahren stärker oder schwächer als andere Preise gestiegen sind, lassen sich die nominalen Preise unter Zuhilfenahme der Inflationsrate in reale Preise umrechnen. Steigen die realen Kraftstoffpreise, so verteuert sich Diesel überdurchschnittlich. Gleiches gilt vice versa. Da Speditionen die Kraftstoffpreise vermutlich eher in Relation zu güterverkehrsrelevanten Kosten betrachten, wurden die nominalen Dieselpreise nicht mit der allgemeinen Inflationsrate sondern mit dem Erzeugerpreisindex für Straßengüterverkehr des Statistischen Bundesamtes in reale Preise umgerechnet. Die sich daraus ergebende reale Preisentwicklung ist in Abbildung A- 4 dargestellt. Im Vergleich zum Jahr 2005 stiegen demnach die realen Kraftstoffpreise kaum an.

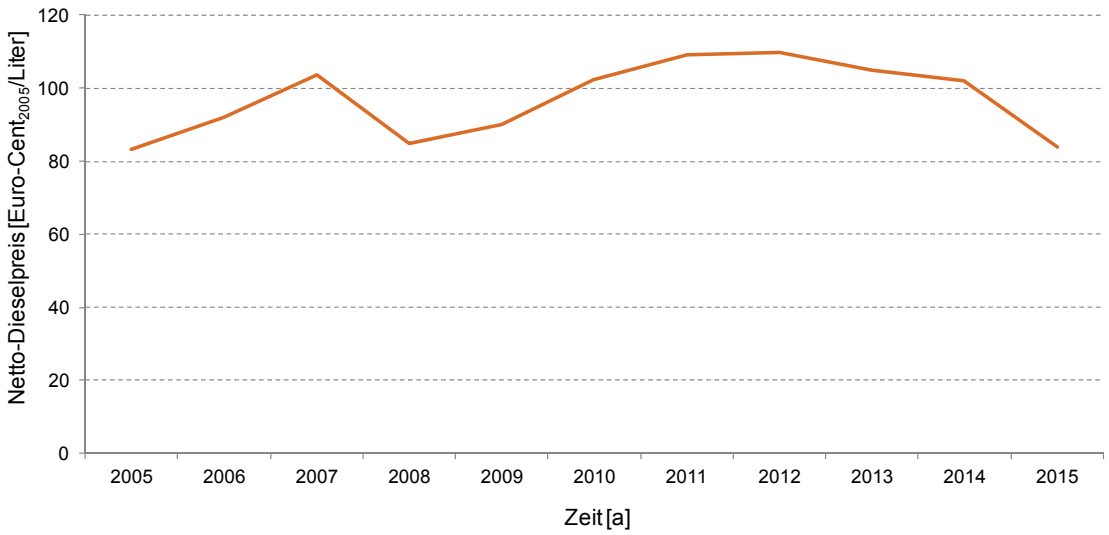


Abbildung A- 4: Entwicklung des realen Netto-Dieselpreises (deflationiert mit Erzeugerpreisindex Straßengüterverkehr; Basisjahr 2005)

A.3.3 Bestimmung der Restwerte von Nutzfahrzeugen

Als Restwert wird der Wert eines Nutzfahrzeuges bezeichnet, der am Ende der Nutzungsperiode auf dem Gebrauchtwagenmarkt erzielt werden kann. Auf Basis einer Stichprobe von Gebrauchtfahrzeugen mit Angaben zu der Jahresfahrleistung und dem Preis (siehe Abbildung A- 5) wurden mit Hilfe der Kleinste-Quadrate-Methode die Parameter für Gleichung A1 ermittelt.

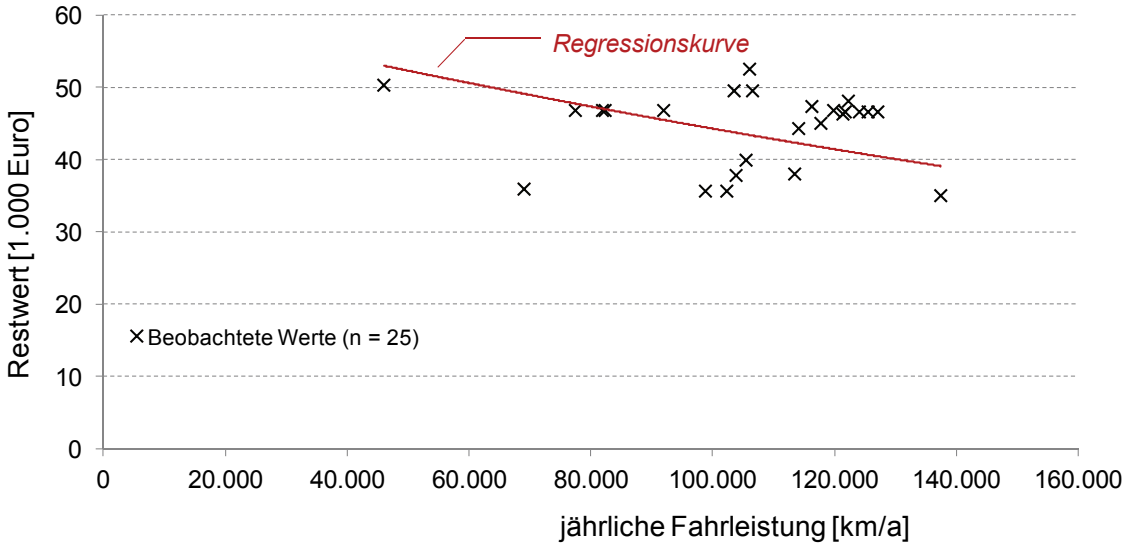


Abbildung A- 5: Regressionsanalyse für Nutzfahrzeug-Restwerte

$$\ln RW = \alpha + \beta_1 \times T + \beta_2 \times \frac{JLL}{12} + \beta_3 \times \ln P + \varepsilon \qquad (A1)$$

mit

RW: *Restwert des Fahrzeuges*
T: *Alter des Fahrzeuges (Haltedauer)*
JLL: *Jahresfahrleistung*
P: *Neupreis*

Der Kleinste-Quadrate-Ansatz (KQ) stellt eine Methode zur Parameterschätzung einer linearen Regression dar. Dabei werden die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen Schätzfunktion und beobachteten Werten minimiert (vgl. Fahrmeir et al. 2011, S. 480). Dabei ergaben sich folgende Werte:

$\alpha = 0{,}93948$, $\beta_1 =$ -0,00437, $\beta_2 =$ -0,00004, $\beta_3 = 0{,}91569$, $\varepsilon = 0$.

Gleichung A1 liefert unter Berücksichtigung dieser Parameter den logarithmierten Wert des Restwertes eines Nutzfahrzeuges abhängig vom Alter und der Fahrleistung. Die Summe aller Abweichungen zwischen den in Gleichung A1 berechneten Werten und den beobachteten Restwerten ist mit der Verwendung dieser Parameter minimal. Somit eignet sich diese Gleichung um Restwerte für sämtliche Kombinationen aus Fahrleistung und Alter abzuschätzen.

A.4 Motive für Produktionsverlagerungen

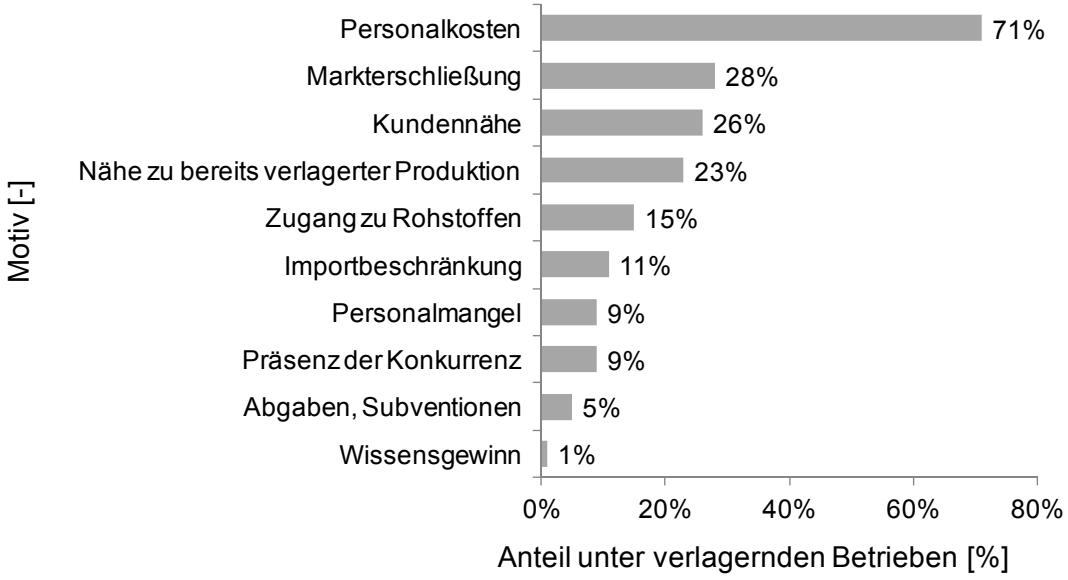


Abbildung A- 6: Motive für Produktionsverlagerungen ins Ausland (Zanker et al. 2013, S. 9)

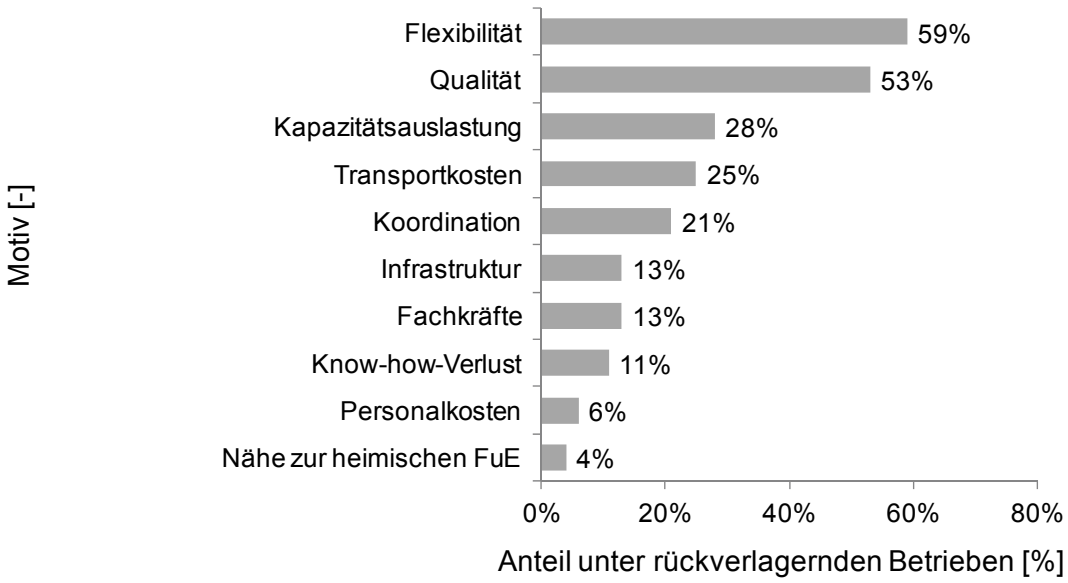


Abbildung A- 7: Motive für eine Rückverlagerung von Produktionskapazitäten aus dem Ausland nach Deutschland (Zanker et al. 2013, S. 10)

In der Diskussion über die Reduktion transportbedingter Umweltwirkungen werden ökologische und ökonomische Zielsetzungen oft für unvereinbar gehalten. Diese Arbeit vergleicht drei Szenarien der Regionalisierung von Automobilzulieferern. Durch eine systemdynamische Simulation wird gezeigt, dass durch die Standortverlagerung von Tier-1-Zulieferern in lokale Zulieferparks sowohl positive ökologische als auch ökonomische Effekte entstehen können.

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI untersucht Marktchancen technischer Entwicklungen und deren Auswirkungen auf Wirtschaft, Staat und Gesellschaft. Die interdisziplinären Forschungsgruppen konzentrieren sich auf neue Technologien, Industrie- und Serviceinnovationen, Energiepolitik und nachhaltiges Wirtschaften sowie auf die Dynamik regionaler Märkte und die Innovationspolitik.

Fraunhofer ISI

FRAUNHOFER VERLAG

ISBN 978-3-8396-1116-6