

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Entwicklung eines Ansatzes zur CO2-Footprint-Optimierung von Logistikstrukturen und -prozessen unter besonderer Berücksichtigung der e-mobility

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1 Technische Universität München - Forschungsinstitut Unternehmensführung, Logistik und Produktion

Nr.2 Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg - Institut für Produktionswirtschaft

Das IGF-Vorhaben 17566 BG der Forschungsvereinigung Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.(IUTA) wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

München, 05.06.2014

Ort, Datum

Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Horst Wildemann,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Specht

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Die Autoren



Horst Wildemann

Univ.-Prof. Dr. Dr. h. c. mult.

Forschungsinstitut Unternehmens-
führung, Logistik und Produktion
Technische Universität München



Dieter Specht

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.

Institut für Produktionswirtschaft
Brandenburgische Technische
Universität Cottbus-Senftenberg

Die Mitarbeiter



Fabian Fischer

M. Sc.

Technische Universität München



Marc Gebauer

Dipl.-Ing.

Brandenburgische Technische
Universität Cottbus-Senftenberg



Jesco Gumprecht

M.Sc., B.Eng.

Technische Universität München



Mandy Hermann

M. Sc.

Brandenburgische Technische
Universität Cottbus-Senftenberg



Thorsten Lützel

Dipl.-Kfm.

Technische Universität München



Moritz Seidenader

M.Sc.

Technische Universität München



Thomas Wolff

Dipl.-Ing.

Technische Universität München

Vorwort

Die zunehmende Verknappung der natürlichen Ressourcen und der damit einhergehende Anstieg der Rohstoffpreise sowie die voranschreitende Klimaerwärmung stellen eine wachsende Herausforderung für produzierende Unternehmen dar. Gleichzeitig findet eine Verschärfung des Umweltbewusstseins der Bevölkerung und damit der Kunden statt. Allein im Jahr 2012 entfielen 23 Prozent aller CO₂-Emissionen in Europa auf den Transport- und Logistiksektor. Deutschland hat sich dazu verpflichtet seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 gegenüber 1990 um 40 Prozent zu senken. Vor dem Hintergrund, dass der Transport von Gütern einen wesentlichen Anteil der CO₂-Emissionen ausmacht, stellt die CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik einen wesentlichen Hebel zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes dar. Bislang fehlt Unternehmen eine gezielte Untersuchung der Haupttreiber von CO₂-Emissionen in der Logistikkette, eine strukturierte Vorgehensweise zur Ermittlung des eigenen CO₂-Footprints sowie Strategien zur gezielten Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in der Logistik. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde daher die CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik untersucht. Das Forschungsvorhaben greift praktische und theoretische Defizite auf und stellt, auf Basis von Expertengesprächen und Workshops sowie theoretischen Analysen, eine praxistaugliche CO₂-Footprint-Optimierung dar. Es werden die Treiber von CO₂-Emissionen in der Logistikkette untersucht, eine Vorgehensweise zur CO₂-Footprint-Ermittlung vorgestellt und in Form eines IT-Tools operationalisiert. Die erarbeiteten Normstrategien helfen Unternehmen zielgerichtet Ihre CO₂-Emissionen in

der Logistikkette zu reduzieren. Das Forschungsprojekt wurde in enger Zusammenarbeit mit den Partnerunternehmen durchgeführt.

Für die produktiven und aufschlussreichen Diskussionen, Beiträge und Anregungen in den Expertengesprächen und Workshops bedanken wir uns bei allen Experten aus Theorie und Praxis. Unser Dank gilt den Unternehmen Arktik GmbH, Autohaus Strube GmbH, BALTH. PAPP Int. Lebensmittellogistik KG, BOSIG Baukunststoffe GmbH, BMW Group, DB FuhrparkService GmbH, DB Schenker, Deutsche Post AG, Diehl Metal Applications GmbH, EDAG GmbH & Co. KGaA, EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG, e-Wolf GmbH, FINE Mobile GmbH, Group 7 AG, Johnson Controls Inc., Siemens AG, TachoEASY GmbH, TÜV Süd AG, Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG.

Bei den Mitarbeitern Herrn Fabian Fischer, M.Sc., Herrn Dipl.-Ing. Marc Gebauer, Herrn Jesco Gumprecht, M.Sc., Frau Mandy Hermann, M.Sc., Herrn Dipl.-Kfm. Thorsten Lützel, Herrn Moritz Seidenader, M.Sc., und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Wolff bedanken wir uns herzlich für die Unterstützung bei der Forschungsarbeit und für die Erstellung des Schlussberichts.

München und Cottbus, 01. Juni 2014

Dieter Specht

Horst Wildemann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	5
0 Zusammenfassung der Ergebnisse	8
1 Einleitung	20
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	20
1.2 Stand der Forschung	30
1.3 Vorgehensweise	49
2 Charakterisierung des Forschungsvorgehens	53
2.1 Hypothesen	53
2.2 Empirische Basis	59
2.2.1 Fallstudienanalyse	59
2.2.2 Expertengespräche	63
2.2.3 Workshops	68
2.3 Ableitung der Forschungsfragen	73
3 CO ₂ -Emissionen in der Logistik	75
3.1 Abgrenzung der Logistik und des Prozessmodells	75
3.2 Logistikprozesse	79
3.2.1 Beschaffungslogistik	80
3.2.2 Produktionslogistik	84
3.2.3 Distributionslogistik	87
3.2.4 Entsorgungslogistik	91
3.2.5 Rückführungslogistik	92

3.2.6	Handelslogistik.....	94
3.2.7	Logistik der „letzten Meile“	96
3.2.8	City-Logistik	98
3.3	CO2-Emissionsträger in der Logistik.....	101
3.4	Zusammenfassung der CO2-Relevanz in der Logistik.....	112
4	CO2-Footprint in der Logistik	114
4.1	Analyse der angebotenen Tools	120
4.2	Ermittlung des CO2-Footprints.....	136
4.3	Berechnungsmodell nach DIN EN 16258.....	146
4.4	IT-Tool-Umsetzung und Leitfaden zur Anwendung .	156
4.5	Exemplarische Berechnungen anhand von Fallstudien	163
4.6	Lessons Learned	193
5	Strategien zur CO2-Reduzierung in der Logistik	198
5.1	Einführung rollwiderstandsarmer Reifen.....	198
5.2	Verbesserung der Aerodynamik.....	218
5.3	Substitution konventioneller Antriebe durch E-Antriebe	221
5.4	Minimierung der Leerfahrten durch Internetportale ..	230
5.5	Optimierung der Containerbeladung und Behältersysteme.....	234
5.6	Milkrun-Konzept	239
5.7	Fahrertrainings.....	245
5.8	Reduzierung von Sonderfahrten.....	248

5.9	Qualitätsmanagement in der Logistik	251
5.10	Strukturentscheidungen	258
5.11	Fremdbezug logistischer Leistungen.....	262
5.12	Informationsflussgestaltung	264
5.13	CO2-Kompensation.....	270
5.14	Verlagerung des Transports auf die Schiene.....	272
5.15	Warenstromverteilung auf effiziente Verkehrsträger	274
6	Abbildungsverzeichnis	278
7	Anhang.....	283
8	Literaturverzeichnis.....	308
9	Stichwortverzeichnis	334

0 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die fortschreitende Globalisierung und Urbanisierung lassen das Handelsvolumen und somit auch das Transportaufkommen weiter ansteigen. Im Rahmen des zunehmenden öffentlichen Interesses an der Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit steigt auch die Nachfrage nach einer umweltorientierten Logistik. Das prognostizierte Wachstum des Transportvolumens spiegelt sich in zunehmenden Treibhausgasemissionen im Transportsektor wider und hat somit einen direkten Einfluss auf den Treibhauseffekt und Klimawandel. Die hohe Wertschätzung der Verbraucher, der Druck durch Nichtregierungsorganisationen sowie regulatorische Eingriffe führen dazu, dass viele Unternehmen den grundsätzlichen Handlungsbedarf erkennen und eine Reduzierung ihrer CO₂-Emissionen anstreben. Als entscheidender Hebel zur Reduzierung von CO₂-Emissionen gewinnt für Unternehmen vor allem die Betrachtung der Logistikkette immer mehr an Bedeutung – gerade vor dem Hintergrund der fortschreitenden Globalisierung und internationaler Arbeitsteilung. Jedoch stößt das Vorhaben der Unternehmen die eigenen CO₂-Emissionen zu reduzieren schnell an seine Grenzen, da ein grundlegendes Verständnis zur Entstehung von CO₂-Emissionen fehlt sowie Ursachen und Wirkungen des CO₂-Ausstoßes bislang zu unsystematisch erfasst werden, um gezielt Reduzierungsmaßnahmen ableiten zu können. Das Forschungsvorhaben „CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik“ hat diese Problemstellung aufgegriffen und praxistaugliche Lösungsansätze zur Berechnung und Reduzierung von CO₂-Emissionen erarbeitet, welche die Ableitung von Maßnahmen zur CO₂-Footprint-Optimierung ermöglichen. Unter dem CO₂-

Footprint ist die Menge des Äquivalenzgewichts an Kohlendioxid (CO₂) und anderen Treibhausgasen zu verstehen, die durch den Energieverbrauch in Verbindung mit einem Prozess einschließlich aller relevanten vor- und nachgelagerten Prozesse entsteht und in die Atmosphäre gelangt. CO₂ entsteht in nahezu allen Wirtschaftsprozessen. Es spiegelt dabei den Energieverbrauch in den jeweiligen Prozessen wider, denn in Abhängigkeit vom Energieträger, verhalten sich CO₂-Emissionen nahezu direkt proportional zum Energieverbrauch. Bei der Verbrennung fossiler Energieträger ist auch die Zusammensetzung der Kraftstoffe zu berücksichtigen. So wird etwa bei Biodiesel eine andere Menge an Schadstoffen emittiert als bei Diesel ohne Biokraftstoffanteil. Wird aufgrund einer größeren Wegstrecke mehr Kraftstoff verbraucht, steigen die Emissionen an Treibhausgasen in gleichem Maße. Dies bedeutet auch, dass der Ausstoß von CO₂-Emissionen den für die jeweiligen Energieträger entstehenden Kosten direkt proportional gegenüber steht. Wird mehr Energie verbraucht, steigen die Kosten für eine Logistikleistung und auch der Ausstoß von CO₂. Ein Ansatz zur Reduzierung der CO₂-Emissionen hat somit direkt Einfluss auf die Kostenstruktur in der Logistik. Dies bedeutet umgekehrt aber auch, dass steigende Kraftstoffkosten einen Anreiz darstellen, die Optimierung des CO₂-Fußabdrucks in der Logistik voranzutreiben. Die Identifikation der bedeutendsten Treiber von Treibhausgasemissionen deckt hierbei ebenfalls wichtige Kostenpositionen auf. Eine Transportdienstleistung per Flugzeug ist in gleichem Maße teuer wie energieineffizient im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern wie der Bahn oder dem Binnenschiff. Letztgenannte Verkehrsträger sind ebenfalls deutlich CO₂-effizienter als das Flugzeug als Transportmodus. Es fehlt vielen

Unternehmen jedoch an Kenntnissen wo CO₂-Emissionen in der Wertschöpfungskette im Allgemeinen und in der Logistik im Speziellen entstehen. Als problematisch erweisen sich dabei etwa unterschiedliche Größenklassen von Verkehrsträgern wie bei LKW, welche zwischen drei und bis zu 40 Tonnen schwer sein können. Auch ist die Allokation von CO₂ auf einzelne Transportgüter bei Sammelfahrten komplex und unterscheidet sich individuell je nach Transportleistung. Wenn Unternehmen die Kenntnis über die CO₂-Entstehung in der eigenen Logistikkette jedoch fehlt, kann der CO₂-Ausstoß nicht verlässlich ermittelt werden und somit fehlt auch die Indikation zur Ermittlung wichtiger Kostentreiber. Expertengespräche und Fallstudien, welche im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführt wurden lassen zudem darauf schließen, dass Unternehmen im Vergleich zu Firmen, welche keine gezielte Ermittlung von CO₂-Emissionen durchführen häufiger Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung anwenden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass wenn die Hebel zu einer systematischen Reduzierung des CO₂-Footprints nicht bekannt sind, diese auch nicht sinnvoll betätigt werden können. Vor allem kleine und mittelständische Unternehmen verfügen jedoch nicht über das Methodenwissen und die Kapazitäten eine eigene Messsystematik zu implementieren. Dabei ist zu beachten, dass der CO₂-Footprint sowohl einzelnen Produkten oder Dienstleistungen als auch Unternehmen als Ganzes zugerechnet werden kann. Der logistische CO₂-Footprint bezieht sich auf eine Logistikdienstleistung und kann auf ein einzelnes Transportgut heruntergebrochen werden oder aber aggregiert zu einem Unternehmensfootprint zusammengefasst werden. Unabhängig vom Betrachtungsfokus ist zur Bewertung der CO₂-Emissionen für Unternehmen zunächst ent-

scheidend die Systemgrenzen und somit den Rahmen der Betrachtung festzulegen. Dies ist Grundvoraussetzung für die Vergleichbarkeit von CO₂-Emissionen verschiedener logistischer Lösungen. Dabei erlaubt eine prozessorientierte Perspektive auf die Logistikkette eine ganzheitliche, am Material- und Informationsfluss orientierte Betrachtung der Logistik. Das so entstandene Prozessgerüst dient als Orientierungshilfe, insbesondere für Anwender aus kleinen und mittelständischen Unternehmen zur Identifikation von CO₂-Verursachern und Einsparungspotenzialen in den logistischen Prozessen. Hierzu sind neben den Kernprozessen Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik auch Spezialprozesse wie die Rückführungs-, Handelslogistik, Logistik der letzten Meile und City-Logistik bei der CO₂-Reduzierung zu berücksichtigen. Eine Systematisierung von CO₂-Emissionsverursachern und Einsparpotenzialen in den einzelnen Logistikprozessen ermöglicht das Aufzeigen von Handlungsfeldern. Entscheidend an dieser Stelle ist, dass erst über die Messbarkeit effiziente Reduzierungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Bislang fehlt eine standardisierte und praxistaugliche Methode zur Messung und Berechnung des CO₂-Footprints. Zwar sind in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze und Berechnungstools entwickelt worden, ein Standard hat sich jedoch nicht etablieren können, sodass zusätzlich zum Fehlen eines einheitlichen Begriffsverständnisses auch die unternehmensübergreifende Vergleichbarkeit von CO₂-Emissionen nicht gewährleistet ist. Dies hindert Unternehmen an der Durchführung einer ganzheitlichen und systematischen CO₂-Footprint-Optimierung und verringert das Bewusstsein für eine nachhaltige Logistik. Mithilfe einer einheitlichen Berechnungssystematik sind Unternehmen im Stande

ihre Umwelteinflüsse durch CO₂-Emissionen zu bilanzieren und damit die Auswirkungen der Logistik ökologisch wie ökonomisch transparent darzustellen. Die Identifikation und Systematisierung von Stellhebeln zur CO₂-Footprint Optimierung unterstützt Unternehmen des produzierenden Gewerbes sowie Logistikdienstleister bei der Anwendung nachhaltiger Verbesserungsansätze und dem gezielten Einsatz von Optimierungshebeln zur Reduzierung von CO₂-Emissionen. Denn auf Grundlage von detaillierten Informationen lassen sich nachhaltige und damit wettbewerbsfähige Entscheidungen treffen. Die empirischen Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Optimierung der Logistik und damit eine Reduzierung der CO₂-Emissionen anhand von drei Ansätzen verfolgt werden kann. Diese Gestaltungsbereiche sind die Logistikstrukturen, -prozesse und -konzepte. Dies bedeutet, dass für die Optimierung des CO₂-Footprints in der Logistik neben technologischen Ansätzen wie etwa dem Einsatz von E-Fahrzeugen auf der letzten Meile ebenfalls der Aufbau von Logistikstrukturen und der Ablauf von Logistikprozessen einen direkten Einfluss auf die Emissionen von Treibhausgasen in der Logistik haben. Im Zuge technischer Entwicklungen werden in Zukunft auch alternative Transportmittel wie elektrische Nutzfahrzeuge weiter an Bedeutung gewinnen. So behandeln technische Maßnahmen am Fahrzeug die Möglichkeit zur Effizienzsteigerung durch Treibstoffeinsparung mit entsprechend positiver Wirkung auf die CO₂-Emissionen. Hierzu zählen die Einführung rollwiderstandsarmer Reifen, die Verbesserung der Aerodynamik sowie die Substitution konventioneller Antriebe durch E-Antriebe. Die Senkung des Rollwiderstands der Reifen erfolgt durch eine Veränderung der Laufstreifengeometrie und der Reifenkontur.

Auch ein korrekter Reifenfülldruck trägt zu einem verminderten Rollwiderstand bei. Ein weiterer Ansatz zur Senkung der CO₂-Emissionen liegt im Bereich der Elektromobilität. Bei der E-Mobility für Nutzfahrzeuge ist zwischen Hybridtechnologie und rein elektrischen Antrieben zu differenzieren. Batterieelektrische Fahrzeuge befinden sich bereits erfolgreich im täglichen Gebrauch bei Kurier-, Express- und Paketdienstleistern vor allem im Bereich der City-Logistik. Die dabei zurückgelegten Touren liegen stets innerhalb der Reichweite der Fahrzeuge, so dass die Vorteile lokal emissionsfreier Transporte voll genutzt werden können. Diese und andere alternative Antriebskonzepte können einen wichtigen Beitrag zur CO₂-Footprint-Optimierung leisten. Logistikstrukturen etwa können hinsichtlich des CO₂-Footprints durch den Einsatz spezialisierter Logistikdienstleister verbessert werden. Diese können Skaleneffekte im Transport wesentlich besser nutzen als die meisten Einzelunternehmen aus dem produzierenden Gewerbe. Ferner können sie auf Strukturen zurückgreifen die beispielsweise einen Warenumschlag oder eine Kommissionierung vereinfachen und diese effizienter gestalten. Die erhobenen Fallstudien zeigten zudem, dass weiteres Verbesserungspotenzial in den Logistikprozessen zu erwarten ist. Die Prozessoptimierung geht häufig mit der ökonomischen Kostenreduzierung einher. Ein Beispiel ist die Verpackungsoptimierung. Hierbei steht die Minimierung des Verpackungsmaterials im Vordergrund, was zum einen zur Konsequenz hat, dass das Verpackungsvolumen sinkt und zum anderen die Transportkapazitäten besser ausgenutzt werden können. Eine weitere Logistikprozessoptimierungsmaßnahme ist das Erzielen von Skaleneffekten durch die Bündelung von Transporten. Vorteil einer Transportkonsolidierung

ist, dass Transportdienstleister in die Lage versetzt werden Linienverkehre oder Sammeltouren aufzustellen, die einen höheren Auslastungsgrad ermöglichen. Diese Vorgehensweise ist im Bahn- und Schiffsverkehr vielfach bereits Standard. Neben dem Auslastungsgrad beschreibt der Anteil an Leerfahrten ebenfalls die Effizienz der durchgeführten Logistikprozesse. Leerfahrten dienen nicht der Bereitstellung von Ressourcen oder Gütern und sind daher aus ökonomischer wie ökologischer Sicht möglichst zu vermeiden. Daher steigert jede Leerfahrt direkt den CO₂-Footprint einer Transportleistung, denn die Leerfahrten müssen in der Allokation des CO₂-Footprints einzelner Transportgüter berücksichtigt werden. Eine weitere Maßnahme zur Optimierung der Logistikprozesse stellt der Einsatz alternativer Transportmittel oder die Kombination mehrerer Verkehrsträger in einem multimodalen Transportsystem dar. Gerade Verkehrsträger wie das Binnenschiff oder die Bahn sind gegenüber dem klassischen Straßentransport oder Flugverkehr hinsichtlich der CO₂-Emissionen pro Tonnenkilometer Transportleistung deutlich überlegen. Jedoch verfügen diese Verkehrsträger über Schwächen hinsichtlich ihrer räumlichen Flexibilität und ihrer Durchschnittsgeschwindigkeiten. Es kommt daher für die Logistikplaner auf eine geschickte Kombination der einzelnen Verkehrsträger an, um sowohl die ökonomischen Zielsetzungen hinsichtlich der Logistikleistung zu erreichen und gleichzeitig CO₂-Verbesserungspotenziale zu nutzen. Hierbei weisen mehrstufige Logistikstrukturen durch die Möglichkeit zur Konsolidierung von Frachten Vorteile auf, da sich auf diese Weise im Hauptlauf die Auslastung der Transportmittel erhöhen lässt und die Anzahl an Fahrten gesenkt werden kann. Dies gilt insbesondere für internationale Transporte, bei denen die Güter gro-

ße Distanzen zurücklegen. Vor- und Nachlauf, welcher meist mit LKW erfolgt, sollte so gering wie möglich gehalten werden. Weitere Strategien zur Senkung der CO₂-Emissionen beschäftigen sich mit einer Erhöhung der Auslastung der Fahrzeuge sowie einer Reduzierung der zurückgelegten Strecken durch den Einsatz von Informationstechnologien. Hierzu zählt auch eine Vermeidung von Sonderfahrten und Leerfahrten. So können die Leerfahrten durch Internetportale reduziert werden, welche Angebot und Nachfrage nach Transportdienstleistungen synchronisieren. Transport- und Logistikunternehmen bieten hierbei ungenutzten Laderaum an, um so eine höhere Auslastung ihrer Fahrzeuge zu erreichen und die Leerfahrten zu verringern. Der Einsatz moderner Technologien zum Informationsaustausch ist damit eine wichtige Grundlage zu einer flächendeckenden Reduzierung der CO₂-Emissionen in der Logistik. Hierzu zählen auch Technologien wie RFID, welche eine Echtzeitverfolgung von Sendungen ermöglichen. Eine Reduzierung von Sonderfahrten ist unter anderem durch eine erhöhte Planungsgenauigkeit zu erreichen. Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglichen es hierbei, beispielsweise die Marktnachfrage in Echtzeit beim Kunden zu erfassen. Diese Informationen kann beispielsweise der Lieferant nutzen, um Abweichungen zu seinen Prognosen zu erkennen und frühzeitig seine Produktionspläne anzupassen. Auch für die anderen Aufgaben entlang der Logistikkette ist eine hohe Verfügbarkeit und Qualität der Informationen wichtig. Die Informationsbereitstellung erfolgt zwischen dem Abnehmer, seinen Lieferanten und den Logistikdienstleistern, wodurch eine vereinfachte und effiziente Anpassung der Versorgung an die Erfordernisse des Abnehmers angestrebt wird. Durch geringe Reaktionszeiten der

Geschäftspartner sowie eine robuste Informationsübertragung lassen sich Störungen schnell beheben und Planungsfehler zügig ausgleichen. Dies reduziert ebenfalls die Sonderfahrten und wirkt sich daher positiv auf den CO₂-Footprint aus. Neben den geschilderten Verfahren zur vorbeugenden Reduzierung der CO₂-Emissionen lässt sich der CO₂-Footprint auch durch Kompensationsmaßnahmen verbessern. Dies kann durch Projekte zum Klimaschutz erfolgen, beispielsweise durch den Bau eines Windparks oder einer Wasserkraftanlage in Schwellenländern. Durch die Unterstützung solcher Projekte erhalten die Unternehmen Emissionszertifikate, welche sie dazu berechtigen, eine bestimmte Menge an Treibhausgasen zu emittieren. Die untersuchten Optimierungsmaßnahmen zeigen, dass nicht nur Maßnahmen zur Logistikeffizienzsteigerung einen Einfluss auf den CO₂-Footprint haben. Vielmehr geht es um das Zusammenspiel aus dem Einsatz technologischer Möglichkeiten wie dem unternehmensübergreifenden Informationsaustausch in Echtzeit oder dem Einsatz von Elektrofahrzeugen in der Lieferkette sowie durch den Einsatz von Emissionszertifikaten und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung gleichermaßen, um eine Reduzierung der CO₂-Emissionen in der Logistik zu erreichen. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens lassen sich zu folgenden Kernaussagen zusammenfassen:

1. CO₂-Emissionen entstehen überwiegend bei der Bereitstellung von Energie und der Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Bezogen auf die CO₂-Emissionen in der Logistik korrelieren sie linear mit dem Energieverbrauch und hängen stark von der Art des Energieträgers ab. Aufgrund des Übergewichts der durch Transport verursachten CO₂-Emissionen steht die Berechnung von

Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Gütertransport im Mittelpunkt der CO₂-Reduzierung in der Logistik. Anhand der durchgeführten Untersuchungen zur Entstehung von CO₂-Emissionen in der Logistikkette, konnte die Entstehung von CO₂-Emissionen systematisiert werden, welche Unternehmen einen Überblick über die Haupttreiber des CO₂-Ausstoßes in den einzelnen Logistikabschnitten bietet. Weiterhin zeigt sich, dass Unternehmen mit einer CO₂-Emissionsreduzierung – vor allem durch die Reduzierung des Verbrauchs von fossilen Brennstoffen – Kosten einsparen können.

2. Die Ermittlung des CO₂-Footprints einer Logistikkette ist jeweils an die Gestaltungsfelder der Beschaffungs-, Produktions-, Distributions-, Entsorgungs-, Rückführungs-, Handels-, City-Logistik sowie die der Logistik der „letzten Meile“ anzupassen. Über die Verwendung des Logistikprozessmodells ist eine detaillierte Analyse aller Abschnitte der Logistikkette möglich und erlaubt eine gezielte Ableitung von Reduzierungsmöglichkeiten. Dabei unterscheidet sich die Eignung verschiedener Optimierungsstrategien je nach betrachtetem Logistikprozess.
3. Ein strukturiertes Bewertungsmodell nach DIN 16258 zur Ermittlung des CO₂-Footprints liefert Unternehmen Aussagen über die CO₂-Emissionen und Energieverbräuche der eigenen Logistikkette. Basis der Berechnungen ist ein entfernungsbasierter Ansatz, welcher anwendungsfreundlicher und praktikabler im Vergleich zum verbrauchsorientierten Ansatz ist. Die Nutzung einer standardisierten Methode zur Ermittlung und Bewertung

des CO₂-Footprints in der Logistik gewährleistet die Vergleichbarkeit des CO₂-Footprints verschiedener Logistikketten. Mittels Szenarioanalyse können Unternehmen alternative Routen und Transportmodalitäten simulieren, um unter den gegebenen Restriktionen einen CO₂-effizienten Transport zu erreichen. Mit Hilfe des Bewertungsmodells können Unternehmen die Potenziale zur Reduzierung von CO₂-Emissionen ihrer Logistikkette abschätzen. Die gewonnene Transparenz unterstützt Unternehmen bei der gezielten Auswahl der Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung.

4. Normstrategien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen in der Logistik ermöglichen es Unternehmen trotz der hohen Individualität der verschiedenen Logistikprozesse Maßnahmen zu systematisieren. Hierzu zählen verschiedene Ansätze aus den Bereichen Fahrzeuge und Antriebe, Transport- und Lieferkonzepte, Informationsvernetzung sowie CO₂-Kompensation. Diese sind hinsichtlich ihres Beitrags zur Senkung des CO₂-Ausstoßes in der gegebenen Situation zu bewerten und auszuwählen. Die erarbeiteten Strategien helfen Unternehmen zielgerichtet ihren CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Eine sinnvolle Ableitung von Handlungsoptionen für Unternehmen im E-Mobility Umfeld ist gegeben.
5. Die Operationalisierung des Bewertungsmodells in einem IT-Tool ermöglicht es die Ergebnisse der Modellbildung direkt zu nutzen. Das IT-Tool trägt zur zukünftigen Optimierung des CO₂-Footprints in der Logistik bei und gewährleistet damit den Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis.

Zum Transfer der Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden Workshops mit zahlreichen Unternehmen durchgeführt. Zudem wurden die Forschungsergebnisse online über Newsletter veröffentlicht. Außerdem erfolgte die Vorstellung und Diskussion der Inhalte und Ergebnisse des Forschungsprojekts auf Kolloquien und Expertengesprächen. Das IT-Tool zur CO₂-Footprint-Berechnung steht interessierten Unternehmen kostenlos im Internet unter folgender Website zur Verfügung:

<http://www.tools.bwl.wi.tum.de/co2-footprint/>

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der letzte Klimabericht der Vereinten Nationen warnt vor einem weiteren Anstieg der durchschnittlichen Ozean- und Erdoberflächentemperatur, den Konsequenzen schmelzender Gletscher, dem Anstieg des Meeresspiegels sowie einer Häufung von Naturkatastrophen. Im Rahmen der Diskussionen über Verantwortlichkeiten und mögliche Gegenmaßnahmen zum Klimawandel ist vor allem die Senkung der durch die Menschen verursachten Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emissionen in das Blickfeld der Betrachtung gerückt. Hier spielt vor allem der Transportsektor eine bedeutende Rolle. Das weltumspannende Transportnetz hat erhebliche negative Auswirkung (vgl. Koch 2012). Es ist davon auszugehen, dass die fortschreitende Globalisierung und Urbanisierung das Handelsvolumen und somit auch das Transportaufkommen weiter stark ansteigen lassen. Das prognostizierte Wachstum wird sich in steigenden Treibhausgasemissionen widerspiegeln und somit direkten Einfluss auf Treibhauseffekt und Klimawandel haben. Untersuchungen des Intergovernmental Panel on Climate Change haben ergeben, dass sich die globale Durchschnittstemperatur seit Beginn der instrumentellen Wetteraufzeichnung im Jahr 1850 bis zum Jahr 2014 um bis zu 0,85°C erhöht hat. Zwar ist die genaue Ursache für den Temperaturanstieg nicht abschließend geklärt, dennoch besteht in der Wissenschaft weitgehende Einigkeit darüber, dass die Klimaerwärmung der letzten 50 Jahre nicht ausschließlich natürlichen Ursprungs war, sondern geprägt wurde durch den Einfluss des Menschen (vgl. Intergovernmen-

tal Panel on Climate Change 2013). Die atmosphärische Konzentration des wichtigsten, anthropogenen Treibhausgases, dem CO₂, hat sich seit Beginn der Industrialisierung besonders stark erhöht und ist vor allem auf die Nutzung fossiler Brennstoffe zurückzuführen. Einer der Hauptemittenten für CO₂ ist der Logistiksektor. Der Optimierung des CO₂-Footprints in der Logistik kommt somit eine besonders bedeutende Rolle zu. Jeder Logistikprozess, ob Transport, Umschlag oder Lagerung, verbraucht Energie und ist somit für die Emission von CO₂ verantwortlich, egal ob nun direkt fossile Kraftstoffe verbraucht werden oder indirekt CO₂ bei der Erzeugung anderer Energieträger emittiert wird. Wie groß diese CO₂-Emissionen sind, hängt maßgeblich vom eingesetzten Verkehrsträger im Rahmen der Transportprozesse ab. Die Verkehrsträger unterscheiden sich in puncto Flexibilität, Geschwindigkeit, Infrastrukturabhängigkeit und auch hinsichtlich ihrer CO₂-Emissionen. Während bei einem Lufttransport durchschnittlich mehr als 1500 Gramm CO₂ pro Tonnenkilometer (tkm) emittiert werden, sind andere Verkehrsträger wie Bahn und Binnenschiff mit etwa 23 Gramm pro tkm und 33 Gramm pro tkm deutlich CO₂-effizienter. Der LKW liegt mit 97 Gramm pro Tonnenkilometer transportierter Fracht im Mittelfeld (vgl. Kahlenborn et al. 2012). Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung hat für Deutschland den Modal-Split errechnet, also die Verteilung der transportierten Güter auf die unterschiedlichen Verkehrsträger: Straßenverkehr, Schienentransport, Binnenschifffahrt, Pipelines und Luftverkehr. Insgesamt wurden im Jahr 2010 in Deutschland etwa 620 Milliarden Tonnenkilometer Fracht transportiert. Auf den Straßenverkehr entfielen dabei knapp 70 Prozent oder 434 Mrd. tkm. Der Schienenverkehr bildete mit etwa 17 Pro-

zent den zweitwichtigsten Verkehrsträger, gefolgt von der Binnenschifffahrt mit etwa 10 Prozent. Abgeschlagen folgen der Transport über Pipelines mit 2,6 Prozent sowie der Luftverkehr mit lediglich 0,21 Prozent (vgl. Koether 2012). Europaweit liegt der Anteil des Straßenverkehrs sogar bei über 70 Prozent des Gesamttransportvolumens (vgl. Gudehus 2012). Die hohe Flexibilität und die vergleichsweise günstige Infrastruktur machen den LKW heute zum meistgenutzten Transportmittel im Güterverkehr. Die Notwendigkeit logistischer Flexibilität aber auch Effizienz ist vor allem auf Trends aus dem globalen Umfeld zurückzuführen. Diese ändern die Anspruchshaltung an die Logistik sowie deren Bedeutung auf vielfältige Weise. Globale Lieferketten und große Transportdistanzen auf der einen Seite sowie Urbanisierungstendenzen, die daraus resultierende wachsende Bedeutung der City-Logistik und die Logistik der „letzten Meile“ auf der anderen Seite stellen die Logistikplaner vor vielfältige Herausforderungen. Es lassen sich sechs Trends in der Logistik identifizieren (vgl. Gudehus 2012), welche über gestiegenes Verkehrsaufkommen, größere zu überbrückende Distanzen und die Individualisierung von Logistikdienstleistungen Einfluss auf den logistischen CO₂-Footprint haben: demografischer Wandel, Globalisierung und Nähe zu Kundenmärkten, technologischer Wandel sowie das Internet, Individualisierung und Flexibilisierung, globaler Preisdruck sowie steigende Anforderungen an Nachhaltigkeits- und Umweltauforderungen. Hinzu kommt eine steigende Urbanisierungsquote. Demografischer Wandel, Bevölkerungsrückgang und Überalterung in den westlichen Ländern sowie Bevölkerungswachstum in den Schwellenländern stellen sehr heterogene Anforderungen an die Logistik. So ist eine zunehmende Individualversorgung

älter Menschen über mikrologistische Lösungskonzepte genauso zu berücksichtigen wie eine wachsende Exportwirtschaft. Gerade die mikrologistische Versorgung älterer Menschen, die nicht mehr selbst mobil sind, stellt die Logistik vor die Herausforderung, einzelne Güter individuell und zeitlich flexibel zuzustellen. So wird die Anzahl der Pflegebedürftigen in Deutschland bis 2030 um etwa 50 Prozent auf etwa 3,16 Mio. Menschen ansteigen. Von diesen werden etwa 70 Prozent häuslich versorgt (vgl. Klug 2010). Skaleneffekte entfallen und die Effizienz leidet, denn es werden mehr Transporte mit immer geringeren Auslastungen der Verkehrsträger benötigt, um eine umfassende Versorgung zu gewährleisten. Hinzu kommt eine bedeutende Tendenz hin zur Urbanisierung. Bereits heute lebt fast die Hälfte der Weltbevölkerung in urbanen Gebieten, wobei ein Anstieg des Verstädterungsgrades auf über 75 Prozent angenommen wird (vgl. Martin 2009). Mit dem Fortschreiten der Urbanisierung geht eine Erhöhung der Anzahl an Ein- oder Zweipersonenhaushalten einher. Dies steigert abermals die Anzahl der Destinationen, welche belieferbar sein müssen. Die Logistikkomplexität erhöht sich. Auch die Globalisierung und die Nähe zu Kundenmärkten führen zu einer zeitgleichen Erhöhung der Lieferfrequenzen und der Liefermengen, welche gerade im Warenannahme- und Warenausgabeprozess sowie in der Routenplanung auf langen Distanzen die Komplexität erhöhen. Durch die Fragmentierung der Wertschöpfungsketten kommt der Logistik mehr denn je eine Schlüsselposition zu. Ohne eine verlässliche und flexible Logistik sind Konzepte wie Global Sourcing oder Just-in-Time nicht möglich. Begünstigt wird diese Tendenz durch den weltweiten Abbau von Handelshemmnissen. Die Konsequenz ist ein hoher Bedarf an länder-

übergreifenden Transportdienstleistungen, um einerseits Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe an den globalen Produktionsstandorten bereitzustellen und andererseits eine weltweite Verteilung produzierter Waren zu gewährleisten (vgl. Koch 2012). Die Globalisierung hat bereits in der Vergangenheit zu einer stark ansteigenden Bedeutung der Logistik geführt. So hat sich seit 1970 der globale Warenverkehr etwa verdreißigfacht (vgl. Liebscher/ Wohlfahrt 2010). Diese Tendenz hält weiter an (vgl. Pfohl 2010). Auch der technologische Wandel sowie das Internet verleihen der Logistik eine erhöhte Bedeutung. Konsumgewohnheiten verändern sich durch die Möglichkeit, jederzeit von zu Hause aus Waren bestellen zu können und die Ware an die Haustüre geliefert zu bekommen. Die Endkundenbelieferung mit verhältnismäßig kleinem Ladungsangebot nimmt rasant zu. Vor allem auf der letzten Meile vom Güterverkehrszentrum zum Endkunden steigen die Komplexität und die benötigte Anzahl an Transporten enorm an. Eine 24-Stunden-Lieferfähigkeit von Onlineshops wird zum Standard und erhöht die Anforderungen vor allem an die Distributionslogistik sowie die interne Logistik. Gleichzeitig steigt die Retourenquote. Ein effizientes Abwicklungsmanagement und eine funktionierende Redistributionslogistik sind zwingend erforderlich. Gerade durch die vermehrten Retouren, welche für Endverbraucher zumeist kostenlos angeboten werden, steigt das Verkehrsaufkommen stark an. Es wird davon ausgegangen, dass in Deutschland etwa 30 Prozent aller im Internet bestellten Produkte zurückgeschickt werden (vgl. Bojanowski 2013). Auch der Trend hin zu mehr Individualisierung und Flexibilisierung führt zu einer steigenden Logistikkomplexität. Die Individualisierung von Investitionsgütern zeigt, dass standardisierte Einheitsprodukte auf dem heuti-

gen Markt nur noch in geringem Ausmaß existieren. Zumeist sind Produkte individualisiert und auf einen bestimmten Zielmarkt zugeschnitten. Transportbündelungen und verlässliche Nachfrageprognosen werden erschwert. Auch immer individueller werdende Anforderungen im Konsumgüterbereich führen zu verstärkten Logistikaktivitäten. So zeigt das Beispiel der japanischen Einzelhandelsgesellschaft 7-Eleven, dass die Anforderungen an ein täglich mehrfach wechselndes Warensortiment die Logistik – gerade im urbanen Bereich – vor große Herausforderungen stellen kann (vgl. Lal/ Han 2005). Das steigende Verkehrsaufkommen im ohnehin vielfach überlasteten städtischen Bereich stellt ein großes Risiko für die Versorgungssicherheit dar und führt bei vielen Logistikdienstleistern dazu, dass Kapazitäten ausgebaut werden. Dies wiederum erhöht die Verkehrsproblematik auf der Straße weiter. Der Trend zur Individualisierung wird auch durch den globalen Preisdruck für Logistikdienstleistungen erhöht und führt zu einer steigenden Variantenvielfalt angebotener Produkte und Logistikdienstleistungen, welche heute vermehrt als Teil eines hybriden Leistungsbündels wahrgenommen werden. Dies erfordert neue und innovative Logistiklösungen, um am Markt eine Differenzierung zu erreichen, zumal die zentrale Herausforderung im globalen Logistikmarkt heute in der Erfüllung lokaler Anforderungen besteht (vgl. Gudehus 2012). Individualtransporte häufen sich, die Komplexität in der Logistik wird erhöht, da Logistikdienstleister der Nachfrage folgen und verstärkt differenzierte Services anbieten. In diesem Zusammenhang ist eine gesteigerte Nachhaltigkeit im Sinne der Ressourcenschonung seitens der Logistik erforderlich, da neben der ökologischen Betrachtung auch die Beschränkung und die daraus resultierende Preissteigerung

der fossilen Ressourcen erforderlich ist. Eine stärkere Reduzierung von Kraftstoffverbräuchen und damit eine Reduktion des emittierten CO₂ sind unausweichlich. Steigende Nachhaltigkeits- und Umweltaforderungen erhöhen vermehrt den ökonomischen Handlungsdruck auf Unternehmen, Maßnahmen zum Klima- und Umweltschutz durchzuführen. Neben den direkten ökologischen und ökonomischen Auswirkungen nimmt auch die Anzahl der öffentlichen Klima-Restriktionen deutlich zu. So hat sich Deutschland verpflichtet, bis zum Jahr 2020 seine Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 40 Prozent zu senken (vgl. Krumme 2009). Auch hier ist der Verkehr ein bedeutender Hebel. Verdeutlicht wird dies durch die Tatsache, dass heute bis zu 70 Prozent des CO₂-Footprints eines Konsumgutes auf die Logistikaktivitäten innerhalb der Wertschöpfungskette entfallen (vgl. Krumme 2009). Dies wird umso deutlicher vor dem Hintergrund des rasant gewachsenen Welthandels. Jeder der hier aufgeführten Megatrends führt letztendlich dazu, dass die Bedeutung der Logistik – ob im Endkundenbereich, in der Entsorgung oder aber in der Beschaffung – weiter zunehmen wird. Der Güterverkehrsaufwand in Deutschland ist in den letzten Jahren deutlich angestiegen. Trotz eines Rückgangs im Zuge der Wirtschaftskrise, wird für die Zukunft weiterhin ein starkes Wachstum prognostiziert (vgl. BMU 2012). Sinnbildlich für diese Entwicklung steht die Betrachtung der Entwicklung des Welthandels ab 1950. Dieser ist nahezu exponentiell gewachsen (vgl. Abbildung 1-1). Das gestiegene Verkehrsaufkommen korreliert jedoch mit den Kraftstoffverbräuchen und damit mit dem ausgestoßenen CO₂ in der Logistikbranche. Mit dem Zuwachs an wirtschaftlicher Bedeutung, im Zuge der Entwicklung der hier skizzierten Megatrends

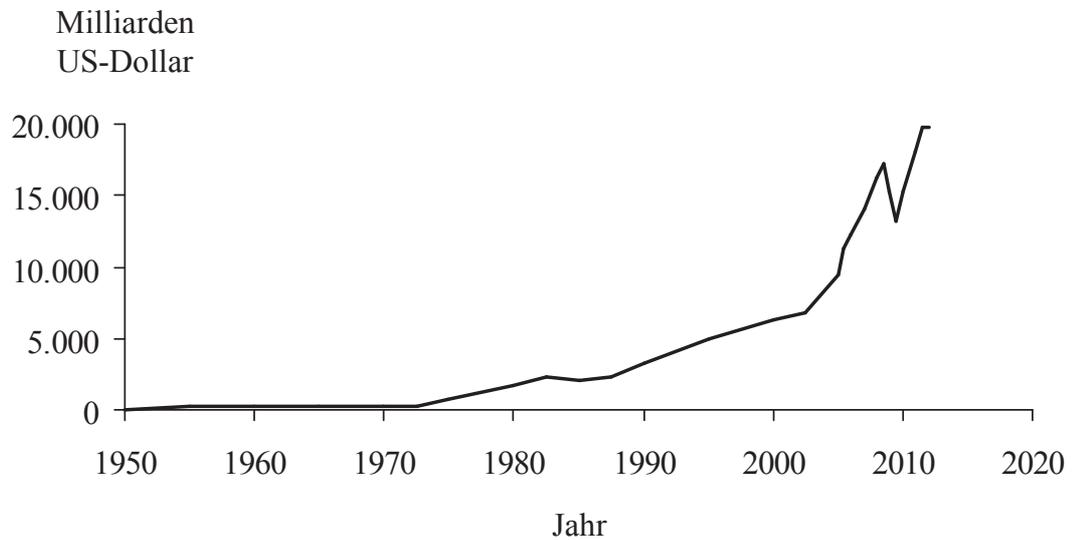


Abbildung 1-1: Entwicklung der weltweiten Handelsströme (vgl. Statista 2013)

in der Logistik, ist der durch die Logistik verursachte CO₂-Ausstoß signifikant angestiegen. Bereits im Jahr 2006 waren 16 Prozent aller CO₂-Emissionen in Deutschland auf den Sektor Transport und Logistik zurückzuführen (vgl. Gadesmann/Kuhnert 2007). Trotz weitreichender Verbesserungen in Logistikstrategien und -technologien in den vergangenen Jahren war es nicht möglich, das durch den Logistikbereich emittierte CO₂ zu reduzieren. Im Gegenteil: Durch den schnellen Anstieg der Handelsvolumina sowie immer größer werdenden logistischen Distanzen, einer stärker ausgeprägten Arbeitsteilung zwischen Nationen und Kontinenten, aber auch individualisierten Logistiklösungen im urbanen Bereich und auf der letzten Meile stieg der CO₂-Footprint logistischer Leistungen in Deutschland seit dem Jahr 1990 um 29 Prozent an (vgl. Abbildung 1-2), während der CO₂-Ausstoß in anderen Wirtschaftsbereichen, aber auch in privaten Haushalten, in den Jahren ab 1990 kontinuierlich reduziert werden konnte.

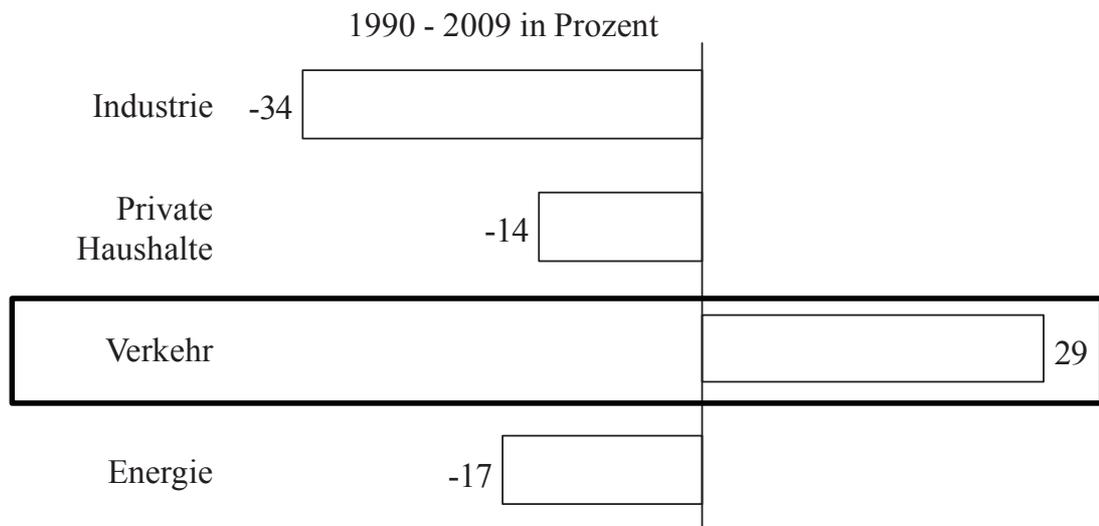


Abbildung 1-2: Relative Entwicklung der CO₂-Emissionen (vgl. Allianz pro Schiene 2013)

Doch die gestiegenen Transportvolumina sind nicht allein für diesen Anstieg verantwortlich. Durch Anforderungen an flexible und individuelle Logistiklösungen auf großen Distanzen oder in der City-Logistik und die daraus entstehende verringerte Planbarkeit von Logistikdienstleistungen verringert sich die Auslastung pro Ladungsträger. Nicht ausgeglichene Handelsbilanzen sowie große Frachtartenunterschiede führen vermehrt zu Leerfahrten. Dies bedeutet, dass der Transport von Gütern tendenziell ineffizienter wird, also mehr Kraftstoff pro Tonnenkilometer verbraucht und somit mehr CO₂ emittiert wird. Es zeigt sich, dass bisherige Logistiklösungen, welche auf die neuen Anforderungen angewendet werden, diesen nur unzureichend gerecht werden. Verstärkte Kooperation und die Bündelung von Warenströmen werden an Bedeutung gewinnen, um ökonomische und ökologische Verbesserungen herbeizuführen. Dabei ist die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes nicht nur aufgrund direkter ökologischer Einflüsse zu forcieren, sondern auch um wirtschaftlichen Interessen der beteiligten Unternehmen gerecht zu

werden. So hängen Kraftstoffverbrauch und damit Transportkosten direkt mit dem emittierten CO₂ zusammen. Verdeutlicht werden diese Zusammenhänge in Abbildung 1-3. Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens ist es somit, Unternehmen eine Vorgehensweise und ein Modell mit konkreten Handlungsempfehlungen zur Reduzierung des CO₂-Footprints in der Logistik an die Hand zu geben, um so eine nachhaltige Reduzierung des logistischen CO₂-Footprints trotz steigendem Verkehrsaufkommen und erhöhter Komplexität in der Logistik zu ermöglichen. Unternehmen wie BMW verlangen das Ausweisen des CO₂-Fußabdrucks von ihren Lieferanten bereits heute. Dies bedeutet, dass allein die Quantifizierung des emittierten CO₂ vielfach einen Wettbewerbsvorteil darstellt. Des Weiteren ist es Ziel dieses Forschungsvorhabens, Strategien und Methoden zu identifizieren, welche eine aktive Reduzierung des

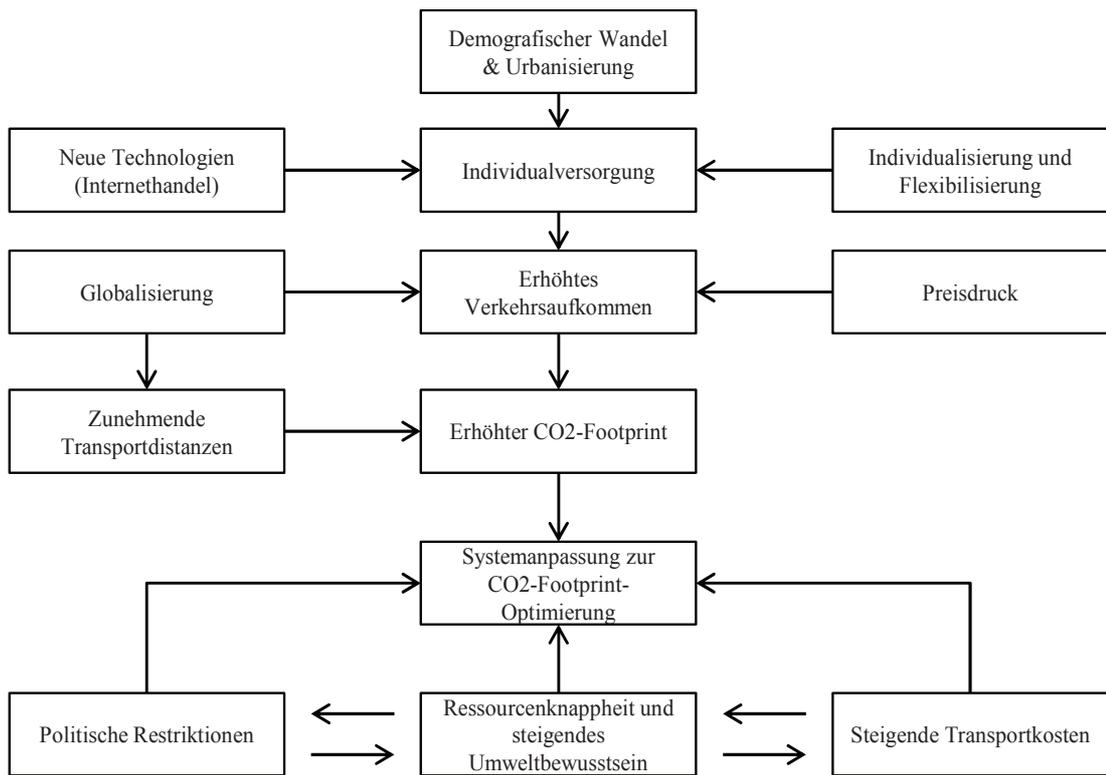


Abbildung 1-3: Zusammenhang zwischen Trends und Notwendigkeit der CO2-Footprint-Optimierung

CO2-Footprints in der Logistik ermöglichen. Zusammen mit dem Berechnungstool wird es für Unternehmen auf diese Weise möglich, die Wirkung von Optimierungsmaßnahmen ebenfalls quantifizierbar zu machen. Das Beispiel der E-Mobility ist in zweifacher Hinsicht von Bedeutung. So bildet die E-Mobility eine mögliche und vielversprechende Strategie zur Reduzierung von CO2-Emissionen in der Logistik etwa im Bereich der City-Logistik, aber auch einen relevanten Betrachtungsgegenstand hinsichtlich der Reduzierung von CO2 in der Wertschöpfungskette von „grünen“ Produkten, da insbesondere der im zukunftssträchtigen Feld der Elektromobilität induzierte Wandel weitläufige Veränderungen in den Bereichen Design, Produktion, Vertrieb, Aftersales, Infrastruktur und Energievertrieb, aber auch gerade in der Logistik nach sich zieht.

1.2 Stand der Forschung

In der Unternehmenspraxis existieren hinsichtlich der CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik zwei wesentliche Problemstellungen. Zum einen gibt es Defizite in der Messung von CO₂-Emissionen. Zum anderen fehlt ein ganzheitlicher Rahmen für die Anwendung von Optimierungsansätzen des CO₂-Footprints. Vor allem KMU sehen sich hier großen Schwierigkeiten ausgesetzt, da eine Ausweisung des CO₂-Footprints immer häufiger von Kunden, Verbrauchern und der Politik verlangt wird. Eine Operationalisierung dieser genauen Zuweisung stellt sich in der unternehmerischen Praxis jedoch aufgrund von Ressourcenmangel, fehlendem Know-how sowie dem Fehlen einer ganzheitlichen Bewertungsmethodik äußerst komplex dar. Aufbauend auf den skizzierten logistischen Trends, welche auf die Unternehmen wirken, stehen diese vor der Herausforderung, zielgerichtete Maßnahmen zur Verbesserung des CO₂-Fußabdrucks abzuleiten. Dabei gilt es, die größten Stellhebel zu identifizieren und das Heben von Potenzialen durch gezielte Maßnahmen zu ermöglichen. Zwar sind viele logistische Optimierungsmethoden bekannt, die einen Einfluss auf den CO₂-Footprint haben, allerdings fällt die gezielte Verortung einer CO₂-Reduzierungsstrategie aufgrund mangelnder methodischer Systematisierung und der Ungewissheit des tatsächlichen Nutzens schwer. Um der aufgezeigten Problematik zu begegnen, ist es zunächst erforderlich, Erkenntnisse aus verschiedenen Bereichen der Forschung zu analysieren und diese in einem integrierten Ansatz zu konzentrieren. Im Hinblick auf die vorliegende Thematik ist der aktuelle Forschungsstand einerseits hinsichtlich der Mengenströme in der Logistik, der Möglichkeiten der

Erfassung des logistischen CO₂-Footprints, der aktuellen CO₂-Optimierungsdiskussion sowie der Rolle der Elektromobilität als Möglichkeit zur Reduzierung der CO₂-Emissionen in der Logistik und andererseits im Hinblick auf die CO₂-Emissionen in der elektromobilen Wertschöpfungskette zu untersuchen. Logistische Mengenströme werden primär durch staatliche und weitere öffentliche Institutionen erfasst. Diese zumeist rein volkswirtschaftlichen Betrachtungen geben einen detaillierten Überblick über Haupthandelsrouten, Menge der umgeschlagenen Waren sowie verwendete Verkehrsträger und liefern somit Implikationen für die CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik. Die weltweit wichtigsten Warenströme verbinden die sogenannte Triade, also Nordamerika, Europa und Fernost. Die wichtigsten Verkehrsknotenpunkte im globalen Handelsnetz sind die großen Seehäfen. Allein der Umschlag in den deutschen Seehäfen betrug im Jahr 2013 fast 300 Mio. Tonnen (vgl. Statista, Statista 2014a). Die größten Seehäfen in Fernost wie Shanghai oder Ningbo-Zhoushan brachten es im Jahr 2011 sogar auf je über 600 Mio. Tonnen an Güterumschlag (vgl. Statista 2014b). Auffällig ist die große Diskrepanz. Während die wirtschafts- und exportstärkste Nation in Europa 300 Mio. Tonnen pro Jahr über den Seeweg im- und exportiert, schlägt ein einzelner Hafen in China fast die doppelte Tonnage um. Im Welthandel zeigt sich immer deutlicher eine Unausgeglichenheit in den Handelsbilanzen. Dies gilt monetär wie auch für die Tonnage oder die transportierten Ladungsträger (vgl. WTO 2014). So werden im asiatisch-pazifischen Raum deutlich mehr Güter exportiert als importiert. Unausgeglichene Handelsströme, Leerfahrten sowie leer transportierte Container sind die Folgen. Dies spiegelt sich auch in der Anzahl der umgeschlage-

nen Ladungsträger wider. Im größten deutschen Seehafen, dem Hamburger Hafen, werden jährlich mehr als 9 Mio. Standardcontainer mit 20 Fuß Länge umgeschlagen. Damit ist dieser global gesehen gerade noch in den Top 20 zu finden. Die zurzeit größten Containerhäfen sind Shanghai und Singapur mit einem Umschlag von jeweils über 30 Mio. Standardcontainer im Jahr (vgl. Statista 2014b). Seit Mitte des letzten Jahrhunderts sind Stückguttransporte immer mehr durch moderne, containerbasierte Systeme substituiert worden. Im globalen Kontext sind die großen Containerschiffe von Reedereien wie Maersk, China Ocean Shipping Company oder Hapag-Lloyd, welche mit ihren Liniendiensten die großen Seehäfen verbinden, die wesentlichen Verkehrsträger. Moderne Versionen können über 18 Tsd. Standardcontainer transportieren. LKW bringen es im Durchschnitt gerade auf 2,5 Standardcontainer, Ganzzüge auf 400 bis 530 Standardcontainer, Binnenschiffe auf 50 bis 100 Standardcontainer (vgl. Rodrigue et al. 2009). Dies bedeutet, dass für den landgestützten Transport ein deutliches höheres Verkehrsaufkommen notwendig ist, um die gleiche Menge an Gütern zu transportieren. Treibstoff- und damit CO₂-reduzierende Skaleneffekte ergeben sich bei kapazitativer leistungsfähigeren Verkehrsträgern und somit vor allem in der Seeschifffahrt. Die Mengenströme in der Logistik werden zumeist über die Anzahl der umgeschlagenen Ladungsträger oder monetär quantifiziert. Hinsichtlich der Berechnung des CO₂-Footprints ist diese Form der Erfassung der Warenströme nicht zweckmäßig, da weder der Warenwert noch die Anzahl eingesetzter Container oder Paletten sinnvolle Rückschlüsse auf den CO₂-Footprint zulassen. Dagegen stellt das Statistische Bundesamt die Beförderungsleistung für Deutschland im Jahr 2011

auf. Insgesamt ist die Leistung im Straßenverkehr mit 654 Mrd. Tonnenkilometern bei einer durchschnittlichen Transportdistanz von 138 km am höchsten. Der Bahnverkehr liegt mit 113 Mrd. Tonnenkilometern und einer durchschnittlichen Transportdistanz von 302 km auf Platz zwei. Es folgen der Seeverkehr, die Binnenschifffahrt und der Luftverkehr mit lediglich 1,5 Mrd. Tonnenkilometern Transportleistung (vgl. Hütter 2013). Insgesamt und gerade auf der Kurzstrecke dominiert der LKW. Dies unterstreicht die besondere Bedeutung des Straßenverkehrs. Lediglich auf den längeren Strecken wird dieser heute durch kosten- und CO₂-effizientere Verkehrsmittel substituiert. Diese volkswirtschaftliche Betrachtung liefert zwar fundierte Hinweise auf die Leistungsfähigkeit, Nutzung und Einsatzgebiete der verwendeten Verkehrsträger, konkrete Maßnahmen zur Optimierung des CO₂-Footprints oder dessen Messung lassen sich hieraus jedoch nicht ableiten. Die Problematik liegt nicht in der Erfassung der Mengenströme in der Logistik an sich. Dies ist für Unternehmen eine eher triviale Aufgabe. Vielmehr gilt es, den transportierten Gütern ihren spezifischen CO₂-Footprint zuzuweisen, um so Optimierungsstrategien erarbeiten zu können. Jedoch lässt sich auf Basis einer volkswirtschaftlichen Berechnung der Warenströme kein CO₂-Fußabdruck für einen einzelnen Logistikabschnitt identifizieren. Dieser kann individuell für ein konkretes Szenario bestimmt werden, da auch der Transport mehrerer Güter auf einem Ladungsträger zu Schwierigkeiten der produktspezifischen Zuordnung des CO₂-Footprints führen kann. Auch die verursachungsgerechte Allokation von Leerfahrten muss gewährleistet werden können, wobei dies einen Punkt der aktuell diskutierten Messproblematik darstellt. Die Messung des CO₂-Footprints ist

in der Literatur im Bereich der Nachhaltigkeitsforschung angesiedelt. Zurzeit gibt es keine standardisierten und weltweit anerkannten Quantifizierungsmethoden für ein Nachhaltigkeitsmaß von Unternehmen (vgl. Beucker 2005). Erste Ansätze liefern zwar bereits Indikatoren für eine performanceorientierte Messung von Nachhaltigkeit (vgl. Griebhammer/ Hochfeld 2009), allerdings haben sich inzwischen unabhängig voneinander unterschiedliche Indizes herausgebildet, welche eine Vergleichbarkeit verschiedener Nachhaltigkeitsberichte erschweren (vgl. Franchetti/ Apul 2013). Im Gegensatz zu dieser eher qualitativ orientierten Sichtweise zur Nachhaltigkeit, existieren bereits konkrete Ansätze bei der singulären Quantifizierung des CO₂-Ausstoßes in der Logistik (vgl. Verkehrsrundschau 2014). Speziell diese sind für das vorliegende Forschungsprojekt von Relevanz. Die Messproblematik von CO₂ in der Logistik ist ein aktuell vielfach behandeltes Thema, denn eine einheitliche Definition, was unter einem „CO₂-Fußabdruck“ zu verstehen ist, hat sich bislang nicht etablieren können. Auch ist nicht geklärt, wie der Footprint einem Unternehmen oder einem Produkt zuzurechnen ist (vgl. Pandey et al. 2011); (vgl. Wiedmann/ Minx 2007). Das Funktionsprinzip dieser CO₂-Messmethoden beruht darauf, dass verbrauchte Energieträger wie Öl, Benzin oder Gas einem Verbraucher mit spezifischen Emissionsklassen zugewiesen werden. Je nach Menge des verbrauchten Energieträgers oder der Emissionsklasse des Verbrauchers lässt sich das angefallene CO₂ bilanzieren und einem spezifischen Betrachtungsgegenstand zuordnen. In der Literatur wird der Betrachtungsgegenstand zwischen dem „Corporate Carbon Footprint“ (vgl. Matthews et al. 2008), also den unternehmensspezifischen CO₂-Emissionen und dem „Product Carbon Footprint“, also der

Bilanz der Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus eines spezifischen Produkts differenziert (vgl. Franchetti/ Apul 2013). Gerade im Bereich der Logistik ergeben sich Schwierigkeiten hinsichtlich der verursachungsgerechten Zuordnung. Für die Berechnung des CO₂-Footprints in der Logistik bietet sich die Fokussierung auf ein bestimmtes Produkt an, da in der Wertschöpfungskette eines Produktes zumeist mehrere Unternehmen beteiligt sind und die logistischen Aktivitäten dazu dienen, die jeweiligen Wertschöpfungsstufen über beschaffungslogistische, innerbetriebliche sowie distributionslogistische und rückläufige Warenströme miteinander zu verbinden. Die ausschließlich unternehmensspezifische Betrachtung würde somit immer nur einen Teil des CO₂-Footprints abdecken. Dies bedeutet für die Modellbildung, dass den unterschiedlichen Logistikarten Rechnung getragen werden muss, um die Wertschöpfungskette eines Produktes ganzheitlich abbilden zu können. Hinsichtlich der verursachungsgerechten Zuweisung des emittierten CO₂ ergeben sich jedoch weitere Herausforderungen. So ist die genaue Abgrenzung des Betrachtungshorizonts erforderlich. Es wird zwischen drei unterschiedlichen Betrachtungshorizonten unterschieden. Die direkte Betrachtung bezieht lediglich die Emission mit in die Betrachtung ein, welche durch Verbrennung des Kraftstoffs während des Transports entsteht. Die indirekte Betrachtung integriert Emissionen aus der Strom- und Wärmebereitstellung, bezieht also auch indirekte Emissionen mit ein. Beim erweiterten Ansatz wird zusätzlich emittiertes CO₂ während der Förderung und Raffination fossiler Brennstoffe mit in die Berechnung einbezogen (vgl. Edwards et al. 2011). Um eine Vergleichbarkeit zwischen mehreren berechneten CO₂-Fußabdrücken zu gewährleisten, müssen diese nach dem je-

weils gleichen Betrachtungshorizont errechnet worden sein. Standardisierte Betrachtungshorizonte mit einer überbetrieblichen Vergleichbarkeit haben sich bislang nicht etablieren können, da eine einheitliche Bemessungsgrundlage fehlt. Zwar werden inzwischen auch von verschiedenen Unternehmen Dienstleistungen zur CO₂-Bilanzierung angeboten, die zugrundeliegenden Annahmen und Daten sind jedoch nicht standardisiert. Alle Verkehrsträger verfügen über unterschiedlich hohe Emissionen und können sich untereinander stark unterscheiden (vgl. Kranke et al. 2011). Die CO₂-Emissionen einzelner Transportträger sind bislang nur unzureichend geklärt. Folgendes Beispiel veranschaulicht diesen Sachverhalt: Nach Angaben des Verbands der Chemischen Industrie verursachen LKW etwa 65 Gramm CO₂ pro Tonnenkilometer und die Bahn 21 Gramm pro Tonnenkilometer (vgl. Verband der Chemischen Industrie 2010). Hierbei handelt es sich allerdings lediglich um Durchschnittswerte, welche von vielen Parametern (etwa dem Fahrverhalten, der Topografie, dem Reifendruck oder von LKW-Fabrikat und -Größe) abhängen. Generell gibt es einen Unterschied zwischen der direkten Messung von CO₂-Emissionen beispielsweise durch die Messung des Kraftstoffverbrauchs auf einer bereits gefahrenen Route und der indirekten Abschätzung von CO₂-Emissionen über Durchschnittswerte. Die indirekte Abschätzung ist zurzeit deutlich weniger präzise, da oftmals verlässliche Daten fehlen. Sie ist aber erforderlich, um den CO₂-Footprint beispielsweise auf einem Lieferschein ausweisen zu können. Darüber hinaus ergeben sich Probleme bei der Allokation der CO₂-Emissionen von Transporten, zum Beispiel durch Leerfahrten oder den gleichzeitigen Transport mehrerer Güter. Daher ist es zum einen für ein einheitliches Berech-

nungsmodell erforderlich, über eine große Datenbank an Verkehrsträgern zu verfügen, zum anderen ist der Einsatz einer einheitlichen Methodik zur Allokation des emittierten CO₂ auf die einzelnen Transportgüter zu gewährleisten. Die DIN 16258 liefert für Berechnung und Allokation wertvolle Erkenntnisse (DIN EN 16258). Es mangelt jedoch an einer eingängigen Operationalisierung der Berechnungsmethodik. So werden zwar Rechenwege und mögliche Allokationen aufgezeigt, wie diese aber in der täglichen unternehmerischen Praxis angewendet werden können, bleibt offen. Generell zeigt der Literaturüberblick Defizite in der praktischen Anwendbarkeit auf. Zwar existieren mathematische Modelle zur Berechnung und zur Allokation von CO₂ in der Logistik, es werden jedoch keine Aussagen darüber getroffen wie Unternehmen an die benötigten Daten zur Berechnung kommen oder die Formeln in ihrem Tagesgeschäft anwenden können. Hinzu kommt, dass sich unterschiedliche Methoden zur CO₂-Berechnung in der Logistik etabliert haben. Ein Beispiel hierfür sind die divergierenden Betrachtungshorizonte für die Erfassung der Emissionen. Ebenfalls finden sich in der wissenschaftlichen Literatur nahezu keine konkreten Beispiele für die Anwendung der jeweiligen CO₂-Messmethoden. Mathematische Modelle und Anwendungsfälle werden zumeist getrennt voneinander behandelt. Ähnlich der Messung des CO₂-Footprints ist dessen Optimierung im Bereich des Nachhaltigkeitsmanagements angesiedelt. Mit der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension tangiert die Emissionsreduzierung alle drei Zielgebiete der Nachhaltigkeit (vgl. Rogall 2008). Im Idealfall wird durch die Optimierung der Logistik eine Senkung des Kraftstoffbedarfs (ökonomische Komponente) verursacht. Diese geht mit einer Senkung des Schadstoffaussto-

ßes (ökologische Komponente) einher, was die Umweltbelastung verringert und die Lebensqualität der Menschen (soziale Komponente) steigert. Zugleich impliziert die gesteigerte Effizienz der Logistik auch einen Mindereinsatz von Rohstoffen. Aufgrund dieser großen Verflechtungen und positiven Wirkungszusammenhänge nimmt die CO₂-Footprint-Optimierung in logistischen Netzwerken bereits eine zentrale Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen ein und wird diese Position in den kommenden Jahren weiter ausbauen (vgl. Wildemann 2014e). Wilkens greift die ökonomische Komponente auf und bekräftigt den positiven Einfluss von Umwelt- und Sozialmanagement auf den Unternehmensgewinn (vgl. Wilkens 2008). Weiter lassen sich positive Zusammenhänge zwischen einer nachhaltigen Unternehmensausrichtung und einem Shareholder-Value-Zuwachs nachweisen (vgl. Godfrey et al. 2008). Proaktive Ansätze zur Emissionsreduzierung dienen heute vornehmlich der Einsparung von Rohstoffkosten und damit der Steigerung des ökonomischen Gewinns. Ansätze, die zur Rubrik der Marktorientierung zählen, fokussieren durch die Steigerung der Nachhaltigkeit auf eine möglichst hohe Öffentlichkeitswirkung (vgl. Seidel/ Wolff 2007). Hermeier unterstreicht, dass Unternehmen Umweltschutz betreiben, um rechtliche Anforderungen zu erfüllen als auch ihr Image zu verbessern (vgl. Hermeier 2007). Die Bedeutung der Optimierung des logistischen CO₂-Footprints ist somit unbestritten. Zugleich wird aufgezeigt, dass erst wenige Unternehmen konkrete Ziele und Maßnahmen zur CO₂-Footprint-Optimierung vorweisen können. Ursache sind vor allem fehlende Instrumente, Methoden und Standards (vgl. Quariguasi Frota Neto et al. 2006). Losgelöst von der Produkt- und Produktionstechnologie gilt es

hierbei, nachhaltige Logistiksysteme zu entwickeln, welche die CO₂-Emissionen in der Wertschöpfungskette von Produkten verringern. Zur Realisierung von nachhaltigen Logistikstrukturen werden je nach Unternehmensziel unterschiedliche Ansätze verfolgt. Srivastava unterscheidet drei Ansätze operativer „grüner“ Logistik: Eine grüne Wertschöpfungskette unter Einbeziehung von Recyclingmaßnahmen, die Redistributionslogistik sowie die Abfallwirtschaft. Er kommt zu dem Erkenntnis, dass eine „grüne“ Supply Chain den Einfluss ökonomischer Aktivitäten auf die Umwelt reduzieren kann ohne gleichzeitig Produktqualität oder andere ökonomische Zielgrößen zu verfehlen (vgl. Srivastava 2007). Die Untersuchung ist jedoch weit gefasst und schließt ebenfalls Produktionsprozesse mit ein. Wie eine konkrete Reduzierung des logistischen CO₂-Footprints erreicht werden kann, bleibt weitgehend offen. Ähnlich verhält es sich mit der Arbeit von Monaumi und Freitag. Die beiden Autoren beschreiben einen unternehmenszielspezifischen Korridor für die Optimierung des produktbezogenen CO₂-Footprints (vgl. Monaumi/ Freitag 2012). Allerdings geht es bei dem vorgestellten Konzept primär um die Festlegung von Zielwerten, nicht um die Optimierung des CO₂-Footprints durch konkrete Maßnahmen. Auch spielt die Logistik lediglich eine untergeordnete Rolle. Der Fokus liegt auf der Produktion und dem CO₂-Footprint einzelner Produktkomponenten. Anders konzipieren Reinhart et al. in ihrem Forschungsprojekt eine webbasierte Plattform zur ganzheitlichen Optimierung der Energie- und Ressourcenverbräuche entlang der Wertschöpfungskette. Auch sie gehen davon aus, dass der erste Schritt zur Optimierung die Identifikation der wesentlichen Verbraucher von Energie ist. Aufbauend darauf können Optimierungspotenziale

quantifiziert und konkrete Handlungsoptionen abgeleitet werden (vgl. Reinhart et al. 2008). Im Unterschied zu weiteren Veröffentlichungen im Bereich der Ressourceneffizienzsteigerung und der Reduzierung des CO₂-Footprints zeigen sie eine konkrete Maßnahme zur Verbesserung bestehender Systeme auf. Jedoch stellt dies lediglich eine Einzelmaßnahme dar, kein ganzheitliches Optimierungskonzept. Zudem wird nicht auf die Logistik fokussiert. Ebenfalls findet keine Konzentration auf den CO₂-Footprint statt, es wird lediglich von „Energieeffizienz“ gesprochen. Der Aspekt der geschlossenen Wertschöpfungskette und deren Auswirkungen auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung wird von einigen Autoren (vgl. Chouinard et al. 2005; Daugherty et al. 2005; Dyckhoff et al. 2004; Specht/ Braunisch 2008) aufgegriffen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, für eine ganzheitliche Betrachtung des CO₂-Footprints nicht nur die vorwärts gerichteten, sondern auch die rückwärtsgerichteten Materialströme in den Optimierungsansatz mit einzubeziehen (vgl. Specht/ Braunisch 2008). Doch auch die Betrachtung der rückwärtsgerichteten Warenströme liefert alleine noch keinen wesentlichen Erklärungsbeitrag zur Reduzierung des CO₂-Footprints in der Logistik, sie zeigt lediglich Möglichkeiten zur Ressourcenschonung im Lebenszyklus von Wirtschaftsgütern auf. Aktuelle Ansätze, welche speziell auf das Thema der Reduzierung des logistischen CO₂-Footprints abzielen, halten lediglich fest, dass strategische Entscheidungen den größten Einfluss in Hinblick auf Umweltwirkungen haben. Im Speziellen werden hier die Erhöhung der Auslastung von Lagern und Transportmitteln, die Verfügbarkeit von Informationen und die Nutzung virtueller Lager herausgestellt (vgl. Aronsson/ Brodin 2006). Eine Untergliederung von

möglichen Nachhaltigkeitsmaßnahmen in der Logistik nach Gestaltungsfeldern und Einzelmaßen zu einem breit anwendbaren Methodenbaukasten wurde jedoch bislang nicht vorgenommen. Eine Einordnung und Konkretisierung der unterschiedlichen Maßnahmen ist aber Grundvoraussetzung für die strukturierte und zielgerichtete Optimierung des CO₂-Footprints in der Logistik. Bei dieser Betrachtung werden die positiven Aspekte einzelner Maßnahmen vielfach angenommen, ohne diese verifizieren zu können. Es fehlt an dieser Stelle also vor allem eine Integration der Messung des logistischen CO₂-Footprints auf der einen Seite sowie Optimierungsmaßnahmen auf der anderen Seite. Bedeutsam ist dies vor allem dann, wenn zwei divergierende Lösungen miteinander verglichen werden sollen. Die Literaturanalyse macht Defizite in der Optimierung des CO₂-Footprints vor allem im Bereich der Analyse unterschiedlicher Handlungsoptionen deutlich. Zwar werden von verschiedenen Autoren einzelne Maßnahmen genannt, diese werden jedoch weder quantifiziert noch in einen ganzheitlichen Rahmen zur Verbesserung des CO₂-Fußabdrucks in der Logistik überführt. Auch die unterschiedliche Charakteristik der Logistik wird nicht berücksichtigt. Eine differenzierte Prozessanalyse wird im Rahmen der Nachhaltigkeitsbetrachtung der Logistik nicht durchgeführt. Es wird lediglich auf die Bedeutung der Rückführungs- und Wiedereinsatzlogistik in der geschlossenen Wertschöpfungskette verwiesen. Eine Optimierung der einzelnen Teilbereiche der Logistik ist jedoch nicht Gegenstand der aktuellen Diskussion. Die Integration dieses differenzierten Logistikverständnisses ist jedoch gerade vor dem Hintergrund der Optimierung von besonderer Bedeutung. So bieten sich in der City-Logistik andere Optimie-

rungsmöglichkeiten an als im Bereich der Beschaffungslogistik. Auch die Optimierungspotenziale sind in der Beschaffungslogistik aufgrund größerer Freiheitsgrade und zumeist größerer Transportdistanzen höher als im innerstädtischen Bereich. Die Wirkung des Einsatzes von E-Fahrzeugen in der Logistik wird zurzeit kontrovers diskutiert. Eine Studie weist ausdrücklich auf die Vorteile des Einsatzes elektrischer Antriebssysteme im Transportsektor hin (vgl. McKinsey 2007), jedoch werden rein volkswirtschaftliche Größen angeführt. Was der Einsatz von E-Fahrzeugen in einem konkreten Anwendungsfall an CO₂-Einsparungen bedeutet und welche wirtschaftlichen Implikationen sich ergeben, bleibt weitgehend offen. Einen Indikator für Verbesserungspotenziale stellt die Nationale Plattform Elektromobilität dar. So können die kurzen und Start-Stoppintensiven Fahrsituationen der „letzten Meile“ bereits heute durch Elektromobilität deutlich effizienter gestaltet werden (vgl. Nationale Plattform Elektromobilität 2011). Trotz dieser Vorteile für den Logistiksektor beschäftigen sich die meisten Studien zum Thema Elektromobilität mit der Technologiediffusion. Dabei werden insbesondere Hemmnisse und Treiber der Elektromobilität analysiert. So gehen einige Studien von einem Marktwandel hin zur elektrifizierten Mobilität insbesondere auf Kurzstrecken und im Stadtverkehr aus. Als Beispiele können Studien von Bain & Company (vgl. Bain & Company 2010), der Boston Consulting Group (vgl. Boston Consulting Group 2011) sowie von Wildemann (vgl. Wildemann 2012a) angeführt werden. Ausgehend von Marktentwicklungen werden Strukturveränderungen in der Automobilindustrie analysiert, die sich aus den gewandelten Kompetenzanforderungen ergeben (vgl. IAO 2010). All diese Studien beziehen sich jedoch

lediglich auf die Diffusion der Elektromobilität und deren Entwicklungspotenzial im regionalen und nationalen Umfeld. Eine konkrete Anwendung im Logistikmarkt sowie daraus resultierende Optimierungsmöglichkeiten werden nicht behandelt. Die bisherigen Forschungsarbeiten zur Anwendung der E-Mobility im Logistikbereich fokussieren auf die Technologieentwicklung und erste Flottenversuche zur Abschätzung der Möglichkeiten. Sie stellen somit erste Feldstudien dar. So wird im Forschungsprojekt EMKEP in Zusammenarbeit mit der Daimler AG die Alltagstauglichkeit von batteriebetriebenen Transporten am Beispiel eines Mercedes-Benz Vito getestet (vgl. Daimler AG/Vattenfall Innovation GmbH 2011). Eine sehr ähnliche Zielsetzung wird auch beim Forschungsprojekt EMIL in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG und der Deutsche Post DHL Research and Innovation GmbH sowie der Hochschule für Bildende Künste Braunschweig verfolgt (vgl. VW AG et al. 2011). Diese beiden Studien stehen exemplarisch für den Einsatz von E-Fahrzeugen vor allem in der City-Logistik und auf der letzten Meile zum Endkunden. Gerade vor dem Hintergrund der zunehmenden Urbanisierung kann das Konzept der E-Mobility hier traditionelle Verkehrsträger substituieren und zu Kosten- und CO₂-Einsparungen führen. Das ENUBA-Projekt von Siemens zielt auf die Nutzung oberleitungsgespeister, schwerer Nutzfahrzeuge ab. Im Gegensatz zu den Alternativen für die letzte Meile wäre dieses Konzept auch für Mittel- und Langstreckentransporte geeignet (vgl. BMU 2012). Auch die Bundesregierung hat in ihrem Regierungsprogramm die tiefgreifenden Auswirkungen der Elektromobilität auf die bestehenden Logistiksysteme erkannt und fordert daher eine Untersuchung neuer Logistikkonzepte, welche Elektromobilität integrieren

(vgl. Bundesregierung 2011). Im Rahmen des Forschungsprojekts „Konzipierung und Gestaltung elektromobiler Dienstleistungen im innerstädtischen Raum“ werden bereits Prototypen als Technologiekonzepte für E-Mobility-Anwendungen im Logistikbereich vorgestellt. Allerdings werden die Konzepte nicht näher bezüglich ihrer Einsatzweise analysiert (vgl. HBK Braunschweig, Institut für Transportation Design (ITD) 2011). Diese Studien zeigen, dass es möglich ist, die Elektromobilität sowohl in den bestehenden logistischen Kontext einzubinden als auch völlig neue Logistikkonzepte um sie herum aufzubauen. Allerdings steht die Forschung hier noch am Anfang. Bislang werden lediglich Feldversuche unternommen. Eine flächendeckende Anwendung elektromobiler Konzepte, gerade über den urbanen Raum hinaus, findet dagegen nicht statt. Auch werden bislang nur selten Auswertungen hinsichtlich der Erfolgsfaktoren, Potenziale, Restriktionen, Nutzungskonzepte und Auswirkungen auf bestehende Logistiksysteme durchgeführt. Die Wertschöpfungskette von E-Fahrzeugen unterscheidet sich von der konventioneller Fahrzeuge. Nicht zuletzt, weil sich durch neue Komponenten (beispielsweise Batteriesysteme) oder den verstärkten Einsatz von Verbundwerkstoffen neue Zuliefererstrukturen (vgl. Brand/ Herrmann 2012). Wallentowitz et al. identifizieren wesentliche Komponenten, deren Bedeutung sich im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug verschiebt. So entfallen beispielsweise der Verbrennungsmotor oder die Kupplung. Andere Komponenten wie das Bremssystem und der Antriebsstrang sind teils starken Veränderungen ausgesetzt (vgl. Wallentowitz. et al. 2009). Ebenfalls wird die neue Rollenverteilung zwischen Automobilherstellern und der Zuliefererindustrie diskutiert. Implikationen, wie sich dies auf die

CO₂-Emissionen in der Wertschöpfungskette und in der Logistik im Speziellen von E-Fahrzeugen auswirkt, werden jedoch nicht herausgestellt. Auch Kampker et al. untersuchen die Auswirkungen eines Wandels zur Elektromobilität in der Automobil- und Zuliefererindustrie. Sie unterscheiden zwischen Veränderungen der vorwärts gerichteten und der rückwärtsgerichteten Wertschöpfungskette (vgl. Kampker et al. 2013). Sie stellen zudem die wachsende Bedeutung neuer Mobilitätskonzepte heraus. Jedoch werden auch hier keine Schlüsse hinsichtlich einer Veränderung des CO₂-Footprints in der Herstellung von Elektrofahrzeugen gezogen. Eschenbächer et al. untersuchen in ihrem Forschungsprojekt „Personal Mobility Center“ die Wechselwirkungen zwischen neuen Mobilitätskonzepten wie dem Car Sharing und der Elektromobilität. Auch sie kommen zu dem Schluss, dass es entlang der Wertschöpfungskette der Elektromobilität industrieübergreifende Veränderungen geben wird. Welche Unternehmen hierbei eine führende Rolle übernehmen, bleibt aufgrund der bislang fehlenden Standardisierung von Produkten und Infrastruktur offen. Neben den Automobilherstellern heben sie vor allem die Rolle der Batteriehersteller sowie der Infrastrukturanbieter und Mobilitätsdienstleister hervor (vgl. Eschenbächer et al. 2012). Capgemini greift diese Entwicklung auf und untersucht näher, welche Auswirkungen dies auf die Wertschöpfungsnetzwerke der Automobilhersteller hat. Hierbei wird herausgestellt, dass die Zusammenarbeit vieler Einzelunternehmen weiter an Bedeutung gewinnt und vor allem kleinere Unternehmen fernab der Automobilindustrie in den Mittelpunkt treten (vgl. Capgemini 2012). Gerade vor dem Hintergrund einer sich verändernden Wertschöpfungsstruktur in der Herstellung von E-Fahrzeugen sind die Konzepte

so zu gestalten, dass KMU in der Lage sind, diese umzusetzen. Die daraus resultierende Herausforderung ist eine ressourcenschonende Koordination der vielschichtigen Partner und die Realisierung von effizienten Logistiksystemen. Trotz hoher Anforderungen an die Infrastruktur und an neue Wertschöpfungsstrukturen zeichnet sich in den vergangenen Jahren ein immer stärker werdender Trend hin zu Elektrofahrzeugen ab. Auch Premiumhersteller wie BMW sind nun im Markt der E-Mobility aktiv. Hinsichtlich der Optimierung des CO₂-Footprints sind in der Produktlebenszyklusbetrachtung besonders die Ökobilanzen von Herstellung und Entsorgung eines Fahrzeugs in den Mittelpunkt gerückt. Neben den Herstellungsprozessen trägt die Logistik während des Produktlebenszyklus eines E-Fahrzeugs maßgeblich zu dessen CO₂-Footprint bei. In einer Untersuchung von Fuchs et al. werden die lebenszyklusspezifischen CO₂-Emissionen eines E-Fahrzeugs denen konventionell angetriebener Fahrzeuge gegenübergestellt. Mit in die Betrachtung einbezogen werden auch Conversion Cars, also Fahrzeuge, die zunächst mit konventionellem Antrieb ausgerüstet sind und später zu Elektrofahrzeugen umgebaut werden (vgl. Fuchs et al. 2012). Es kann davon ausgegangen werden, dass in der Wertschöpfungskette eines E-Fahrzeugs bis zu seiner Fertigstellung deutlich mehr CO₂ emittiert wird, als bei einem Fahrzeug mit konventionellem Antrieb. Dies liegt vor allem an den aufwändigeren Herstellungsprozessen etwa im Batteriebereich. Eine vergleichende Untersuchung hinsichtlich des CO₂-Footprints für die Logistik wird jedoch nicht vorgenommen. Gerade vor dem Hintergrund steigender Produktionszahlen werden diese Themen jedoch immer dringlicher und bilden eine bedeutende Forschungslücke. Die steigenden Fertigungszahlen

werden auch durch den Verband der deutschen Elektrotechnik aufgenommen und weitreichende Handlungsbedarfe in der Entwicklung von Konzepten zur Massenproduktion dieser Fahrzeuge abgeleitet. Die Produktion von Elektrofahrzeugen ist zwar bereits heute technisch möglich, jedoch sind viele der benötigten Verfahren noch nicht dem Automobilstandard angeglichen und ineffizient. Eine Weiterentwicklung der Logistiksysteme hin zur automobilen Massenproduktion ist demnach erforderlich (vgl. Verband der Elektrotechnik 2010). Auch hier wird zwar der Handlungsbedarf aufgezeigt, es werden jedoch keine konkreten Möglichkeiten zur Reduktion des CO₂-Footprints in der Logistik in der Wertschöpfungskette von E-Fahrzeugen untersucht. Dies lässt zusammen mit der Steigerung der Produktionszahlen sowie der sich verändernden Zuliefererstruktur darauf schließen, dass auch in der Logistik deutliches Optimierungspotenzial existiert. Es gibt also einen großen Bedarf an logistischen Optimierungslösungen in der Wertschöpfungskette von E-Fahrzeugen. Hierbei sind auch die Redistributions- und Entsorgungslogistik von besonderer Bedeutung, wie die Projekte des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zum Recycling von Batteriesystemen nahelegen (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2011, 2012). Dies unterstreicht die Bedeutung eines ganzheitlichen logistischen Optimierungsansatzes, welcher sowohl vorwärts- als auch rückwärtsgerichtete Material- und Informationsflüsse mit einbezieht. Der Literaturüberblick zeigt deutlich die Defizite im aktuellen Stand der Forschung. Einzelne Aspekte der im Forschungsprojekt relevanten Themen werden bereits tiefgehend behandelt, jedoch steht die Forschung im Bereich der Elektro-

mobilität und ihrer Implikationen für die Logistik noch am Anfang. Gerade die besonders relevanten Bereiche der Messung des logistischen CO₂-Footprints sowie dessen Optimierung werden bislang nur unzureichend in der Literatur behandelt. Es fehlt bislang eine Möglichkeit, bereits bestehende Berechnungsmodelle zur Erfassung des logistischen CO₂-Footprints einfach und praxistauglich in das Tagesgeschäft von kleinen und mittelständischen Unternehmen zu überführen. Eine Quantifizierung ist jedoch ein Schritt für erfolgreiche Optimierungsbestrebungen. Die Betrachtung zur Optimierung des logistischen CO₂-Footprints findet nicht auf Ebene der einzelnen Logistikprozesse statt, sodass sich daraus ergebende Implikationen für Handlungsoptionen und deren Potenziale nicht betrachtet werden.

1.3 Vorgehensweise

Die gesetzten Forschungsziele und die identifizierten Forschungslücken dienen als Grundlage für die weitere Vorgehensweise, deren Ziel eine ganzheitliche CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik am Beispiel der Elektromobilität darstellt. Neben der Literaturanalyse dienen die empirische Untersuchung, eine umfangreiche Logistikprozessanalyse, die Entwicklung eines Berechnungsmodells für die Transportlogistik und dessen Validierung an exemplarischen Berechnungen sowie die Ableitung von Handlungsoptionen und die Plausibilisierung von CO₂-Reduzierungspotenzialen unter Anwendung der Handlungsoptionen auf verschiedene Szenarien als Eckpunkte des Forschungsdesigns. Die Literaturanalyse in den Bereichen der CO₂-Footprint-Messung, der Optimierungsstrate-

gien zur Verbesserung des CO₂-Footprints in der Logistik sowie der Elektromobilität hinsichtlich CO₂-Emissionen in der Wertschöpfungskette eines E-Fahrzeugs und des Einsatzes elektrischer Antriebssysteme in der Logistik bildet demnach die Ausgangsbasis der Untersuchung. Auf dieser Basis werden Hypothesen abgeleitet. Das zweite Element des Forschungsprojekts ist die empirische Untersuchung, welche auf die Erweiterung und Validierung der Erkenntnisse der theoretischen Analyse fokussiert. Die empirische Untersuchung setzt sich aus drei wesentlichen Säulen zusammen: Expertengespräche als Einzelinterviews mit Ansprechpartnern aus der Praxis, Workshops als Diskussionsforum für neue Erkenntnisse und offene Fragen sowie die Analyse von Fallstudien zur Validierung der erzielten Ergebnisse. Die Inhalte der Expertengespräche konzentrieren sich auf die Identifikation der markt- und technologieeitigen Rahmenbedingungen der Elektromobilität einerseits und auf Herausforderungen und Erfolgsfaktoren bei der Implementierung von Mess- und Optimierungssystemen des logistischen CO₂-Footprints andererseits. Ziel ist die Ableitung von Forschungsfragen und die weitere Spezifizierung der Untersuchungsrichtung. Die Workshops dienen zur Diskussion der Erkenntnisse aus der Literaturanalyse und der Expertenbefragung sowie als Austauschmedium mit den Praxispartnern. Ebenfalls erfolgt durch das Einbringen von Anforderungen und Erfahrungswerten aus der Praxis eine stetige Adjustierung des zu entwickelnden Methoden-Mixes sowie des CO₂-Berechnungstools. Die Fallstudien dienen während der gesamten Projektlaufzeit als Referenz zur Veranschaulichung der gesammelten Erkenntnisse und zur Abbildung des Begründungszusammenhangs der Hypothesen. Aufgrund der Ausrichtung

des Forschungsprojekts auf die Elektromobilität liegt der Fokus der meisten Fallstudien im Bereich der elektromobilen Wertschöpfungskette. Ein weiteres Projektsegment stellt eine ausführliche Analyse der relevanten Logistikprozesse dar. Die Logistik wird dabei in die Teilprozesse Beschaffungslogistik, Produktionslogistik, Distributionslogistik, Entsorgungslogistik, Wiedereinsatzlogistik, City-Logistik, Handelslogistik sowie die Logistik der letzten Meile unterteilt. Diese Teilprozesse werden voneinander abgegrenzt und hinsichtlich ihrer typischen Merkmale untersucht. Der Fokus liegt auf der Analyse der Besonderheiten in Bezug auf prozessspezifische CO₂-Emissionen, beispielsweise durch eine typische Verkehrsträgerwahl. Ziele dieses Projektbausteins sind die Spezifizierung der einzelnen Logistikprozesse und daraus resultierend die Ableitung typischer Problemstellungen hinsichtlich CO₂-Footprint-Messung und -Optimierung. Dies bedeutet, dass über die Logistikprozessanalyse der Grundstein für die Messung des logistischen CO₂-Footprints gelegt wird. Auf Basis der Vorarbeiten aus der Literatur sowie der Erkenntnisse aus Workshops und Expertengesprächen wird eine praktikable Berechnungssystematik entwickelt und in einem internetbasierten IT-Tool umgesetzt. Wesentlicher Bestandteil ist die Identifikation von Messpunkten für CO₂-Emissionen und die Abgrenzung zusammenhängender Logistiksysteme an den identifizierten Messpunkten. Fallbeispiele dienen hier zur Illustration der Berechnungssystematik. Herausforderungen wie die Allokation von Leerfahrten sowie die transportgutspezifische Identifikation des CO₂-Footprints können auf diese Weise anschaulich dargestellt werden. Dieser Teil des Forschungsprojekts dient der Lösung zweier wesentlicher Problemstellungen. Zum einen geht es um die Transpa-

renzsteigerung sowie um eine einfache Zugänglichkeit und Handhabbarkeit eines umfangreichen Berechnungstools für die Messung des logistischen CO₂-Fußabdrucks. Zum anderen bildet die Messbarmachung von CO₂-Emissionen den Grundstein für die Optimierung des CO₂-Footprints in der Logistik, denn nur auf diese Weise kann der Effekt von Verbesserungsmaßnahmen gemessen werden. Der differenzierte Einsatz dieser Verbesserungsmaßnahmen und damit die Optimierung des CO₂-Footprints sind Gegenstand des letzten Projektbausteins. Hier werden Optimierungsstrategien und deren Wirkungspotenziale auf den CO₂-Footprint in der Logistik identifiziert. Die Potenziale werden dabei hinsichtlich der Wirkung der verschiedenen Strategien anhand von Fallstudien gemessen. Dabei werden die Strategien und deren Einfluss auf den CO₂-Footprint unter Berücksichtigung verschiedener Ausgangsszenarien einer umfassenden Bewertung unterzogen. Hierbei wird im Speziellen überprüft, welche der eingesetzten Strategien universell verwendet werden können und welche lediglich in einzelnen Szenarien ökologische Vorteile bedeuten, ohne die ökonomische Leistungsfähigkeit eines Logistiksystems negativ zu beeinflussen. Im Zusammenspiel zwischen CO₂-Emissionsmessung und Einsatz der Optimierungsstrategien werden die Forschungsfragen beantwortet. Die Vorgehensweise im Forschungsprojekt ist in Abbildung 1-4 dargestellt.

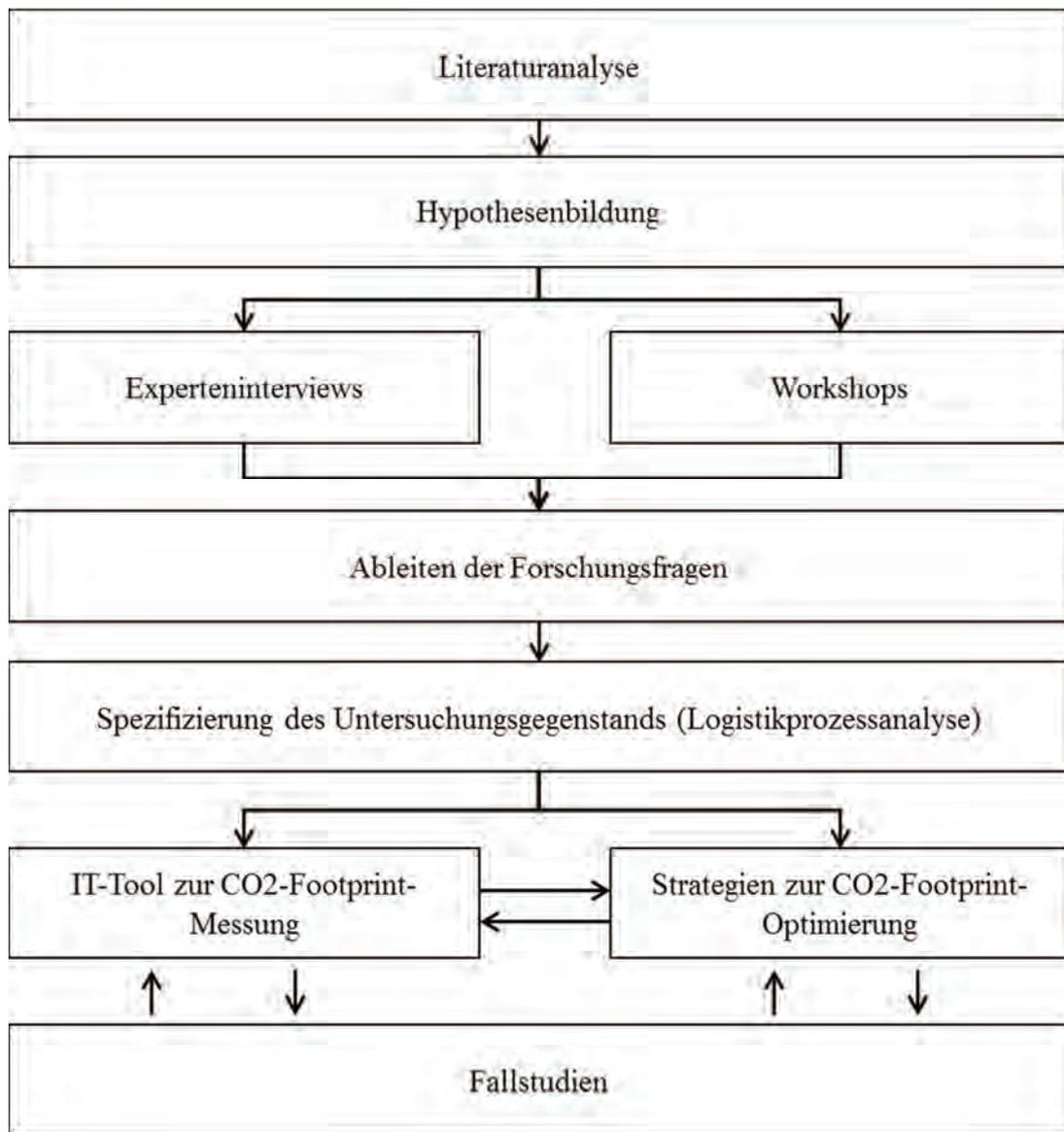


Abbildung 1-4: Vorgehensweise

2 Charakterisierung des Forschungsvorgehens

2.1 Hypothesen

Im Rahmen der Literaturanalyse des Forschungsvorhabens sind Hypothesen aus den gesammelten Erkenntnissen abgeleitet worden, die Aussagen über die relevante Kausalität der CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik treffen. Unter einer Hypothese ist eine wissenschaftliche formulierte Aussage über einen möglichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zu verstehen, die noch nicht bewiesen ist. Die Formulierung einer Hypothese orientiert sich in der Regel an der Bedingung, unter der sie gültig sein soll. Wissenschaftliche Hypothesen müssen bestimmten Kriterien genügen. Es ist darauf zu achten, dass sie Teil eines systematischen Zusammenhangs sind und nicht in Widerspruch zu anderen Hypothesen stehen. Sie sind so zu formulieren, dass sie empirisch überprüfbar und operationalisierbar sind sowie keine Wertung enthalten. Auf Basis dieser Kriterien sind die Forschungshypothesen aus bestehenden wissenschaftlichen Theorien abgeleitet sowie um Erkenntnisse aus Voruntersuchungen und eigenen Beobachtungen spezifiziert worden. Die Hypothesenbildung und -überprüfung ist ein entscheidender Schritt im Forschungsprozess, um spezifische Empfehlungen aussprechen zu können. Im Rahmen eines deduktiven Forschungsprozesses werden die Hypothesen konkretisiert. Ziel der vorliegenden Analyse war es, Aussagen abzuleiten, welche sich auf das Ergebnis der empirischen Untersuchung beziehen. Die aus der Literaturlauswertung aggregierten Daten waren der Ausgangspunkt des deduktiven Forschungsprozesses. Im Verlauf des Forschungsprojekts trugen die Erkenntnisse aus Experten-

gesprächen, Fallstudienanalysen und den Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses zur Hypothesenformulierung bei. Insgesamt wurden 15 Hypothesen zur Optimierung des CO₂-Footprints in der Logistik formuliert, die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu untersuchen sind.

H1: *Je höher der Verbrauch von fossilen Brennstoffen in der Logistikkette ist, desto höher ist der Ausstoß an CO₂.*

In Deutschland verursachte der Verkehr im Jahr 2012 CO₂-Emissionen von mehr als 150 Millionen Tonnen, wovon etwa 95 Prozent auf den Straßenverkehr entfallen. Der gesamte Verkehr verursacht damit etwa 20 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland. Der Beitrag der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle oder Erdöl sowie deren Derivate wie Benzin oder Diesel zum anthropogenen Treibhauseffekt wird global auf etwa 50 Prozent geschätzt. Es ist davon auszugehen, dass mit zunehmendem Verbrauch von fossilen Brennstoffen auch der Ausstoß von CO₂ steigt.

H2: *Je mehr CO₂-Emissionen eingespart werden können, desto geringer sind die Kosten für Unternehmen.*

Wenn sich der Emissionsrechtehandel in der EU etabliert und die Preise für CO₂-Zertifikate wieder steigen, ist mit einer erheblichen finanziellen Mehrbelastung der Unternehmen für ihre verursachten CO₂-Emissionen zu rechnen. Zusätzlich bedeutet in der Logistik eine Reduzierung von CO₂-Emissionen eine Reduzierung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen und damit auch eine Kosteneinsparung. Daher ist die Hypothese zu untersuchen, ob durch eine Vermeidung von CO₂-Emissionen auch Kosten eingespart werden können oder ob mit einem zusätzlichem finanziellen Mehraufwand zu rechnen ist.

H3: *Unternehmen fehlt die Kenntnis über die Entstehung von CO₂-Emissionen in der Logistikkette.*

Unternehmen können ihren CO₂-Ausstoß nicht ermitteln, wenn ihnen die Kenntnis über die CO₂-Entstehung in der eigenen Logistikkette fehlt. Aufgrund dem Mangel an finanzieller und personeller Ressourcen sowie am notwendigen Wissen, sind Unternehmen daher selten in der Lage gezielt CO₂-Emissionen zu reduzieren, da sie nicht die Hauptverursacher der CO₂-Emissionen identifizieren können.

H4: *Steigende Energiekosten und Treibstoffpreise in der Logistik führen zu einer Reduzierung von CO₂-Emissionen.*

Die Steigerung der Energiekosten im Bereich der endlich verfügbaren fossilen Energieträger führen zu einer Transportkostensteigerung und damit zu einer indirekten Umweltorientierung von Unternehmen. Es ist daher zu untersuchen, inwieweit die Kostensteigerungen Unternehmen veranlassen CO₂-Effizienzmaßnahmen durchzuführen.

H5: *Aufgrund einer fehlenden Methodik können Unternehmen die Kosten des CO₂-Ausstoßes in ihrer Logistikkette nicht quantifizieren.*

Mangelnde Kenntnis über die Entstehung von CO₂-Emissionen in der Logistikkette verhindert auch eine finanzielle Bewertung des CO₂-Ausstoßes. Unternehmen sind zwar die Kosten der Energieträger bewusst, jedoch fehlt ihnen eine Möglichkeit diese ins Verhältnis zu ihrem CO₂-Footprint zu setzen, um ökoefiziente Entscheidungen zu treffen. Daher ist zu untersuchen, ob Unternehmen von einer einfachen Methodik zur Ermittlung des CO₂-Footprints profitieren können, um mehr Transparenz über die Kosten des CO₂-Ausstoßes zu erhalten.

H6: *Die Problematik der Messbarkeit von CO₂-Emissionen in der Logistik hindert Unternehmen ihren CO₂-Footprint zu reduzieren.*

Für eine zielorientierte Reduzierung des CO₂-Footprints ist eine Quantifizierung der CO₂-Emissionen in der Logistik notwendig. Unternehmen stehen jedoch vor dem Problem der Messbarkeit der CO₂-Emissionen. Es fehlt an einer standardisierten und praxistauglichen Methode zur Messung und Berechnung des CO₂-Footprints. Dies hindert Unternehmen an der Durchführung einer CO₂-Footprint-Optimierung und verringert das Bewusstsein für eine nachhaltige Logistik.

H7: *Eine Effizienzsteigerung in der Logistik ist notwendig, um CO₂-Emissionen zu reduzieren.*

Aufgrund der zunehmenden Güterverkehrsleistung in Deutschland ist auch in den nächsten Jahren mit einer Steigerung des CO₂-Ausstoßes zu rechnen. Über eine Effizienzsteigerung in der Logistik in Form von Wegstrecken- und Ladungsträgeroptimierung kann der Ausstoß von CO₂-Emissionen in der Logistik reduziert werden.

H8: *Der Einsatz von E-Mobility unterstützt die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in der Logistik.*

In Folge des höheren Wirkungsgrads und des geringeren durchschnittlichen Energieverbrauchs ist davon auszugehen, dass Elektrofahrzeuge geringere CO₂-Emissionen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren aufweisen. Daher ist zu untersuchen, welchen Beitrag die E-Mobility zur Reduzierung von CO₂-Emissionen in der Logistik liefert.

H9: *Eine integrierte Optimierung der Logistikkette trägt zur Reduzierung von CO₂-Emissionen bei.*

In der Logistikkette liegen wichtige Hebel der CO₂-Vermeidung in einem integrierten Optimierungsansatz für den Güterverkehr, der sowohl technische als auch ökonomische Ansätze berücksichtigt.

H10: *Ein entfernungsbasierter Ansatz eignet sich besser als ein verbrauchsorientierte Ansatz zur Berechnung von CO₂-Emissionen in der Logistik.*

Für die Ermittlung der CO₂-Emissionen in der Logistikkette existieren zwei verschiedene Ansätze: Einerseits der kraftstoffbeziehungweise energiebasierten und andererseits der entfernungs-basierte Ansatz. Die Anwenderfreundlichkeit und Praxistauglichkeit dieser Ansätze ist daher zu untersuchen, um eine spezifische Empfehlung treffen zu können.

H11: *Zur Emissionsberechnung sind die zurückgelegte Wegstrecke und die Auslastung des Transportfahrzeugs relevant.*

Für die Berechnung des CO₂-Ausstoßes in der Logistikkette sind verschiedene Kenngrößen zu untersuchen und auf ihre Praxistauglichkeit hin zu bewerten. Aufgrund einer nachvollziehbaren und schnellen Ermittlung von zurückgelegter Wegstrecke und der Auslastung des Transportfahrzeugs sind vor allem diese Kenngrößen relevant.

H12: *Für die Vergleichbarkeit des CO₂-Footprints in der Logistik ist eine einheitliche Vorgehensweise und Berechnung notwendig.*

Aufgrund unterschiedlicher Vorgehensweisen und Bilanzierungsräume zur Ermittlung des CO₂-Footprints ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse bislang kaum möglich. Daher ist zu untersuchen, inwiefern eine standardisierte Vorgehensweise zur Ermittlung von CO₂-Emissionen die CO₂-Reduzierung unterstützt und eine Vergleichbarkeit des CO₂-Footprints verschiedener Logistikketten ermöglicht.

H13: *Je höher der Einsatz moderner Technologien zur Material- und Informationsflussgestaltung in der Logistik ist, desto höher ist die CO₂-Effizienz in der Logistikkette.*

Die Nutzung moderner Technologien wie RFID, GPS, ERP-Systemen oder Fahrerassistenzsystemen erlauben es den Material- und Informationsfluss flexibel zu gestalten und effizient zu steuern. Es ist daher zu untersuchen, welche Auswirkung die Nutzung moderne Technologien auf den CO₂-Footprint in der Logistik hat.

H14: *Ein effizienter Multi-Modaler-Güterverkehr, hat einen positiven Einfluss auf die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in der Logistikkette.*

CO₂-Emissionen pro Tonnenkilometer verteilen sich für die Transportmodi Luftverkehr, Straße, Schiene und Seeschiff grob 100 : 10 : 4 : 2. Transporte mit Bahn und Schiff können somit signifikant dazu beitragen, den CO₂-Ausstoß in der Logistikkette zu reduzieren. Es ist daher zu untersuchen, wie ein Multi-Modaler-Güterverkehr effizient in der Logistikkette genutzt werden kann.

H15: *Je größer das Bewusstsein über die Entstehung von CO₂ in der Logistikkette ist, desto zielgerichteter ergreifen Un-*

ternehmen Maßnahmen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen.

Die Treiber des CO₂-Ausstoßes in der Logistikkette sind vielschichtig und hängen von verschiedenen Einflussgrößen ab. Neben technischen Einflussgrößen wie Brennstoffverbrauch und Motoreffizienzklasse, haben auch Logistikstrukturen und -prozesse einen Einfluss auf den CO₂-Footprint der Logistik. Dabei steht die Frage im Fokus, ob ein umfangreiches Bewusstsein über die Treiber der CO₂-Emissionen in der Logistik Unternehmen dabei unterstützt geeignete Maßnahmen zielgerichtet anzuwenden.

2.2 Empirische Basis

Die Analyse theoretischer sowie praktischer Beiträge zur CO₂-Entstehung und CO₂-Footprint-Berechnung bilden die empirische Basis des Forschungsprojekts. Zur Gewinnung der Daten wurden Expertengespräche, Workshops und Fallstudienanalysen durchgeführt. Der Austausch mit den am Projekt beteiligten Unternehmen ermöglicht eine Kommunikationsplattform zum Abgleich der theoretischen und praktischen Fragestellungen. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Begründungszusammenhang der Hypothesen sowie zur Konkretisierung der Forschungsfragen.

2.2.1 Fallstudienanalyse

Zur Erarbeitung der empirischen Basis wurden elf Fallstudien analysiert. Die Auswertung von Fallstudien dient der Präzisierung der Hypothesen und der Bestätigung der Relevanz des

Forschungsprojekts im Forschungskontext. Ein Vorteil der Fallstudienanalyse gegenüber einem strukturierten Fragebogen ist die Beschränkung auf nur ein Untersuchungsobjekt und die dadurch entstehende Tiefenanalyse, die umfangreichere und komplexere Ergebnisse liefert als bei anderen empirischen Forschungsmethoden. Die durchgeführte Fallstudienanalyse definierte weitere praxisrelevante Treiber von CO₂-Emissionen in der Logistik sowie Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung. Die analysierten Fallstudien konzentrierten sich auf Unternehmen aus den Branchen Logistik, Automobilzulieferer und -hersteller, Maschinenbau und der Transporttechnik (vgl. Abbildung 2-1). Zielsetzung der Fallstudienanalyse war die Ermittlung und Identifikation von CO₂-Treibern in der Logistik, die Ableitung von Vorgehensweisen zur CO₂-Ermittlung und Bewertung, die Sammlung von Gestaltungsfeldern der Logistikkette sowie die Auswertung der in der Praxis angewandten Maßnahmen und Strategien zur CO₂-Reduzierung in der Logistik.

Fallstudie	Branche	Umsatz (Mio. EUR)	Mitarbeiter
1	Logistik	73	110
2	Logistik	5.000	31.500
3	Logistik	1.200	4.300
4	Automobilzulieferer	30.000	170.000
5	Automobilzulieferer	46.000	280.000
6	Automobilhersteller	76.000	110.000
7	Automobilhersteller	330	1700
8	Maschinenbau	215	800
9	Maschinenbau	390	1.000
10	Maschinenbau	800	3.200

Abbildung 2-1: Übersicht der Fallstudien

Die Fallstudien wurden entsprechend der Untersuchungsbereiche auf ihre Relevanz zur Beantwortung der Forschungshypothesen sowie den Einfluss auf die Modellbildung bewertet. Die Auswertung der Fallstudien zeigte, dass bei allen untersuchten Unternehmen die CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik von hoher bis sehr hoher Relevanz ist und bestätigt damit die Praxisrelevanz des Forschungsthemas. Knapp dreiviertel der Fallstudien lässt Rückschlüsse auf die Treiber von CO₂-Emissionen in ihrer Logistikkette zu und liefert damit erste Erkenntnisse über die größten CO₂-Treiber, welche im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts priorisiert untersucht wurden. Auch zur Vorgehensweise bei der CO₂-Ermittlung konnten bereits erste Erkenntnisse gewonnen werden. Die Auswertung zeigte allerdings auch die unterschiedlichen Vorgehensweisen und Bilanzierungsräume der Unternehmen, sodass hier ebenfalls Forschungsbedarf nach einer standardisierten Berechnungslogik besteht. Bei der Analyse der Gestaltungsfelder zur CO₂-Reduzierung in der Logistik zeigte die Fallstudienauswertung, dass die betrachteten Unternehmen kaum geeignete Gestaltungsfelder identifiziert haben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die untersuchten Unternehmen noch keine strukturierten Reduzierungsmaßnahmen in relevanten Gestaltungsfeldern geplant haben, sondern sich aktuell eher mit kurzfristigen und schnell umzusetzenden Maßnahmen auseinandersetzen. Hier zeigt sich weiterer Forschungsbedarf, indem Unternehmen aufgezeigt wird auf welche Gestaltungsbereiche sie sich konzentrieren sollen, um nachhaltig CO₂ in ihrer Logistikkette zu reduzieren. Durch die Fallstudienanalyse wurde ein Überblick über die in der Praxis verbreiteten und angewandten Methoden und Strategien zur CO₂-Reduzierung gewonnen.

Diese können zur Ableitung von spezifischen CO₂-Reduzierungsstrategien sowie im Modell zur CO₂-Reduzierung in der Logistik genutzt werden. Die Auswertung zeigte jedoch auch, dass die Unternehmen nur eine geringe Methodenkompetenz im Bereich der CO₂-Footprint-Optimierung aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die untersuchten Unternehmen überwiegend KMU waren, die bislang mit wenigen Methoden vertraut sind, welche sie für die CO₂-Reduzierung einsetzen. Zusätzlich zeigte sich, dass den Unternehmen häufig die Unterstützung bei der Umsetzung von CO₂-Einsparungsmaßnahmen fehlt, was durch die geringe Relevanz dieses Kriteriums in der Fallstudienanalyse ausgedrückt wird. Aufgrund mangelnder finanzieller und kapazitiver Ressourcen der Unternehmen können häufig die erzielten Ergebnisse aus der CO₂-Ermittlung nicht umgesetzt werden. Hierfür wurde ein praxistaugliches Modell zur CO₂-Reduzierung entwickelt, das Unternehmen gezielt dabei unterstützt Maßnahmen zu ergreifen. Eine Zusammenfassung der Relevanz der untersuchten Themenfelder in den Fallstudien ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Diese können zur Ableitung von spezifischen CO₂-Reduzierungsstrategien sowie im Modell zur CO₂-Reduzierung in der Logistik genutzt werden. Die Auswertung zeigte jedoch auch, dass die Unternehmen nur eine geringe Methodenkompetenz im Bereich der CO₂-Footprint-Optimierung aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die untersuchten Unternehmen überwiegend KMU waren, die bislang mit wenigen Methoden vertraut sind, welche sie für die CO₂-Reduzierung einsetzen. Zusätzlich zeigte sich, dass den Unternehmen häufig die Unterstützung bei der Umsetzung von CO₂-Einsparungsmaßnahmen fehlt, was durch die geringe Relevanz

Fallstudie Kriterien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CO2-Relevanz	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CO2-Treiber	●	●	●	●	○	●	●	●	○	○
Vorgehensweisen	●	●	○	●	○	●	○	●	●	○
Gestaltungsfelder	●	●	●	●	○	○	●	○	○	●
Methoden/ Tools	○	●	○	●	●	●	○	●	○	●
Instrumenteneinsatz	○	●	○	○	●	○	●	●	●	●
Umsetzungs- maßnahmen	○	●	●	●	●	●	○	●	●	○

○ Keine Relevanz ● Teilweise relevant ● Sehr relevant

Abbildung 2-2: Zusammenfassung der Fallstudienanalyse

dieses Kriteriums in der Fallstudienanalyse ausgedrückt wird. Aufgrund mangelnder finanzieller und kapazitiver Ressourcen der Unternehmen können häufig die erzielten Ergebnisse aus der CO₂-Ermittlung nicht umgesetzt werden. Hierfür würde ein praxistaugliches Modell zur CO₂-Reduzierung Unternehmen helfen, gezielt Maßnahmen umzusetzen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudienanalyse ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

2.2.2 Expertengespräche

Zielsetzung der Expertengespräche war die Verfolgung eines iterativen Optimierungsansatzes, welcher für eine kontinuierliche Anpassung des Modells mit den praktischen Bedürfnissen der Unternehmen sorgt. Expertengespräche helfen den Untersuchungsgegenstand thematisch zu strukturieren sowie die Forschungsfragen zu konkretisieren. Ausgangsbasis zur Erstellung der Gesprächsleitfäden ist die zuvor durchgeführte Literatur-

und Fallstudienanalyse. Zur Konkretisierung der im Rahmen der theoretischen Analyse gewonnenen Hypothesen wurden 27 Interviews mit Unternehmensvertretern geführt (vgl. Abbildung 2-3). Die Ansprechpartner der Unternehmen waren verschiedenen Abteilungen zugeordnet, wodurch eine ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung mit vielschichtigen Lösungswegen erreicht wurde. So wurden Expertengespräche mit Geschäftsführern und Experten aus den Abteilungen Logistik, Einkauf, Marketing, Controlling, Entwicklung und Umwelt geführt. Es wurde darauf geachtet Unternehmen aus verschiedenen Branchen und mit unterschiedlicher Größe zu befragen. Inhalt der Expertengespräche waren die Diskussion der Problemstellungen in der logistischen Kette sowie der Einflussgrößen auf den CO₂-Footprints, Strategien zur Reduzierung des CO₂-Footprints sowie die zum Aufbau des Modells notwendigen Anforderungen der Unternehmen an die Bedienbarkeit und Funktionalität eines IT-Tools. Zielsetzung der geführten Expertengespräche war es, belastbare Erkenntnisse zu Einflussgrößen und Handlungsoptionen zur CO₂-Footprint-Reduzierung zu gewinnen sowie die Wechselwirkungen zwischen diesen zu diskutieren. Dabei wurden die Wirkmechanismen in den Unternehmen in die Logik der Modellbildung mit aufgenommen. Durch die Expertengespräche war es möglich unterschiedliche Auffassungen hinsichtlich der CO₂-Footprint-Optimierung mit den Unternehmen zu diskutieren und Gründe für die Motivationen der CO₂-Footprint-Optimierung, Hemmnisse bei der Implementierung von Maßnahmen und Konflikte zwischen ökonomischen und ökologischen Perspektiven aufzudecken. Die Ergebnisse der Expertengespräche konnten die aufgestellten

Hypothesen zur CO₂-Ermittlung und CO₂-Reduzierung sowie deren Wirkbeziehungen in der Logistikkette plausibilisieren.

Unternehmen		Typ
	Arktik GmbH	KMU
	BMW Group	GU
	Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG	KMU
	BOSIG Baukunststoffe GmbH	KMU
	DB FuhrparkService GmbH	GU
	DB Schenker	GU
	Deutsche Post AG	GU
	Diehl Metal Applications GmbH	KMU
	EDAG GmbH & Co. KGaA	GU
	EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG	KMU
	e-Wölf GmbH	KMU
	Group 7 AG	KMU
	Johnson Controls Inc.	GU
	Autohaus Strube GmbH	KMU
	BALTH. PAPP Int. Lebensmittellogistik KG	KMU
	Siemens AG	GU
	TachoEASY GmbH	KMU
	TÜV Süd AG	GU
	FINE Mobile GmbH	KMU

KMU = kleine und mittelständische Unternehmen | GU = Großunternehmen

Abbildung 2-3: Übersicht der Expertengespräche

Folgende Erkenntnisse aus den Expertengesprächen zeigen die Praxisrelevanz des Forschungsvorhabens und bilden die Grundlage für die weitere Modellbildung: Die Unternehmen würden eine Möglichkeit zur einfachen und schnellen Berechnung des CO₂-Footprints begrüßen, um gezielt Maßnahmen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen durchzuführen. Aufgrund mangelnden Wissens in Bezug auf die CO₂-Footprint-Optimierung in Unternehmen, ist bei der Modellbildung eine einfache Benutzerführung und Erläuterung von Begrifflichkeiten zu implementieren. Der Zusammenhang zwischen CO₂-Ausstoß und entstehenden Kosten ist Unternehmen kaum bewusst. Die Schaffung von Transparenz über die Korrelation dieser zwei Komponenten im Unternehmen kann daher als ein Enabler der CO₂-Footprint-Optimierung gesehen werden. Direkter Treiber der CO₂-Emissionen in der Logistik ist der Verbrauch von fossilen Brennstoffen. Indirekt tragen vor allem ineffiziente Flächennutzung von Ladungsträgern in den Transportmitteln, veraltete Antriebstechnologien, unnötige Leerfahrten und ineffizientes Fahrverhalten zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch bei, welcher den CO₂-Ausstoß zusätzlich erhöht. Ein Vergleich der CO₂-Footprints von Unternehmen zeigte sich in den Interviews als eingeschränkt verwertbar, da die verwendeten Ansätze zur Ermittlung zu unternehmensspezifisch waren. Die befragten KMUs betonten die Notwendigkeit einer einfachen und praxistauglichen Vorgehensweise zur Ermittlung des CO₂-Ausstoßes, sonst sehen sie keinen Mehrwert im Forschungsprojekt. In den Gesprächen wurde bestätigt, dass Unternehmen aufgrund der Dringlichkeit der CO₂-Reduzierung einen praxiserprobten Methodenbaukasten und sowie Handlungsstrategien zur Reduzierung von CO₂-Emissionen benötigen. Die Problematik der

CO₂-Ermittlung stellt für die meisten Unternehmen eine Herausforderung dar und ist einer der Hauptgründe, warum noch keine gezielten Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung stattfanden. Die Problemstellung des Forschungsprojekts gewinnt gerade bei KMU zunehmend an Bedeutung. Sie können eine anhaltende Sensibilisierung der Endkonsumenten für nachhaltige Produkte feststellen und spüren den zunehmenden Druck auf Zulieferer und Industriegüterhersteller. Allerdings stehen sie erst am Anfang bei der Ermittlung ihrer CO₂-Emissionen und haben einen geringen Kenntnisstand über die Haupttreiber von CO₂ in ihrer Logistikkette. Hingegen zeigte sich, dass Großunternehmen bereits Know-how zur Ermittlung und gezielter Reduzierung von CO₂-Emissionen gesammelt haben. Alle befragten Unternehmen bestätigten, dass die Nutzung der E-Mobility in der Logistikkette ein wesentlicher Hebel in der Reduzierung von CO₂-Emissionen ist. Vor allem im Bereich der City-Logistik sehen sie Anwendungsmöglichkeiten. Von den befragten Unternehmen, die bereits ihren CO₂-Footprint ermittelt haben, konnten alle unmittelbare Optimierungs- und Einsparungspotenziale zur CO₂-Reduzierung ableiten. Insbesondere Kunden im B2C-Bereich wünschen sich verstärkt die Bereitstellung entsprechender Kennzahlen zum CO₂-Ausstoß sowie Informationen zu Kompensationsmaßnahmen. Zur Steigerung der Effizienz in der Logistik sehen die Unternehmen vor allem den Einsatz geeigneter Software zur Steuerung der Warenströme sowie zur genaueren Vorausplanung und Auslastung der Transportmittel. Zudem stimmten sie der Hypothese zu, dass ein effizient gestalteter Multi-Modal-Verkehr zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in der Logistik beiträgt.

2.2.3 Workshops

Über den Zeitraum des Forschungsprojekts wurden vier unternehmensübergreifende Workshops durchgeführt, die jeweils in den Rahmen der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses integriert wurden. Zielsetzung der Sitzungen war es, einen stetigen Austausch zwischen Forschung und Praxis zu gewährleisten. In den Sitzungen wurden aktuelle Forschungsergebnisse präsentiert und mit den Teilnehmern die Forschungsfragen diskutiert. Die so gewonnen Erkenntnisse halfen die aufgestellten Hypothesen zu plausibilisieren, Antworten auf die Forschungsfragen aus Sicht der Unternehmen zu erhalten sowie die Erarbeitung eines Modells zur Reduzierung von CO₂-Emissionen zu unterstützen. So konnte der Praxisbezug der Forschungstätigkeiten sichergestellt und der Transfer des aktuellen Forschungsstands in die Unternehmen ermöglicht werden. An den Sitzungen nahmen insgesamt 17 Unternehmen unterschiedlicher Größe und Branche teil. Es waren Unternehmen aus den Bereichen E-Fahrzeughersteller, Industrie- und Logistikdienstleister, Automobilhersteller und -zulieferer sowie Experten zur Reduzierung von CO₂-Emissionen bei den Sitzungen vertreten. Der erste Workshop im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses diente dem Abgleich der wissenschaftlichen und praktischen Sichtweise des Forschungsprojekts sowie zur Diskussion der Forschungsfragen. Dazu wurde der aktuelle Stand der Forschung zum Thema CO₂-Footprint-Optimierung den teilnehmenden Unternehmen vorgestellt, die Projektstrukturierung diskutiert und sich auf eine gemeinsame Verständigung der Zielsetzung des Forschungsvorhabens mit den Praxispartnern geeinigt. Es wurden erste Kategorien von Treibern der CO₂-

Emissionen in der Logistik auf Basis der bisherigen Ergebnisse aus Literatur- und Fallstudienanalyse sowie mögliche Lösungsansätze zur Reduzierung der CO₂-Emissionen vorgestellt. Als Ergebnis der geführten Diskussion über die CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik konnten bestehende Defizite aufgegriffen und in ein erstes Lastenheft der Methodik überführt werden. Praxisvorträge der Unternehmen lieferten zusätzliche Informationen über aktuelle Herausforderungen und Möglichkeiten in der betrieblichen Praxis zur Reduzierung von CO₂-Emissionen in der Logistik. Die Unternehmensvertreter teilten das Verständnis für den aufgezeigten Forschungsbedarf zur Behebung der praktischen und theoretischen Defizite. In der Gruppenarbeit wurden die Hypothesen sowie mögliche Einflussgrößen auf den CO₂-Footprint von Unternehmen sowie entsprechende Gestaltungsbereiche zur Reduzierung der CO₂-Emissionen diskutiert. Hierbei konnten fünf Trends identifiziert werden, die verantwortlich für den CO₂-Ausstoß sind und damit das Forschungsvorhaben bekräftigen. Diese sind neben dem demografischen Wandel, Globalisierung und Nähe zu den Kundenmärkten, auch der technologische Wandel und das Internet, Individualisierung und Flexibilisierung, steigende Nachhaltigkeits- und Umweltanforderungen sowie der zunehmende globale Preisdruck. Es zeigte sich, dass Unternehmen Methoden und Konzepte benötigen, um ihren CO₂-Footprint gezielter reduzieren zu können. Es fehlt ihnen allerdings ein Überblick über vorhandene Maßnahmen und deren Reduzierungspotenzial von CO₂-Emissionen. Dabei werden besonders Konzepte gefordert, welche eine CO₂-effiziente Gestaltung der Logistik ermöglichen. Hierzu sind aus Sicht der Unternehmen Bewertungs- und Messmechanismen notwendig, die es Unternehmen ermögli-

chen geeignete Maßnahmen abzuleiten. Neben diesen Erwartungen an die Ergebnisse des Forschungsprojekts sehen die Unternehmen das Forschungsvorhaben als eine Austauschplattform an, um Problemstellungen und bereits initiierte Maßnahmen mit Vertretern aus anderen Bereichen diskutieren zu können. Die zweite Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses diente der Vorstellung und Diskussion der erarbeiteten Einflussgrößen auf den CO₂-Footprint in der Logistik sowie der Modellkonzeption für die Bewertung der CO₂-Emissionen. Zielsetzung war es zu prüfen, ob die im Rahmen der Literatur- und Fallstudienanalyse, den Expertengesprächen sowie im ersten Workshop ermittelten Hypothesen zur Reduzierung des CO₂-Footprints in der Logistik umsetzbar und lösungsorientiert sind. Zu diesem Zweck wurden die Unternehmensvertreter befragt, welche Gestaltungsbereiche der Logistik für sie relevant sind und wo sie Verbesserungspotenziale erwarten. Eine wesentliche Grundlage für die Diskussion bildete hierbei die Präsentation der Ergebnisse aus den geführten Expertengesprächen. Die Diskussion ergab, dass die Reduzierung der CO₂-Emissionen entlang der logistischen Prozesskette je Subsystem separat zu betrachten ist. Die teilnehmenden Unternehmen einigten sich auf die Gestaltungsbereiche Beschaffungslogistik, Innerbetriebliche Logistik und Produktionslogistik, Distributionslogistik, „City-Logistik“, Logistik der „letzten Meile“, sowie auf die Entsorgungslogistik. Unternehmensspezifische Differenzen wurden explizit in der Diskussion behandelt und sind auf Basis der Diskussionsergebnisse in das Berechnungsmodell und die Strategien zur CO₂-Reduzierung mit einbezogen worden. Exemplarische Fallstudienanalysen von Logistikdienstleistern zeigten wie eine praxistaugliche Umsetzung der CO₂-

Bilanzierung erfolgen kann. Die Analyse verdeutlicht, dass durch die Erfassung sowie Ableitung geeigneter Maßnahmen CO₂-Emissionen um 16 Prozent reduziert werden konnten. Weiterhin wurde ein Excel-Demonstrator zur Berechnung des CO₂-Footprints in der Logistik vorgestellt. Die Unternehmen begrüßten die einfache Benutzung und Darstellung der Ergebnisse und bekräftigten die Umsetzung des Excel-Demonstrators in ein IT-Tool, welches Unternehmen zur Verfügung steht. In der Diskussion zeigte sich, dass die Allokation der Emissionen auf die einzelnen Verkehrsträger bei einer CO₂-Footprint-Berechnung besonders relevant ist. Die Unternehmen bestätigten jedoch, dass für eine erste Analyse die Berechnung der CO₂-Emissionen auch mit Annahmen oder Durchschnittswerten durchgeführt werden kann, um zu sehen, welche Handlungsoptionen zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse korrelieren stark mit der vorhandenen Datenbasis. Je mehr Daten zur Verfügung stehen, umso gezielter können Maßnahmen abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang wurden auch neue Antriebstechnologien sowie alternative Brennstoffe diskutiert, welche eine Reduzierung der CO₂-Emissionen in der Logistikkette erreichen würde. Der dritte Workshop fand bei der EDAG GmbH in Fulda statt. Hier wurden die Erkenntnisse zu den Treibern von CO₂-Emissionen sowie mögliche Gestaltungsfelder diskutiert, die bei der Vorstellung der Modellkonzeption mit den Unternehmen weiter vertieft wurden. Insgesamt wurden die Hypothesen und konzeptionellen Ansätze, die in die Entwicklung des Berechnungsmodells eingebunden sind, durch die Teilnehmer bewertet. In Praxisvorträgen wurden ökologische Vorgaben für die Lieferantenauswahl vorgestellt und die Relevanz der CO₂-Effizienz in der Logistikkette der Zulieferer be-

tont. Auch wurde aufgeführt, dass Elektrofahrzeuge CO₂-Emissionen in der Logistik signifikant verringern können. Die Unternehmen stimmten überein, dass eine grobe Berechnung für die Identifikation von CO₂-Treibern ausreichend ist, um mögliche Handlungsoptionen für die CO₂-Reduzierung prüfen zu können. Auch wurden den teilnehmenden Unternehmen bei EDAG erste Konzeptstudien von Elektrofahrzeugen und deren Auswirkung auf den CO₂-Footprint in der Logistik vorgestellt. In der vierten Arbeitskreissitzung wurden die bisherigen Projektergebnisse den Teilnehmern vorgestellt und als wesentliche Zwischenergebnisse festgehalten. Auch wurde eine Ergebnisverdichtung in Form eines entwickelten IT-Tools zur Messung der CO₂-Emissionen in der Logistikkette sowie zur Ableitung von Reduzierungsmaßnahmen präsentiert. Durch Praxisvorträge der Deutsche Post DHL und Papp-Logistik konnten unterschiedliche Aspekte der CO₂-Footprint-Optimierung angesprochen werden. Die Vorträge zeigten, dass die Logistik zwar von verschiedenen unternehmensinternen und externen Einflussgrößen getrieben wird, jedoch gemeinsame logistische Handlungsfelder bei Unternehmen existieren. Dies wurde anhand unterschiedlicher Verkehrsträger und deren CO₂-Emissionen pro Tonnenkilometer dargestellt. Die CO₂-Footprint-Berechnung diente dabei der Messung von Ist-Zuständen und Identifikation von Maßnahmen zur Reduzierung. Auch wurde nochmals die Thematik eines fehlenden einheitlichen Maßstabs für die Messung von CO₂-Emissionen angesprochen. Die Unternehmen sehen in der Anwendung von DIN 16258 zur Berechnung der CO₂-Emissionen in der Logistik, eine Möglichkeit eine standardisierte und vergleichbare Basis für die CO₂-Footprint-Optimierung zu erhalten und begrüßen daher die Implementie-

rung dieser Norm und deren Erweiterung im IT-Tool. Weiterhin ist den unterschiedlichen Kundenanforderungen hinsichtlich der CO₂-Reduzierung Rechnung zu tragen. So besteht ein großer Unterschied zwischen Geschäftskunden- und Endkundenmärkten. Endverbraucher sind wesentlich sensibler bei den Umweltwirkungen eines Unternehmens im Vergleich zu Geschäftskunden. Für letztere zählt in erster Linie der Preis eines Produkts oder einer Dienstleistung, weniger deren ökologischer Fußabdruck. Jedoch bestätigten alle Unternehmen, dass die Bedeutung einer CO₂-effizienten Leistungserbringung in der Logistik zunehmen wird. So investieren sie in neue Technologien, wie etwa moderne, spritsparende LKWs oder rollwiderstandsarme Reifen. Auch zeigte sich, dass gerade kleine und mittelständische Unternehmen Unterstützung bei der Ökobilanzierung sowie bei der Ausweisung des CO₂-Footprints benötigen, da sie häufig nicht über die Kapazitäten verfügen, um eine schnelle Umsetzung von Projekten in diesem Bereich anzugehen. Weiterhin wurden die Ausprägungen der Einflussgrößen und Gestaltungsbereiche mit den anwesenden Unternehmen in Gruppenarbeit und anschließender Ergebnisdiskussion abgestimmt. Hierzu wurden die in vorherigen projektbegleitenden Sitzungen und Expertengesprächen abgestimmten Einflussgrößen auf die unterschiedlichen Gestaltungsfelder hin untersucht.

2.3 Ableitung der Forschungsfragen

Das Forschungsprojekt strebt die Erarbeitung eines Vorgehensmodells zur Verbesserung des CO₂-Footprints in der Logistik sowie die Erarbeitung von CO₂-Reduzierungsstrategien an. Dies hilft Unternehmen bei der Identifizierung und Bewer-

tung möglicher Verbesserungen im Bereich der CO₂-Footprint-Optimierung sowie der gezielten Durchführung von Maßnahmen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen. Zur Erfüllung der Forschungsziele sowie um die Anforderungen an die Modellbildung abbilden zu können, sind folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- Mit welchem Handlungsbedarf zur Reduzierung der CO₂-Emissionen in der Logistik können Unternehmen in den nächsten Jahren konfrontiert werden?
- Wie kann der CO₂-Footprint in der Logistik praxistauglich definiert werden?
- Welche Einflussgrößen auf den Ausstoß von CO₂ in der Logistik existieren und welche Möglichkeiten der Bewertung stehen Unternehmen zur Verfügung?
- Wie ist eine CO₂-effiziente Logistik unter besonderer Berücksichtigung der Restriktionen und Rahmenbedingungen von KMU in Hinblick auf eine aufwandsarme und wirkungsstarke Reduzierung von CO₂-Emissionen in der Logistik zu gestalten?
- Welche Methoden und Konzepte sind zur Vermeidung, Reduzierung und Beherrschung des CO₂-Ausstoßes in der Logistik zu empfehlen und welche dieser Methoden werden bereits erfolgreich in der Praxis angewendet?
- Wie ist ein IT-Tool zu gestalten, das Unternehmen dabei unterstützt ihren CO₂-Footprint in der Logistikkette standardisiert zu bewerten und damit vergleichbar zu machen?

3 CO2-Emissionen in der Logistik

Grundlage der Untersuchung von CO2-Emissionen in der Logistik bildet die Analyse der Rahmenbedingungen der gegenwärtigen Logistik. Hierzu werden zunächst die Logistik und deren Bedeutung abgegrenzt.

3.1 Abgrenzung der Logistik und des Prozessmodells

Unter dem Begriff der Logistik herrscht ein breites Spektrum an Konzeptionen und Begriffsauffassungen. Die Grenzen zwischen Logistik, Supply Chain Management und Transport sind fließend. Zum Verständnis der Logistik als Gegenstand der CO2-Footprintoptimierung sollen hier die Merkmale analysiert werden (vgl. Abbildung 3-1).

Günther 2009, S.120	„Der klassische Logistikbegriff umfasst in Unternehmen die ganzheitliche Planung, Steuerung, Koordination, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Güter- und Informationsflüsse.“
Göpfert 2000, S. 54	„Logistik ist ein spezieller Führungsansatz zur Entwicklung, Gestaltung, Lenkung und Realisation effektiver und effizienter Flüsse von Objekten (Güter, Informationen, Personen) in unternehmensweiten und -übergreifenden Wertschöpfungssystemen.“
Bowersox/ Closs 1996, S.20	„Logistik beinhaltet alle Aspekte der physischen Bewegung, nach und innerhalb der Niederlassungen eines Unternehmens.“

Pfohl 2010, S. 12	„Zur Logistik gehören alle Tätigkeiten, durch die die raum-zeitliche Gütertransformation hinsichtlich der Gütermenge und -sorten, der Güterhandhabungseigenschaften sowie der logistischen Determiniertheit der Güter geplant, gesteuert, realisiert oder kontrolliert werden. Durch das Zusammenwirken dieser Tätigkeiten soll ein Güterfluss in Gang gesetzt werden, der einen Lieferpunkt mit einem Empfangspunkt möglichst effizient verbindet.“
Gudehus 2005, S.7	„Effizientes Bereitstellen der geforderten Menge benötigter Objekte in der richtigen Zusammensetzung zur rechten Zeit am richtigen Ort.“
Isermann 1975, S.22	<p>„Die für ein Leistungsobjekt zu erbringende Logistikleistung umfasst:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mindestens eine der drei Kernleistungen: Lagerleistungen, Transportleistungen, Umschlagleistungen, - logistische Zusatzleistungen, wie z.B. Kommissionierleistungen, Verpackungsleistungen, Markierungsleistungen und - logistische Informationsleistungen.“
Wildemann 2010, S. 14ff	„Logistik beinhaltet neben der Steuerung, Abwicklung und Überwachung von Material- und Informationsflussaktivitäten eine Grundhaltung zur zeiteffizienten, kunden- und prozessorientierten Koordination von Wertschöpfungsaktivitäten.“

Abbildung 3-1: Logistikdefinitionen

Abgeleitet aus dem Prinzip der Flussoptimierung zählt das Denken in Prozessketten zu einem der zentralen Bestandteile jeder Logistikkonzeption. Die betriebliche Leistungserstellung wird als Wertschöpfungskette verstanden, in die alle betrieblichen Funktionen von der Beschaffung über die Entwicklung und Produktion bis hin zum Vertrieb und Rückführung eingebunden sind. Innerhalb der betrieblichen Wertschöpfungskette kommt der logistischen Kette zwischen Zulieferer, Produzent und Abnehmer eine zentrale Rolle zu. Sie hat die Aufgabe die horizontalen Geschäftsprozesse zu koordinieren. Sie umfasst die ganzheitliche Funktions- und Unternehmensgrenzen überwindende Gestaltung, Steuerung und Koordination von Material- und Produktflüssen sowie die hierzu komplementären Informationsflüsse (vgl. Wildemann 2010). Logistik wird somit als Querschnittsfunktion gesehen, welche die Mitglieder eines Wertschöpfungsnetzwerks verbindet. Entscheidungen in der Logistik erstrecken sich über alle Stufen des Wertschöpfungs-systems und sind sowohl operativer als auch strategischer Natur. Um die Logistik effizient zu gestalten, müssen die Prozesse von der Rohstoffgewinnung bis hin zum Endabnehmer unter anderem unternehmensübergreifend gesteuert werden. Die verstärkte Arbeitsteilung entlang der Wertschöpfungskette führt zudem zu neuen und zum Teil komplexeren Abnehmer-Lieferanten-Beziehungen in Form von flexiblen, wandelbaren Logistiknetzwerken. Folge hiervon ist ein wachsendes Bedürfnis nach Transparenz und einem durchgängigen Supply Chain Management. Allerdings zeigen viele Fallstudien wesentliche Verbesserungen durch ein Reengineering interner Prozesse auf. Nur wenigen Unternehmen, allen voran der Automobilindust-

rie, gelang es aufgrund ihrer Stellung innerhalb der Wertschöpfungskette die Logistikprozesse über die Unternehmensgrenzen hinweg zu optimieren (vgl. Wildemann 2001b). Die verfolgte managementorientierte Logistikkonzeption und die damit verbundene prozessorientierte Sichtweise fokussieren auf die Koordinationsfunktion der Logistik entlang der gesamten logistischen Kette. Dieses Vorgehen soll den am Forschungsvorhaben beteiligten KMU eine ganzheitliche, am Materialfluss orientierte Betrachtung ihrer vollständigen Logistikkette ermöglichen. Die prozessualen Logistikaktivitäten werden dabei nicht als Gemeinkostenfunktionen, sondern als primäre Wertaktivitäten verstanden. Operatoren dieser Logistikprozesse sind dabei die eingesetzten Materialflusstechnologien wie Lagersysteme, Transport-, Förder-, Ladehilfs- und Handhabungsmittel sowie Informationstechnologien (vgl. Wildemann 2010). Die Logistik zielte bislang primär darauf ab, die logistischen Zielgrößen Leistung, Kosten und Qualität bestmöglich zu erfüllen. Es galt dabei, das richtige Gut, zur richtigen Zeit, in der richtigen Menge und Qualität, am richtigen Ort, dem richtigen Kunden zu den richtigen Kosten zur Verfügung zu stellen. Seit einigen Jahren hat sich die Forderung nach ressourceneffizienten Logistikprozessen als zusätzliche Zielgröße etabliert. Der effiziente Einsatz von Ressourcen nimmt aus Kostengründen in der Logistik und in der gesamten unternehmerischen Praxis schon seit jeher eine wichtige Rolle ein. Als Ressourcen werden sämtliche Mittel verstanden, die das Unternehmen zum Wirtschaften braucht. Hierzu zählen die Rohstoffe, die Energie, die Finanz- und Betriebsmittel sowie das Fachwissen und das Personal. Die neue Zielgröße einer ressourceneffizienten Logistik leitet sich aus verschiedenen Motivationsgründen ab. Durch steigende Faktor-

kosten und wachsende Forderungen nach umweltgerechten Lösungen seitens der Kunden, entwickelt sich die Ressourceneffizienz und hierbei insbesondere die CO₂-Minimierung zu einem der wichtigsten Gebote für die Logistik. Nicht nur politische Beschlüsse, sondern auch sämtliche Stakeholder wie Investoren, Banken und Umweltinitiativen verlangen von Unternehmen die Erfüllung von stets höheren Nachhaltigkeitsansprüchen. Gleichzeitig nutzen Unternehmen Innovationen im Bereich der Ressourceneffizienz zur Differenzierung ihres Unternehmens im Wettbewerb. Um sich im internationalen Wettbewerb weiter behaupten zu können, stehen Unternehmen vor der Herausforderung die Logistik nachhaltiger zu gestalten, da diese für einen Großteil der emittierten Umweltbelastung verantwortlich ist. KMU sind dabei im Speziellen mit der Problematik konfrontiert, die Forderungen des Marktes zu erfüllen und gleichzeitig nicht zu hohe Investitionen in Nachhaltigkeitsfaktoren zu tätigen, für die der Markt noch nicht bereit ist, einen Mehrwert zu bezahlen. Maßnahmen zur CO₂-Emissionsreduzierung und zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Logistik erfordern häufig Retrofits und Erweiterungen sowie in manchen Fällen komplette Neuinvestitionen (vgl. Wildemann 2012d).

3.2 Logistikprozesse

Nach wie vor birgt der Einsatz logistischer Konzepte in den Logistikprozessen Beschaffung, Produktion, Distribution und Entsorgung erhebliche Optimierungspotenziale im Hinblick auf die CO₂-Footprintoptimierung. Weitere Logistikprozesse, die einer Einzelbehandlung bedürfen, ergeben sich für die Logistik

in urbanen Ballungsgebieten („City-Logistik“) und die der „letzten Meile“ in einer Logistikkette.

3.2.1 Beschaffungslogistik

Die Beschaffungslogistik ist ein marktverbundenes Logistiksystem und stellt die Verbindung zwischen der Distributionslogistik der Lieferanten und der Produktionslogistik der Abnehmer dar. Bedarfsträger ist das Beschaffungslager oder bei Direktanlieferungen die erste Produktionsstufe im Abnehmerunternehmen (vgl. Pfohl 2010). Zentrale Aufgabe ist die bedarfsgerechte Bereitstellung in der Produktion benötigter Güter, wie Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Kaufteile oder Handelsware. Die Beschaffungslogistik stellt somit den Einstieg in den Wertschöpfungsprozess jedes Unternehmens dar. Primäres Ziel der Beschaffungslogistik ist die Sicherung einer optimalen Lieferbereitschaft durch die Gewährleistung termin- und bedarfsgerechter Lieferungen und der Beschaffungsquellen. Die Sicherstellung von Flexibilität im Beschaffungsvolumen zur Anpassung an Schwankungen in Produktion und Vertrieb, die Qualität der beschafften Güter, die Wirtschaftlichkeit der Güterbeschaffung und materialwirtschaftlichen Aufgaben zu sichern und die Kapitalbindung zu minimieren (vgl. Wildemann 2010). Die beschaffungslogistische Kontrollspanne reicht von der Materialübergabe beim Zulieferer bis zur Übergabe an den Bedarfsträger im Unternehmen. Dementsprechend zählen zu den beschaffungslogistischen Aufgaben der Transport vom Zulieferanten bis zum Wareneingang, die Warenannahme und -prüfung, Eingangslagerhaltung sowie der innerbetriebliche Transport zum Verbrauchsort. Die Sicherungsziele und die daraus resultierende Optimierung der Material- und Informationsflüsse zwischen

Beschaffungsmarkt und den Bedarfsstellen innerhalb des Unternehmens stehen dabei nicht notwendigerweise im Konflikt mit einer nachhaltigeren und CO2-Emissionsoptimierten Beschaffungslogistik. Infolge steigender Energie- und Treibstoffkosten sind Unternehmen intrinsisch motiviert, Kosten und somit auch CO2-Emissionen durch effizientere Logistik zu reduzieren. Zeit-, Produktivitäts- und Zuverlässigkeitsverluste durch überlastete Verkehrswege schaffen zusätzliche Anreize für Unternehmen Lieferungen durch bessere Planung und Trade-offs zu Lasten maximaler Flexibilität und minimaler Lagerhaltung zu bündeln, kleinteilige- und Sonderlieferungen zu minimieren und somit zur langfristigen Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit auch CO2-Emissionen zu vermeiden (vgl. Bretzke/ Barkawi 2012). Beschaffungsprogramm und -strategie, Lieferantennetzwerkstrukturen sowie Versorgungs- und Materialbereitstellungskonzepte stellen im Kontext der Beschaffungslogistik Handlungsfelder dar, die einen maßgeblichen Einfluss auf Transport, Lagerung, Umschlag sowie Verpackung und somit auf den Anfall von CO2-Emissionen haben. Das Beschaffungsprogramm stellt eine Hauptdeterminante für die Gestaltung der Beschaffungslogistik dar. Im Beschaffungsprogramm legt das Unternehmen fest, welche Güter, in welcher Menge und in welcher zeitlichen Verteilung innerhalb eines Planungszeitraums bezogen werden. In der Beschaffungsstrategie werden im Rahmen von Make-or-Buy-Entscheidungen die Wertschöpfungstiefen festgelegt und je Materialgruppe zwischen den Strategien eines „Single Sourcing“ oder eines „Multiple Sourcing“ abgewägt (vgl. Pfohl 2010). Mit diesen strategischen Entscheidungen werden die Rahmenbedingungen für das logistische Aktionsfeld festgelegt. Ein weiteres Handlungsfeld mit Einfluss

auf den CO₂-Anfall stellt die Lieferantennetzwerkstruktur dar. Diese kann über die Beschaffungswege, die Anzahl und geographische Streuung der Lieferanten sowie über die Anzahl der Stufen der vorgelagerten Supply Chain charakterisiert werden. Eine große Anzahl von Lieferanten kann Störungsrisiken minimieren, belastet aber durch die Komplexität das System der Beschaffungslogistik. Eine Reduzierung der Lieferantenzahl birgt Chancen zur Reduzierung von Koordinations- und Logistikkosten sowie von CO₂-Emissionen. Global Sourcing bietet Chancen zur Ausnutzung von Preis- und Wechselkursvorteilen sowie zur Sicherung von Lieferkapazitäten und zur Risikostreuung. Nachteile stellen längere Transportentfernungen und Lieferzeiten, größere Unterwegsbestände sowie eine geringere Lieferzuverlässigkeit dar. Mit steigender Transportentfernung wächst in den meisten Fällen die Anzahl der erforderlichen Transaktionspartner sowie die Notwendigkeit für den Einsatz unterschiedlicher Transportträger (vgl. Pfohl 2010). Die güterspezifischen Materialfluss- und Materialbereitstellungsstrategien stellen ein weiteres CO₂-relevantes Handlungsfeld der Beschaffungslogistik dar. Diese werden auf Basis der jeweiligen Bedarfsanforderungen und Liefermöglichkeiten der Beschaffungsquellen bestimmt. Das Ziel der Materialflussgestaltung ist die Realisierung aufwands- und schnittstellenarmer Logistikstrukturen, die eine enge Zusammenarbeit zwischen Abnehmer und Lieferant beinhalten und eine Fertigung mit kurzen Lieferzeiten und hoher Versorgungssicherheit gewährleisten. Dabei kann zwischen den Ausgestaltungsformen Direktanlieferung und Lagerstufenkonzept unterschieden werden. Bei den Materialbereitstellungskonzepten ist zwischen der Just-in-Time(JIT)-Anlieferung, der Just-in-Sequence(JIS)-Anlieferung,

der periodischen und der bedarfsorientierten Anlieferung zu differenzieren (vgl. Wildemann 2010). Der Umfang der logistischen Kontrollspanne und somit auch der Umfang der direkten Verantwortung für CO₂-Emissionen werden im zwischenstaatlichen Güterverkehr in den so genannten Incoterms vertraglich geregelt (vgl. Pfohl 2010). Im Bereich der Lagerlogistik liegt aufgrund des hohen Automatisierungsgrads das größte CO₂-Reduktionspotenzial im Bereich der Energieeinsparung. Der Energieverbrauch kann dabei durch unterschiedlichste Optimierungsansätze gesenkt werden. Eine Möglichkeit liegt in der Umstellung auf verbrauchsarme Antriebe bei automatischen Lagern, wobei die höchsten Potenziale in diesem Zusammenhang bei Hochregallagern sowie automatischen Kleinteilelagern liegen. Außerdem sollten die bewegten Massen in den automatischen Lagern reduziert und stets geprüft werden, ob es unnötige Antriebseinrichtungen gibt, die beispielsweise durch den Einsatz eines Durchlaufregals substituiert werden können. Nicht nur die Reduzierung des Energieverbrauchs, sondern auch die Rückgewinnung von Energie sind mögliche Ansätze. Technische Möglichkeiten bestehen in diesem Kontext im Bereich der Rückgewinnung von Bremsenergie bei der Förder-technik, bei Regalbediengeräten und bei Gabelstaplern. Nicht zuletzt können erhebliche Energieeinsparungen im Bereich der Energieversorgung, der Infrastruktur und der Gebäudebauweise umgesetzt werden. Durch die Nutzung erneuerbarer Energien wie Windkraft oder Photovoltaik in Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen kann die Energieversorgung deutlich effizienter realisiert werden. Des Weiteren kann der Energieverbrauch durch den Einsatz moderner Heiz- und Lüftungssysteme sowie durch die Reduktion von Wärme- und Kältever-

lusten vermindert werden. In diesem Zusammenhang können beispielsweise eine bessere Wärmedämmung sowie schnellere Rolltore und Schleusen erfolgreich eingesetzt werden (vgl. Wildemann 2012d).

3.2.2 Produktionslogistik

Die Produktionslogistik schließt sich im Unternehmen an die Beschaffungslogistik an (vgl. Pfohl 2010). Dabei umfasst sie die Planung, Steuerung und Überwachung von Material- und Informationsflüssen entlang der einzelnen Wertschöpfungsstufen des Produktionsprozesses bis hin zur Lagerung der fertigen Produkte. Ziel der Produktionslogistik ist es durch Produktionsplanung den Bedarf an Rohmaterialien, Bau- und Fertigteilen sowie Modulen sowohl aus Eigenfertigung als auch aus Fremdbezug zu antizipieren. Durch die Produktionssteuerung sollen Durchlaufzeiten minimiert und die Auslastung der Produktion an Absatzmöglichkeiten optimal angepasst werden. Weitere grundlegende Zielgrößen der Produktionslogistik sind kurze Lieferzeiten, hohe Termintreue und Qualität sowie die Transportwege in der Fertigung optimal zu gestalten. Ebenso werden niedrige Bestände und die damit verbundene Verbesserung der Kapitalbindung und Lagerhaltung angestrebt (vgl. Wildemann 2010). Gleichzeitig ist auch hier die Anpassungsfähigkeit an Bedarfsschwankungen im nachgelagerten Prozess, der sich wiederum am externen Kunden orientierenden Distributionslogistik im Blickfeld. Bei Mehrbetriebsunternehmen mit standortteiler Fertigung umfasst die Produktionslogistik auch die zwischenbetriebliche Logistik innerhalb des Produktionssystems. Besonders bei internationalen Produktionssystemen kommt es dabei zu umfangreichen außerbetrieblichen logisti-

schen Tätigkeiten. Auch in der Produktionslogistik sind ökologische und ökonomische Zielgrößen nicht zwangsläufig unvereinbar, so besteht grundsätzlich Optimierungspotential durch Ressourceneffizienz. Politische Maßnahmen zur Internalisierung von Externalitäten, wie die restriktiven Rahmenbedingungen des Zertifikathandels für CO₂-Emissionen, setzen zusätzliche Anreize zur Vermeidung. Neben Aspekten der Nachhaltigkeit stehen in diesem Kontext immer auch die Gesamtbetriebskosten im Fokus. Im Hinblick auf die CO₂-Emissions Optimierung in innerbetrieblichen Prozessen und in Anbetracht von steigenden Transportkosten ergeben sich Potenziale in der geographischen Organisation der Produktionsstätten und dem Werkslayout. Die Anordnung von Lagern und den einzelnen innerbetrieblichen Wertschöpfungsstufen des Produktionsprozesses sowie die Entfernung zu Zulieferern und Abnehmern innerhalb und außerhalb des Unternehmens sind maßgeblich für die Länge der Transportstrecken und folglich den Energieverbrauch und die Emission von Treibhausgasen. Als positives Beispiel lassen sich hier die geographisch häufig stark konzentrierten Systemlieferanten in der Automobilindustrie nennen, die in Lieferantenparks planbasierte Module zu Teilsystemen zusammenfügen. Durch Single Sourcing Strategien lassen sich gegenüber einer Mehrquellenversorgung des OEM erhebliche Konsolidierungseffekte erzielen. Durch den Einsatz von Gebietsspediteuren durch OEMs lassen sich zusätzliche Bündelungseffekte von Transporten und somit eine bessere Auslastung von Transportmitteln erreichen. Mit dem erklärten Ziel der Vermeidung von Verschwendung haben sich in den letzten Jahrzehnten ausgehend von der Automobilindustrie, in der Produktion Konzepte wie das Pull Prinzip, Just-in-Time- und Just-

in-Sequence- Produktion sowie die Kanban Steuerung durchgesetzt. Radikale Prozessverschlinkung soll unter der Maxime der Minimierung planungs- und prognosebasierter Irrtumsrisiken sowie von Lagerbeständen und Kapitalbindung in zu früh gelieferten und in zu großen Losen vorhandenen Materialien, insbesondere auch zur Vermeidung von jeglicher Überproduktion beitragen. Die Kombination aus strikter Bedarfsorientierung und starker Zeitkompression kann aber unter Anderem auch zu einer erhöhten Störanfälligkeit von Prozessen führen. Dies wird besonders am erhöhten Expressfrachtaufkommen, ungeplanten Luftfrachteinsätzen und Sonderfahrten deutlich. Steigende Transportkosten und eine zunehmende Internalisierung der gesellschaftlichen Belastung durch CO2-Emissionen verdeutlichen dass in diesem Kontext auch die Verschwendung von Laderaum den Charakter von Überproduktion hat. Hier bestehen Potenziale zur Vermeidung von CO2-Emissionen und Einsparung von Transportkosten durch die gezielte Haltung von Zeit und Bestandspuffern, die es ermöglichen Laderaumkapazitäten besser zu nutzen sowie Express- und Sondertransporte zu vermeiden (vgl. Bretzke/ Barkawi 2012). Auch für innerbetriebliche Transporte bieten sich im Bereich der Produktionslogistik zahlreiche Lösungskonzepte an. Beispielhaft lassen sich die Reduzierung des Energieverbrauchs von Flurförderzeugen um 35 Prozent durch Einsatz intelligenter Batterietechnologien, die Reduzierung des Energieverbrauchs durch die Verwendung effizienter Trommelmotoren sowie die Effizienzsteigerungen durch Einsatz fahrerloser Transportsysteme nennen. Im Bereich der Intralogistik bieten die Entwicklungen der Material- und Systementwicklung, aber auch der Informations- und Kommunikationstechnologie hohe Potenziale für den erfolgreichen

Ausgleich zwischen Ökonomie und Ökologie. Die Wirtschaftlichkeit und Robustheit der Prozesse gilt es im Einklang mit dem optimalen Einsatz der Ressourcen wie Zeit, Fläche, Mitarbeiter, Energie und Materialien sicherzustellen. Gerade bei der Förder- und Hubtechnik konnten in den letzten Jahren Fortschritte im Hinblick auf den CO₂-Footprint erzielt werden. Im Bereich der Mechanik konnten wirkungsgradoptimierte Getriebe, Leichtbauweise sowie rollwiderstandsarme Werkstoffpaarungen zwischen Rad und Schiene die Effizienz deutlich erhöhen. Ähnliche Ergebnisse können durch den Einsatz energieeffizienter Motoren in der Fördertechnik erzielt werden. Dort erweisen sich Getriebe-Synchron-Motoren als vielversprechend. Unternehmensbeispiele belegen, dass auf Energieeffizienz ausgerichtete Planungen allein bei den fördertechnischen Längs- und Quertransporten mit moderner Fördertechnik bis zu 50 Prozent der Energie einsparen können. Weitere Potenziale liegen im Einsatz von Palettenhebern mit Gegengewicht, bauseitig reduzierten Stand-by-Verbräuchen sowie Prozessoptimierungen (vgl. Wildemann 2012d).

3.2.3 Distributionslogistik

Die Distributionslogistik ist wie die Beschaffungslogistik ein marktverbundenes System. Sie steuert und kontrolliert die Prozesse zwischen Produzent und Abnehmer. Ihre Aufgabe ist die Planung, Steuerung und Kontrolle sowie die Abwicklung einer optimalen Belieferung der Kundschaft. Durch den direkten Kundenkontakt agiert die Distributionslogistik teilweise vertriebsunterstützend und übernimmt Marketingfunktionen (vgl. Pfohl 2010). Wichtige Entscheidungsfelder der Distributionslogistik betreffen die Art, Anzahl und Standorte von Lagern, Ver-

teilzentren und Übergabepunkte an die Beschaffungslogistik der Abnehmer. Sie bezieht sich auf alle Transport-, Lager- und Umschlagsprozesse im Anschluss an den Produktionsprozess, die Koordination der Warenströme und den komplementären Informationsfluss. Die geographische Verteilung der Bereitstellorte orientiert sich am Trade-off zwischen den Skalenerträgen zentraler Produktion und niedrigeren Transportkosten kundennaher oder spezialisierter Produktionsstätten. Die Parameter der Güterbereitstellung sind weiter durch die Möglichkeit der Steuerung von Produktionslosgröße, Transportlos, Transportfrequenz und Lagerbestandshöhe zeitlich autonom beeinflussbar. Die Konstitution der zu transportierenden Güter beeinflusst maßgeblich die zur Verfügung stehenden Transportmittel und -hilfsmittel sowie die Möglichkeit des Einsatzes standardisierter Verpackungsmittel oder mechanisierter Lager- und Umschlagstechniken. Die Distributionslogistik muss daher bereits auf die Produktdefinition Einfluss nehmen, da die genannten Faktoren große Wirkung sowohl auf Kosten als auch die Effizienz des Distributionsprozesses haben (vgl. Wildemann 2010). Durch Kundennähe und Trends zu mehr Nachhaltigkeit und der Forderung nach mehr unternehmerischer Verantwortung wird es zur Aufgabe der Distributionslogistik Lieferprozesse auch an ökologische und soziale Faktoren zu knüpfen. Insbesondere die CO₂-Minimierung und -dokumentation spielen hierbei eine zentrale Rolle. Gleichzeitig besteht der Bedarf an einer flexiblen und anpassungsfähigen Logistik, der insbesondere im Kontext eines steigenden Wettbewerbs im Absatzmarkt eine zunehmend wichtige Rolle obliegt. Die oft überlegene Verhandlungsposition des Abnehmers führt dazu, dass bezüglich des Preises, der Menge und der Lieferzeit wenig Spielraum besteht

und Lieferfähigkeit, -zeit und -kosten weiterhin die primären Differenzierungsfaktoren im Wettbewerb darstellen (vgl. Wildemann 2014a). Gerade im Hinblick auf die Vermeidung von Treibhausgasen sind auch die Optimierung von Vertriebswegen und die Wahl von Absatzkanälen entscheidend für eine erfolgreiche Distributionslogistik. Die Belieferung von Abnehmern kann sowohl direkt aus dem Produktionsprozess heraus, als auch über eine oder mehrere Absatzlagerstufen, wie beispielsweise Zentrallager, Regionallager, aber auch über Gebietsspediteure, externe Distributionslager, Transshipment-Terminals oder Güterverkehrszentren erfolgen. Die Absatzwegentscheidung beeinflusst maßgeblich die Anzahl der Empfangspunkte. So kann die Belieferung an wenige Großhändler, viele Einzelhändler oder direkt an den Kunden erfolgen. Einflussgrößen für die Festlegung sind die Anzahl der Abnehmer, deren Entfernung und die zu transportierenden Mengen. Die individuelle Belieferung bietet sich insbesondere bei einer geringen Entfernung zu wenigen Kunden bei gleichzeitig großen Transportmengen an. Mehrstufige Logistikstrukturen sind im Gegensatz vorteilhaft, wenn sich durch Sammlung von Erzeugnissen mehrerer Lieferanten oder Bedarfe mehrerer Abnehmer, Transporte auf langen Distanzen bündeln lassen (vgl. Wildemann 2010). Besondere Vorzüge ergeben sich wenn anstelle des Straßenverkehrs vergleichsweise energieeffiziente Verkehrsträger wie Schiene und Seefahrt oder der Multimodale Transport zum Einsatz kommen. Neben den Produkteigenschaften entscheiden die Wahl des Absatzweges, der Aufbau der Logistikstrukturen, die Integration spezialisierter Logistikdienstleister sowie das Zeitfenster zur Belieferung über die zur Verfügung stehenden Verkehrsträger und deren Auslastung und

stehen somit in direkter Relation zur Emission von CO₂ pro Tonnenkilometer im Transportprozess. Bei Betrachtung des globalen Erdölverbrauchs lässt sich feststellen, dass der Verkehrssektor etwa die Hälfte und die Industrie ein Drittel des globalen Erdöls konsumiert. Dies zeigt die ausgesprochen hohe Relevanz der Distributions- und Transportlogistik. Unternehmen konzentrieren sich im Bereich der Distributionslogistik derzeit vornehmlich auf die Reduzierung von CO₂-Emissionen. Diese Reduzierungsmaßnahmen stehen mehrheitlich im Einklang mit der Erhöhung der Ressourceneffizienz. Hierbei hat sich bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze herausgestellt. Potenziale durch eine verbesserte Planung können durch den Einsatz von Software zur Tourenplanung, Telematik und Kapazitätsbündelung sowie durch die Verlagerung von Transporten auf die Schiene oder Binnenschifffahrt und durch Kooperationen mit anderen Verladern gehoben werden. Außerdem sollte der Anteil an Expressfahrten so weit wie möglich vermindert werden. Ein Beispiel für die verstärkte Akzeptanz einer nachhaltigen Transportlogistik liegt in dem Vorgehen, dass heutzutage Transportleistungen mehrheitlich auf Volumenbasis und nicht mehr nach der Wegstrecke bezahlt werden. Die Bündelung der Lieferungen geschieht hierdurch aus Eigeninteresse. Die personelle Komponente stellt einen weiteren Stellhebel zur Verbesserung der Ressourceneffizienz in der Transportlogistik dar. Diese kann durch die Durchführung von Fahrerschulungen erfolgreich adressiert werden. Technische Innovationen zur Senkung des Ressourcenverbrauchs stellen beispielsweise die Reduktion des Luft- und Rollwiderstands bei LKW, der Einsatz von Reifenfülldruck-Sensoren, Start-Stopp-Automatiken für Verteilerfahrzeuge sowie die Nutzung von Hybrid- und Elektro-

fahrzeugen dar. Insbesondere im innerbetrieblichen und innerstädtischen Bereich bietet sich der Einsatz von Elektrotransportern an. Verschiedene Logistikdienstleister haben die oben aufgeführten Themen für sich selbst entdeckt und bieten neue Dienstleistungen wie beispielsweise klimaneutrale Transporte an. Sie übernehmen hierbei das gesamte Management von kompensierenden Leistungen und erreichen dadurch für ihre Kunden eine Verringerung der Umweltbelastung (vgl. Wildemann 2012d).

3.2.4 Entsorgungslogistik

Der Stellenwert der Entsorgungslogistik hat sich in den letzten Jahren stark gewandelt. Das gesteigerte Umweltbewusstsein der Gesellschaft und vom Gesetzgeber verfolgte Ziele einer ökonomischen und ökologischen Kreislaufwirtschaft haben zu Umweltschutzauflagen und steigenden Entsorgungskosten geführt. Die traditionelle Betrachtungsweise der physischen Logistikprozesse im Unternehmen mit ihrer Unterteilung in Beschaffung, Produktion und Distribution ist daher um die nachgeschaltete und entgegengesetzt verlaufende Prozesskette der Entsorgung zu ergänzen (vgl. Wildemann 2007). Die mit Produktion, Distribution und Konsumtion verbundene Entstehung von Rückständen bedarf insbesondere im Hinblick auf steigende Rückstandsauflagen und des damit verbundenen steigenden Logistikaufwandes für dessen Kontrolle und Steuerung einer eigenen Betrachtung. Die Trennung, Sortierung und Sammlung von Rückständen sind Gegenstand der Redistributionslogistik. Gebrauchte und verbrauchte Produkte, Austauschaggregate, Retouren und Verpackungen müssen zunächst gesammelt, sortiert und getrennt werden. In Analogie zur Distribution muss

die Redistribution ausgehend von der Rückstandsquelle, der innerbetrieblichen Entstehungsquelle beziehungsweise dem Verbraucher, ausgehen. Aufgabe der Aufbereitungslogistik ist es schließlich, die Aufbereitung zu planen, zu steuern und zu kontrollieren. Die gesammelten Rückstände werden je nach Notwendigkeit in der Aufbereitung in ihre Komponenten zerlegt und die so entstehenden Werkstoffe werden zur Verwendung oder Verwertung dem Wiedereinsatz zugeführt. Reststoffe müssen ordnungsgemäß beseitigt werden. Eine solche Entsorgung ist nur noch dann zulässig, wenn keine wirtschaftlich vertretbaren Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung zur Verfügung stehen. In der letzten Phase der Entsorgungslogistik, der Wiedereinsatzlogistik sollen schließlich gewonnene Rohstoffe dem Beschaffungsmarkt oder der Produktion wieder zugeführt werden. Nur in der Theorie ist so ein komplettes Recycling im Sinne eines geschlossenen Materialkreislaufes möglich. In der Realität gilt es jedoch technische, ökonomische und ökologische Hürden zu überwinden (vgl. Burghardt 2013; Wildemann 2010, 2007).

3.2.5 Rückführungslogistik

In Zeiten zunehmender Rohstoffverknappung und besonders im Hinblick auf eine effiziente Verwertung vorhandener Ressourcen und der Vermeidung von Emissionen kommt der Rückführungslogistik eine zentrale Bedeutung zu und trägt maßgeblich zur ökologischen und ökonomischen Effizienz von Stoffkreisläufen bei (vgl. Kaluza 1998). Die Rückführungs- oder Wiedereinsatzlogistik lässt sich als die Distributionslogistik von Recyclinggütern verstehen. Sie setzt an der Aufbereitungslogistik an und endet am Ort des Wiedereinsatzes (vgl. Klaus et al.

2012). Quelle bei der Rückführung von Wertstoffen sind grundsätzlich alle Marktteilnehmer die zuvor an den Prozessen der Redistribution und Aufbereitung beteiligt waren. Idealerweise lassen sich Baugruppen, Bauteile und Wertstoffe unternehmensintern im Sinne eines geschlossenen Kreislaufes dem Güterversorgungsfluss wieder zuführen. Häufig besitzt nur das einzelne Unternehmen entsprechendes Know-how die eigenen Produkte effizient aufzubereiten und wiedereinzusetzen. Es kommen aber auch überbetriebliche Kooperationen mit anderen Unternehmen sowie der Absatz über Sekundärmärkte in Betracht. Die Entwicklung auf dem Markt für Sekundärrohstoffe ist höchst dynamisch. Neben klassischen Feldern der Wiederaufbereitung wie beispielsweise Glas, Papier oder Schrott, entwickeln sich komplexere Technologien zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen etwa aus Elektronikaltgeräten oder Altkunststoffen (vgl. Kranert/ Sihler 2008). Tatsächlich gibt es bereits erste Erfolge Kunststoffe auf CO₂-Basis zu produzieren. Grundsätzlich lassen sich bei der Art der Verwertung drei Typen unterscheiden. Bei der stofflichen Verwertung wird die physikalische Beschaffenheit der Objekte nicht verändert. Der Output der Aufbereitung in Form von Baugruppen, -teilen und Sekundärrohstoffen kann also der Produktion direkt wieder zugeführt werden. Ein Beispiel auf niedrigster Wertschöpfungsstufe ist die Wiederaufbereitung von Altaluminium. Laut einer Studie des Fraunhofer Instituts lässt sich Aluminiumschrott fast verlustfrei mit ca. 5 Prozent der Herstellungsenergie des Primärprozesses und nahezu ohne Qualitätsverlust wiederaufbereiten. Dadurch werden im Sekundärprozess rund 9,87 Tonnen CO₂ pro Tonne Aluminium eingespart, was in etwa 93 Prozent der Emissionen des Primärprozesses entspricht (vgl. Fraunhof-

er-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik 2011). Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer effektiven Planung, Steuerung und Kontrolle der Material- und Informationsflüsse durch die Rückführungslogistik besonders mit Blick auf die CO2 Emissionsoptimierung. Zudem bestehen Interdependenzen und Synergiepotenziale mit vor- und nachgelagerten Prozessen innerhalb und außerhalb des Unternehmens. Der chemischen Verwertung unterliegt die Überführung in nutzbare Stoffe wie beispielsweise bei der Rückgewinnung von Erdöl aus Kunststoffresten durch Pyrolyse. Die Thermische Verwertung steht schließlich für die Verbrennung von anders nicht verwertbaren Stoffen in Verbrennungsanlagen zur Energiegewinnung (vgl. Wildemann 2010). Sowohl im Sinne der Gesetzgebung als auch auf Grund umweltpolitischer Gesichtspunkten und Aspekten der Ressourceneffizienz ist ein Wiedereinsatz auf höchster Wertschöpfungsebene anzustreben. Neben Material-, Energie-, Emissions- und anderen Kostenersparnissen kann die Rückführlogistik dazu beitragen durch Kontrolle der Sekundärmärkte die eigene Marktposition zu sichern sowie Kunden- und Lieferantenbeziehungen zu festigen.

3.2.6 Handelslogistik

Die Handelslogistik umfasst die Planung, Steuerung und Kontrolle des Güterflusses bestehend aus Handelswaren und Betriebsstoffen und die komplementären Informationsflüsse. Die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten in der Belieferung von Filialen sowie der organisatorischen Zusammenfassung von Ein- und Verkauf lassen in der Handelslogistik eine phasenspezifische Zuordnung einzelner Teilprozesse wie im Produktionsunternehmen kaum zu. Bei der Direktbelieferung durch Herstel-

ler oder Dritte wird die Gestaltung der Material- und Informationsflüsse zwischen Hersteller und Filialen der Beschaffungslogistik zugeordnet. Ebenso kann der Warenfluss jedoch zwischen handelseigenen Zentrallagern und den Filialen koordiniert werden. In diesem Fall ist die Gestaltung der Waren- und Informationsflüsse der Distributionslogistik zuzuordnen. Die innerbetriebliche Logistik im Handel umfasst primär Lagerung und Umschlag sowie innerbetriebliche Transporte (vgl. Tietz 1993). Anders als in produzierenden Unternehmen gibt es in Handelsunternehmen keine Produktions-, Aufbereitungs- oder Wiedereinsatzlogistik (vgl. Wildemann 2010). Zentrale Herausforderung an die Handelslogistik ist es die Warenverfügbarkeit unter Berücksichtigung der Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten nach Art, Menge und Qualität termingerecht sicherzustellen. In Ihrer Versorgungsfunktion verbindet die Handelslogistik die globale Herstellung mit der lokalen Verfügbarkeit von Waren für Endverbraucher. Eine Problematik mit der sich die Handelslogistik insbesondere im Handel mit frischen, verderblichen und gefrorenen Gütern konfrontiert sieht, ist die Kühlung und die Aufrechterhaltung von Kühlketten. Dies erfordert zusätzliche Energie in Form von Diesel oder Strom und führt folglich auch zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen von der Vorkühlung des Laderaums über die gesamte Einsatzzeit. Zudem werden für verschiedene Anforderungen unterschiedliche Sonderfahrzeuge benötigt, was zu einer weiteren Fragmentierung von Sendungen führt. Der Kraftstoffverbrauch von Kühlaggregaten hängt von einer Vielzahl an Variablen wie beispielsweise Typ und Betriebsmittel des Aggregats, Größe des Laderaums, Vorkühlung der Güter, Außentemperatur, Anzahl der Laderaumöffnungen sowie Art und Intensität der Kühlung

ab. Allgemeine Daten zum Energieverbrauch von temperaturgeführten Transporten liegen in Deutschland bisher öffentlich nicht vor. Energieeinsparungen können bei der Kühlung durch neuartige Kyrogen-Kühltechniksysteme, bei denen unter sehr geringem Energieverbrauch flüssiges Kohlenstoffdioxid verdampft wird, erzielt werden (vgl. Kranke et al. 2011). Durch den Einsatz von Mehrkammersystemen wird der Transport von Gütern in mehreren Klimazonen innerhalb eines LKWs möglich, was insbesondere bei kleinteiligen Sendungen zu einer erheblich besseren Auslastung von Fahrzeugen und der Möglichkeit zur Bündelung von Transporten beiträgt. Auch durch die teilweise mehrfach tägliche Anlieferung zur Gewährleistung der Frische sensibler Warengruppen fallen in der Handelslogistik zusätzlich kleinteilige- und Express-Sendungen an. Teilweise können verderbliche Güter nur durch den in Relation zur Transportleistung besonders treibhausgasintensiven Luftfrachtverkehr transportiert werden. So kommen täglich rund 140 Tonnen Lebensmittel auf dem Luftweg nach Deutschland (vgl. Kranke et al. 2011). Ferner ist die Handelslogistik aufgrund des Gebots der Kundennähe besonders mit den Herausforderungen der Logistik der „letzten Meile“ und der „City-Logistik“ konfrontiert, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

3.2.7 Logistik der „letzten Meile“

Die „letzte Meile“, mit der Güterfeinverteilung als Kernherausforderung, stellt in der Güterverkehrslogistik meist das schwächste Glied dar und steht im Fokus vieler Optimierungsbestrebungen. Nachhaltige Konzepte für die Güterfeinverteilung gilt es unter besonderer Berücksichtigung der „letzten Meile“ zu konzipieren (vgl. Weidmann et al. 2012). Während

im Fernverkehr meist hohe Volumina mit niedriger Frequenz befördert werden, um Skaleneffekte zu realisieren wie in der Schifffahrt und dem Güterzugtransport, müssen Lieferungen beim Abnehmer mit hoher Frequenz und niedrigen Volumina eintreffen. Als „letzte Meile“ bezeichnet man die Teilstrecke eines Logistikprozesses vom letzten Verteildepot bis zum Abnehmer. Die Fracht muss in Teil- und Sammelladungen fraktioniert und auf kleinere Fahrzeuge umgeschlagen werden. Für die Distribution muss schon aufgrund der Erreichbarkeit der individuellen Abnehmer überwiegend der Straßenverkehr genutzt werden. Gleichzeitig ist es wegen der Sendungsstrukturen nicht immer möglich die Fahrzeuge optimal auszulasten. Folglich entstehen auf diesem Teilabschnitt die höchsten Kosten und die meisten CO2-Emissionen. Insbesondere in Städten und Ballungsräumen mit hoher Verkehrsdichte ist die Logistik zudem mit zusätzlichen Problemstellungen konfrontiert. Die Logistik der „letzten Meile“ lässt sich mit der Art der Transportkette sowie der geographischen Ausprägung näher spezifizieren. Die Art der Transportkette kann ein direkter oder gebrochener Transport über einen oder mehrere Knoten sein. Hierzu werden sogenannte Verteildepots benötigt, in denen die Güter kommissioniert bzw. umgeschlagen werden und in den weiteren Transport übergehen. Typische Praxisbeispiele sind in diesem Kontext Zentrallager, Verteilzentren, KV-Terminals oder Rangierbahnhöfe. Aus geographischer Perspektive wird die „letzte Meile“ als Variable in Abhängigkeit des notwendigen Handlungsspielraums zur Beeinflussung der Nachhaltigkeit gesehen. Als oberer Grenzwert für die Definition der „letzten Meile“ werden 150 km empfohlen (vgl. Weidmann et al. 2012) KEP-Dienstleister sind in besonderem Maße mit den Herausforderungen der „letz-

ten Meile“ konfrontiert. Einer aktuellen Studie zufolge repräsentieren die Kosten der „letzten Meile“ bei der Zustellung eines B2C-Paketes 50 Prozent der Zustellkosten. Die Erstzustellung ist nur in 54 Prozent der Fälle erfolgreich. Daher werden alternative Zustelloptionen zur Kosten- und CO2-Emissionsreduzierung entwickelt. Erfolgreiche Alternativen können die Zustellung an zentrale Abholstellen, an Paketautomaten sowie an den Arbeitsplatz sein. Diese alternativen Zustelloptionen bergen Kostenreduktionspotenziale von bis zu 12 Prozent und können auch einen Beitrag zur Verringerung der CO2-Emissionen leisten (vgl. Salehi et al. 2012). Weitere Potenziale zur Senkung der CO2-Emissionen auf der „letzten Meile“ liegen im Einsatz elektrobetriebener Fahrzeuge. Für die Brief- und Paketzustellung wird die Deutsche Post DHL beispielsweise in Zukunft neu entwickelte Elektrofahrzeuge, so genannte „Streetscooter“, einsetzen.

3.2.8 City-Logistik

Die Versorgung urbaner Ballungsgebiete stellt besondere Anforderungen an die innerstädtische Güterlogistik. Derzeit sind viele LKWs im Stadtbereich zu Beginn ihrer Tour nur zu 30 bis 50 Prozent ausgelastet. Gleichzeitig steigt die Relevanz der „City-Logistik“ in zunehmendem Maße, da weltweit bereits mehr als 800 Städte mit mehr als einer Million Einwohnern existieren und im Jahr 2050 voraussichtlich etwa 55 Prozent der Weltbevölkerung in urbanen Ballungsgebieten leben werden (vgl. Lierow 2012). Bereits heute sind allein in Deutschland täglich rund 50.000 Lieferfahrzeuge im innerstädtischen Einsatz. Der deutsche Markt für Kurier-, Express- und Paketlieferungen umfasste im Jahr 2010 2,33 Milliarden Sendungen und einen Um-

satz von knapp 14 Milliarden Euro (vgl. Bosselmann 2011). Kleinteilige Sendungsstrukturen und zunehmende Fragmentierung des Sendungsmarkts, hohe Verkehrsdichte und Staus, zeit- und raumspezifische Zufahrtsbeschränkungen sowie Engpässe an Laderampen stellen logistische Problemstellungen mit ökonomischem und ökologischem Optimierungspotenzial dar. Unter „City-Logistik“ versteht man die netzwerk- und unternehmensübergreifende Bündelung und Restrukturierung des Güterverkehrs in Ballungszentren größerer Städte. Grundsätzlich zielt das Konzept auf die Etablierung einer kooperativen Nutzung von Transportkapazitäten und einer verdichteten, effizienteren Versorgung von Warenempfängern ab. Hiermit werden eine Entlastung der innerstädtischen Infrastruktur, eine verbesserte Wirtschaftlichkeit und eine geringere Umweltbelastung angestrebt. Dabei lassen sich zwei Verdichtungseffekte unterscheiden: Die Sendungsverdichtung bezeichnet die Erhöhung der pro Warenempfänger gelieferten Sendungen. Die Tourenverdichtung bezeichnet die Erhöhung der Anzahl von Stopps bei gleichzeitiger Verkürzung der Distanz zwischen den Stopps. Aufgrund der begrenzten Ladekapazität von Lieferfahrzeugen führt die Verdichtung von Touren zur Verkürzung der Gesamtwegstrecke, was insbesondere im Hinblick auf eine Minimierung von Leerfahrten relevant ist (vgl. Bretzke/ Barkawi 2012). Wesentlicher Bestandteil der „City-Logistik“ sind zentrale Distributionszentren, sogenannte „City-Hubs“ oder „Urban Consolidation Centers“ (UCC). Hier werden Warenströme verschiedener Lieferanten gesammelt, Teilladungen konsolidiert und tourenoptimal gebündelt. Durch die Vorkonsolidierung der Güter und die Auslieferung mit maximal ausgelasteten LKWs kann die existierende Straßeninfrastruktur deutlich effizienter

genutzt werden. Das Blickfeld verschiebt sich somit vom Warenstrom des Lieferanten und der Lieferung der gleichen Ware an verschiedene Abnehmer, zum Warenstrom des Empfängers und der Lieferung verschiedener Waren an den gleichen Abnehmer (vgl. Wolpert 2013). Zu den weiteren Konzeptelementen gehören der Direktumschlag von Waren ohne Lagerung, die Trennung bestimmter Warengruppen wie gekühlte Waren, die Kommissionierung in der Gangfolge der späteren Lieferstopps sowie standardisierte Labeling- und IT-Systeme (vgl. Lierow 2012). Neben der Versorgungslogistik ist das Konzept der „Citylogistik“ auch in der Entsorgungslogistik zur Sammlung von Wertstoffen und Abfällen und deren Wiederaufführung in den Wirtschaftskreislauf geeignet. Aktuelle Studien gehen von einer möglichen Senkung des CO₂-Ausstoßes des Frachtverkehrs um 35 bis 45 Prozent durch den Einsatz von „City-Logistik-Konzepten“ aus. Weitere Potenziale liegen in der Reduzierung der benötigten LKW, in einem um 30 bis 40 Prozent beschleunigten Verkehrsfluss sowie in verringerten Lärm- und Abgasbelastungen aus. Durch die begrenzte Tourenlänge und die Rückkehr der LKW zum Ausgangsort können auch Fahrzeuge mit Elektroantrieb verwendet werden, welche die CO₂-Bilanz des Konzeptes noch weiter verbessern können. Abhängig von den lokalen Faktorkosten können „City-Logistik-Konzepte“ trotz des zusätzlichen Konsolidierungsschritts im „City-Hub“ in vielen Städten der Welt Kostenpotenziale bei gleichbleibendem Service-Level ermöglichen (vgl. Lierow 2012). Sie können in den meisten Fällen nur mit externer politischer Hilfe etabliert werden, da die einzelnen Akteure nicht bereit sind bei unsicherem Ausgang ihrer Bemühungen die Entwicklungskosten selbst zu tragen (vgl. Allemeyer et al. 2010). Heute bereits implemen-

tierte Konzepte fokussieren auf Handel, Krankenhäuser, Hotels sowie den öffentlichen Sektor (z.B. Flughäfen). Beispiele sind in Heathrow (Heathrow Consolidation Center), Utrecht, Stockholm und London zu finden. Umfassende Neukonzepte sind derzeit für Dubai, Kuala Lumpur und Istanbul in Planung (vgl. Deutsche Post DHL 2012).

3.3 CO₂-Emissionsträger in der Logistik

Treibhausgasemissionen entstehen hauptsächlich bei der Bereitstellung von Energie und der Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Bezogen auf die CO₂-Emissionen in der Logistik korrelieren sie linear mit dem Energieverbrauch und hängen stark von der Art des Energieträgers ab. Im Jahr 2010 wurden weltweit 32.840 Mt (Megatonnen = 1.000.000 t) CO₂ emittiert. Dabei lässt sich beobachten, dass die Emissionen in Industrienationen in den letzten Jahren zurückgehen oder stagnieren, während sie in Entwicklungsländern teilweise stark ansteigen. In Deutschland wurden im Jahr 2010 835 Mt CO₂ emittiert, wovon 789 Mt (94,5 Prozent) direkt auf den Verbrauch von Energie zurückzuführen sind (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2014). Logistik- und Transportaktivitäten sind zentrale Treiber jeder Volkswirtschaft. Laut einer Studie im Rahmen des World Economic Forums 2009 entstehen weltweit etwa 5,5 Prozent aller Treibhausgasemissionen in logistischen Prozessen. Rund 87 Prozent der logistikbezogenen Emissionen entfallen hierbei auf den Gütertransport. Nur 13 Prozent der Emissionen fallen in logistischen Einrichtungen an (vgl. Doherty/ Hoyle 2009); (vgl. Wolpert 2013). Folglich entfallen nur 13 Prozent der logistikbezogenen Emissionen nicht

auf den Gütertransport (vgl. Abbildung 3-2). Weiterhin ist der stationäre Bereich in der Europäischen Norm DIN EN 16258, zur europaweit standardisierten Berechnung von CO2-Emissionen in der Logistik ausgeschlossen. Lagerhaltung und Umschlag sind explizit ausgeklammert. Allerdings fällt auch in Gebäuden, Lagern und Umschlagterminals ein Teil der CO2-Emissionen an. Darunter fällt beispielsweise der Stromverbrauch in Gebäuden und Umschlageinrichtungen, der Wärmeenergieverbrauch von Bürogebäuden, Umschlag- und Lagereinrichtungen, der Verbrauch von fossilen Brennstoffen sowie der Strom von Umschlag-, Lager und anderem Equipment wie etwa Umsetz- oder Flurförderfahrzeugen, Gabelstaplern oder anderen Sortier-, Förder-, Hub- und Lagerfahrzeugen. Allerdings gibt es bisher keine standardisierte, geschweige denn verbindliche Berechnungsvorgaben (vgl. Schmied/ Knörr 2012).

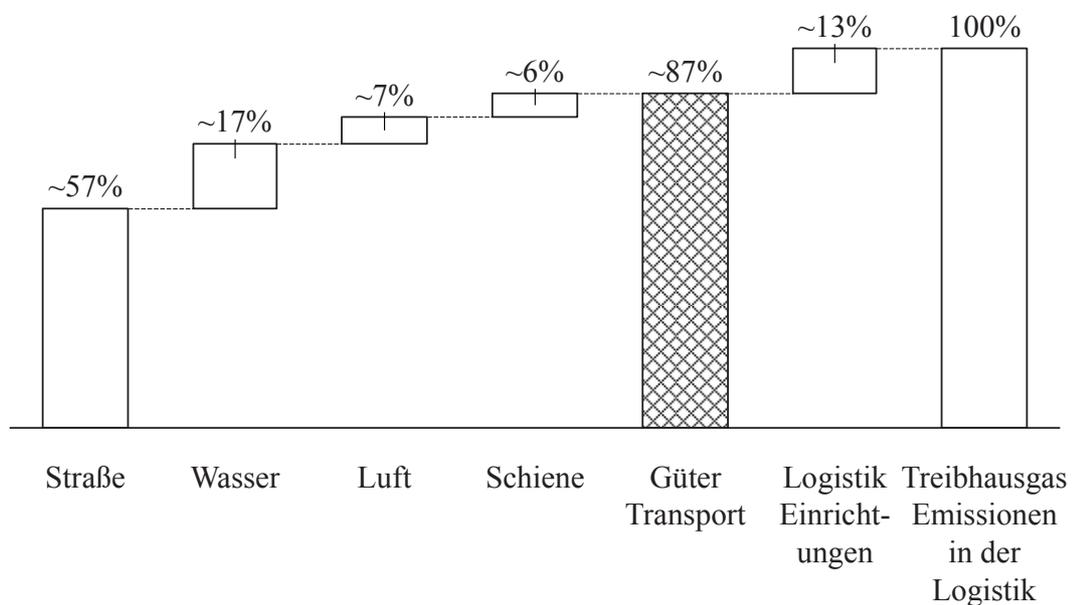


Abbildung 3-2: Weltweite Verteilung von Treibhausgasemissionen in der Logistik (vgl. Doherty/ Hoyle 2009; Wolpert 2013)

Aufgrund des Übergewichts der durch Transport verursachten Emissionen im Logistikbereich steht die Berechnung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Gütertransport im Mittelpunkt der Klimaschutzstrategiefindung von Unternehmen und infolgedessen auch im zentralen Blickfeld des Forschungsprojekts. Abbildung 3-3 stellt die Transportleistung in Milliarden Tonnenkilometern (Mrd. tkm) im Jahr 2010 dar. Unter „Einfuhr“ ist die Leistung auf der Strecke vom Versandort bis zur Grenze berücksichtigt. Bei der „Ausfuhr“ wird entsprechend die Strecke von der Grenze bis zum Empfangsort dargestellt. In der Position „Inland“ sind sowohl nationale Fahrten als auch anteilig die Durchfahrten von grenzüberschreitenden Transporten mit Start und Zielpunkt außerhalb Deutschlands sowie die nationalen Anteile von Einfuhr und Ausfuhr berücksichtigt. Der Seeverkehr stellt unter Berücksichtigung der Importe und Exporte, mit 2345 Mrd. tkm im Jahr 2010 mit Abstand die größte Transportleistung. Dies ist zum einen auf die großen Distanzen, zum anderen auf die Transportkapazitäten in der Seefahrt zurückzuführen. Innerhalb Deutschlands ist der Straßenverkehr das dominierende Verkehrsmittel. Im Jahr 2010 wurden auf deutschen Straßen 434 Mrd. tkm an Transportleistung erbracht. Somit werden 71,74 Prozent des innerdeutschen Gütertransportes über den Straßenverkehr abgewickelt. Mit 107 Mrd. tkm entfallen weitere 17,69 Prozent der nationalen Güterverkehrsleistung auf den Schienenverkehr und mit 62 Mrd. tkm, 10,24 Prozent auf die Binnenschifffahrt. Aufgrund der enormen Kosten, nicht zuletzt auf Grund der im Verhältnis zum Energieverbrauch sehr geringen Transportleistung, ist der Luftverkehr auf kurzen Strecken und innerhalb Deutschlands auch inklusive der Ein- und Ausfuhrleistung mit

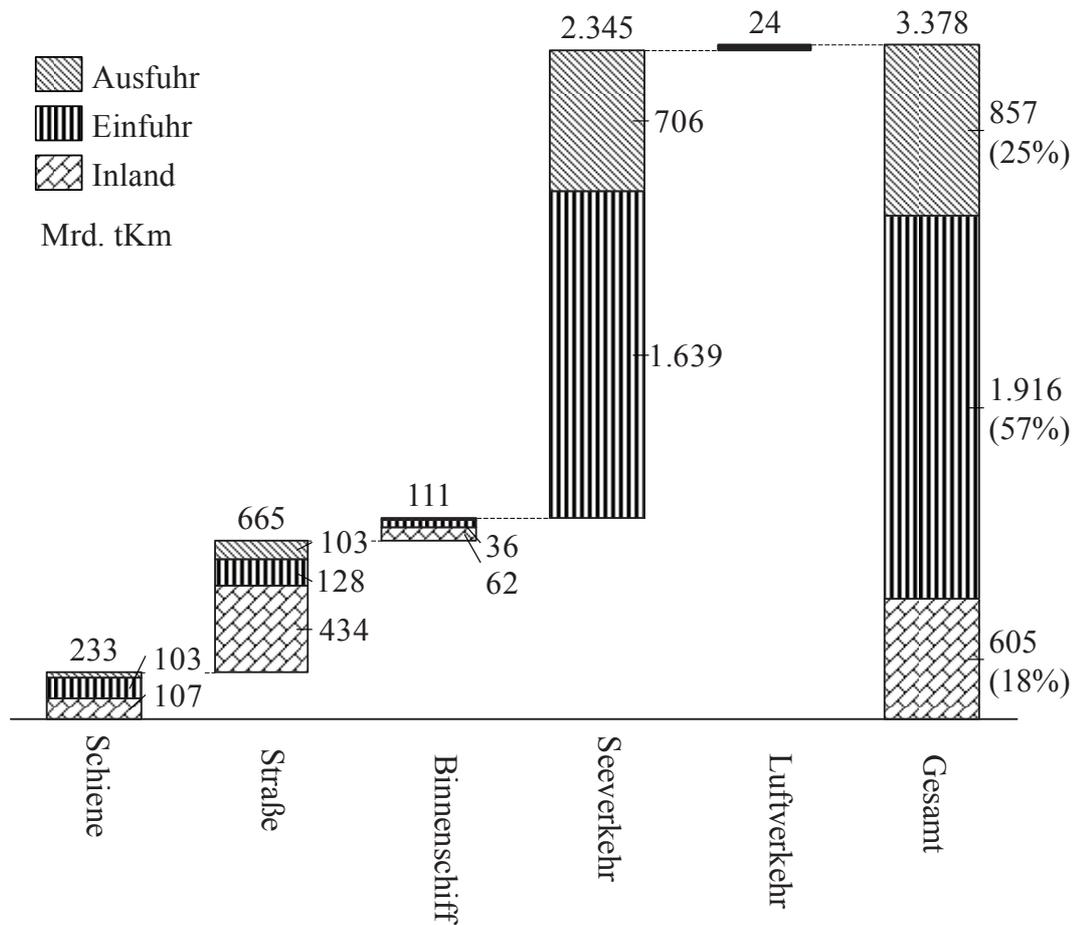


Abbildung 3-3: Transportleistung in Deutschland im Jahr 2010, inklusive Transportleistung von Ausfuhren und Einfuhren (vgl. Thomas 2012)

24 Mrd. tkm das am wenigsten genutzte Transportmittel. Von 835,99 Mt CO₂-Emissionen in Deutschland entfielen im Jahr 2010 172,43 Mt (20,63 Prozent) auf den Verkehr (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2014). Innerhalb Deutschlands („Inland“) entfielen 49,61 Mt CO₂, also 5,93 Prozent der Gesamtemissionen, beziehungsweise 28,77 Prozent der verkehrsbezogenen Emissionen auf den Güterverkehr. Der nationale Hauptverkehrsträger Straße (71,74 Prozent der Transportleistung) ist auch Hauptverursacher von CO₂-Emissionen im Güterverkehr. Mit Emissionen von 46,34 Mt im Jahr 2010 entstanden hier 93,4 Prozent der auf den nationalen Gütertrans-

port entfallenden CO₂-Emissionen (vgl. Abbildung 3-4). Vergleicht man die absolute Transportleistung so wird deutlich, dass in der Schifffahrt trotz der in dieser Betrachtung mit 2345 Mrd. tkm (69,41 Prozent) größten Transportleistung, nur 20,77 Prozent der CO₂-Emissionen anfallen. Während auf den Straßenverkehr mit 665 Mrd. tkm, beziehungsweise 19,68 Prozent der absoluten Transportleistung 60,95 Mt, oder 55,53 Prozent der CO₂-Emissionen zurechenbar sind (vgl. Abbildung 3-5). Um eine Abschätzung der Wirkungen der einzelnen Verkehrsträger vornehmen zu können ist eine Analyse ihrer Einsatzhäufigkeit erforderlich.

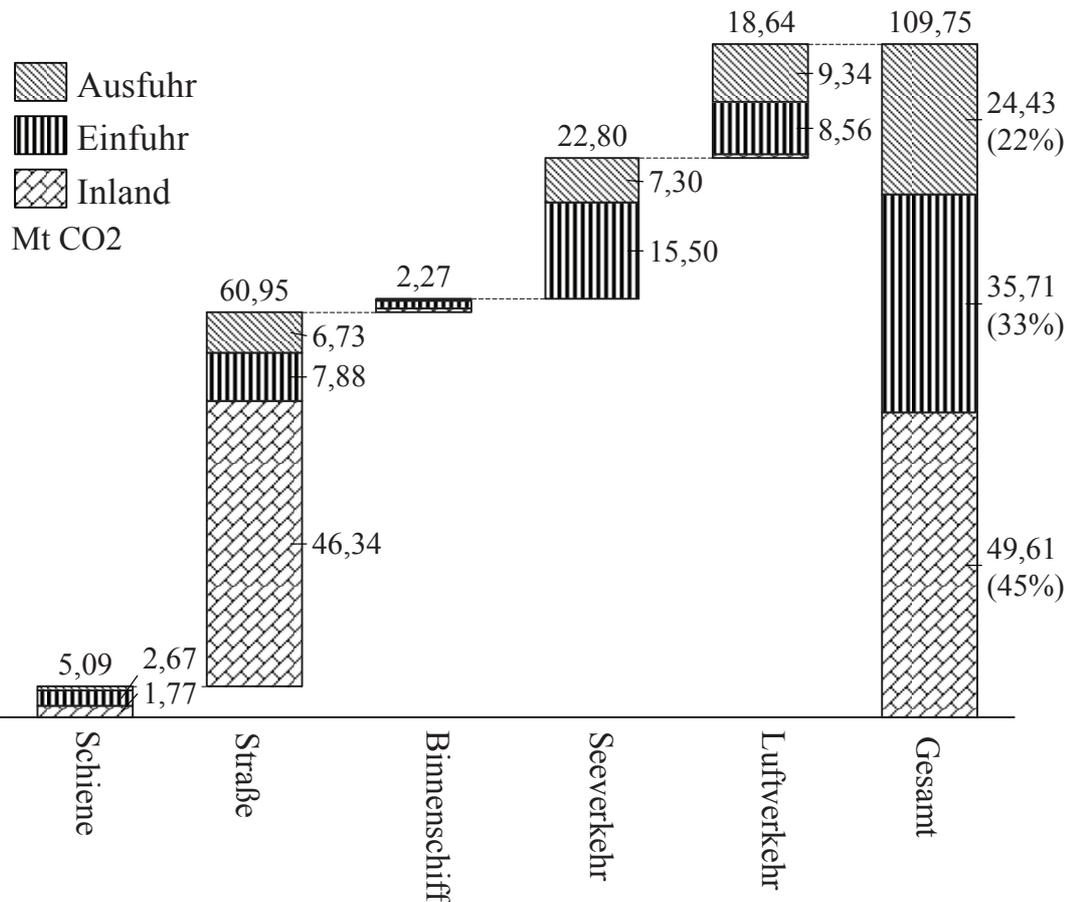


Abbildung 3-4: CO2 Emissionen in Deutschland im Jahr 2010, inklusive der Emissionen durch Ausfuhren und Einfuhren (vgl. Thomas 2012)

Seeschiffahrtsgüterverkehr: Der Güterverkehr auf See repräsentiert 69,4 Prozent der Tonnenkilometer und 20,8 Prozent der CO2-Emissionen im deutschen Güterverkehr unter Berücksichtigung von Ein- und Ausfuhren. Hinsichtlich der CO2-Effizienz ist die Seeschiffahrt mit 0,0097 kg CO2/tkm allen anderen Verkehrsträgern deutlich überlegen (siehe Abbildung 3-5). Die Seeschiffahrt stellt einen der wichtigsten Verkehrsträger der internationalen Logistik dar und ist für den grenzüberschreitenden Gütertransport unverzichtbar. Über 90 Prozent der im Außenhandel transportierten Gewichte und Volumina werden per Schiff transportiert. Der Seetransport eignet sich insbesondere für den Transport von Massengütern und Containern über lange

Distanzen. Zusätzlich dürfen die Lieferungen nicht zeitkritisch sein. Zu den größten Vorteilen zählen die großen Einzelladegewichte und großen Laderäume sowie das Angebot von Spezialschiffen. Einzelne Güter, die durch sehr hohe Gewichte oder durch sehr große Dimensionen charakterisiert sind, lassen sich ausschließlich per Seefracht transportieren. Nachteilig ist die Abhängigkeit von Sturm, Eisgang und Nebel sowie im Linienverkehr die Abhängigkeit von festen Routen. Die wichtigsten

Verkehrsträger	Mrd. tKm	Mt. CO2	kgCO2/tKm
Seeverkehr	2344,9	22,8266	0,0097
Binnenschifffahrt	110,54	2,26363	0,0205
Eisenbahnverkehr	233,45	5,09079	0,0218
Straßengüterverkehr	664,82	60,94622	0,0917
Luftverkehr	24,08	18,6465	0,7744

Abbildung 3-5: Effizienz der Verkehrsträger basierend auf Transportleistung und den subsequenten CO2 Emissionen in Deutschland inklusive Ein- und Ausfahrten (vgl. Thomas 2012)

Einflussgrößen bei der Seeschifffahrt im Hinblick auf Energieverbrauch und CO2-Emissionen sind Schiffstyp und -größe, Geschwindigkeit, Auslastung des Schiffes, Schiffsroute und Kraftstoffart (vgl. Kranke et al. 2011). Bei Seeschiffen gelten die gleichen physikalischen Regeln für den Energieverbrauch wie bei anderen Verkehrsträgern. Umso größer Schiff und Ladekapazität sind, desto geringer ist der spezifische Energieverbrauch je Ladeinheit. Stärker als bei anderen Verkehrsträgern ist bei Schiffen die Geschwindigkeit entscheidend für den Energieverbrauch (vgl. Schmied/ Knörr 2012). Eine Besonderheit des Schiffsverkehrs ist der Umstand, dass der Energieverbrauch mit steigender Auslastung nur geringfügig steigt. Wenig

beladene Schiffe werden zur Stabilisierung mit Ballastwasser gefüllt, so dass sich das Gesamtgewicht im Vergleich zu einem voll beladenen Schiff nur kaum verändert. Die tatsächliche Beladung ist daher für den Energieverbrauch eines Seeschiffes nur zweitrangig (vgl. Kranke et al. 2011).

Binnenschiffahrtsgüterverkehr: Der Güterverkehr auf Binnenschiffen repräsentiert 3,3 Prozent der Tonnenkilometer und 2,1 Prozent der CO₂-Emissionen im deutschen Güterverkehr unter Berücksichtigung von Ein- und Ausfuhren. Hinsichtlich der CO₂-Effizienz liegt er mit 0,0205 kg CO₂/tkm hinter dem Seeverkehr, jedoch deutlich vor dem Schienen-, Straßen- und Luftverkehr (siehe Abbildung 3-4). Die Binnenschiffahrt eignet sich insbesondere für den Transport von Massengütern und Containern, die nicht zeitsensitiv sind. Zudem kommt ihr die Rolle als vor- oder nachgelagertes Element zum Gütertransport per Seeschiffahrt zu. Neben den bereits bei der Seefahrt aufgeführten Vorteilen sind die günstigen Beförderungskosten bei der Binnenschiffahrt hervorzuheben. Als Nachteile sind das eingeschränkte Streckennetz, die Witterungsabhängigkeit sowie Mehrkosten beim Fehlen einer eigenen Anlegestelle zu nennen. Die relevantesten Einflussgrößen auf den Energieverbrauch und auf CO₂-Emissionen bei Transporten per Binnenschiffahrt sind Schiffsgröße (Kapazität, Motorleistung), Fahrgeschwindigkeit, Querschnitt der Wasserstraße, Auslastung des Schiffes, Fahrtrichtung in Relation zur Strömung und Art des Gutes (Massengut vs. Container) (vgl. Kranke et al. 2011). Große Binnenschiffe verbrauchen im Vergleich zu kleineren Schiffen deutlich weniger Energie pro Tonnenkilometer. Des Weiteren haben die Fahrgeschwindigkeit, die Charakteristika der Wasserstraße sowie Fahrtrichtung gegenüber der Strömung großen

Einfluss auf den Energieverbrauch. Die Art des Gutes determiniert unmittelbar die maximal mögliche Auslastung des Binnenschiffes. Beim Transport von Massengütern kann die maximale Ladekapazität tendenziell besser ausgenutzt werden als beim Transport von Containern.

Schienengüterverkehr: Der Güterverkehr auf der Schiene repräsentiert 6,9 Prozent der Tonnenkilometer und 4,6 Prozent der CO₂-Emissionen im deutschen Güterverkehr unter Berücksichtigung von Ein- und Ausfuhren. Hinsichtlich der CO₂-Effizienz liegt er mit 0,0218 kg CO₂/tkm hinter dem See- und Binnenschiffverkehr, jedoch vor dem Straßen- und Luftverkehr (vgl. Abbildung 3-5). Der Güterverkehr per Bahn ist für nahezu alle zu transportierenden Güterarten möglich. Grenzüberschreitende Transporte werden jedoch durch international sehr heterogene Bahn- und Schienensysteme erschwert. Der Schienenverkehr eignet sich insbesondere für hochvolumige und auch für schwere Massengüter sowie für Gefahrgüter. Typische Beispiele sind feste mineralische Brennstoffe, Metalle, flüssige Chemikalien, Mineralölerzeugnisse sowie auch Container. (vgl. Kranke et al. 2011) Vorteile des Schienengüterverkehrs sind insbesondere die größeren Einzelladegewichte als beim Lkw, exakte Fahrpläne sowie die weitgehende Störungsfreiheit. Nachteilig sind teilweise die Erfordernis privater Schienennetze sowie Zusatzkosten zur Anmietung von Spezialwagen. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch und auf CO₂-Emissionen stellen beim Schienengüterverkehr Traktionsart (Elektro vs. Diesel), Bruttogewicht (Waggons + Ladung), Gutart und Auslastung der Waggons, Leerfahrtenanteil sowie Streckentopographie dar. Rund 80 Prozent der Verkehrsleistung entfallen dabei auf Elektro-Lokomotiven (vgl. Kranke et al.

2011). Der Energieverbrauch von Güterzügen hängt hauptsächlich vom Bruttogewicht des Zuges ab: je länger und schwerer, desto weniger Energie entfällt auf die einzelne transportierte Tonne (vgl. Schmied/ Knörr 2012). Die Art des zu transportierenden Gutes hat Einfluss auf die maximale Auslastung der Waggon und den Leerfahrtenanteil und beeinflusst somit indirekt den Energieverbrauch. Unterschiedliche Streckentopographien können ebenfalls den Energieverbrauch steigern. Im Vergleich zu flachen Strecken ist bei bergigen Strecken mit einem Mehrverbrauch an Energie von bis zu 20 Prozent zu rechnen (vgl. Kranke et al. 2011).

Straßengüterverkehr: Der Güterverkehr auf der Straße repräsentiert 19,7 Prozent der Tonnenkilometer und 55,5 Prozent der CO₂-Emissionen im deutschen Güterverkehr unter Berücksichtigung von Ein- und Ausfuhren. Hinsichtlich der CO₂-Effizienz liegt er mit 0,0917 kgCO₂/tkm hinter dem See-, Binnenschiff- und Schienenverkehr, jedoch deutlich vor dem Luftverkehr (vgl. Abbildung 3-5). Der Straßengüterverkehr stellt bezüglich der inländischen Transporte den wichtigsten Verkehrsträger dar und ist für den deutschen und europäischen Güterlandverkehr unabdingbar. Mit Spezialfahrzeugen können nahezu sämtliche Güterkategorien auf Lkw transportiert werden. Des Weiteren kommt dem Güterverkehr auf der Straße eine entscheidende Rolle als vor- oder nachgelagertes Element anderer Verkehrsträger zu. Zu den größten Vorteilen zählen Zeit- und Kostenersparnisse im Nah- und Flächenverkehr, die flexible Fahrplangestaltung, das breite transportierbare Güterspektrum sowie anpassungsfähige Annahmezeiten. Nachteilig sind das Fehlen zeitgenauer Fahrpläne, die Witterungs- und Verkehrsabhängigkeit, die begrenzte Ladefähigkeit sowie der Ausschluss gewis-

ser Gefahrgüter (vgl. Wildemann 2010). Die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch und auf CO₂-Emissionen stellen beim Lkw-Verkehr Fahrgeschwindigkeit, Roll- und Luftwiderstand, Topographie, Verkehrssituation und Fahrverhalten sowie Gewichtsauslastung und Leerkilometeranteil dar (vgl. Kranke et al. 2011). Die Antriebskraft des Lkw-Motors wirkt entgegen des Luft- und Rollwiderstands sowie der Straßenlängsneigung. Der Rollwiderstand erhöht sich linear, der Luftwiderstand sogar exponentiell mit steigender Fahrgeschwindigkeit. Somit weist die Fahrgeschwindigkeit den größten Einfluss auf den Energieverbrauch auf (vgl. Kranke et al. 2011). Der Rollwiderstand ist durch die Wahl des Reifentyps sowie des Reifenluftdrucks beeinflussbar. Der Luftwiderstand wird durch die Aerodynamik der Zugmaschine, des Anhängers und der Aufbauten determiniert. Bei der Topographie, die in der Regel nicht veränderbar ist, hat die Straßenlängsneigung in Form von Gefälle und Steigungen Einfluss auf den Verbrauch (vgl. Schmied/ Knörr 2012). Weitere Effekte ergeben sich durch unterschiedliche Beschleunigungsprofile der Lkw, die zum einen auf die Verkehrssituation, zum anderen auf die verschiedenen Verhaltensweisen der Lkw-Fahrer zurückzuführen sind. Bezogen auf den Energieverbrauch je Sendung sind auch die tatsächliche Gewichtsauslastung sowie der Leerfahrtenanteil des Lkws zu berücksichtigen (vgl. Kranke et al. 2011).

Luftfrachtverkehr: Der Güter-Luftverkehr repräsentiert 0,7 Prozent der Tonnenkilometer und 17,0 Prozent der CO₂-Emissionen im deutschen Güterverkehr unter Berücksichtigung von Ein- und Ausfahrten. Hinsichtlich der CO₂-Effizienz ist die Luftfracht mit 0,7744 kg CO₂/tkm sämtlichen anderen Verkehrsträgern deutlich unterlegen (siehe Abbildung 3-5). Per

Luftfracht werden vorwiegend eilige, verderbliche oder sehr hochwertige Produkte über weite Entfernungen und oftmals grenzüberschreitend transportiert. Typische Güter sind durch eine hohe Wertdichte, also der Wertigkeit je Gewichtseinheit, charakterisiert. Gleichzeitig dürfen die Güter Gewichts- bzw. Geometriegrenzen nicht überschreiten. Zu den größten Vorteilen der Luftfracht zählen die sehr hohe Transportgeschwindigkeit sowie der Wegfall des Erfordernisses seefester Verpackungen. Die hohen Transportkosten sowie die große Witterungsabhängigkeit stehen diesen Vorteilen jedoch entgegen (vgl. Wildemann 2010). Die wichtigsten Einflussgrößen auf den Energieverbrauch und auf CO₂-Emissionen bei Luftfrachttransporten sind Flugzeugtyp und -version, Triebwerksart, Art des Flugzeugs (Passagier- vs. Frachtmaschine), Auslastung sowie Flugentfernung und erforderliche Umwege. Der Energieaufwand, der für Start, Reiseflug und Landung erforderlich ist, ist bezogen auf die maximale Nutzlast verhältnismäßig hoch. Der Kerosinverbrauch hängt maßgeblich vom Flugzeugtyp ab. Dieser determiniert das Leergewicht, die maximale Nutzlast, die Aerodynamik, die Reichweite sowie die Anzahl der Triebwerke (vgl. Kranke et al. 2011). Luftfracht kann in reinen Frachtflugzeugen, aber auch im Frachtraum von Passagiermaschinen transportiert werden. Beim Transport in Passagiermaschinen spricht man auch von Beifracht oder Bellyfracht. Bei Bellyfracht muss der Energieverbrauch zwischen Passagieren und Fracht aufgeteilt werden (vgl. Schmied/ Knörr 2012). Im Gegensatz zum Seeverkehr ist beim Luftverkehr die Auslastung der Flugzeuge für den Kerosinverbrauch von großer Bedeutung. Eine weitere Besonderheit des Luftfrachtverkehrs ist das Verhältnis des Kerosinverbrauchs zur Fluglänge. Da der Kerosin-

verbrauch in der Startphase deutlich höher als beim Reiseflug ist, ist der gemittelte Verbrauch über die Flugkilometer bei Kurzstrecken deutlich höher als bei Langstrecken (vgl. Kranke et al. 2011).

3.4 Zusammenfassung der CO₂-Relevanz in der Logistik

CO₂- Emissionen entstehen in Abhängigkeit vom Energieträger nahezu direkt proportional zum Energieverbrauch. Je nach Betrachtungsweise können sie Produkten, Unternehmen oder Dienstleistungen zugerechnet werden. Für das einzelne Unternehmen ist es zunächst wichtig die Systemgrenzen und somit den Rahmen der Betrachtung festzulegen. Die gewählte, prozessorientierte Sichtweise auf die Logistik gewährt jedem kleinen und mittelständischen Unternehmen einen Überblick über sämtliche Logistikprozesse und liefert einen Orientierungsrahmen zur individuellen Identifikation relevanter CO₂-Emissionsverursacher und Einsparpotenzialen. Hierzu werden nicht nur die Kernprozesse Beschaffungs-, Produktions-, Distributions- und Entsorgungslogistik beleuchtet, sondern auch Spezialprozesse mit CO₂-Relevanz wie Rückführungs-, Handelslogistik, Logistik der „letzten Meile“ und „City-Logistik“ thematisiert. Für jeden logistischen Prozess erfolgen eine Definition sowie die Darstellung der wesentlichen logistischen Aktivitäten. Es wurde aufgezeigt, welche Handlungsfelder sich in den einzelnen Logistikprozessen ergeben und wie relevant diese für die Entstehung von CO₂-Emissionen sind. Zudem wurden aktuelle Trends und beispielhafte Optimierungsansätze diskutiert. In Bezug auf Logistikleistungen ist mit 87 Prozent der Gesamtemissionen der Transport im zentralen Blickfeld von Nor-

men und Optimierungsmaßnahmen. Es wird daher gesondert auf die CO₂-Emissionen im Transportsektor auf volkswirtschaftlicher Ebene und speziell auf die Transportleistung und die dadurch entstehenden Emissionen eingegangen. Ferner werden die einzelnen zur Verfügung stehenden Verkehrsträger und deren spezifische Effizienz im Hinblick auf CO₂-Emissionen beleuchtet. Durch ihre Planungs-, Steuerungs- und Kontrollfunktion bietet es sich in der Logistik an die hier identifizierten Gestaltungsfelder zu optimieren. Im Folgenden soll auf konkrete Optimierungsmaßnahmen zur Vermeidung und Reduzierung von CO₂-Emissionen eingegangen werden. Um verschiedene Ansätze und deren Potenziale bewerten zu können, muss zunächst auf die Abgrenzung des CO₂-Footprints und dessen Berechnung in der Logistik detailliert abgezielt werden.

4 CO2-Footprint in der Logistik

Der CO2-Footprint lässt sich auf zwei Ursprünge, den „ökologischen Fußabdruck“ und den konzeptionellen Ansatz der ganzheitlichen Betrachtung von Produktlebenszyklen, zurückführen. Der „ökologische Fußabdruck“ (engl. ecological footprint) wurde erstmals im Jahr 1996 von Wackernagel und Rees vorgestellt (vgl. Wackernagel/ Rees 1998). Er beschreibt die benötigte Fläche auf der Erde (Hektar pro Person und Jahr), um den Bedarf der Menschen an Ressourcen und Energie dauerhaft zu gewährleisten. Mit dem „ökologischen Fußabdruck“ wird ermittelt, ob eine einzelne Person, eine Stadt oder ein Land im Vergleich zu der verfügbaren Fläche über ihre, beziehungsweise seine Verhältnisse lebt. In Lebenszyklusbetrachtungen wurde das „Carbon Footprinting“ als Ergebnisgröße einer speziellen Wirkkategorie ermittelt. Es handelte sich dabei um einen Indikator für das Treibhausgaspotenzial (Global warming potential). Das Treibhausgaspotenzial stellt einen Faktor dar, der die „Wirkung der verstärkten Strahlung einer massebezogenen Einheit eines bestimmten Treibhausgases in Bezug auf eine äquivalente Einheit Kohlendioxid über einen Zeitraum von 100 Jahren beschreibt“ (vgl. ISO 14064-1). Es wird deutlich, dass beim CO2-Footprint die Namensgebung vom „ökologischen Fußabdruck“ abstammt und gleichzeitig dem konzeptionellen Ansatz eines Treibhausgasindikators zugrunde liegt (vgl. Pandey et al. 2011). Der CO2-Footprint wird als „measure of the exclusive total amount of carbon dioxide emissions that is directly and indirectly caused by an activity or is accumulated over the life stages of a product“ (vgl. Wiedmann/ Minx 2007) definiert. Die Definition bezieht sich auf alle Aktivitäten ein-

zelter Personen, einer Bevölkerung, Regierung, Unternehmen, Organisationen, Prozesse und Industrien. Auch sind alle Güter und Dienstleistungen als Produkte zu verstehen und die direkten und indirekten Emissionen zu berücksichtigen. Dennoch bestehen keine einheitlichen Ansichten darüber, welche direkten und indirekten Emissionen in eine Bewertung einfließen sollen (vgl. Abbildung 4-1). Direkte Emissionen entstehen unmittelbar aus einem Prozess eines Akteurs, wie CO₂-Emissionen durch die Kraftstoffverbrennung in Fahrzeugen. Indirekte Emissionen entstehen hingegen nicht direkt beim Akteur, sondern in einem vor- oder nachgelagerten Prozess. Dies können Emissionen durch bezogenen Strom sein, welche bei der Stromerzeugung in einem Kraftwerk anfallen.

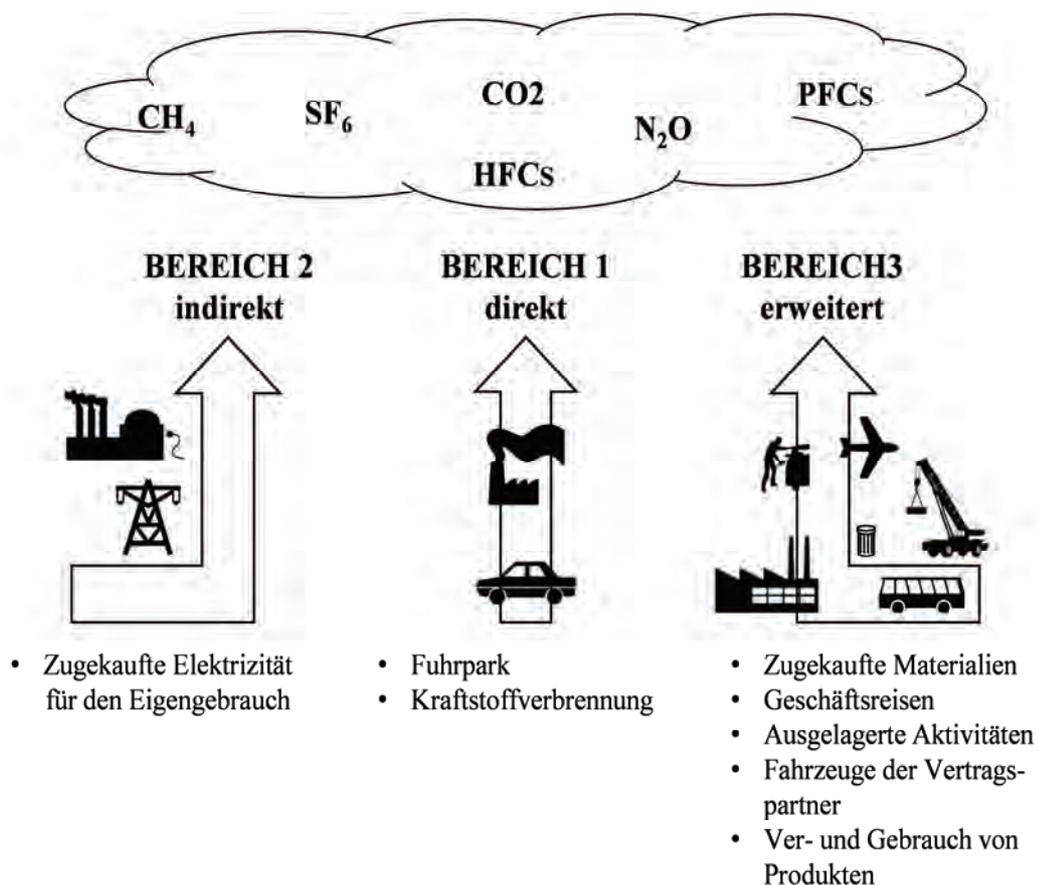


Abbildung 4-1: Abgrenzung der Emissionsbereiche

Da die Ermittlung aller möglichen Emissionen sehr komplex ist, berücksichtigen die meisten Studien nur direkte und indirekte Emissionen ersten Grades (vgl. Pandey et al. 2011). Das Ziel eines konsistenten CO₂-Footprints ist es, die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Berechnungen zu ermöglichen. Hierzu hat sich die Einheit des CO₂-Äquivalents (CO₂e; e für equivalent) als zentrale Größe durchgesetzt. Mit Hilfe des CO₂-Äquivalents ist ein Vergleich der verstärkten Strahlung des Treibhausgases gegenüber dem CO₂ möglich. Berechnet wird das CO₂-Äquivalent durch die Multiplikation der Masse eines bestimmten Treibhausgases mit dessen Treibhausgaspotenzial. Zum Beispiel beträgt das CO₂-Äquivalent von Methan 28. Damit trägt ein Kilogramm Methan innerhalb der ersten 100 Jahre nach der Freisetzung 28-fach stärker als ein Kilogramm CO₂ zum Treibhauseffekt bei. In Anlehnung an die akzeptierte Einheit für den CO₂-Footprint lässt sich dieser auch definieren als „the quantity of Greenhouse Gases expressed in terms of CO₂e, emitted into the atmosphere by an individual, organization, process, product, or event from within in a specified boundary” (vgl. Pandey et al. 2011). Es bedeutet, dass der CO₂-Footprint für Unternehmen, Produkte oder Prozesse ausgewiesen wird. Er ist ein Maß für alle CO₂-Emissionen, die direkt oder indirekt durch Aktivitäten oder Prozesse im jeweiligen Bewertungsbereich verursacht werden. Treibhausgase werden in natürliche und anthropogene Treibhausgas-Emissionen unterschieden (vgl. Kranke et al. 2011). Natürliche Treibhausgas-Emissionen befinden sich im Gleichgewicht mit ihrem natürlichen Abbau. Anthropogene Treibhausgas-Emissionen, also solche die vom Menschen erzeugt werden, kommen zusätzlich zu den natürlichen Treibhausgas-Emissionen hinzu und steigern

damit die Welt-Klimabilanz. Laut Untersuchungen verursacht der Verkehr weltweit rund zehn Prozent des gesamten anthropogenen Treibhausgas effekts. Den größten Anteil unter den Treibhausgasen hat das CO₂ mit 97 Prozent. In der Logistik treten Treibhausgas-Emissionen im Besonderen bei der Verbrennung fossiler Energieträger auf. Zwei Tendenzen bestärken den hohen Stellenwert der Logistik in der Supply Chain von Produkten. Zum einen ist dies der Trend die Lagerhaltung von Unternehmen auf die Straße zu verlagern. Dabei wird der Produktionsprozess von Herstellern und Lieferanten so abgestimmt, dass es möglich ist Just-in-Time anzuliefern um somit Lagerflächen so klein wie möglich auszulegen. Zum anderen bestellen Verbraucher zunehmend über das Internet, wodurch die Versandmenge der Transportdienstleister vor allem im Paketgeschäft in den letzten Jahren stetig angestiegen ist. Gemessen an den Logistikprozessen kommt es durch diese Trends besonders in den Bereichen der Beschaffungs-, Produktions-, Vertriebs- und „City-Logistik“ zu einem zunehmenden Transportaufkommen. Diese Logistikprozesse gilt es im Besonderen zu betrachten, eine Messung der CO₂-Emissionen zu fokussieren und damit CO₂-Reduzierungsmöglichkeiten für die Logistikprozesse zu schaffen. Ziel einer CO₂-Reduzierung in der Logistik ist die Minderung der anthropogenen Auswirkungen auf das Klima und damit eine Abmilderung der Klimafolgen. Da eine CO₂-Reduzierung außerdem in direktem Zusammenhang mit einem geringeren Verbrauch von Kraftstoff steht ist ein weiteres Ziel die Senkung der Transportkosten. Eine CO₂-Reduzierung in der Logistik steht in unvermittelter Kongruenz mit den Weltklimakonferenzen der Vereinten Nationen. Das Ziel des internationalen Übereinkommens ist die Stabilisierung

der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Diese Ziele decken sich auch mit dem Energie- und Klimaschutzprogramm der Regierung der Bundesrepublik Deutschland in dem vereinbart wurde die Treibhausgas-Emissionen in Deutschland bis 2020 um 40 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren. Mit dem Kyoto-Protokoll aus dem Jahr 1998 verfassten die Industrieländer einheitliche Standards zur Erfassung der Treibhausgas-Emissionen und beauftragten nationale Organisationen mit der Erstellung von Treibhausgasinventaren. Basis für die Berechnung sind die Guidelines for National Systems der United Nations Framework Convention on Climate Change. In Deutschland erstellt das Umweltbundesamt jedes Jahr einen „Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar“. Der Verkehr ist im nationalen Inventarbericht Teil des Hauptsektors Energie und es werden ausschließlich die direkten Treibhausgas-Emissionen ohne Emissionen der Energievorkette berücksichtigt. Für den Straßenverkehr wird der Verkehr auf öffentlichen Straßen im Inland ohne den land- und forstwirtschaftlichen sowie den militärischen Verkehr betrachtet. Im Bericht erfolgt eine Betrachtung aller Transportmittel – Personenkraftwagen, motorisierte Zweiräder, leichte Nutzfahrzeuge, schwere Nutzfahrzeuge, Busse, Eisenbahnverkehre, nationale Binnen- und Küstenschiffahrt sowie nationaler Flugverkehr. Die Berechnung der Treibhausgas-Emissionen für den Nationalen Inventarbericht erfolgt nach dem „Transport Emission Model“. Das Modell wurde 1993 vom Umweltbundesamt initiiert und ist eine Berechnungsmethodik zur Erfassung von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen des motorisierten Ver-

kehrs in Deutschland. Das „Transport Emissions Model“ weist die jährlichen Gesamtemissionen differenziert nach Verkehrsträgern und einzelnen Verkehrsmitteln in Deutschland aus. Durch die Verbindung dieser Werte mit der Verkehrsleistung der einzelnen Verkehrsträger ergeben sich durchschnittliche CO₂- und Treibhausgas-Emissionen je Tonnenkilometer im Güterverkehr. Eine genauere Messung des CO₂-Footprints in der Logistik kann mit Hilfe der DIN EN 16258:2013-03 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen“ erfolgen (vgl. DIN EN 16258). Die Norm gibt vor, dass der gesamte Fahrzeugumlauf betrachtet werden muss, bei dem die einzelne Sendung transportiert wird. Dieser Fahrzeugumlauf wird als Fahrzeugeinsatzsystem (Vehicle Operation System) bezeichnet. Die Konvention stellt sicher, dass auch Leerfahrten zur Bereitstellung der Fahrzeuge oder Leerfahrten zurück zum Versandstandort in die Berechnung miteingehen. Dabei ist zu beachten, dass zum Beispiel bei Containerschiffen das Fahrzeugeinsatzsystem der gesamte Loop vom Abgangshafen zum Empfangshafen und wieder zurück ist, auch wenn der betrachtete Container nur eine Teilstrecke transportiert wird. Dementsprechend gehört bei Sammel- und Verteilerverkehr die gesamte Tour zum Fahrzeugeinsatzsystem. Des Weiteren können mit Hilfe der Norm nicht nur die direkten Energieverbräuche sowie Treibhausgas-Emissionen berechnet werden, sondern auch alle indirekten Verbräuche und Emissionen die zur Bereitstellung einer Transportdienstleistung nötig sind. Die Ergebnisse einer CO₂-Footprint-Berechnung bilden eine solide Basis für Unternehmen Maßnahmen zur Minderung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen auszuarbeiten. Die Kalkulationen kön-

nen dazu dienen Emissionstreiber wie verbrauchsintensive Routen oder ungeeignete Transportmittel in den Logistikprozessen zu identifizieren. Das Aufzeigen von CO₂-Treibern in der Logistikkette ermöglicht den Ansatz emissionsreduzierender Gegenmaßnahmen. Eine Reduktion von Treibhausgasen kann zum Beispiel durch Optimierung von Routen, Minderung von Leerfahrten, effizientere Informationsflussgestaltung, Zuordnung effizienter Fahrzeuggrößen oder eine sparsame Energieversorgung von Lager und Umschlag geschehen. Diese Einsparpotenziale stehen im direkten Zusammenhang mit den Logistikkosten. Andere Einsparmaßnahmen wie verbrauchsärmere Transportmittel führen zu Beginn zu Kosten, die sich über die Energieeinsparungen in den Folgejahren amortisieren. Die Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen ermöglicht dadurch eine ganzheitliche Bewertung und Priorisierung von Maßnahmen.

4.1 Analyse der angebotenen Tools

Es gibt Tools für die Messung des CO₂-Footprints von Unternehmen, Produkten, Dienstleistungen und Prozessen. Sie sind frei über das Internet zugänglich oder durch kostenpflichtige Softwarelizenzen zu beziehen. Im Allgemeinen lässt sich die verfügbare Software in zwei Kategorien unterteilen. Zunächst gibt es sogenannte Life-Cycle-Assessment-Tools mit denen sich Lebenszyklusanalysen darstellen lassen. Bei diesen sehr umfangreichen Tools werden Bilanzen erstellt, welche die Umweltwirkungen von Produkten oder Unternehmen über ihren Lebenszyklus aufzeigen. Die Eingangs- und Ausgangsparameter der Tools sind sämtliche umweltrelevanten Ressourcen wie

Wasser, Energieträger, Treibhausgasemissionen oder Abwässer. Betrachtet werden alle vor- und nachgeschalteten Prozesse zur Darstellung von Unternehmensaktivitäten auf Produkt- oder Betriebsebene. Aufgrund ihrer umfangreichen Betrachtungsweise kombinieren diese Tools verschiedene Datenbanken und Bilanzierungsregeln. Als weitere Kategorie finden sich Tools die konkrete Prozesse abbilden. Für den Logistiksektor sind in den letzten Jahren einige softwarebasierte Tools erschienen, da neue Regulierungen auf nationaler sowie europäischer Ebene eine standardisierte Berechnungsmethodik ermöglichen. Im Folgenden werden Software-Tools für die Berechnung von Energieverbräuchen und Treibhausgas-Emissionen bei Transportdienstleistungen detailliert vorgestellt (vgl. Abbildung 4-2). Im Besonderen werden die Funktionalitäten sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Tools im Hinblick auf die CO₂-Footprint-Berechnung in der Logistik betrachtet. Eine detaillierte Funktionsanalyse wurde bei den Tools EcoTransIT World, NTM Calc, LogEC, Map&Guide Prof, CO₂-Rechner der Luftfahrtgesellschaften sowie bei den CO₂-Rechner der Seereeder durchgeführt. Entscheidende Bewertungskriterien bei der Analyse waren die Möglichkeit zur Auswahl multimodaler Transportmittel wie LKW, Zug, Flugzeug oder Schiff. Zudem wurde bewertet ob mehrere Frachtgüter bei der Bewertung berechnet werden können und ob das Tool verschiedene Möglichkeiten zur Allokation der Energieverbräuche/Treibhausgas-Emissionen vorgesehen hat. Ein weiterer Bewertungspunkt war die flexible Gestaltungsmöglichkeit der Fahrzeugeinsatzsysteme, um verschiedene Teilstrecken abbilden zu können. Dies ist essentiell, um beispielsweise Sammelfahrten zu modellieren.

<ul style="list-style-type: none"> ● Vollumfänglich enthalten ◐ Teilweise enthalten ○ Nicht enthalten 	Eco TransIT World	NTM Calc	LogEC	Map & Guide Pro	CO2- Rechner Luftfahrt gesellschaften	CO2- Rechner Seereeder
Multimodale Transportmittelwahl	●	●	●	○	○	○
Differenzierung Größenklassen Transportmittel	●	●	●	●	◐	●
Differenzierung Kraftstoffe	○	○	●	●	○	○
Flexible Gestaltung Fahrzeugeinsatzsystem	●	●	●	●	○	○
Transport mehrerer Frachtgüter	○	○	●	●	○	○
Verwendung allgemeingültiger Durchschnittsverbräuche	●	●	●	●	●	●
Verwendung detaillierter, fahrzeug- oder flottenspezifischer Verbrauchswerte	○	○	●	●	○	○
Berücksichtigung von Leerfahrten/ Auslastungsgrad	●	○	●	●	○	○
Berücksichtigung Ladungsträger	○	○	○	●	○	○
Berücksichtigung Topographie	○	○	○	●	○	○
Allokation von Energieverbrauch/ THG-Emissionen zu Frachtgütern	○	○	●	○	○	○
Ausgabe von Energieverbrauch/ Treibhausgas-Emissionen	●	◐	●	◐	◐	◐
Tabellarische/ Grafische Ergebnisdarstellung	●	◐	●	◐	◐	◐
Kostenfreie Nutzung	●	●	○	○	●	●

Abbildung 4-2: Funktionsanalyse der auf dem Markt erhältlichen Softwarelösungen für die CO2-Footprint-Berechnung in der Logistik.

Dies bedeutet eine nutzerspezifische Auswahl beliebiger Transportstrecken sowie Transportmittel auf diesen Teilstrecken. Nur durch die flexible Gestaltung des Fahrzeugeinsatzsystems lassen sich Teilladungs-, kombinierter Verkehr und mehrstufige Netzwerksysteme realitätsnah abbilden. Von besonderer Bedeutung der Betrachtung stehen die Kalkulationsannahmen der Tools für die Verbrauchswerte der Transportmittel. Diese Annahmen tragen entscheidend zur Genauigkeit der Kalkulationsannahmen bei. Im Idealfall erlaubt es das Berechnungstool mit den tatsächlichen Verbrauchswerten je Transportstrecke und Verkehrsträger zu rechnen. Liegen die detaillierten Verbrauchswerte nicht vor, so bieten manche Tools an mit durchschnittlichen Verbräuchen für ein Transportmittel zu rechnen. Liegen keine Durchschnittswerte für ein spezifisches Fahrzeug vor, so ist eine weitere Möglichkeit den Verbrauch über flotten-spezifische Annahmen zu definieren. Hierbei muss im Stil einer Bilanz der Gesamtverbrauch einer Flotte im Verhältnis zur Gesamtfahrleistung eines Jahres betrachtet werden. Das letzte Verfahren ist die ungenaueste Annahme des Verbrauchs. Andere Software ermöglicht überhaupt keine Angabe von unternehmensinternen Verbräuchen sondern nur die pauschale Berechnung mittels Standard-Durchschnittsverbrauch je Transportmodalität aus Datenbanken. Ein weiterer funktionaler Unterscheidungspunkt der Softwaretools sind die Beachtung von Leerfahrten, der Auslastungsgrad der Transportmittel sowie Ladungshilfen der Frachtgüter. Zudem kann mitunter bei den Größenklassen der Transportmittel und den Kraftstoffarten differenziert werden. Diese Unterscheidungsmerkmale tragen zu einer erhöhten Genauigkeit der Kalkulationen bei. Die Ergebnisdarstellung ist ein weiteres wichtiges Unterscheidungskrite-

rium. Eine umfangreiche Ergebnisdarstellung beinhaltet sowohl die Darstellung der Fahrzeugeinsatzsysteme sowie der Ergebnisgrößen Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen in tabellarischer und grafischer Form. Als ein wichtiges Kriterium gelten zudem die Kosten, die für die Benutzung des Softwaretools anfallen. Im Folgenden wird eine detaillierte Beschreibung der erhältlichen Tools unter besonderer Berücksichtigung der oben genannten Untersuchungskriterien geliefert. In Bezug auf die Berechnungs- und Optimierungsmethodik lassen sich die Tools in zwei unterschiedliche Gruppen clustern. Zunächst gibt es Tools, die Transportdienstleistungen unabhängig vom Transportmittel darstellen können. Diese Tools, auch transportmittelunabhängige Kalkulationssoftware genannt, weisen in unterschiedlicher Art und Weise die Energieverbräuche und Treibhausgas-Emissionen aus. Als zweite Kategorie gibt es sogenannte transportmittelspezifische Kalkulationssoftware. Diese Tools sind speziell auf eine Transportmodalität ausgerichtet. Die Vorteile dieser transportmittelspezifischen Tools sind, dass die Berechnungen sehr detailliert ausgeführt werden können, da die Datenbank nur Informationen einer Transportmittelvariante beinhalten muss. Optimierungsmaßnahmen wie zum Beispiel die Routenführung können speziell auf diese eine Transportmodalität ausgelegt sein. Ein transportmittelunabhängiges Tool braucht für dieselbe Optimierungsmöglichkeit eine wesentlich größere Datenbank und komplexere Rechenlogik, da die Transportmittelwahl in verschiedener Art und Weise miteinander kombiniert werden kann und damit die Komplexität erhöht wird. Im Folgenden werden zunächst die transportmittelunabhängigen Kalkulationssoftwares vorgestellt. Diese sind das Tool Eco TransIT World, das Tool NTM Calc und das Tool

LogEC. Im Weiteren werden dann die transportspezifischen Kalkulationssoftwares im Detail erläutert. Map&Guide ist eine Software zur spezifischen Kalkulation des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen des LKW-Verkehrs. Der CO2-Rechner der Luftfahrtgesellschaften und der CO2-Rechner der Seereeder sind im spezifischen für den Luftverkehr sowie den Seeverkehr konzipiert.

EcoTransIT: Das kostenlose Tool ist im Internet frei zugänglich. Es identifiziert die Auswirkungen des Güterverkehrs in Bezug auf den direkten Energieverbrauch und die Emissionen beim Betrieb von Fahrzeugen zum Transport von Gütern. Das Tool berechnet sowohl den Primärenergieverbrauch in Megajoule, Kilowattstunde und Liter Dieseläquivalent, als auch den Kohlendioxidausstoß und das CO₂-Äquivalent in Tonnen und die Stickoxide in Kilogramm. Dabei berücksichtigt EcoTransIT die Emissionen, die beim Betrieb der Transportmittel (Tank-to-Wheel) sowie die, die bei der Produktion der Kraftstoffe (well-to-tank) anfallen. Nicht berücksichtigt werden hingegen die Emissionen, die bei der Herstellung, Entsorgung der Fahrzeuge, Bau, Instandhaltung und Entsorgung der Verkehrsinfrastruktur entstehen, sowie die Emissionen von Gebäuden und Häfen. Die grundlegenden Datenbanken auf denen die Berechnung der Emissionen besteht sind die „TREMODO – Transport Emission Model“, sowie das „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs.“ Eine Vielzahl an Einflussfaktoren dienen ebenso als Basis bei der Berechnung der Auswirkungen. Vordefinierte Faktoren der Rahmenbedingungen können über die Benutzeroberfläche an unternehmensspezifische Bedingungen angepasst werden. EcoTransIT vergleicht den Energieverbrauch und die Emissionen für Güter, die per Eisen-

bahn, Lkw, Schiff und Flugzeug transportiert werden. Berücksichtigt werden auch intermodale Transportdienste und die unterschiedlichen technischen Standards der Fahrzeuge. Der Energiebedarf wird je zurückgelegtem Kilometer und Ladungsgewicht ermittelt. Durch Umrechnungsfaktoren auf Basis der Energieverbrauchswerte werden schließlich die Emissionen festgestellt. Bei der Ermittlung der beim Transport emittierten Emissionen beschränkt sich das Tool auf die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffoxid. Als Reaktion auf die Anforderungen von Unternehmen im weltweiten Maßstab werden auch länderspezifische Kriterien wie die Kombination verschiedener Energieträger und die Topologie in die Berechnungen einbezogen. Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen werden in Form von Balkendiagrammen und Tabellen präsentiert. Darin werden Energieverbrauch und Emissionen der verschiedenen Umweltschadstoffe miteinander verglichen und es wird zwischen den ausgewählten Verkehrsmitteln unterschieden. Das Tool basiert auf der europäischen Norm DIN EN 16258 zur Ermittlung von Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen. EcoTransIT wurde zuletzt 2014 aktualisiert. Hierbei wurde die europäischen Norm 16258 bei den Berechnungen von Flugdistanzen und bei den Umrechnungsfaktoren für die Vorkette und Energieumrechnung berücksichtigt. Limitiert wird das kostenlose Tool lediglich dadurch, dass es ausschließlich Berechnungen von einzelnen Transportketten ermöglicht, die topographische Merkmale unberücksichtigt lassen. Eine Berechnung von Massendaten und Schnittstellen zu unternehmensinterner Logistiksoftware ist nur durch Aufpreis möglich. Zudem kann das Tool nur zur Berechnung von Transportdienstleistungen einzelner Frachtgüter verwendet werden.

Eine Allokation mehrerer Frachtgüter bei einer Transportdienstleistung ist nicht möglich. Eine weitere Limitierung des Tools ist der Umstand, dass der Nutzer selbst ermittelte Energieverbräuche für Verkehrsträger nicht eingeben kann. Das Tool rechnet generell mit durchschnittlichen Verbrauchswerten. Eine Verwendung von individuellen Messwerten, transportmittel-spezifischen Durchschnittswerten oder Flottenwerten ist nicht möglich. Zudem findet keine Differenzierung der verschiedenen Kraftstoffe statt.

NTM Calc: Dieses als Basisversion ebenfalls im Internet frei zugängliche Tool dient der Berechnung von CO₂-Emissionen als auch Emissionen von Luftschadstoffen wie Stickoxiden, Kohlenwasserstoffen und Kohlenstoffmonoxid, die beim Transport entstehen. Das Spektrum der Berechnung erstreckt sich über Lkw-, Bahn-, Schiffs- und Flugverkehr. Ein kostenpflichtiges Upgrade ermöglicht den Zugriff auf Informationen zu Beschaffungsstrategien, Kraftstoffvergleiche und weiteren Bibliotheksfunktionen. Das Tool berücksichtigt lediglich die direkten Verbrauchs-Emissionen (Tank-to-Wheel) und hierbei auch nur Kohlenstoffdioxid. Die Ergebnisgröße wird in Gramm CO₂-Emission pro Tonnenkilometer ausgegeben. NTM Calc bezieht seine Daten aus diversen Quellen, darunter das „Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems“ (kurz: Artemis), welches verschiedene Kalkulationsmethoden im Transport kombiniert. Innerhalb der Verkehrsmittel werden verschiedene Fahrzeugklassen aufgeführt. Dabei werden das Sendungsgewicht und die Transportentfernung angegeben. Die Bestimmung der CO₂-Emission erfolgt linear in Abhängigkeit der Last- und Transportstrecke. Zur Bestimmung der Entfernung wird auf andere Tools im Internet

verwiesen, da NTM Calc diese Dienstleistung nicht anbietet. Nachteil des NTM Calc ist, dass schwankende Kapazitätsauslastungen und Geschwindigkeiten bei der Berechnung vernachlässigt werden. Dies wird im Vergleich hierzu beim Tool EcoTransIT berechnet. Ein weiterer Nachteil des Tools ist, dass lediglich ein Frachtgut betrachtet werden kann. Eine Berechnung von mehreren Frachtgütern und deren Allokation innerhalb einer Transportdienstleistung ist nicht möglich. Des Weiteren können bei NTM Calc keine individuellen Verbrauchswerte zur Energieverbrauchsrechnung eingegeben werden. Auch spezifische Transportmittelwerte sowie durchschnittliche Flottenwerte eines Unternehmens können nicht berücksichtigt werden. Topografische Merkmale der Transportstrecke werden ebenfalls nicht betrachtet. Die Ergebnisse der Treibhausgasemissionen werden lediglich in tabellarischer Form nicht aber in einer grafischen Darstellung ausgegeben. Mit einer Mitgliedschaft bei NTM (gegen ein jährliches Entgelt) entstehen vertiefte Berechnungsmöglichkeiten und Zugriff auf hilfreiche Datenbanken.

Logistics Emission Calculator (LogEC): Dieses kostenpflichtige Tool dient der Berechnung von CO₂-Emissionen in der Logistik, im Speziellen den Logistikdienstleistern. Berücksichtigt werden die Treibhausgase CO₂, Methan und Distickstoffmonoxid sowie die Luftschadstoffe Stickoxide, Kohlenmonoxid und Rußpartikel. Ähnlich wie EcoTransIT und NTM Calc werden ausschließlich Tank-to-Wheel beziehungsweise direkte Emissionen erfasst. Missachtet werden hingegen Kältemittelverluste bei temperaturgeführten Gütern. Die Emissionsdaten werden sowohl in Kilogramm, als auch in Kilogramm pro angegebener Frachteinheit berechnet. Ebenso wird der Energiebe-

darf in Megajoule als auch in Megajoule pro angegebener Frachteinheit berechnet. Das Tool benötigt sämtliche Daten zur Depotstruktur vom Nutzer. Die Knotenpunkte des Logistikdienstleisters werden hinterlegt und sämtliche Streckenabschnitte werden automatisch auf Basis von Kosten- und Kapazitätsaspekten mit Fahrzeugtypen hinterlegt. Im Verhältnis zur Entfernung und dem Energieverbrauch des Transportmittels wird der Kraftstoffverbrauch für den Transport der Sendungen errechnet. Darauf folgt die Umwandlung in Emissionswerte. Das Tool berechnet nicht nur die Strecke, die eine Sendung zurücklegt, sondern auch den wahrscheinlichsten Weg durch das Transportnetzwerk des Logistikdienstleisters. Somit berücksichtigt die Methode Vor-, Haupt- und Nachläufe der Netzwerke. Im Gegensatz zu anderen Tools findet LogEC die Umschlagspunkte des Dienstleisters von allein heraus, was bei vielen Einzelsendungen einen entscheidenden Mehrwert bringt. Die Emissionswerte der Transportmodalitäten für den Straßenverkehr stammen aus dem Handbuch „Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA Version 3.1) des Umweltbundesamtes. Dagegen wird beim Schienenverkehr auf Kennzahlen der EU aus dem „Soft Mobility Paper“ zurückgegriffen. Das IT-Tool ist vor allem für Verlader mit hohem Sendungsvolumen interessant, da das System viele Informationen zur Depotstruktur und Auskünfte zur Flottenzusammensetzung mit Größe und Schadstoffklasse für Vor-, Haupt- und Nachläufe sowie durchschnittliche Kapazitätsauslastungen benötigt.

Map&Guide: Bei Map&Guide handelt es sich um ein kostenpflichtiges Softwaretool der Firma PTV für die Disposition von LKW Touren. Neben der Emissionsberechnung dient die Software dazu Handlungsempfehlungen zur Routenplanung zu lie-

fern und Optimierungspotenziale bei Maut und Transportkosten aufzudecken. Die Software kann auch zur Verwaltung von Kundenstammdaten verwendet werden. Hauptanwender sind mittelständische deutsche Firmen. Die seit 2009 vorhandene Komponente Emissionsberechnung erlaubt es, die Emissionen von Kohlenstoffdioxid für individuelle Straßentransporte zu ermitteln. Ebenso ermöglicht die Software den Zugang zu weiteren Datensätzen wie zum Beispiel der Anzeige der transportbedingten Freisetzung von Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und weiteren Schadstoffen. Die Emissionen werden in Kilogramm pro Kilometer angegeben. Dabei werden sowohl die fahrzeugbezogenen Emissionen als auch die routenbezogenen Emissionen berücksichtigt. Map&Guide rechnet sowohl mit Tank-to-Wheel und Well-to-Tank Emissionen, nicht jedoch mit Emissionen, die bei der Herstellung der Fahrzeuge oder durch den Verlust von Kältemitteln entstehen. Wichtige Datenquelle des Tools ist das Handbuch „Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA, Version 3.1), wobei die Berechnung für ganz Europa erfolgt. Die von Map&Guide verwendete Straßenklassifizierung ist sehr detailliert. Streckenabschnittsspezifische Daten werden mit Daten des NASA SRTM Höhenmodells kombiniert um sehr genaue Emissionswerte berechnen zu können. Seit 2011 ist es möglich anderweitig gemessene Kraftstoffverbrauchsdaten bei den Berechnungen der Map&Guide Software zu verwenden. Das Tool orientiert sich an der CEN-Norm prEN 16258:2011. Die CO₂-Emissionen können auf Wunsch auch auf Basis des französischen Dekrets 2011-1336 ausgewiesen werden. Nachteil der Software ist, dass einzig LKW-Transporte betrachtet werden können. Andere Transportmodalitäten können im Tool

für die Berechnung der Transportdienstleistung nicht ausgewählt werden. Dem Tool fehlt zusätzlich die Möglichkeit die Emissionswerte den Frachtgütern zuzuordnen. Eine weitere Limitation der Software ist, dass sie lediglich Emissionswerte und keine Energieverbräuche ausgibt.

CO2-Rechner der Luftfahrtgesellschaften: Immer mehr Luftfahrtgesellschaften bieten inzwischen kostenlose Internettools an, mit denen CO₂-Emissionen berechnet werden. Diese sind oftmals auf die Ermittlung von Emissionen beim Transport von Passagieren ausgelegt. Die schwedische Fluggesellschaft SAS bietet einen kostenlosen Internetrechner für die CO₂-Emissionen von „Bellyfracht“ an. Für reine Frachtflugzeuge existiert ein Tool der Firma Cargolux. Beide Tools liefern die Daten über Tank-to-Wheel CO₂-Emissionen. Bei fast allen Tools liegt der Fokus auf dem CO₂-Ausstoß, während andere Treibhausgase unberücksichtigt bleiben. Damit wird die Diskussion um die zusätzliche Klimawirksamkeit von Emissionen in den höheren Schichten der Atmosphäre ausgeblendet. Bei den verwendeten Datenbanken handelt es sich um das „EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook“ und die Flugzeugperformance Datenbank Piano. Das SAS-Tool berücksichtigt, im Gegensatz zum Cargolux-Tool, die unterschiedlichen Flugzeugtypen und nimmt damit Rücksicht auf den geringeren Energieverbrauch je Tonnenkilometer Fracht auf Langstrecken. Beide Tools berechnen die ausgestoßenen Emissionen in Kilogramm sowie Kilogramm pro Tonnenkilometer. Ebenso werden bei beiden Tools Umwege, die durch An- und Abflugverfahren an Flughäfen, Warteschleifen oder Gewittern mit Verweis auf die Großkreisentfernung entstehen, nicht berücksichtigt. Das SAS-Tool ist sehr hilfreich bei der Ermittlung von

Emissionen beim Transport von „Bellyfracht“. Allerdings ist die Dokumentation der Berechnungsmethode nur unzureichend. Das Cargolux-Tool liefert im Gegensatz zum SAS-Tool sehr pauschale Werte und dient eher zur allgemeinen Plausibilisierung. Nachteilig bei beiden Tools ist die unflexible Gestaltung des Fahrzeugeinsatzsystems. Die Strecke kann lediglich von einem Punkt zu einem anderen definiert werden. Die ermittelte Entfernung wird dann um Durchschnittsverbräuche erweitert um die CO₂-Emissionen zu berechnen. Es können keine individuellen oder transportmittelspezifischen Verbräuche verwendet werden. Zudem können keine mehrfachen Frachtgüter in einem Fahrzeugeinsatzsystem definiert werden. Als Input für die Berechnung wird lediglich eine Transportmasse aufgenommen. Dementsprechend gibt es keine Allokation der CO₂-Emissionen auf die Frachtgüter sowie eine Berücksichtigung von spezifischen Auslastungsgraden der Transporte. Die Auswahl der unterschiedlichen Größenklassen der Transportmittel gliedert sich lediglich in Mittel- und Langstreckenflüge.

CO₂-Rechner der Seereeder: Von mehreren Seereedereien wurde 2010 ein Internettool zur Ermittlung von CO₂-Emissionen entwickelt, welches kostenlos zugänglich ist. Fokus liegt bei diesem Rechner auf dem Bereich Seeschifffahrt. Das Tool dient ausschließlich der Berechnung direkter Tank-to-Wheel CO₂-Emissionen. Weitere Treibhausgasemissionen sowie Kältemittelverluste bei temperaturgeführten Transporten werden nicht berücksichtigt. Die ausgegebenen Daten sind die CO-Emissionen in kg und die Entfernung in km. Der Vorteil bei der Verwendung dieses Tools ist, dass führende Reeder eine einheitliche Berechnungsmethode nutzen und diese mit unternehmensspezifischen Energieverbrauchsdaten hinterlegen. Dies

ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Emissionen der unterschiedlichen Transportanbieter. Detaillierte Verbrauchsinformationen für Transporte können nicht für die Berechnung herangezogen werden. Ein Nachteil der Software ist, dass die Kapazitätsauslastung der Frachtschiffe nicht berücksichtigt wird. Ebenso ist es nicht möglich die gewonnenen Ergebnisse im Nachgang in realitätsnahe Emissionswerte inklusive des Auslastungsgrades umzurechnen, da die Reedereien hierzu keine Daten zur Verfügung stellen. Ein weiterer Nachteil ist die schlechte Dokumentation der Datengrundlage und der Methode. Die Berechnungssystematik wurde weder von den Reedern noch von der Clean Cargo Working Group (CCWG), dem Träger des Projekts, veröffentlicht. Die detaillierte Dokumentation ist nur Mitgliedern zugänglich. Falls die Berechnungsmethodik offengelegt werden sollte und sich eine Mehrzahl der weltweit führenden Reedereien dazu entschließt die CCWG-Methode zur Berechnung von CO₂-Emissionen zu verwenden, könnte sie sich als Standard durchsetzen. Von der International Maritime Organization (IMO) wird derzeit parallel zu den Reedereien an einem "Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)" gearbeitet. Dieser soll die schiffsspezifischen CO₂-Emissionen unter Berücksichtigung der Auslastung ausweisen. Ein weiterer Nachteil des Tools der Seereeder ist, dass nur Transportgewichte angegeben werden können. Es besteht nicht die Möglichkeit flexible Fahrzeugeinsatzsysteme zu erstellen und verschiedene Frachtgüter zu definieren. Zudem ist es nicht möglich zwischen verschiedenen Kraftstoffen der Transportmittel zu wählen. Aus der Funktionsanalyse der auf dem Markt erhältlichen Software zur Berechnung des CO₂-Footprints geht hervor, dass es kein ganzheitliches Tool zur Kalkulation von CO₂-Emissionen in

der Logistik gibt. Lediglich eines der untersuchten Tools, der LogEC-Rechner, weist die vier wichtigsten Kernmerkmale für eine ganzheitliche Berechnung des CO2-Footprints in der Logistik auf. Die essenziellen Merkmale sind die Auswahlmöglichkeit multimodaler Transportmittel, die Betrachtung mehrerer Frachtgüter auf einem Transport, die flexible Gestaltung von Fahrzeugeinsatzsystemen und die Ausgabe von Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen. Nachteil des LogEC-Rechners sind die Lizenzgebühren, die für die Nutzung des Tools anfallen. Um alle Leistungslücken der erhältlichen Tools zu schließen sieht eine ganzheitliche Software zur Berechnung des CO2-Footprints in der Logistik wie folgt aus: Zunächst muss das Tool im Stande sein die Eingangsparameter realistisch abbilden zu können. Dies bedeutet, dass der Nutzer alle grundlegenden Transportmittel (LKW, Zug, Schiff und Flugzeug) zur Auswahl gestellt bekommen muss und hierbei zwischen unterschiedlichen Größenklassen des Transportmittels wählen kann. Neben den Größenklassen ist außerdem eine Differenzierung von Kraftstoffen von besonderer Bedeutung für den CO2-Footprint. Im Bereich des LKW-Transports kann die Kraftstoffwahl große Unterschiede bei den Emissionen bewirken. Des Weiteren sollte es möglich sein das Fahrzeugeinsatzsystem flexibel gestalten zu können. Der Nutzer muss die Möglichkeit haben beliebige Strecken mit unterschiedlichen Transportmitteln miteinander zu kombinieren. Hierbei sollte das Tool fähig sein dem Nutzer auch die Möglichkeit zum Transport mehrere Frachtgüter einzuräumen. Als Eingangsgröße hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs sollten dem Nutzer verschiedene Alternativen geboten werden. Als ungenaueste Eingangsgröße des Kraftstoffverbrauchs gilt der in einer Datenbank hinterlegte

Durchschnittsverbrauch eines Transportmittels einer Größenklasse. Diese Durchschnittsverbräuche werden volkswirtschaftlich ermittelt und können zum Beispiel aus der Datenbank des „Transport Emission Model“ entnommen werden. Als genaueste Eingangsgröße des Kraftstoffverbrauchs für eine Transportdienstleistung gilt der anwendungsfallspezifische, also gemessene Kraftstoffverbrauch aus der Realität. Dieser liegt dem Nutzer auf Grundlage einer Messung/Erfassung bei einem Transport vor. Als Mittelweg zwischen ungenauester und genauester Eingangsgröße für den Kraftstoffverbrauch gelten fahrzeug- oder flottenspezifische Verbräuche des Anwenders. Diese ermittelt der Nutzer für das spezifisch verwendete Fahrzeug oder der gesamten Flotte über einen gewissen Zeitraum. Hierbei sind fahrzeugspezifische Durchschnittswerte genauer als flottenspezifische Durchschnittswerte. Weitere wichtige Eingangsparameter bei der Routenmodellierung sind die Berücksichtigung von Leerfahrten beziehungsweise des Auslastungsgrads, die Berücksichtigung der Ladungsträger und die Berücksichtigung der Topographie. Nach Modellierung der Transportdienstleistung ist es wichtig, dass der CO2-Footprint-Rechner die benötigten Ausgangsparameter in geeigneter Form ausgibt. Zu den relevanten Ausgangsgrößen zählen neben den direkten Treibhausgas-Emissionen und Energieverbräuchen des Transportprozesses auch die gesamten Treibhausgas-Emissionen und Energieverbräuche bei denen zusätzlich die Aufwendungen zur Kraftstoffproduktion berücksichtigt werden. Ein geeigneter CO2-Rechner sollte zudem die Möglichkeit bieten eine bilanzierungskonforme Ausgabe der Berechnungsgrößen ausgeben zu können. Dies sollte in tabellarischer und grafischer Form erfolgen, damit die Berechnungsgrößen direkt in

einer Bilanz verwendet werden können. Abschließendes Merkmal eines geeigneten Tools zur Berechnung von CO₂-Emissionen in der Logistik ist die freie Zugänglichkeit der Software. Gerade für kleine und mittelständische Unternehmen ist die Ressourcenknappheit ein entscheidender Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit. Gesetzliche Auflagen wie eine europäische Verordnung zur Angabe von CO₂-Emissionen bei Transportdienstleistungen können mittelständische Unternehmen vor große Herausforderungen stellen. Die freie Zugänglichkeit eines CO₂-Rechners für Logistikdienstleistungen ist daher wichtig um die Wettbewerbsfähigkeit kleinerer Unternehmen aufrecht zu erhalten.

4.2 Ermittlung des CO₂-Footprints

Die CO₂-Footprint-Optimierung in der Logistik setzt zunächst eine Analyse des bestehenden CO₂-Footprints voraus. Das Erfassen des CO₂-Footprints kann auf zwei Arten erfolgen. Entweder wird eine direkte Messung des CO₂-Ausstoßes im untersuchten Betrachtungsbereich durchgeführt und damit der CO₂-Footprint ermittelt. Oder es werden Berechnungen durchgeführt, die auf gegebenen Emissionsfaktoren und standardisierten Modellen beruhen. Die Wahl der Methode ist abhängig vom Untersuchungsobjekt, der Glaubwürdigkeit der Daten, der Realisierbarkeit und von Kosten- und Kapazitätsbeschränkungen (vgl. Pandey et al. 2011). Das Untersuchungsobjekt zur Ermittlung des CO₂-Footprints lässt sich in drei Betrachtungsbereiche unterteilen (vgl. Abbildung 4-3). Hierzu existieren verschiedene Standards und Normen, die bei der Berechnung von Treibhausgas-Emissionen angewendet werden können. Der CO₂-

Footprint beziehungsweise Carbon Footprint wird für Unternehmen, Produkte oder Logistikdienstleistungen dabei separat ausgewiesen. Er ist ein Maß für alle CO₂-Emissionen, die direkt oder indirekt durch Aktivitäten oder Prozesse im jeweiligen Bewertungsbereich verursacht werden. Der Begriff Carbon Footprint wird in der Literatur als Synonym für CO₂-Emissionen und Treibhausgasemissionen verwendet. Die Darstellung der Treibhausgas-Emissionen erfolgt in CO₂-Äquivalenten (CO₂e). Nach dem Kyoto-Protokoll fallen neben Kohlenstoffdioxid insgesamt fünf weitere Treibhausgase darunter: Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆).

- Treibhausgasbilanz bzw. Ökobilanz mit nur einer Wirkungskategorie (Global Warming Potential)
- Erfassung aller direkten und indirekten Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten (Scope 1-3)

“Carbon footprint is a measure of the total amount of CO₂ emissions that is directly and indirectly caused by an activity or is accumulated over the life stages of a product or process.”

(Wiedmann/Minx, 2008)

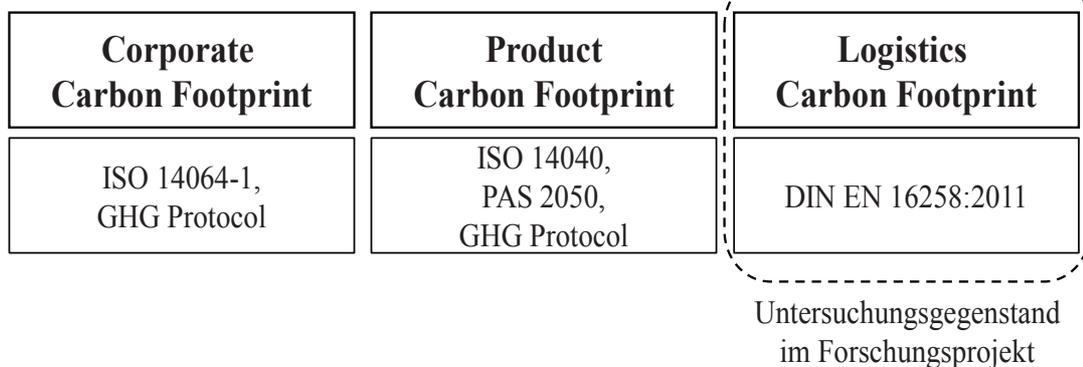


Abbildung 4-3: Abgrenzung der CO₂-Footprint-Berechnungsmöglichkeiten

Die Berechnung der einzelnen CO2-Footprints sowie die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt anhand verschiedener Normen. Die Ermittlungsmethoden werden separat dargestellt.

Unternehmen: Möchte ein Unternehmen die Treibhausgas-Emissionen des gesamten Unternehmens ermitteln, wird vom so genannten Corporate Carbon Footprint (CCF) gesprochen. Derzeit wird die Klimabilanzierung auf Unternehmensebene durch zwei Normen festgelegt, der ISO 14064-1 und dem Greenhouse Gas Protocol (vgl. Schmied/ Knörr 2012). Beide Normen stimmen inhaltlich in großen Teilen überein. Die ISO 14064-1 enthält die Grundsätze und Anforderungen für eine quantitative Erfassung von Treibhausgas-Emissionen sowie Angaben zur Planung, Erstellung, Management und Berichterstattung einer Treibhausgas-Bilanz (vgl. ISO 14064-1). Von vielen Unternehmen wird jedoch das Greenhouse Gas Protocol als Bilanzierungsstandard verwendet, obwohl dieses nicht von externen Gutachtern verifiziert werden muss. Das vom World Resource Institute und World Business Council for Sustainable Development gemeinsam entwickelte Greenhouse Gas Protocol ist der weltweit anerkannteste Standard zur Bilanzierung der Treibhausgas-Emissionen von Unternehmen. Das Greenhouse Gas Protocol dient auch als Grundlage für die von der International Organisation for Standardization (ISO) entwickelte Norm ISO 16064-1. Für die Berechnung muss zunächst die Systemgrenze festgelegt werden, das heißt welche Unternehmensteile bei der Betrachtung berücksichtigt werden sollen. Dazu wird zwischen direkten Emissionen, indirekten Emissionen durch die Bereitstellung von Strom sowie Fern- und Prozesswärme und sonstigen indirekten Emissionen unterschieden. Es müssen alle Treibhausgas-Emissionen in CO2-Äquivalenten angegeben

werden. Direkte Emissionen beinhalten alle Treibhausgas-Emissionen, die direkt durch das Unternehmen verursacht und kontrolliert werden. Darunter fallen alle, die bei der Verbrennung von fossilen Kraftstoffen für den Betrieb von Fahrzeugen entstehen. Zu den indirekten Treibhausgas-Emissionen, die bei der Erzeugung und Verteilung des vom Unternehmen benötigten Stroms emittiert werden, zählen Emissionen, die bei der Bereitstellung von Fern- und Prozesswärme anfallen. Unter alle übrigen indirekten Treibhausgas-Emissionen, die zwar in der Unternehmenstätigkeit begründet sind, aber nicht vom Unternehmen selbst verursacht oder kontrolliert werden fallen externe Logistikdienstleister oder die Benutzung von Flugzeugen für Dienstreisen. In der Praxis folgen die meisten Unternehmen bei der Festlegung der Bilanzierungsgrenzen von Treibhausgasen den Vorgaben des Greenhouse Gas Protokoll oder der ISO 16064-1. Da jedes Unternehmen aber einen Handlungsspielraum in der Festlegung dieser Grenzen besitzt, sind die von den Unternehmen veröffentlichten Treibhausgas-Emissionsdaten nur sehr schwer miteinander vergleichbar.

Produkt: Wird die Treibhausgas-Bilanzierung eines einzelnen Produktes angestrebt, so handelt es sich um den sogenannten Product Carbon Footprint (PCF). Für die Berechnung des Product Carbon Footprint existieren keine anerkannten internationalen Berechnungsstandards (vgl. Schmied/ Knörr 2012). Lediglich der britische Vorstandard „PAS 2050 – Assessing the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services“ gibt Regeln zur Berechnung vor, die jedoch nicht für alle Länder verbindlich sind. Aus diesem Grund orientieren sich Unternehmen bei der Berechnung des Product Carbon Footprints an den internationalen Normen zur Ökobilanz ISO 14040 und

ISO 14044. Eine Ökobilanz stellt Umweltaspekte und potenzielle Umweltauswirkungen in den Phasen des Produktlebenszyklus dar von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung und Recycling bis hin zur endgültigen Beseitigung. Die Ökobilanzstudie umfasst dabei vier Phasen. Die erste Phase legt Ziel und Untersuchungsrahmen einschließlich der Systemgrenzen und des Detaillierungsgrades fest. Diese hängen stark vom betrachteten Produkt und der Zielsetzung der Studie ab, was einen Vergleich verschiedener Ökobilanzen erschwert. In der zweiten Phase, der Erstellung der Sachbilanz, werden alle Input und Output Daten gesammelt, die zum Erstellen der Studie notwendig sind. Die Wirkungsabschätzung, als dritte Phase der Ökobilanzstudie, dient der zusätzlichen Validierung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Einschätzung ihrer Auswirkungen auf die Umwelt. Die vierte Phase wertet die Ergebnisse der vorangegangenen Phasen aus. Britische Unternehmen bevorzugen die Publicly Available Specification (PAS) - „Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services“ – PAS 2050. Auch das Greenhouse Gas Protokoll hat mit dem „Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard“ einen Standard entwickelt, um die Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu verstehen und berechnen zu können. Gleichzeitig dient er den Unternehmen als Leitfaden die Treibhausgas-Emissionen ihrer Produkte zu reduzieren. Im Zuge der Vereinheitlichung strebt die Norm ISO 14067 – „Carbon Footprint of Products“ eine internationale Standardnorm an. Im Juni 2013 wurde dazu die Internationale Technische Spezifikation ISO/TS 14067 veröffentlicht. Diese definiert Anforderungen an sowie Grundsätze und Leitlinien für

die quantitative Bestimmung und die Kommunikation des Product Carbon Footprints auf Basis der internationalen Normen zur Ökobilanz (vgl. ISO 14040 und ISO 14044) und zur Umweltkennzeichnung und -deklaration (vgl. ISO 14020, ISO 14024 und ISO 14025). Diese „Vornorm“ soll in einer Art Testphase Erfahrungen generieren sowie Vertrauen schaffen und damit als Grundlage für die zukünftige Norm ISO 14067 dienen. Ziel dieser Bemühungen ist es, eine Harmonisierung mit bereits existierenden Standards wie dem Greenhouse Gas Protokoll oder der PAS 2050 zu erreichen und damit eine einvernehmliche internationale Spezifikation mit einer breiten Akzeptanz zu schaffen.

Logistik: Neben der Aufstellung von Unternehmens- und Produktklimabilanzen, können die angefallenen Treibhausgas-Emissionen für Transportdienstleistungen im so genannten Logistics Carbon Footprint (LCF) zusammengefasst werden. Mit der im März 2013 veröffentlichten Europäischen Norm DIN EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen“ können Unternehmen erstmalig den Energieverbrauch und die Treibhausgas-Emissionen von Transportdienstleistungen einheitlich nach europäischem Standard ermitteln (vgl. DIN EN 16258). Laut Norm ist eine Transportdienstleistung jeder Transport eines Gutes vom Versender zu einem beliebigen Empfänger. Damit ist es möglich die Treibhausgas-Emissionen, die eine Sendung verursacht, direkt zu berechnen und auszuweisen. Mit Hilfe dieser Daten können Logistikdienstleister neue CO₂-Einsparpotenziale aufdecken und so ihre Fahrzeugflotte optimal organisieren. Außerdem sind die Unternehmen in der Lage die Auswirkungen ihrer Unterneh-

menstätigkeit auf Umwelt und Klima besser einzuschätzen. Während eine Verordnung in Deutschland voraussichtlich nicht vor Ende des Jahres 2014 in Kraft tritt, müssen in Frankreich ansässige Transportunternehmen und solche, die nach Frankreich transportieren die durch den Transport verursachten Treibhausgas-Emissionen bereits heute ausweisen. Die Systemgrenze für die Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen in der Logistik umfasst alle Fahrzeugprozesse inklusive den dazugehörigen Energieprozessen. Fahrzeugprozesse sind für alle direkten Treibhausgas-Emissionen (Tank-to-Wheel-Emissionen) während des Fahrzeugbetriebes verantwortlich. Energieprozesse erfassen alle indirekten Emissionen der Bereitstellung von Kraftstoffen und Elektrizität, von der Quelle bis zum Fahrzeugtank (Well-to-Tank-Emissionen). Dabei werden auch Verluste bei der Herstellung der Energieträger durch Transformationsprozesse berücksichtigt. Explizit ausgeschlossen werden direkte und indirekte Emissionen, die aus der Herstellung, Wartung und Entsorgung von Fahrzeugen sowie Verkehrsinfrastrukturen und betriebsfremden vorgelagerten Prozessen resultieren. Die Gesamtemissionen berechnen sich aus der Summe von indirekten und direkten Emissionen. Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen hängen direkt vom Ladungsgewicht oder der Frachtmenge ab. Die Frachtmenge setzt sich dabei aus der zu transportierenden Fracht einschließlich verwendeter Ladehilfen, wie Paletten oder Containern sowie der Verpackung zusammen. Allerdings nur dann, wenn sie fester Bestandteil der Lieferung sind. So werden bei Waren, die nur zum Zwecke der einfacheren Handhabung auf einer Palette transportiert werden, die Ladehilfen nicht zum Transportgewicht dazu gerechnet. Die

Frachtmenge wird in Kilogramm oder Tonnen angegeben. Wird die Fracht in Containern transportiert, kann die Anzahl der 20-Fuß-Container auch in Twenty-foot Equivalent Unit angegeben werden. Die Angabe der Kraftstoffe erfolgt in Litern oder Kilogramm. Wird im Folgenden von Kraftstoffen gesprochen, so schließt dies auch Elektrizität mit ein. Die Transportentfernung entspricht der tatsächlich zurückgelegten Strecke in Kilometern. Bei Flugstrecken wird die Luftlinie zuzüglich 95 km verwendet (Großkreisdistanz). Für eine exakte Berechnung der Emissionen wird die zurückgelegte Strecke in Teilstrecken unterteilt, auf denen das Frachtgut mit dem gleichen Transportmittel befördert wurde. Eine Grundlage für die Berechnung ist das Fahrzeugeinsatzsystem (Vehicle Operating System). Laut Norm steht ein Fahrzeugeinsatzsystem für eine Gruppe von Fahrzeugeinsätzen, die für eine bestimmte Teilstrecke relevant sind. Ein Fahrzeugeinsatzsystem kann so entweder aus einem konkreten Fahrzeugumlauf, sämtlichen Fahrzeugumläufen auf einer bestimmten Route bzw. eines bestimmten Fahrzeugtyps oder aus allen Fahrzeugumläufen innerhalb eines Netzes bestehen. Wichtig ist hierbei, dass die betrachtete Teilstrecke Teil dieser Umläufe ist. In jedem Fall müssen Leerfahrten bei der Wahl des Fahrzeugeinsatzsystems berücksichtigt werden. Die Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen einer Transportdienstleistung erfolgt in drei Hauptschritten (vgl. Abbildung 4-4): Zunächst sind vom gesamten Transportprozess die unterschiedlichen Teilstrecken der Transportdienstleistung zu bestimmen. Jeder Routenabschnitt ohne Transportmittelwechsel steht dabei für eine Teilstrecke und ist separat zu berechnen.

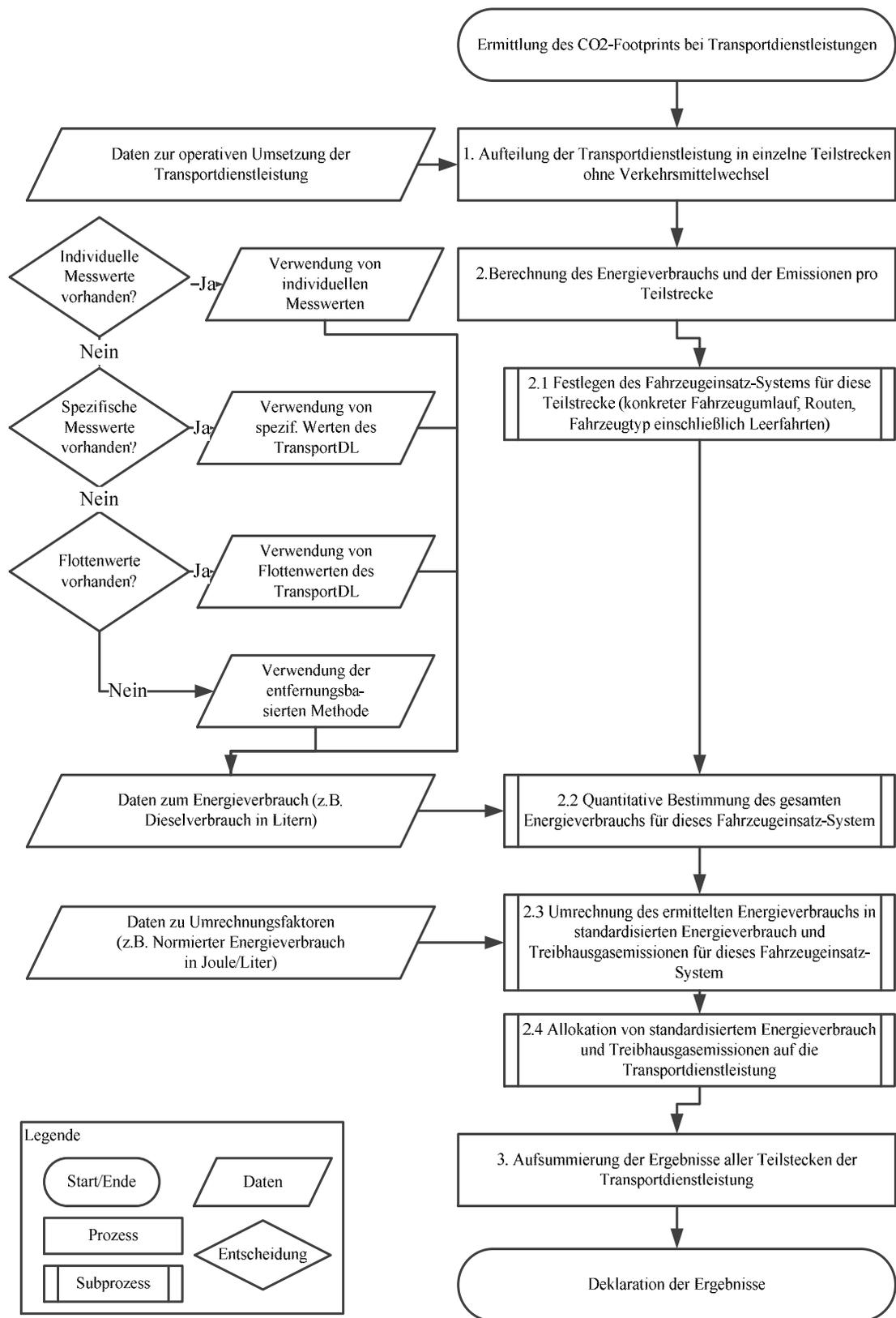


Abbildung 4-4: Vorgehensweise zur Berechnung von Energieverbrauch und CO2-Emissionen bei Transportdienstleistungen

Dann erfolgt die eigentliche Berechnung des Energieverbrauchs sowie der Treibhausgas-Emissionen für die betrachtete Teilstrecke. Hierfür werden unter anderem der Kraftstoffverbrauch je Teilstrecke und die Umrechnungsfaktoren für den direkten und indirekten Energieverbrauch benötigt. Ein wichtiger Bestandteil der Berechnung ist zudem die Allokation der Energieverbräuche sowie Treibhausgas-Emissionen zu den transportierten Frachtgütern und/oder Passagieren. Die Zuordnung einzelner Teilstrecken (Allokation) sollte als Produkt aus der Frachtmenge und der zurückgelegten Entfernung berechnet werden und in ein Verhältnis zur gesamten Transporttätigkeit gesetzt werden. Abweichende Allokationsverfahren und -parameter sind möglich, müssen allerdings über die Zeit einheitlich bleiben. Abschließend kommt es zur Aufsummierung der Ergebnisse aller Teilstrecken und zur Deklaration des CO₂-Footprints der Transportdienstleistung. Die Ermittlung des CO₂-Footprints ist nicht nur eine rein operative Aufgabe des Unternehmens sondern vor allem von organisatorischer Bedeutung. Es gilt mit möglichst wenig Ressourceneinsatz alle Emissionsquellen zu ermitteln und zu erfassen. Dabei ist darauf zu achten, dass keine redundanten Informationen aufgenommen werden. Hierfür ist die Position der Messstelle im Logistiksystem von entscheidender Bedeutung. Die Organisation zur Ermittlung des CO₂-Footprints richtet sich nach den unterschiedlichen Logistikprozessen. Die Ermittlung des CO₂-Footprints ist an die Charakteristika von Beschaffungs-, Produktions-, Distributions-, Entsorgungs-, Rückführungs-, Handels-, City-Logistik sowie die der Logistik der „letzten Meile“ anzupassen. Hat man eine geeignete Position zur Messung des CO₂-Footprints in der Logistikkette gefunden, gilt es die gewonnenen Informationen zu nutzen.

Zwei Aspekte stehen dabei im Vordergrund: der Meß-/Positionierungsaspekt und der Lernaspekt. Während hinter dem Meß- und Positionierungsaspekt das Identifizieren von Emissionstreibern hinsichtlich des CO2-Footprints im Logistikprozess steht, verbirgt sich hinter dem Lernaspekt das Ziel, eine tragfähige Vorgehensweise zur Optimierung eines Logistikprozesses im Unternehmen zu implementieren. Neben dem Ziel der CO2-Emissionsreduzierung müssen Maßnahmen, die in den einzelnen Logistikprozessen getroffen werden zusätzlich die Kernforderungen an die Logistikleistung und –kosten erfüllen. Die spezifischen Ziele der Ermittlung des CO2-Footprints in der Logistik sind somit neben der Beurteilung der eigenen Emissionsmengen auch eine Beurteilung der Transportleistung im Verhältnis zu den Kosten. Als weitere Ziele gelten das Erkennen von Emissionsunterschieden in relevanten Logistikprozessen, die Identifikation bestehender Schwachstellen und Ermittlung von Optimierungsmöglichkeiten sowie die Formulierung anspruchsvoller Ziele hinsichtlich CO2-Emissionen, Logistikleistungen und –kosten in den einzelnen Logistikprozessen.

4.3 Berechnungsmodell nach DIN EN 16258

Das Berechnungsmodell richtet sich nach DIN EN 16258 und berücksichtigt alle gängigen Transportmittel wie Lastkraftwagen, Zug, Schiff oder Flugzeug. Die Kraftstoffauswahl beruht ebenfalls auf den Angaben der Norm und umfasst alle gebräuchlichen Kraftstoffe wie Ottokraftstoff, Ethanolkraftstoff, Dieselmotorkraftstoff, Biodiesel, Autogas, Erdgas, Flugbenzin, Jetzbenzin, Kerosin, Schweröl, Marine-Dieselöl, Bahnstrom sowie

Strom aus öffentlichen Netzen. Mit Hilfe der Richtlinie können die Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen für Transportdienstleistungen berechnet werden, unter anderem der Well-to-Wheel Energieverbrauch (E_w), die Well-to-Wheel Treibhausgas-Emissionen (G_w), der Tank-to-Wheel Energieverbrauch (E_t) und die Tank-to-Wheel Treibhausgas-Emissionen (G_t). Die Ermittlung der Ergebnisgrößen kann nur auf Teilstrecken erfolgen, auf denen ein betrachtetes Gut ohne Fahrzeugwechsel transportiert wird. Die Berechnung einer gesamten Transportdienstleistung erfolgt dementsprechend durch Aufsummierung einzelner Teilergebnisse. Zur Berechnung eines Transports muss die Gesamtstrecke so zerlegt werden, dass das betrachtete Frachtgut eine Teilstrecke auf einem definierten Fahrzeug zurücklegt. Hierfür müssen detaillierte Informationen zur operativen Umsetzung der Transportdienstleistung vorliegen. Für jede Teilstrecke müssen im Anschluss Energieverbrauch und Emissionen ermittelt werden. Die Vorgehensweise zur Berechnung des Energieverbrauchs sowie der Treibhausgas-Emissionen nach DIN EN 16258 gliedert sich wie folgt. Zunächst wird das Fahrzeugeinsatzsystem für die Teilstrecke festgelegt. Danach wird der gesamte Kraftstoffverbrauch für dieses Fahrzeugeinsatzsystem bestimmt um im Anschluss den gesamten Energieverbrauch sowie die Treibhausgas-Emissionen für das festgelegte Fahrzeugeinsatzsystem zu berechnen. Für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bieten sich grundsätzlich zwei Methoden an: die verbrauchsbasierte und die entfernungsbasierte Methode. Nach DIN EN 16258 stellt die verbrauchsbasierte Methode mit individuellen Messwerten, spezifischen Werten des Transportdienstleisters und Flottenwerten des Transportdienstleisters drei Alternativen zur

Angabe des Kraftstoffverbrauchs zur Verfügung. Individuelle Messwerte für einen konkreten Transport sind die bevorzugte Datenquelle, da sie die exaktesten Ergebnisse liefern. Wohingegen spezifische Werte des Transportdienstleister entweder routen- oder fahrzeugabhängige Werte sind, die nicht für den konkreten Transport gemessen wurden, aber in Form von Durchschnittswerten herangezogen werden. Liegt weder das eine noch das andere vor, kann auf Flottendurchschnittswerte des Transportdienstleisters zurückgegriffen werden. Diese liefern jedoch die ungenauesten Ergebnisse. Sofern keine Messungen über den tatsächlichen Kraftstoffverbrauch vorhanden sind, kann dieser mit Hilfe der entfernungsbasierten Methode abgeschätzt werden. Dabei wird auf Vorgabewerte aus Datenbanken zurückgegriffen. Diese sind abhängig vom realen Frachtgewicht, der realen Transportentfernung sowie dem spezifischen Energieverbrauch des verwendeten Transportmittels. Die Formel in Abbildung 4-5 beschreibt diesen Zusammenhang. Der Kraftstoffverbrauch ist einerseits von der Art des Transportmittels (Lkw, Flugzeug, Schiff, etc.), dessen Motorisierung sowie sämtlichen Nebenverbrauchern (Kühlung, Radio, etc.) abhängig. Andererseits haben auch externe Kräfte, die auf das Transportmittel wirken, eine Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch.

Energieverbrauch der betrachteten Sendung: $F = W \times D \times E$

F = Energieverbrauch in l, kg oder kWh

D = Reale Transportentfernung in km

W = Reales Frachtgewicht in t oder TEU

E = Spez. Energieverbrauch je tkm oder TEU-km

Abbildung 4-5: Entfernungsbasierte Methode zur Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs (vgl. Schmied/ Wolfram 2011)

Diese Fahrzeugwiderstände setzen sich aus dem Roll-, Steig-, Beschleunigungs- und Strömungswiderstand (Luft oder Wasser) zusammen (Abbildung 4-6). Der größte Treiber von Treibhausgas-Emissionen ist die bewegte Masse. Sowohl Roll-, Steigungs- als auch Beschleunigungswiderstand hängen von der Masse linear ab. Dabei spielt nicht nur die Masse des Transportgutes zuzüglich Verpackung und Transporthilfe eine Rolle, sondern auch die Masse des Transportmittels. Je besser ein Transportmittel ausgelastet ist, umso weniger ist dessen eigene Masse von Bedeutung. Die Auslastung hängt maßgeblich von der Art des Gutes (Massengut, Volumengut oder Durchschnittsgut) und dessen Geometrie (Höhe, Breite, Länge) sowie besonderer Transportvorschriften ab. Da Auslastungsgrad und Leerfahrtenanteil von Gut zu Gut verschieden sind, wird der spezifische Energieverbrauch separat für die drei Güterarten Massengut, Volumengut und Durchschnittsgut ausgewiesen. Massengüter sind beispielsweise Erze, Kohle und Mineralölprodukte, bei denen das Transportgewicht der begrenzende Faktor ist und die Auslastung oft bei bis zu 100 Prozent liegt.

Fahrzeugwiderstand:	$F_w = F_{\text{Roll}} + F_{\text{Steig}} + F_{\text{Beschl}} + F_{\text{Luft/Wasser}}$
Rollwiderstand:	$F_{\text{Roll}} = m \times g \times \cos(\alpha) \times f_R$
Steigungswiderstand:	$F_{\text{Steig}} = m \times g \times \sin(\alpha)$
Beschleunigungswiderstand:	$F_{\text{Beschl}} = m \times a \times \text{rotatorischer Anteil}$
Strömungswiderstand:	$F_{\text{Luft/Wasser}} = 0,5 \times \rho \times v^2 \times c_w \times A_{\text{st}}$
m Masse [kg]	ρ Dichte (Luft/Wasser) [kg/m ³]
g Erdbeschleunigung [m/s ²]	v Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
α Steigung [Grad]	c_w Widerstandsbeiwert
f_R Rollwiderstandsbeiwert	A_{st} Widerstandsfläche [m ²]
Typische Rollwiderstandsbeiwerte f_R	Typische Widerstandsbeiwerte c_w
0,001 – 0,002 Eisenbahnrad auf Schiene	0,8 LKW
0,006 – 0,010 Autoreifen auf Asphalt, LKW	0,068 Containerschiff

Abbildung 4-6: Berechnung der Fahrzeugwiderstände (vgl. Wallentowitz. et al. 2009)

Aufgrund der meist unpaarigen Transportwege ist der Leerfahrtenanteil deutlich erhöht. Durchschnittsgüter liegen bei einem Auslastungsgrad von 50 bis 80 Prozent. Bei Volumengütern liegt die massenbezogene Auslastung bei ca. 10 bis 50 Prozent. Der Leerfahrtenanteil bei Durchschnitts- und Volumengütern ist gleichzeitig deutlich geringer als bei Massengütern und liegt in etwa bei 10 bis 30 Prozent. Ein weiterer Einflussfaktor auf den Kraftstoffverbrauch und somit CO₂-Emissionstreiber ist die zu überwindende Steigung. Diese wird bei der Bestimmung von Vorgabewerten durch das Streckenprofil explizit berücksichtigt. Bei zunehmender Steigung nimmt der Rollwiderstand ab und der Steigungswiderstand überproportional zu. Der Rollwiderstand ist direkt abhängig vom Rollwiderstandsbeiwert und somit von der Wahl des Transportmittels. So ist der Rollwiderstand bei gleicher Masse und Steigung bei einem Lkw auf Asphalt bis zu sechsmal größer als bei einem Zug. Der Rollwiderstand von Lkws kann durch die Verwendung von rollwiderstandsoptimierten Reifen, Anpassung des Reifendrucks und Optimierung der Spureinstellung verringert werden. Der Beschleunigungswiderstand ist direkt von der Beschleunigung ab-

hängig und somit von der Fahrweise des Fahrzeugführers. Durch eine vorrausschauende und gleichmäßige Fahrweise lässt sich der Kraftstoffverbrauch bei Lkws um 10 bis 12 Prozent reduzieren. Der Luftwiderstand (Strömungswiderstand) ist quadratisch von der Fahrzeuggeschwindigkeit und linear von der Dichte des Fluides sowie dem Widerstandsbeiwert der angeströmten Fahrzeugfläche abhängig. Wird die Transportgeschwindigkeit verdoppelt, vervierfacht sich der Strömungswiderstand. Zusätzlich spielen aerodynamische Eigenschaften des Transportmittels eine bedeutende Rolle, da die angeströmte Fläche den Luftwiderstand linear beeinflusst. Gleiches gilt für den Wasserwiderstand (Strömungswiderstand) von Schiffen. Effizientere Schiffdesigns können helfen, den Wasserwiderstand und somit den Treibstoffverbrauch zu reduzieren. Abhilfe kann zusätzlich durch das sog. Slow-Steaming geschaffen werden. Wenn ein Containerschiff seine Reisegeschwindigkeit um ein Fünftel von 25 auf 20 Knoten verringert, so halbiert sich dessen Treibstoffverbrauch. Der spezifische Energieverbrauch eines Lkws ist von den oben beschriebenen Einflussfaktoren abhängig. Nach Bestimmung des gesamten Kraftstoffverbrauchs des Fahrzeugeinsatzsystems, werden Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen auf dessen Basis und den entsprechenden Energie- und Emissionsfaktoren (vgl. Abbildung 4-7) berechnet. Laut DIN EN 16258 müssen beide Größen sowohl für den Betrieb des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel) als auch insgesamt für Betrieb und Energiebereitstellung (Well-to-Wheel) ausgewiesen werden. Unternehmen, die ihren eigenen Verbrauch von Diesel, Kerosin, Schiffsdiesel oder Strom durch Messungen exakt bestimmen, können mit Hilfe dieser Umrech-

nungsfaktoren den standardisierten Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen ausweisen.

$$\text{Well-to-Wheel-Energieverbrauch des VOS: } E_w(\text{VOS}) = F(\text{VOS}) \times e_w$$

$$\text{Well-to-Wheel-THG-Emissionen des VOS: } G_w(\text{VOS}) = F(\text{VOS}) \times g_w$$

$$\text{Tank-to-Wheel-Energieverbrauch des VOS: } E_t(\text{VOS}) = F(\text{VOS}) \times e_t$$

$$\text{Tank-to-Wheel-THG-Emissionen des VOS: } G_t(\text{VOS}) = F(\text{VOS}) \times g_t$$

e_w = Well-to-Wheel-Energiefaktor

e_t = Tank-to-Wheel-Energiefaktor

g_w = Well-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor

g_t = Tank-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor

Abbildung 4-7: Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen

Die konkreten Energiefaktoren und Treibhausgas-Emissionsfaktoren für alle Transportkraftstoffe können dem Anhang entnommen werden. Für den Auftraggeber einer Transportdienstleistung sind häufig nicht die CO₂-Emissionen einer ganzen Ladung von Bedeutung sondern lediglich die Auswirkungen seiner Einzelsendung. Die Allokation der vier Ergebnisgrößen des (Teilstrecken-) Fahrzeugeinsatzsystems auf die tatsächliche Transportdienstleistung auf der Teilstrecke erfolgt anteilig mit Hilfe eines Allokationsparameters. Der gesamte Energieverbrauch und sämtliche Treibhausgasemissionen eines Transportmittels müssen den beförderten Gütern zugeordnet werden. Das heißt, dass auch Leerfahrten anteilig den beförderten Gütern zugerechnet werden müssen. Der Allokationsparameter bestimmt das Verhältnis zwischen der gesamten Transporttätigkeit und einer Einzelsendung auf einer betrachteten Teilstrecke (vgl. Abbildung 4-8).

$$\text{Allokationsparameter} \quad S(\text{Teilstrecke}) = T(\text{Teilstrecke}) / T(\text{VOS})$$

Well-to-Wheel-Energieverbrauch der Teilstrecke:

$$E_w(\text{Teilstrecke}) = E_w(\text{VOS}) \times S(\text{Teilstrecke})$$

Well-to-Wheel-THG-Emissionen der Teilstrecke:

$$G_w(\text{Teilstrecke}) = G_w(\text{VOS}) \times S(\text{Teilstrecke})$$

Tank-to-Wheel-Energieverbrauch der Teilstrecke:

$$E_t(\text{Teilstrecke}) = E_t(\text{VOS}) \times S(\text{Teilstrecke})$$

Tank-to-Wheel-THG-Emissionen der Teilstrecke:

$$G_t(\text{Teilstrecke}) = G_t(\text{VOS}) \times S(\text{Teilstrecke})$$

$T(\text{Teilstrecke})$ Transporttätigkeit einer Transportdienstleistung auf einer Teilstrecke

$T(\text{VOS})$ Transporttätigkeit des VOS bezüglich einer Teilstrecke

Abbildung 4-8: Allokation der Ergebnisgrößen auf die Teilstrecke

Der gewählte Allokationsparameter darf für ein bestimmtes Fahrzeug oder im Zeitverlauf des Transports nicht geändert werden. Die Transporttätigkeit für eine Teilstrecke wird allgemeingültig aus dem Produkt von Frachtmenge und der zurückgelegten Entfernung berechnet. Die entsprechende Allokationseinheit sind Tonnenkilometer. Da die Berechnung des Produkts aus Sendungsgewicht und Entfernung nicht immer möglich ist, lässt die Norm auch andere Allokationsparameter zu. Alternativ zur Masse der Frachtmenge können andere Transportgrößen wie Volumen, Palette, Paket oder Lademeter verwendet werden. Die gewählte Allokationsgröße muss bei der Berechnung jedoch klar kommuniziert werden. DIN EN 16258 empfiehlt generell die Allokation über Tonnenkilometer. Im letzten Schritt der Berechnung werden die Ergebnisse der einzelnen Teilstrecken addiert und das Gesamtergebnis der Transportdienstleistung angegeben (vgl. Abbildung 4-9). DIN EN 16258

stellt bestimmte Anforderungen an die Deklaration der Ergebnisse.

Well-to-Wheel Energieverbrauch der Transportdienstleistung:

$$E_w(\text{Transportdienstleistung}) = \sum (E_w(\text{Teilstrecke}))_i$$

Well-to-Wheel-THG-Emissionen der Transportdienstleistung:

$$G_w(\text{Transportdienstleistung}) = \sum (G_w(\text{Teilstrecke}))_i$$

Tank-to-Wheel Energieverbrauch der Transportdienstleistung:

$$E_t(\text{Transportdienstleistung}) = \sum (E_t(\text{Teilstrecke}))_i$$

Tank-to-Wheel-THG-Emissionen der Transportdienstleistung:

$$G_t(\text{Transportdienstleistung}) = \sum (G_t(\text{VOS}))_i$$

i Anzahl der Teilstrecken

Abbildung 4-9: Kalkulation Gesamtenergieverbrauch sowie Gesamt-Emissionen

Neben den vier Ergebnisgrößen muss der Rechenweg bzw. die verwendete Methode transparent kommuniziert werden. Dazu zählt neben den Angaben zu allen verwendeten Größen wie Kraftstoffverbrauch, Entfernung, spezifischer Kraftstoffverbrauch, Auslastungsgrad auch das gewählte Allokationsverfahren einschließlich Begründung. Falls Vorgabewerte aus Tabellen verwendet wurden, ist dies zu dokumentieren. Darunter fallen die Vorgabewerte selbst, sämtliche verwendete Quellen, eine Begründung für die Wahl dieser Quellen sowie eine Erläuterung, warum Vorgabewerte anstatt spezifischer Werte oder Werte des Transportdienstleisters herangezogen wurden. Optional kann der Deklaration eine Beschreibung der Transportdienstleistung, der operativen Umsetzung der Transportdienstleistung, das für jede Teilstrecke gewählte Fahrzeugeinsatzsystem, zusätzliche Informationen zu den gewählten Systemgrenzen sowie weitere allgemeine Angaben, die zum Verständnis

der gewählten Methode notwendig sind, angefügt werden. Grundlage für die Emissionsberechnung bilden routen-, fahrzeug- und sendungsspezifische Daten aus unternehmensinternen Datenquellen. Die jeweiligen Energieverbräuche werden im Tool mit spezifischen CO₂-Emissionfaktoren gewichtet, um die entsprechenden Kennzahlen zu berechnen. Diese CO₂-Emissionen werden bei der Allokation einzelnen Frachtgütern, Sendungen oder unternehmensinternen Kenngrößen (zum Beispiel Fahrzeugflotte/Standort) möglichst verursachungsgerecht zugeordnet. Hierbei werden die Vorgaben und Richtlinien der europäischen Norm DIN EN 1625:2013 eingehalten. Die Berechnungsmethodik der Norm geht davon aus, dass ein Unternehmen in jedem Fall die Verbrauchswerte der Transportdienstleistungen kennt. Es wird nicht darauf eingegangen, wie eine Berechnung von Durchschnittsverbräuchen der unterschiedlichen Verkehrsträger aussehen kann. Die Berechnungsmethodik des zu entwickelnden Tools soll daher um die Berechnung von Durchschnittsverbräuchen je Transportmittel erweitert werden. Die Datenquelle für eine solche Berechnung kann das „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ oder die Datenbank des „Transport Emission Model“ liefern. Beide Datenbanken sind kostenfrei zugänglich. Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs soll automatisch erfolgen sobald die benötigten Eingabeparameter Transportmittel, Verkehrsart, Transportmittelklasse, Gutart, Transportentfernung und Sendungsgewicht bestimmt sind. Das Bereitstellen eines solchen Verbraucherechners liefert einen Mehrwert über die Berechnungsmethodik der DIN EN 16258 hinaus. Mit dem Verbraucherechner können Unternehmen, welche die spezifischen Verbräuche einzelner Transportdienstleistungen, Fahrzeuge oder Fahrzeugflotten

nicht kennen, anhand von Durchschnittsverbräuchen verschiedener Transportmittelkategorien und –klassen die Ermittlung des CO2-Footprints durchführen. Des Weiteren soll das Tool den Umfang der DIN 16258 zusätzlich um eine Transportstreckenerfassung erweitern. Hierfür wird auf frei zugängliche Werkzeuge verwiesen, die eine Transportstreckenermittlung zwischen zwei Standorten auf der Straße, der Schiene oder dem Luftverkehr ermöglichen. Bei der Berechnung von Transportentfernungen im Luftverkehr muss zusätzlich zur Luftlinie die sogenannte Großkreisdistanz berücksichtigt werden. Im Internet sind Datenbanken mit entsprechenden Verkehrsdaten vorhanden. Das Tool weist an entsprechender Stelle auf diese verfügbaren Daten hin und ermöglicht den Import der Informationen.

4.4 IT-Tool-Umsetzung und Leitfaden zur Anwendung

Die Logik des IT-Tools folgt einem dreistufigen Aufbau. Der erste Berechnungsschritt basiert auf der Eingabe fixer und variabler Eingangsparameter. Diese Parameter kommen vom Anwender und sind in einer Datenbank im Tool zu hinterlegen. Der zweite Schritt ist die nutzerspezifische Datenverarbeitung mittels der hinterlegten Rechenlogik. Hierfür wird die Rechenlogik entsprechend den Eingaben des Anwenders angepasst, um zum Beispiel die Allokation des CO2-Footprints mit den Vorstellungen des Nutzers abzustimmen. Abschließend erfolgt die Ergebnisdarstellung der Ausgangsparameter CO2-Footprint, Energieverbrauch und Transportdienstleistungsinformationen. Abbildung 4-10 illustriert die Funktionsweise des IT-Tools. Zunächst erfasst der CO2-Footprint-Rechner die unternehmens-

spezifischen Daten einer Transportdienstleistung. Diese Eingangsparameter beinhalten unter anderem die Wahl der Transportmittel, die Art des Kraftstoffs, Informationen zu den versendeten Frachtgütern und Streckeninformationen zu den Einzelabschnitten der Transportstrecke. Der CO2-Rechner basiert auf zwei Datengrundlagen. Das Tool verwendet Berechnungsvorschriften und Emissionsfaktoren aus DIN EN 16258. Der Tool-interne Verbrauchsrechner wird auch mit Werten aus frei zugänglichen Datenbanken (TREMODO; HBEFA) bestückt um durchschnittliche Verbräuche unterschiedlicher Transportmittel zu ermitteln. Der Verbrauchsrechner findet Verwendung sofern der Nutzer keine Informationen über unternehmensspezifische Verbrauchswerte angeben kann. Nach der Datenverarbeitung auf Grundlage von Nutzereingabewerten zu Systemgrenze und Auswertungsumfang werden die Ergebnisgrößen ausgegeben.

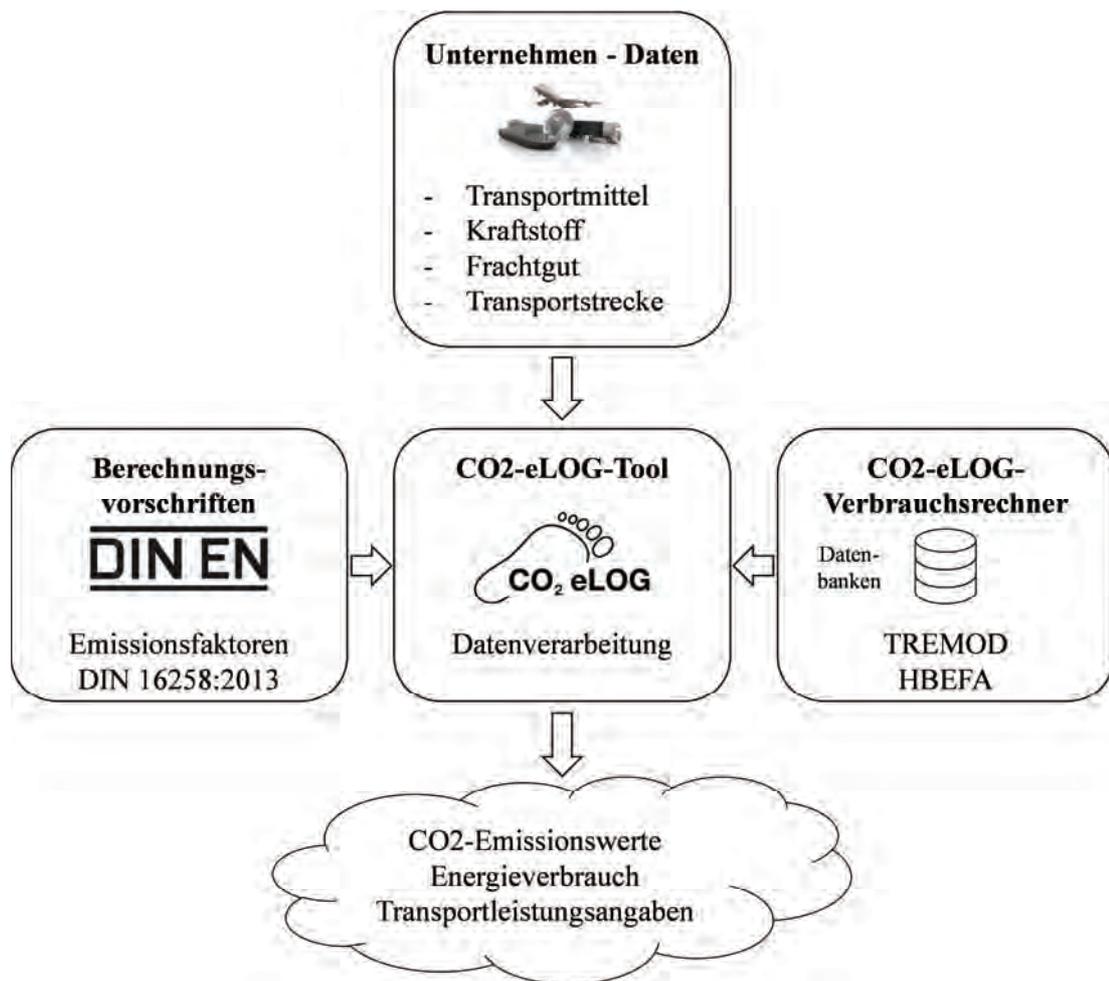


Abbildung 4-10: Funktionsweise des CO2-eLOG-Rechners

Die Darstellung der direkten und indirekten CO₂-Emissionswerte, Energieverbräuche und der Transportdienstleistungsangaben erfolgt tabellarisch und grafisch um eine genaue Dokumentation für das Unternehmen zu gewährleisten. Im Folgenden werden die drei Einzelschritte im Detail erläutert: Die Freischaltung zur Nutzung des IT-Tools geschieht mittels Registrierung. Zur Registrierung werden die Angaben zu Vor-, Zuname, Firmenname und Email-Adresse benötigt. Die Abfrage der Eingangsparameter, welche unternehmensspezifische Informationen zur Transportdienstleistung enthalten, ist durch das IT-Tool wie folgt aufgebaut. Zunächst muss die Transportdienstleistung als Ganzes benannt werden. Sie kann aus belie-

big vielen Teilstrecken mit beliebig vielen Transportmitteln durchgeführt werden. Als nächstes müssen ein oder mehrere Fahrzeugeinsatzsysteme bestimmt werden. Das Fahrzeugeinsatzsystem kann nur aus der Gesamtstrecke bestehen oder aus mehreren zusammengesetzten Teilstrecken. Zu beachten ist allerdings, dass das Fahrzeugeinsatzsystem jeweils ohne Transportmittelwechsel gewählt werden muss. Der Nutzer muss sich also vorab Gedanken über die Aufteilung der gesamten Transportdienstleistung machen. Es empfiehlt sich die Grenze eines Fahrzeugeinsatzsystems bei Wechsel eines Transportmittels oder bei einem Stopp mit Be- oder Entladetätigkeit zu setzen. Der CO2-Footprint-Rechner ermöglicht die Erstellung der gesamten Transportdienstleistung durch die Chance Fahrzeugeinsatzsysteme mehrmalig hinzufügen zu können. Beim Hinzufügen eines Fahrzeugeinsatzsystems muss dieses zunächst eindeutig benannt werden. Als nächstes muss der Nutzer eine Transportmittelwahl treffen und bestimmen, ob es sich bei dem Transport des Fahrzeugeinsatzsystems um eine Leerfahrt handelt. Beide Auswahloptionen können mit Hilfe eines Dropdown-Menüs erfolgen. Als Transportmittel stehen Lkw, Zug, Schiff und Flugzeug zur Auswahl. Die Abfolge des Programms ermöglicht ein Fortfahren nur bei eindeutiger Benennung der Eingangsparameter und Auswahl der geforderten Transportoptionen. Die Auswahl des Transportmittels erlaubt dem Nutzer im Folgenden Details zu dem vom Transportmittel abhängigen Kraftstoff auszuwählen. Diese Details beinhalten den Typ des Kraftstoffs, das Mischverhältnis und den Anteil am Mischungsverhältnis. Als Kraftstofftypen der Datenbank stehen Otto-, Ethanol-, Dieselmotorkraftstoff, Biodiesel, Autogas (LPG), Erdgas (CNG), Flugbenzin (AvGas), Jetbenzin (Jet B), Kerosin

(Jet A1 und Jet A), Schweröl (HFO), Schweröl (HFO), Marine-Dieselöl (MDO) und Marine-Gasöl (MGO) zur Auswahl. Das Mischverhältnis muss lediglich bei Biokraftstoffen (Ottokraftstoff oder Dieselkraftstoff) angegeben werden und kann als Volumen- oder Energieanteil erfolgen. Das Mischungsverhältnis wird in Abstufungen zwischen einem und 85 Prozent bei Volumenanteil und zwischen einem und 20 Prozent bei Energieanteil angegeben. Bei der Auswahl Strom als Kraftstofftyp ist der entsprechende Strommix eines EU27-Landes anzugeben. Alle Auswahloptionen werden mittels Dropdown-Menü vom Benutzer abgefragt. Das Fortfahren im Programmablauf wird nur gewährt, wenn der Benutzer eine Auswahl trifft. Im Fortgang der Berechnung wird der Allokationsparameter durch Eingabe abgefragt. Die Leerstreckenallokation kann auf Basis von Tonnenkilometern oder Treibhausgas-Emissionen erfolgen. Im nächsten Schritt wird für das Fahrzeugeinsatzsystem der Kraftstoffverbrauch vom Benutzer abgefragt. Hierfür hat der Benutzer vier Auswahlmöglichkeiten. Bei der Auswahl „Individuelle Messwerte“ kann der Nutzer gemessene Absolutwerte des Fahrzeugeinsatzsystems eingeben. Die Angabe des Absolutwerts erfolgt in Litern, Kilogramm oder Kilowattstunden. Bei Auswahl „Transportmittelspezifischer Verbrauch“ kann der Nutzer durchschnittliche Verbrauchswerte für eines seiner Transportmittel angeben. Dies erfolgt in Litern pro Kilometer, Kilogramm pro Kilometer oder Kilowattstunden pro Kilometer. Bei Auswahl „Flottenspezifischer Verbrauch“ kann der Nutzer durchschnittliche Verbrauchswerte seiner Fahrzeugflotte angeben. Dies erfolgt ebenfalls in Litern pro Kilometer, Kilogramm pro Kilometer oder Kilowattstunden pro Kilometer. Die Genauigkeit der Kalkulation nimmt von den individuellen Messwer-

ten bis hin zu den flottenspezifischen Verbrauchswerten ab. Sofern der Nutzer keinerlei Informationen zu unternehmensspezifischen Verbrauchswerten hat, steht ihm als vierte Auswahlmöglichkeit der „Verbrauchsrechner“ zur Verfügung. Der Verbrauchsrechner ermittelt unter Angabe des Transportmittels, der Gutart, der realen Transportentfernung und des Sendungsgewichts einen durchschnittlichen Verbrauchswert auf Basis von allgemein gültigen Werten aus hinterlegten Datenbanken. Bei Auswahl „Lkw“ als Transportmittel müssen zusätzlich Angaben zur Verkehrsart (Fracht- oder Güterverkehr), Fahrzeugklasse, Art des Gutes, Straßenkategorie (mittleres Längsneigungsprofil oder Ebene) sowie zum Hauptverlauf der Strecke (inner- oder außerorts) gemacht werden. Nach Auswahl und Auslegung einer der beschriebenen Optionen steht der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugeinsatzsystems fest. Dieser wird vom CO₂-Rechner automatisch als Verbrauchswert für die Berechnung herangezogen. Als weitere Eingangsgröße für das Fahrzeugeinsatzsystem muss im folgenden Schritt die Transportentfernung eingegeben werden. Nach dieser Information sind die Eingangsgrößen für das erste Fahrzeugeinsatzsystem komplett erfasst. Wie oben geschildert wurde, kann die Transportdienstleistung aus beliebig vielen Fahrzeugeinsatzsystemen bestehen. Um die Gesamttransportdienstleistung um eine zusätzliche Teilstrecke zu erweitern muss ein weiteres Fahrzeugeinsatzsystem hinzugefügt werden. Die Informationen zu einem weiteren Fahrzeugeinsatzsystem werden analog nach dem eben beschriebenen Vorgehen erfasst. Nach Eingabe aller Teilstrecken der gesamten Transportdienstleistung muss der Nutzer alle transportierten Güter aufnehmen. Um fortzufahren wählt der Nutzer den Programmschritt „Frachtgüterdefinition“. Hierfür

steht dem Nutzer ähnlich wie beim Kombinieren von mehreren Fahrzeugeinsatzsystemen zur gesamten Transportdienstleistung die Möglichkeit zur Verfügung, beliebig viele Frachtgüter zu definieren. Nach der Auswahl „Frachtgut hinzufügen“ muss das Frachtgut eindeutig benannt werden, um eine nachvollziehbare Dokumentation zu gewährleisten. Als nächstes muss das Gesamtgewicht des Frachtguts angegeben werden. Sofern Ladehilfen verwendet werden, muss die Anzahl der Ladehilfen und das Gewicht der Ladehilfen angegeben werden. Mit Hilfe dieser Informationen wird das Ladungsgewicht des Frachtguts automatisch berechnet. Nach der Definition des ersten Frachtguts hat der Nutzer die Möglichkeit ein weiteres zu erstellen. Dies erfolgt analog zum eben beschriebenen Vorgehen nach der erneuten Auswahl „Frachtgut hinzufügen“. Sofern alle Frachtgüter mit ihrem gesamten Ladungsgewicht aufgenommen wurden, gilt es die transportierten Güter den Fahrzeugeinsatzsystemen zuzuordnen. Wichtig bei der Allokation ist, dass ein Frachtgut auf mehrere Fahrzeugeinsatzsysteme aufgeteilt werden kann. Dies ermöglicht zum einen die Berechnung von kombinierten Verkehren und zum anderen können Teile der Ladung an unterschiedlichen Punkten zwischen den Fahrzeugeinsatzsystemen ab- oder aufgeladen werden. Die Allokation des Energieverbrauchs sowie der Treibhausgas-Emissionen erfolgt im Standardfall auf Grundlage von Tonnenkilometern. Die Transportleistung ergibt sich hierbei aus dem Faktor transportierte Strecke mal transportiertes Gewicht. Der Nutzer geht demnach alle Frachtgüter der Reihe nach durch und definiert, welcher Anteil des Frachtguts auf welcher Strecke transportiert wurde. Nach der Zuordnung aller definierten Frachtgüter auf die Fahrzeugeinsatzsysteme kann die Allokation des Energieverbrauchs bezie-

ungsweise der Treibhausgas-Emissionen unter Berücksichtigung der Leerfahrten erfolgen. Die Zuordnung von Frachtgütern auf Fahrzeugeinsatzsysteme, die zu Beginn als „Leerfahrt“ deklariert wurden, ist nicht möglich. Wird die Fracht in Containern transportiert, kann dies bei der Berechnung explizit berücksichtigt werden. Um die Transporttätigkeit auf der betrachteten Teilstrecke zu berechnen, müssen sowohl Angaben zur Gesamtladung des Containers, als auch zum tatsächlichen Frachtgewicht pro Container gemacht werden. Die Gesamttransporttätigkeit des Fahrzeugeinsatzsystems kann entweder direkt eingegeben werden (individuelle Messwerte) oder über die durchschnittliche Höchstladung eines Containerschiffes und dessen durchschnittlichen Auslastungsgrad (spezifische Werte oder Vorgabewerte) berechnet werden. Die anschließende Allokation erfolgt analog der Berechnung anhand von Tonnenkilometern. Die Ergebnisdarstellung ist abhängig von zwei Auswahlkriterien. Entweder werden die Ergebnisse einzelner Fahrzeugeinsatzsysteme dargestellt oder auf Basis eines oder mehrerer ausgewählter Frachtgüter. Die Standard-Methode der Ergebnisaufbereitung erfolgt anhand aller Frachtgüter. Die Ergebnisdarstellung enthält alle wichtigen Informationen zu den einzelnen Frachtgütern wie Systemgrenze des Fahrzeugeinsatzsystems, Transportmittel, Leerfahrten, Kraftstoff, Verbrauch (Fahrzeugeinsatzsystem), Verbrauch (Teilstrecke), Tonnenkilometer (Fahrzeugeinsatzsystem), Tonnenkilometer (Teilstrecke) sowie Well-to-Wheel-Energieverbrauch, Well-to-Wheel-CO₂-Emissionen, Tank-to-Wheel-Energieverbrauch und Tank-to-Wheel-CO₂-Emissionen. Nicht benötigte Frachtgüter sowie Teilstrecken werden nicht angezeigt. Die Summe der Ergebnisgrößen und Logistikleistung in Tonnenkilometer pro Frachtgut

sowie der gesamten Transportdienstleistung werden berechnet und in tabellarischer und grafischer Weise ausgegeben.

4.5 Exemplarische Berechnungen anhand von Fallstudien

1. Logistik (Handel): Bei dem betrachteten Unternehmen handelt es sich um einen Logistikdienstleister, welcher sich auf den Transport verderblicher Güter wie Lebensmittel und Schnittblumen spezialisiert hat. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurden nahezu alle Transportaktivitäten auf der Straße durchgeführt, um gerade auf kurzen und mittleren Distanzen schnelle Transporte und eine hohe Flexibilität für den Kunden gewährleisten zu können. Das Unternehmen führt primär Distributionsdienstleistungen von Lebensmittelherstellern sowie Blumenhändlern durch und beliefert den Einzelhandel. Die Herausforderung bei der Berechnung des logistischen CO₂-Footprints ergibt sich vor allem durch die Komplexität bedingt durch gleichzeitig transportierte Güter pro Strecke sowie die Anzahl an Einzelstrecken pro logistischer Betrachtungseinheit. So wird bei einer charakteristischen Dienstleistung in diesem Bereich zumeist eine Vielzahl an Produkten gleichzeitig transportiert. Auch haben die jeweiligen Produkte häufig unterschiedliche Destination. Beispielsweise wird eine Ladung Schnittblumen nicht selten auf 4-5 Einzelhandelsmärkte verteilt. Hierdurch ergibt sich für das Fahrprofil eine Art Rundkurs. Für die Berechnung ist es daher erforderlich Start und Ende der Betrachtungseinheit vor der Berechnung zu definieren. Das hier untersuchte Szenario wird in Abbildung 4-11 veranschaulicht und stellt exemplarisch eine für das Unternehmen typische Transportdienstleistung dar und zeigt wie die Berechnung des CO₂-

Footprint bei komplexen Transportnetzen durchgeführt werden kann. Die transportierten Güter in diesem Fall sind zwei unterschiedliche, hochwertige Lebensmittel. Beide Transportgüter werden bei einem Lieferanten in Frankfurt abgeholt und sollen zu Zwischenhändlern in Hamburg und München transportiert werden. Transportgut 1 wird lediglich bis Hamburg transportiert. Transportgut 2 wird zu jeweils gleichen Teilen nach Hamburg und nach München transportiert. Für beide Transportgüter werden Europaletten als Ladehilfen verwendet. Der Rückweg von München nach Frankfurt stellt eine Leerfahrt dar. Diese Leerfahrten sind im Lebensmitteltransport eher ungewöhnlich, lassen sich allerdings aufgrund der in diesem Szenario gegebenen Voraussetzungen nicht vermeiden. Insgesamt beträgt die gesamte Transportentfernung 1680 km, wobei Transportgut 1 lediglich 500 km weit transportiert wird und Transportgut 2

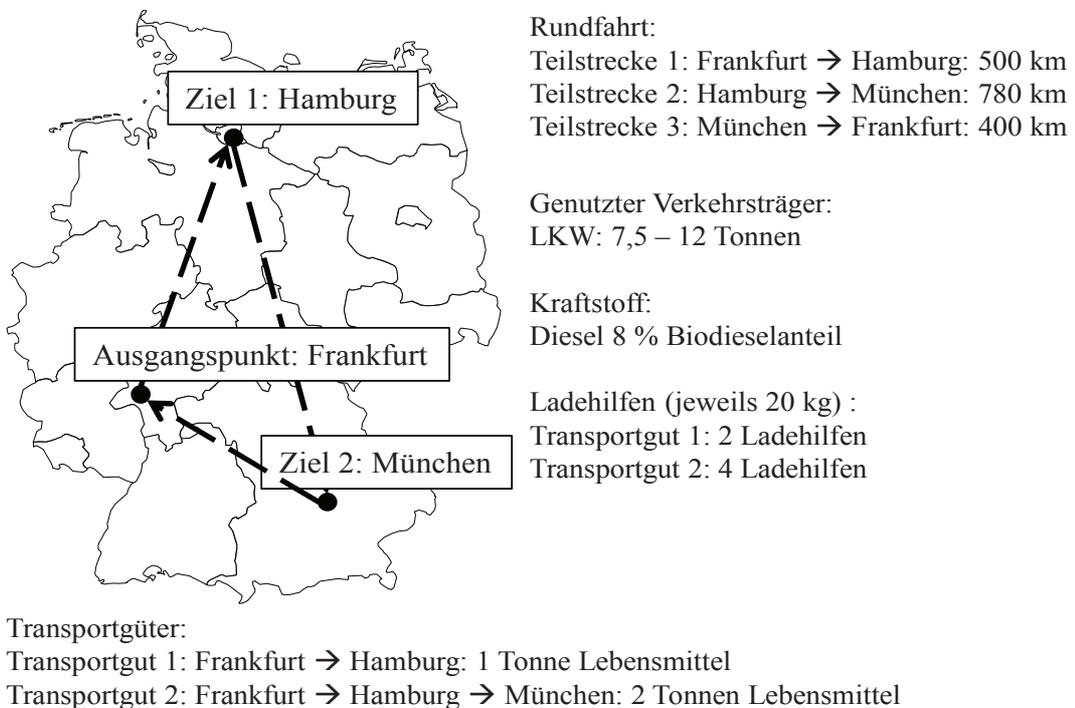


Abbildung 4-11: Ausgangssituation für Fallstudie 1

nach 500 km bereits zur Hälfte abgeladen wird. Die andere Hälfte von Transportgut 2 wird weitere 780 km transportiert. Für die Berechnung des CO2-Footprints für das definierte Szenario ist vor allem die Allokation der Leerfahrt von München nach Frankfurt entscheidend. Zwar bleibt der logistische CO2-Footprint für alle Fahrten immer gleich, die Allokation entscheidet aber darüber wie groß der transportgutspezifische CO2-Footprint ausfällt. So kann die Leerfahrt prinzipiell beiden Gütern zugerechnet werden, oder aber nur jeweils einem der beiden transportierten Produkte. In diesem Fall wird die Leerfahrt beiden Gütern zugerechnet, da es sich um ein in sich geschlossenes Transportsystem handelt und jedes der beiden Güter seinen Anteil an der Verursachung der Leerfahrt hat. Die Ergebnisse von Berechnung und Allokation sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Die Transportleistung beläuft sich im vorliegenden Fall auf 2371 Tonnenkilometer, wobei je nach Betrachtungshorizont 910 kg CO₂ oder 715 kg CO₂ emittiert werden. Der Unterschied erklärt sich durch die Einbeziehung der CO₂-Emissionen in der Vorkette der Kraftstofferzeugung im ersten Fall. Dagegen werden im zweiten Fall nur die direkten Emissionen betrachtet, welche durch die Kraftstoffverbrennung entstehen. Es wird deutlich, dass auf das zweite Transportgut der Großteil der CO₂-Emissionen entfällt.

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Transportgut 1	520 tkm	138 kg CO ₂ e	108 kg CO ₂ e
Transportgut 2	1851 tkm	772 kg CO ₂ e	607 kg CO ₂ e
Gesamt	2371 tkm	910 kg CO ₂ e	715 kg CO ₂ e

Abbildung 4-12: CO₂-Emissionen in Fallstudie 1

Dies erklärt sich zum einen aus der größeren Masse der Ware und zum anderen durch die größere Transportdistanz.

2. Logistik (Recycling): Das Unternehmen der nächsten Fallstudie ist ein Logistikdienstleister, der für verschiedene Logistikprozesse, unter anderem der Entsorgungslogistik, Transportdienstleistungen zur Verfügung stellt. Der Marktbereich Intermodal des Unternehmens verbindet mit über 1.500 Zügen pro Woche die wichtigsten Wirtschaftsstandorte und Häfen in rund 30 Ländern Europas miteinander. Mit 2,8 Mio. transportierten Ladeeinheiten pro Jahr ist das Dienstleistungssegment „Intermodal“ führender Anbieter im europäischen kombinierten Verkehr. Mit über drei Mio. transportierten Fertigfahrzeugen, über 30.000 Zügen pro Jahr und mehr als 9.000 Spezialwagen ist der betrachtete Transportdienstleister einer der größten Anbieter im Bereich Fahrzeugtransport und Logistik in Europa. Gerade in dieser Branche ist aufgrund eines intensiven Wettbewerbs die Ausrichtung der Transportprozesse auf die Wünsche des Kunden von enormer Bedeutung. Ziel ist es, die Ladung in Containern, Sattelaufliegern oder Wechselbehältern effizient, flexibel, zuverlässig und umweltschonend an das Ziel zu bringen. Dies gilt nicht nur für die Beschaffungs- sondern auch für die Entsorgungslogistik wie dieses Fallbeispiel aufzeigt. Für den Transport von Stahlschrott zwischen Krakau und Hamburg stehen zwei alternative Strecken auf der Schiene zur Verfügung. Die „Nordroute“ ist durchgängig elektrifiziert, aber um insgesamt 150 km länger als die alternative Strecke. Die „Südroute“ hat eine Länge von 900 km, insgesamt sind aber nur 630 km elektrifiziert. Der nicht elektrifizierte Teil wird mit einer Diesellokomotive angetrieben. Die beiden Szenarien sind Abbildung 4-13 dargestellt. Bei der Entscheidung für bzw. ge-

gen eine Strecke sind vor allem Trassen- sowie Energiekosten ausschlaggebend. Mit Hilfe des CO2-Footprint-Rechners wurden die relevanten Ergebnisgrößen bestimmt. Zunächst wurde das erste Szenario „Nordroute“ bewertet. Als Eingangsparameter für die Kalkulation wurde zunächst das Fahrzeugeinsatzsystem Krakau-Hamburg bestimmt. Dieses besteht aus einer Teilstrecke und einem Transportmittel. Die Teilstrecke beläuft sich auf 1.050 km welche mit einem Zug mit Elektrotraktion zurückgelegt wurde. Unter zu Hilfenahme des im Tool integrierten Verbrauchsrechner wurde ein durchschnittlicher Verbrauch von 3.360 kWh pro 100 km für einen Langzug mit maximaler Zuladung von 2.000 t bei einer Auslastung von 80 Prozent ermittelt. Das Frachtgewicht des Stahlschrotts des Unternehmens beträgt 5.000 t. Im zweiten Schritt wurde das Szenario „Südroute“ bewertet. Hierfür wurden zwei Fahrzeugeinsatzsysteme bestimmt.

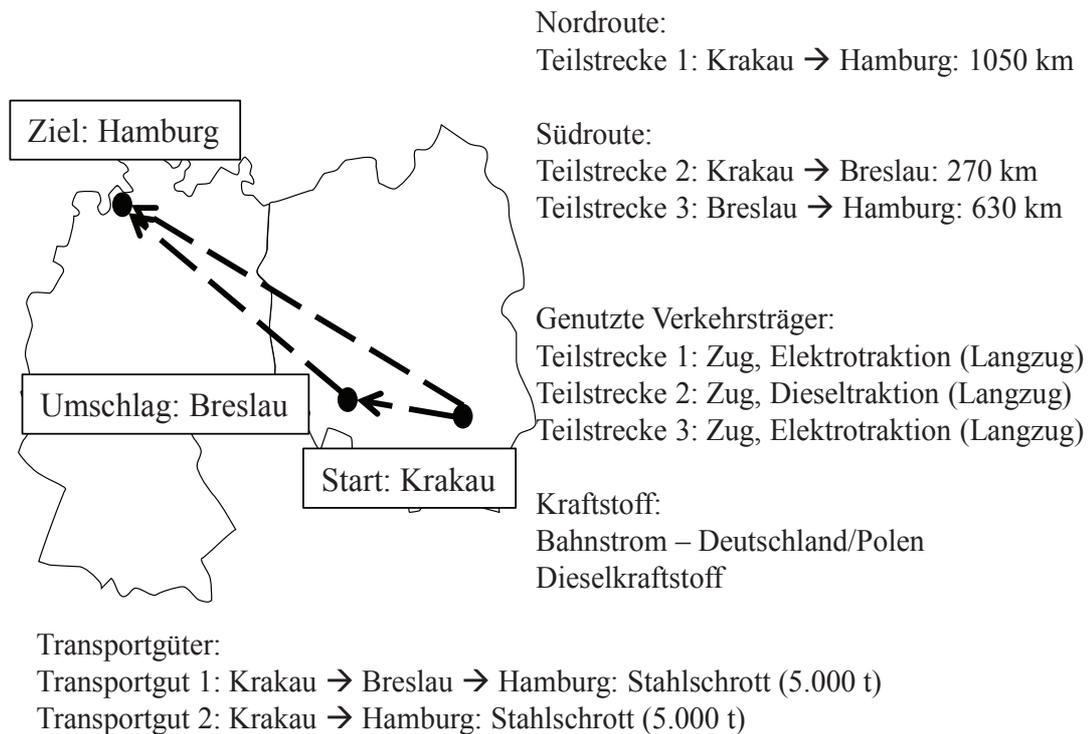


Abbildung 4-13: Szenario-Beschreibung für Fallstudie 2

Das erste Fahrzeugeinsatzsystem mit einer Teilstrecke von 270 km wird mit Langzug mit Dieseltraktion befahren. Das zweite Fahrzeugeinsatzsystem mit einer Teilstrecke von 630 km wird mit einem Langzug mit Elektrotraktion befahren. Das Frachtgewicht sowie die Auslastung blieben unverändert. Die Ergebnisgrößen der beiden Szenarien sind in Abbildung 4-14. Der CO₂-Footprint-Rechner konnte nachweisen, dass die „Nordroute“ trotz längerer Strecke emissionstechnisch günstiger für den Transportdienstleister ist. Diese hat eine Transportleistung von 5.250.000 tkm bei auftretenden Well-to-Wheel-Emissionen in Höhe von 5.063 kg CO₂e. Tank-to-Wheel-Emissionen treten nicht auf, da es bei einem elektrisch betriebenen Zug keine direkten Emissionen gibt. Die Südroute hat eine Transportleistung von 4.500.00 tkm. Die Differenz von knapp 17 Prozent begründet sich auf der kürzeren Transport-

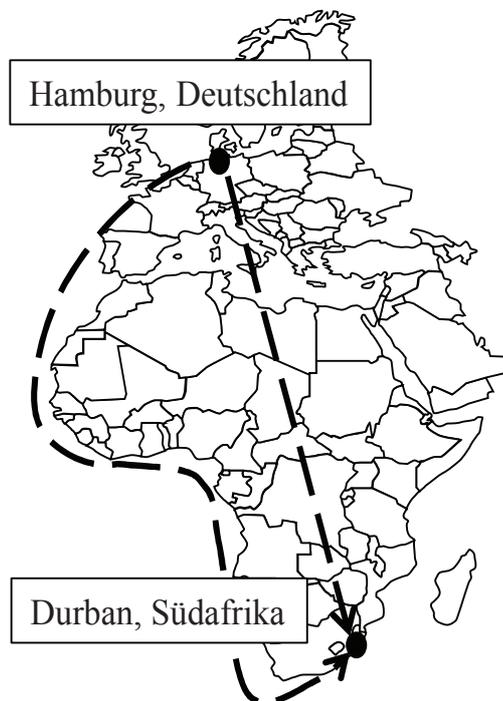
strecke der Gesamtroute. Mit 5.137 kg CO₂e hat die Südroute einen um 1,4 Prozent höheren Emissionsausstoß als die Nordroute. Das zweite Szenario hat direkte Tank-to-Wheel-Emissionen, da auf einer Teilstrecke ein Zug mit Dieseltraktion zum Einsatz kommt. Die Fallstudie hat aufgezeigt, dass durch geeignete Wahl des Transportmittels CO₂-Emissionen eingespart werden konnten, obwohl eine längere Transportstrecke gewählt werden musste.

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Nordroute	5.250.000 tkm	5.063 kg CO ₂ e	N/A
Südroute	4.500.000 tkm	5.137 kg CO ₂ e	1.730 kg CO ₂ e
Differenz	-16,7%	+ 1,4%	N/A

Abbildung 4-14: Ergebnisdarstellung von Fallstudie 2

3. Logistik (Innerbetriebliche Logistik): Der Luxemburger Logistikdienstleister aus Fallstudie 3 übernimmt Transportdienstleistungen für einen deutschen Automobilhersteller. Der Automobilhersteller nutzt den Logistikdienstleister um seine global aufgestellten Werke untereinander zu versorgen. Der Logistikdienstleister erzielte im vergangenen Jahr mit seinen über 4.300 Mitarbeitern einen Umsatz von 1,2 Mrd. Euro. Mit knapp 200 Standorten in rund 32 Ländern verfügt das Unternehmen über spezialisierte Infrastrukturen und Kontakte für Transportlösungen im Bereich Seefracht, Luftfracht und Landtransporte. Das Unternehmen organisiert die Wertschöpfungskette seiner Kunden und stellt Zusatzleistungen wie beispielsweise Lagerflächen zur Verfügung. Logistikdienstleister, die in der Automobilindustrie tätig sind, sehen sich steigenden Anfor-

derungen an die Flexibilität gegenüber. Sie müssen diesen Anforderungen gerecht werden und geeignete Maßnahmen anbieten um auch künftig in Outsourcing-Projekten berücksichtigt zu werden. Die Fallstudie zeigt, dass das Flexibilitätspotenzial eines Logistikdienstleisters ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal im harten Wettbewerb ist. Der Automobilhersteller bietet seinen Kunden einen besonderen Service. Nach Bestellung eines Neuwagens können Änderungswünsche bei der Fahrzeugausstattung bis drei Wochen vor Auslieferung noch angenommen werden. Diese Flexibilität hat gravierende Auswirkungen auf die Wertschöpfungskette. Da der Automobilhersteller die Komponentenbelieferung seiner Werke regulär mittels Zug- und Seeverkehr bewerkstelligt, fehlt bei einem Änderungswunsch des Kunden kurzfristig vor Auslieferung des Fahrzeugs die nötige Zeit, um die geänderten Komponenten fristgerecht mit Bahn oder Schiff anzuliefern. Dies bedeutet, dass der Transportdienstleister, flexibel auf den Änderungswunsch des Kunden reagieren muss, um die Transportdienstleistung zu erfüllen. Abbildung 4-15 verdeutlicht das Szenario des Transportdienstleisters. Betrachtungsgegenstand der Transportdienstleistung ist ein ISO-Container (Twenty-foot-equivalent) voll mit Ersatzbauteilen, die vom Kunden von Hamburg nach Durban in Südafrika geliefert werden. Der Container hat ein Gesamtgewicht von 24 Tonnen. Unter regulären Umständen würde das Frachtgut mit einem Containerschiff von Deutschland nach Südafrika transportiert werden. Das Containerschiff benötigt für die Strecke von 13.300 km 22 Tage auf See. Auf der Route in internationalen Gewässern verwendet das Containerschiff Schweröl als Kraftstoff. Das gesamte Frachtgewicht des Containerschiffs beträgt 4.700 TEU.



Transportgut: 1 Container (TEU), Gesamtgewicht: 24 Tonnen

Vergleich Verkehrsträger:

- 1) Schiff:
Containerschiff, Intrakontinental
- 2) Flugzeug:
Belly-Fracht, Langstrecke

Transportstrecke

- 1) Hamburg → Durban: 13.300 km
- 2) Hamburg → Durban: 9.500 km

Transportzeit

- 1) Seefracht: 22 Tage
- 2) Luftfracht: 13 Stunden

Kraftstoff:

- 1) Schweröl (HFO)
- 2) Kerosin (Jet A1 und Jet A)

Abbildung 4-15: Szenario-Beschreibung für Fallstudie 3

Der CO2-Footprint-Rechner allokiert den verbrauchten Kraftstoff auf den einen Container des Kunden. Aufgrund der langen Transportzeit von 22 Tagen, die das Schiff auf See verbringt, ist es nicht möglich einen Änderungswunsch des Kunden fristgerecht innerhalb von 3 Wochen mit dem Schiff zu bedienen. Aufgrund dessen muss in solch einem Fall auf ein Transportflugzeug zurückgegriffen werden. Im zweiten Szenario der Fallstudie wird der ISO-Container mittels eines Belly-Frachters von Hamburg nach Durban geflogen. Das transportierte Gewicht der Fracht bleibt in diesem Fall dasselbe. Lediglich das Container-Gewicht verändert sich. Luftfrachtcontainer sind speziell für den Transport per Flugzeug konzipiert. Zur Minimierung des Containergewichts sind sie aus Aluminium (Rahmen) und Kunststoff (Seitenwände) hergestellt und bezüglich

ihrer Geometrie auf unterschiedliche Flugzeugtypen angepasst. Das Flugzeug benötigt für die Wegstrecke von 9.500 km eine Flugzeit von 13 Stunden. Das Flugzeug ist demnach um ein Vielfaches schneller als der Seetransport. Mit Hilfe des CO₂-Rechners findet auch in diesem Fall eine Allokation des verbrauchten Kraftstoffs auf das transportierte Frachtgut statt. Der Logistikdienstleister berechnete mit dem CO₂-Rechner die Transportleistung und die direkten sowie gesamten Treibhausgas-Emissionen. Die Ergebnisse der Berechnungen für die beiden Szenarien sind in Abbildung 4-16 dargestellt.

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Seefracht	319.200 tkm	2.404 kg CO ₂ e	2.220 kg CO ₂ e
Luftfracht	228.000 tkm	9.894 kg CO ₂ e	8.109 kg CO ₂ e
Differenz	-28,6%	+311,6 %	+265,3 %

Abbildung 4-16: Ergebnisdarstellung von Fallstudie 3

Aufgrund der kürzeren Flugdistanz ist die Transportleistung des Luftfracht-Szenarios deutlich geringer als die des Seefracht-Szenarios. Die Transportstrecke für den Flugverkehr berücksichtigt die Großkreisdistanz. Hinzu kommt, dass das Transportgewicht ein wenig geringer ist aufgrund des verwendeten Luftfrachtcontainers. Die Abnahme der Transportleistung beträgt 91.200 tkm und entspricht damit einer Differenz von knapp 30 Prozent. Die Ergebnisse der Gesamt-Emissionen, die auch solche für die Bereitstellung des Kraftstoffes berücksichtigen, zeigt die Auswirkungen der Umstellung auf den Transport mittels Luftfracht sehr deutlich. Die Well-to-Wheel-Emissionen steigen von 2,4 Tonnen CO₂e auf 9,9 Tonnen CO₂e an. Dies bedeutet einen Anstieg der Gesamt-Emissionen von

311,6 Prozent. Auch bei den direkten Emissionen, den Tank-to-Wheel-Emissionen, ist ein merklicher Anstieg zu verzeichnen. Die Emissionen steigen von 2,2 Tonnen CO₂e auf 8,1 Tonnen CO₂e an. Dies entspricht einem Mehrausstoß an CO₂-Emissionen von 265,3 Prozent. Mittels der Berechnungen konnte das Unternehmen den Mehraufwand in Form von CO₂-Emissionen darstellen. Die gesteigerte Flexibilität durch die Verkürzung der Transportzeit um 21 Tage geht zum einen zu Lasten der Umwelt und zum anderen erhöht sie die Transportkosten des Transportdienstleisters. Die Berechnungen geben dem Auftraggeber die nötige Transparenz um die getätigten Aufwendungen ganzheitlich den geforderten Kundenwünschen gegenüberzustellen.

4. Automobilzulieferer (Vertrieb): Das Unternehmen ist ein führender Tier-1-Zulieferer für innovative Innenausstattungen in der Automobilindustrie. Weltweit beschäftigt das Unternehmen 170.000 Mitarbeiter und erwirtschaftet einen jährlichen Umsatz von über 30 Mrd. Euro. Im Fokus der Unternehmenstätigkeiten stehen Dienstleistungen und Lösungen, mit denen ein wichtiger Beitrag zur Optimierung der Energie- und Gesamteffizienz von Gebäuden und Fahrzeugen geleistet wird. Neben den betrachteten Gütern für Innenraumlösungen in der Automobilindustrie entwickelt das Unternehmen auch innovative Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Aufgrund der Nachhaltigkeitsstrategie ist dem Unternehmen daran gelegen sowohl Beschaffungs- als auch Vertriebslogistik umweltfreundlich auszulegen. Das Unternehmen verfolgte in den letzten drei Jahren eine konsequente Transport- und Routenoptimierungsstrategie. Ein Teilprojekt der Optimierungsmaßnahmen war die Verlagerung eines Teils der Vertriebslogistik auf die Schiene.

Die vorliegenden Bedingungen des Transportszenarios sind in Abbildung 4-17 dargestellt. Mit Hilfe des CO2-Footprint-Rechners konnten die Veränderungen hinsichtlich der Transportleistung, der Energieverbräuche sowie der Treibhausgas-Emissionen transparent dargestellt werden.

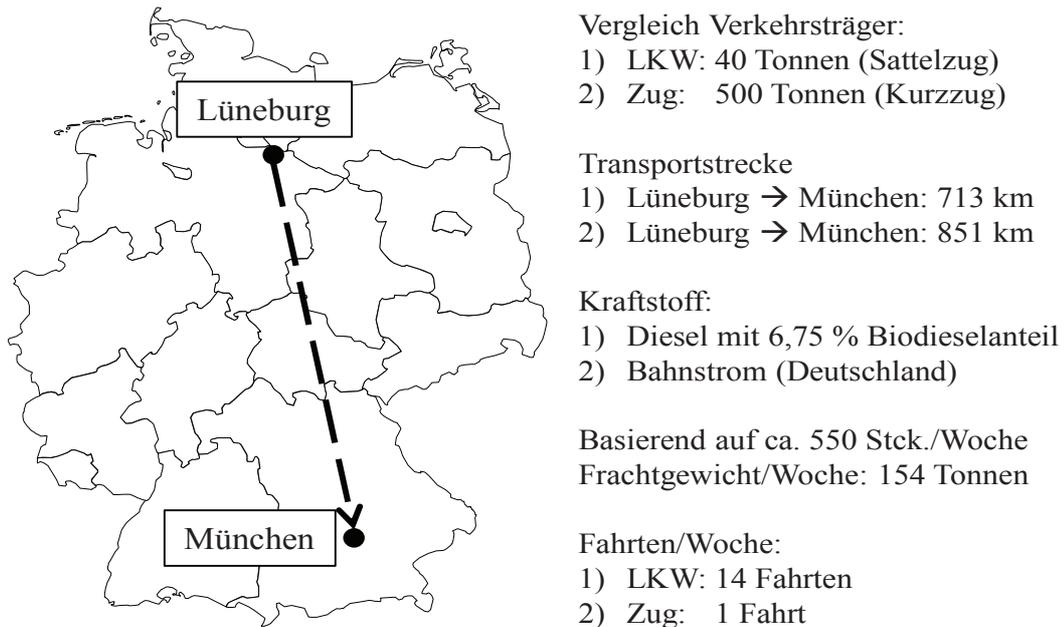


Abbildung 4-17: Szenario-Beschreibung der Fallstudie 4

Das Unternehmen beliefert von seinem Produktionsstandort in Lüneburg einen Automobilhersteller in München. Das Transportvolumen der Interieurkomponenten beträgt 550 Stück pro Woche. Eine Komplett-Komponente wiegt ca. 280 kg. Damit ergibt sich für die Belieferung des Kunden in München ein wöchentliches Frachtgewicht von 154 Tonnen. Bis vor kurzer Zeit wurde der Kunde mit 14 Lkw-Transporten an drei Tagen pro Woche beliefert. Durch die neue Belieferungsstrategie erhält der Kunden einmal pro Woche die gesamte Wochenlieferung mit einer Gesamtstückzahl von 550 Komponenten. Die Lkw-Fahrzeugflotte gebraucht den in Deutschland üblichen Dieselmotorkraftstoff mit 6,75 Prozent Biodieselanteil. Auf der betrachteten

Bahntrasse verkehrt ein Kurzzug (500 t) mit Elektrotraktion. Die unternehmensspezifischen Transportdaten wurden in das CO2-Footprint-Tool aufgenommen und anhand anwenderspezifischer Einstellungen bewertet. Die Ergebnisse der neuen Belieferungsstrategie sind in Abbildung 4-18 dargestellt. Aufgrund der längeren Transportstrecke fällt die Transportleistung des Zugverkehrs größer aus als die des Lkw-Verkehrs obwohl dasselbe Frachtgewicht transportiert wird. Die führt zu einer Zunahme der Transportleistung von knapp 20 Prozent. Durch Verlagerung der Vertriebstätigkeit auf die Schiene konnte der CO2-Ausstoß von 6.916 kg CO₂e auf 3.686 kg CO₂e reduziert werden.

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
LKW-Verkehr	109.802 tkm	6.916 kg CO ₂ e	5.474 kg CO ₂ e
Zugverkehr	131.054 tkm	3.686 kg CO ₂ e	N/A
Differenz	+19,4 %	-46,7 %	N/A

Abbildung 4-18: Wöchentliche Transportleistung und CO₂-Emissionen

Dies entspricht fast einer Halbierung der ausgestoßenen Treibhausgas-Emissionen. Als Nebeneffekt hat sich das betrachtete Unternehmen durch die Verlagerung auf die Schiene zusätzlich die Rechte an der verwendeten Trasse für die kommenden Jahre gesichert. Aufgrund der Elektrotraktion des Zugverkehrs kommt es auf der Transportstrecke zu keinen direkten Emissionen. Deshalb ist bei den Tank-to-Wheel-Emissionen kein Wert eingetragen. Die Bereitstellung der Elektrotraktion benötigt allerdings indirekte Emissionen die in den Well-to-Wheel-Emissionen berücksichtigt werden.

5. Automobilzulieferer (Beschaffung): Das Unternehmen aus Fallstudie 5 ist ein wichtiger Zulieferer der Automobilindustrie mit Firmensitz in Deutschland. Es hat sich auf effiziente Energieerzeugung spezialisiert und ist ein globaler Partner von Fahrzeug- und Motorenhersteller gerade im Hinblick auf den schrittweisen Übergang zur Elektromobilität. Das Unternehmen entwickelt Starter, Generatoren und Elektrische Maschinen für Pkw und Nutzfahrzeuge in einem weltweiten Fertigungsverbund. Um die Effizienz und Umweltfreundlichkeit ihrer Produkte auch in der Wertschöpfungskette widerzuspiegeln betreibt das Unternehmen seit einigen Jahren intensive Bemühungen, mehr Transparenz in den Entstehungsprozess zu bringen. Unter anderem fordert das Unternehmen von seinen Zulieferern detaillierte Auskunft über alle Transportprozesse in der Beschaffungslogistik. Das Unternehmen hat mit Hilfe des CO₂-Rechners beispielhaft für ein Produkt seines Sortiments die Transportleistung und die Treibhausgas-Emissionen eines Jahres zusammengestellt. Hierfür hat es die Transportleistung der fünf wichtigsten Komponenten des Produkts, das von Zulieferern bezogen wird, dargestellt. Dabei wurde die jährliche Produktionsleistung des Herstellers von 30.000 Stück pro Jahr zu Grunde gelegt. Abbildung 4-19 illustriert die Rahmenbedingungen für die Transportdienstleistungen der Zulieferer. In der Fallstudie wurden fünf Zulieferer mit Sitz in Wuppertal, Koblenz, Kaiserslautern, Bad Windsheim und Dresden betrachtet. Die unterschiedlichen Transportstrecken sind der Abbildung zu entnehmen. Die Anlieferungen der Zulieferer betragen bis zu 3 Sendungen pro Woche auf den Zeitraum eines ganzen Jahres betrachtet. Als Transportmittel wurden in allen Fällen Lkw/Sattelzüge mit einer maximalen Zuladung von 12-

24 Tonnen angegeben. Das jährliche Gesamtfrachtgewicht sowie die Anzahl der Sendungen der Zulieferer unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen und Gewichte der Einzelkomponenten.

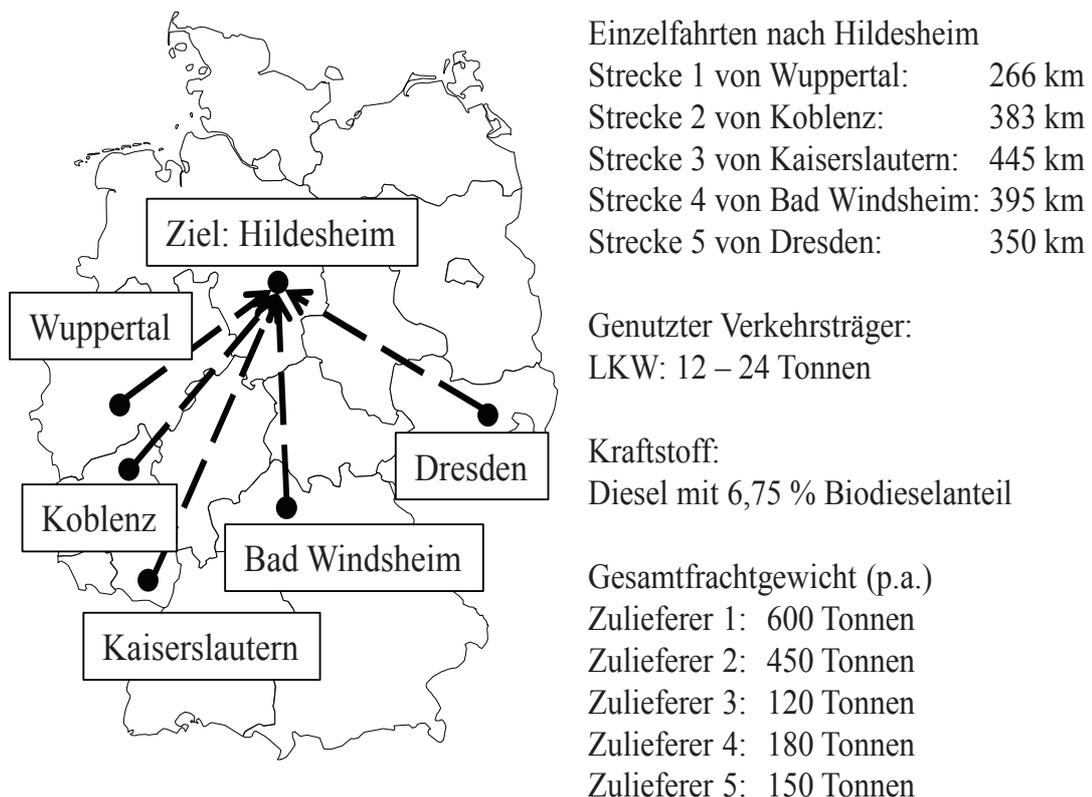


Abbildung 4-19: Szenario-Beschreibung für Fallstudie 5

Als Kraftstoff wurde einheitlich mit Dieselkraftstoff mit 6,75 Prozent Biodieselanteil gerechnet. Die beschriebene Fallstudie zeigt die aktuelle Ist-Situation der Logistikleistungen der Zulieferer. Die Aufnahme der Ist-Situation hatte für das Unternehmen zwei wesentliche Vorteile. Zum einen wurden die Logistikleistungen transparent dargestellt, wodurch Aufwandstreiber aufgrund hoher Transportleistungen festgestellt werden konnten. Zum anderen lieferte die Ist-Situation eine Basis für die strategische Ausrichtung der zukünftigen Beschaffungslo-

gistik. Ziel des Unternehmens ist die Schaffung einer umweltfreundlichen Wertschöpfungskette, bei der auch die Logistik effizient im Sinne der Produktphilosophie gestaltet ist und möglichst wenige Treibhausgas-Emissionen freisetzt. Als Nebeneffekt der effizienten Auslegung der Logistikkette erwartet sich das Unternehmen zudem Einsparpotenziale bei den Transportkosten. Abbildung 4-20 fasst die gemessene jährliche Transportleistung sowie die gesamten und direkten CO₂-Emissionen zusammen. Wie aus den Ergebnissen entnommen werden kann sind bei Lkw-Transporten die direkten sowie gesamten CO₂-Emissionen immer direkt abhängig von der Transportleistung.

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Zulieferer 1	357.159 tkm	46,59 t CO ₂ e	36,83 t CO ₂ e
Zulieferer 2	200.617 tkm	31,37 t CO ₂ e	24,80 t CO ₂ e
Zulieferer 3	162.469 tkm	45,17 t CO ₂ e	35,71 t CO ₂ e
Zulieferer 4	215.469 tkm	52,48 t CO ₂ e	41,49 t CO ₂ e
Zulieferer 5	158.970 tkm	41,28 t CO ₂ e	32,63 t CO ₂ e
Gesamt	1.094.684 tkm	216,89 t CO ₂ e	171,45 t CO ₂ e

Abbildung 4-20: Jährliche Transportleistung sowie – Emissionen der Zulieferer

Bei den Zulieferern 1 und 2 stellen sich verhältnismäßig bessere Emissionsergebnisse trotz vermeintlich höherer Transportleistungen dar. Dies liegt an der kompakten Bauweise sowie guten Stapelbarkeit der Produkte, wodurch eine relativ große Anzahl an Produkten auf die dafür vorgesehenen Ladungsträger passen und es zu einer hohen Auslastung des Transportmittels kommt. Die Fallstudie bestätigt, dass hohe Auslastungsgrade ein wichtiges Instrument für die effiziente Gestaltung der Logistik sind. Die Ergebnisse lieferten dem Unternehmen zudem die Mög-

lichkeit weitere Vergleiche zur Optimierung der einzelnen Transportsysteme durchzuführen. Im Anschluss an die Aufnahme der Ist-Situation wurden unternehmensintern weitere Szenarien betrachtet, bei denen nach Möglichkeit ein Modal-Split vorgenommen wurde. Das Unternehmen prüft derzeit wie eine geeignete Aufteilung der Transporte aussehen kann um andere Verkehrsträger wie den Zugverkehr mit einzubinden. Mit Hilfe des CO₂-Rechners werden für diese Szenarien die Transportleistung sowie die Energieverbräuche und der CO₂-Footprint berechnet.

6. Automobilhersteller (Produktion): In Fallstudie 6 wird die Produktionslogistik eines Automobilherstellers genauer betrachtet. Der Automobilhersteller mit Sitz in München hat mehrere Werke in Bayern, die auf unterschiedliche Schwerpunkte wie Karosserie-, Werkzeug-, Motorenbau, Presswerk und Karosserieausstattungen fokussiert sind. Aufgrund der spezialisierten Teilbereiche der Werke gibt es einen regelmäßigen Zwischenwerksverkehr der die Komponenten auf die unterschiedlichen Werke verteilt. Der Automobilhersteller vertreibt die produzierten Fahrzeuge weltweit und hat im vergangenen Jahr mit seinen mehr als 100.000 Mitarbeitern über 1,85 Mio. Automobile absetzen. Eine funktionierende und effiziente Logistikkette stellt eine der Kernvoraussetzungen für die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens dar. Ein wichtiger Baustein um den damit verbundenen Ansprüchen gerecht zu werden, sind die verschiedenen Anlieferungskonzepte. Diese ermöglichen es Bauteile entsprechend ihrem Bestimmungszeitpunkt und -ort zu steuern. Im Produktionsnetzwerk des betrachteten Unternehmens wurden hierbei zwei Verfahren eingesetzt, um die zwischenwerkliche Versorgung mit Karosserieteilen zu gewährleis-

ten. Das eine Konzept sah vor, in verschiedenen großen Bestellverfahren bedarfsgesteuert anzuliefern. Das zweite Konzept ist ein verbrauchsgetriebener Materialabruf, der automatisiert auf Basis eines Mindestbestandes auslöst. Zum Transport zwischen den Werken wird ein Transportsystem eingesetzt, welches die Bedarfe untertägig bedient. Die Anlieferkonzepte wurden für das gesamte Hausteil-Spektrum des Karosseriebaus der beteiligten Werke realisiert. Betrachtungsgegenstand des Automobilherstellers war ein standardmäßiges Aluminium-Karosseriebauteil mit einem Gewicht von 1,19 kg (vgl. Abbildung 4-21). Das Bauteil wird in Regensburg produziert und findet unter anderem im Werk München Verwendung. Im Spezialbehälter des Unternehmens lassen sich 250 Karosseriebauteile unterbringen. Der Behälter hat ein Eigengewicht von 90 kg. Mit dem bedarfsgesteuerten Anlieferkonzept kam es zu 150 Anlieferungen im Jahr. Die Lieferungen wurden mit einem 40 Tonnen-Sattelzug transportiert. Im bedarfsgesteuerten Anlieferkonzept wurde eine Auslastung der Lkw von 80 Prozent erreicht. Das gesamte Frachtgewicht des ersten Konzepts entsprach 24,8 Tonnen je Lkw-Transport. Der verwendete Treibstoff der Lkw-Flotte ist Dieselkraftstoff mit 6,75 Prozent Biodieselanteil. Für die Strecke zwischen Regensburg und München mit einer Länge von 125 km hatte der Lkw einen Verbrauch von 62 Litern. Leerfahrten wurden nicht berücksichtigt, da der Lkw in München dazu genutzt wurde, um andere Bauteile nach Regensburg zu transportieren. Im Gegensatz dazu kam es bei dem verbrauchsgesteuerten Anlieferkonzepten zu 196 Anlieferungen im Jahr. Die Lieferungen dieser Transportdienstleistungen erfolgten ebenfalls mit einem 40 Tonnen-Sattelzug. Im verbrauchsgesteuerten Anlieferkonzept konnte

aufgrund des unregelmäßigen Abrufs lediglich ein Auslastungsgrad von 55 Prozent der Lkw erreicht werden. Das gesamte Frachtgewicht des zweiten Konzepts entsprach 18,9 Tonnen je Lkw-Transport. Der verwendete Treibstoff war ebenfalls Dieselkraftstoff mit einem Volumenanteil von 6,75 Prozent Biodiesel.

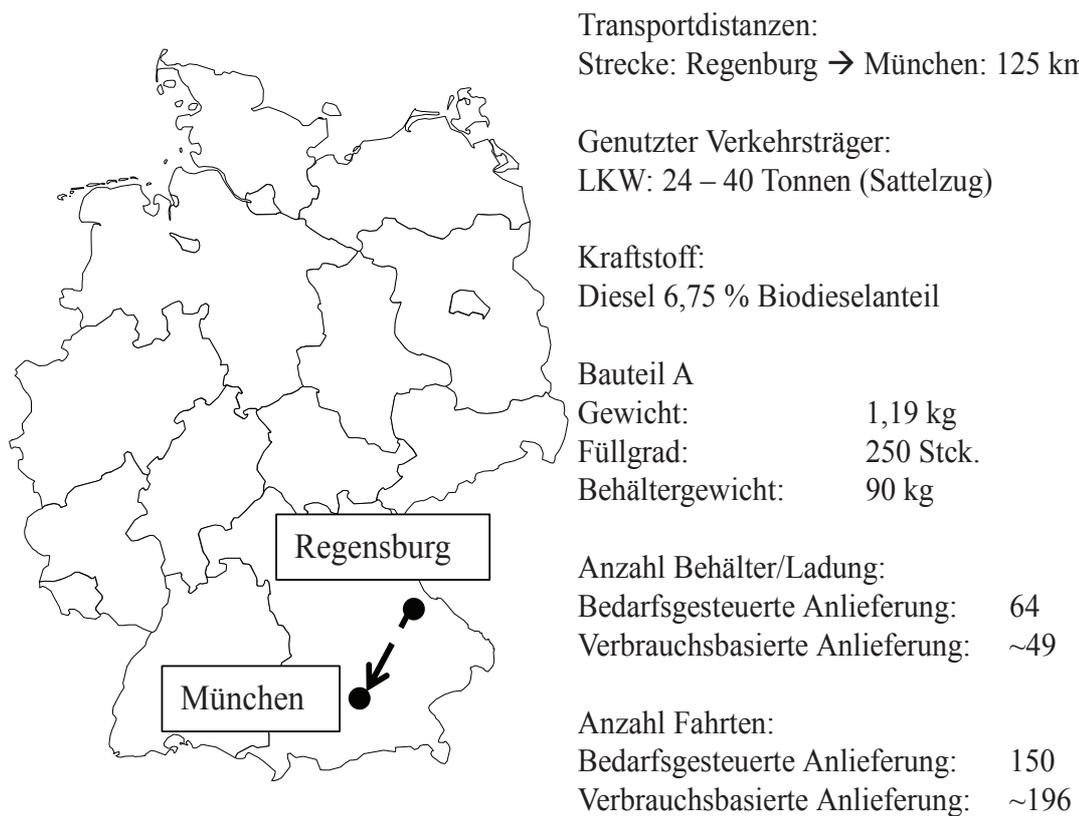


Abbildung 4-21: Szenario-Beschreibung von Fallstudie 6

Aufgrund der geringeren Zuladung des Lkw wurde für die Strecke zwischen Regensburg und München lediglich 53,3 Liter Kraftstoff verbraucht. Bei der Bewertung der Anlieferkonzepte betrachtete das Unternehmen mehrere Dimensionen. Neben der Darstellung von ökologischen Messgrößen wie den Treibhausgasemissionen bewertete das Unternehmen weitere quantitative Faktoren wie Personal-, Risiko-, Lagerbestands- und Fehlmengekosten. Abbildung 4-22 widmet sich der Darstellung der

Ergebnisse des CO2-Footprints. Die reine Transportleistung der beiden Anlieferkonzepte ist ähnlich aufgrund desselben Transportgewichts auf der gleichen Strecke. Mit Hilfe des CO2-Footprint-Rechners konnte dargelegt werden, dass das bedarfsgesteuerte Anlieferkonzept jährlich Well-to-Wheel-Emissionen in Höhe von 29,3 Tonnen CO₂e und Tank-to-Wheel-Emissionen in Höhe von 23,1 Tonnen CO₂e emittierte. Im Gegensatz dazu wurden bei dem verbrauchsbasierten Anlieferkonzept 32,9 Tonnen bei den Well-to-Wheel-Emissionen und 26,0 Tonnen Tank-to-Wheel-Emissionen ausgestoßen. Die Zahlen bedeuten einen Zuwachs von 12,6 Prozent bei den direkten Emissionen und eine Steigerung von 12,9 Prozent bei den Gesamtemissionen, die auch die Bereitstellung des Kraftstoffes berücksichtigen.

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Bedarfsgesteuerte Anlieferung	465.000 tkm	29.250 kg CO ₂ e	23.100 kg CO ₂ e
Verbrauchsbasierte Anlieferung	465.108 tkm	32.928 kg CO ₂ e	26.068 kg CO ₂ e
Differenz	0,1 %	+12,6 %	+12,9 %

Abbildung 4-22: Jährliche Transportleistung und -Emissionen

Die Ergebnisse des CO2-Footprint-Rechners belegten dem Unternehmen, dass neben einem Mehrverbrauch von Kraftstoff und damit einer Steigerung der Logistikkosten auch die ökologischen Auswirkungen zunahmen. Der CO2-Footprint des verbrauchsbasierten Anlieferkonzepts war wesentlich größer als das des bedarfsgesteuerten Anlieferkonzepts, obwohl sich die Transportleistung nicht veränderte. Aus Sicht des CO2-

Footprints ist daher das bedarfsgesteuerte Anlieferkonzept das ökologisch zu favorisierende.

7. Maschinenbau (Vertrieb): In der folgenden Fallstudie ist ein Anlagenproduzent aus Eppingen im Nordwesten Baden-Württembergs Gegenstand der Betrachtung. Im Unternehmen werden Produktionsanlagen für die Automobil- und Automobilzulieferindustrie sowie die Holzplattenindustrie hergestellt. Zentrale Herausforderung an die Transporte des Unternehmens ist die Größe der Anlagen und der logistische Aufwand, der damit verbunden ist. So können die Anlagen in aller Regel nicht in einem Stück transportiert werden. Insbesondere bei nicht zeitkritischen Transporten versucht das Unternehmen durch multimodalen Transportmitteleinsatz sowohl CO₂-Emissionen zu reduzieren als auch Kosten zu sparen. In dem der Betrachtung zugrundeliegenden Fall soll eine Produktionsanlage für Holzfaserverplatten nach Rotterdam geliefert werden, von wo aus sie weiter verschifft werden soll. In diesem Beispiel soll die CO₂-Footprint-Berechnung jedoch ausschließlich den Transport bis zum Hafen abbilden. Im konkreten Anwendungsfall wurde die Anlage zunächst auf 6 Lkw verteilt und mit speziellen Lademitteln gesichert. Die Anlage wird so in 6 Einfahrten a 45 km zum multimodalen Verkehrsterminal Wörth transportiert. Die Rückfahrten von Wörth zum Produktionsstandort in Eppingen stellen Leerfahrten dar (vgl. Abbildung 4-23). Im multimodalen Terminal in Wörth wird die Anlage schließlich auf 6 Container zum Transport auf dem Binnenschiff umgeschlagen. Die Transportstrecke von Wörth nach Rotterdam auf dem Rhein beläuft sich auf 640 km. Im Seehafen Rotterdam können die Container für den Überseetransport auf große Containerschiffe verladen werden. Es entstehen keine

Leerfahrten, da externe Dienstleister eingesetzt werden und die Binnenschifffahrt in Rotterdam beim Weitertransport von in Rotterdamer Hafen eintreffenden Ladungsaufkommen eine wichtige Rolle einnimmt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass auf dem Rückweg weitere Transporte übernommen werden. In Summe beläuft sich die Transportleistung beim untersuchten Fall eines multimodalen Transportes auf 33.936 tkm.

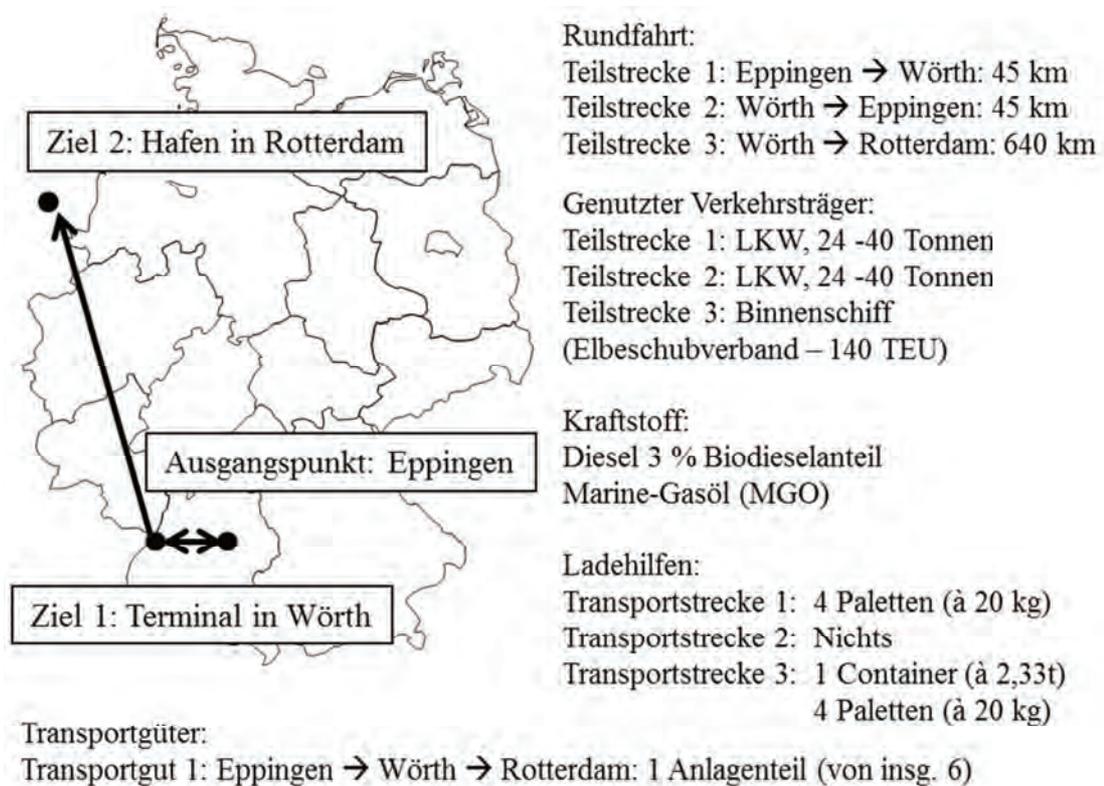


Abbildung 4-23: Ausgangssituation für Fallstudie 7

Hierbei sind sowohl die 6 Lkw Fahrten inklusive der darauf zuzurechnenden Leerfahrten, als auch die anteilige Transportleistung des Binnenschifftransports berücksichtigt. Hierbei wurden in der erweiterten Betrachtung 1.560 kg CO₂e, in der engeren Betrachtung 1.284 kg CO₂e emittiert. Bisher hat das Unternehmen ähnliche Transporte unter ausschließlicher Nutzung des

Straßenverkehrs durchgeführt. In diesem Fall wurde der Transport von einem Spediteur ab Eppingen auf Lkw bis nach Rotterdam transportiert. Die Berechnung ergibt für diesen Fall eine Transportleistung von 19.590 tkm. Dies ist zum einen auf die kürzere Transportstrecke auf der Straße von nur 537 km im Vergleich zu 640 km auf dem Rhein zu erklären. Zusätzlich fällt beim Binnenschifftransport durch die Container zusätzliches Gewicht an. Aufgrund der höheren Emissionen pro Tonnenkilometer fallen im reinen Straßentransport dennoch mit 2.040 kg CO₂e (+23,5 Prozent) in der erweiterten und 1.650 kg CO₂e (+22,2 Prozent) in der engeren Betrachtung, im Vergleich zum Multimodaltransport deutlich höhere Treibhausgasemissionen an. Auch in diesem Fall wurde davon ausgegangen, dass der Spediteur in Rotterdam einen Folgeauftrag hat. Es wurden daher keine Leerfahrten zugeschlagen. (vgl. Abbildung 4-24).

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Case Multimodal	33.936 tkm	1.560 kg CO ₂ e	1.284 kg CO ₂ e
Case LKW	19.590 tkm	2.040 kg CO ₂ e	1.650 kg CO ₂ e
Differenz	+42,3%	- 23,5%	- 22,2%

Abbildung 4-24: Emissionen aus Fallstudie 7

8. Maschinenbau (Beschaffung): Bei dem betrachteten Unternehmen in der nächsten Fallstudie handelt es sich um einen Hersteller für Elektrowerkzeuge. Das Unternehmen mit Hauptsitz in der Nähe von Stuttgart vertreibt seine Produkte weltweit. Um die Wettbewerbsfähigkeit trotz der im Vergleich zum Weltmarkt hohen Produktionskosten gewährleisten zu können,

werden höchste Maßstäbe an die Qualität gesetzt. Dies schließt neben einer hohen Produktqualität ebenfalls die schnelle Verfügbarkeit der Produkte und einen hohen Servicegrad mit ein. Um dies gewährleisten zu können muss das Unternehmen über geeignete Distributionsstrukturen verfügen. Ziel ist es dabei einen möglichst hohen Lieferbereitschaftsgrad unter Berücksichtigung von möglichst geringen Lager- und Transportkosten zu erreichen. Zu diesem Zweck wurde in der Nähe des Seehafens in Bremerhaven ein Distributionshub eingerichtet (vgl. Abbildung 4-25).

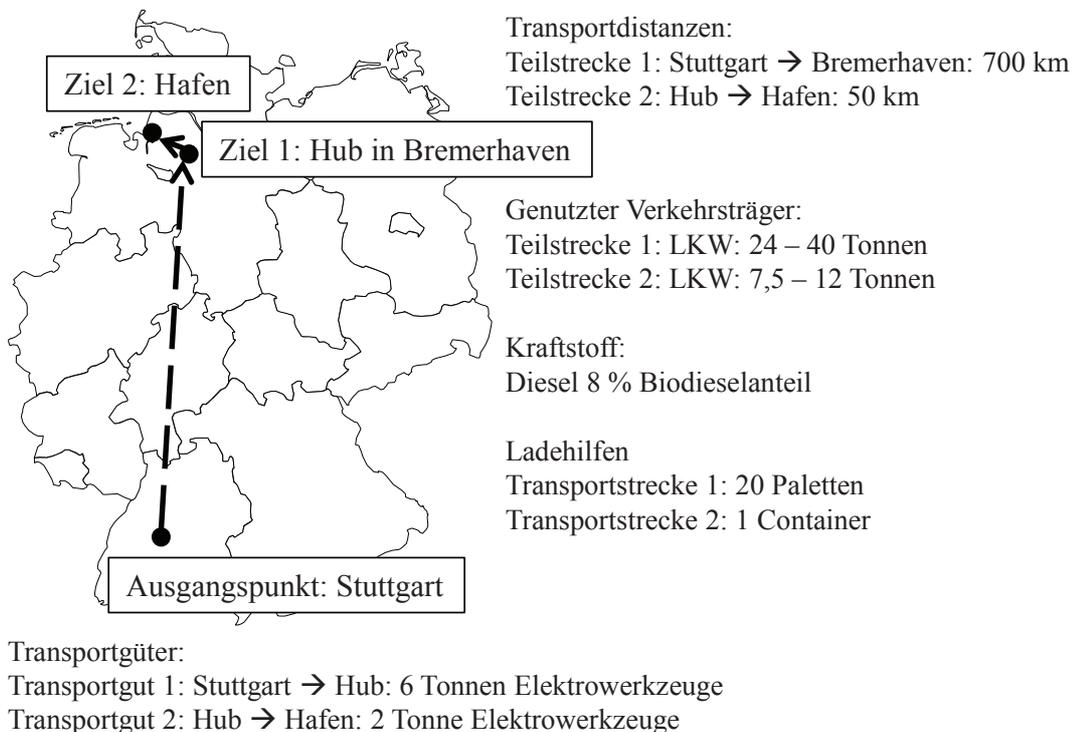


Abbildung 4-25: Ausgangssituation für Fallstudie 8

Über diesen Hub können Kunden in Übersee schnell und effizient mit neuen Produkten versorgt werden. Dort werden Sendungen vorkonfektioniert und in Container verladen, um eine schnelle und unkomplizierte Verladung im Hafen gewährleisten zu können. Ziel sind dabei nicht nur die großen Seeschiffe, sondern ebenfalls Feederverkehre in den Ostseeraum sowie in die

anderen großen europäischen Häfen wie Hamburg, Antwerpen und Rotterdam. Um Skaleneffekte bei möglichst hoher Flexibilität und Geschwindigkeit realisieren zu können, werden die Waren aus der Stuttgarter Region zumeist mit möglichst großen Lkw transportiert. Zu diesem Zweck werden Speditionen und Fuhrunternehmen beschäftigt. Einzelcontainer werden dann vom Hub auf das Hafengelände mit einem Firmeneigenen Lkw transportiert. Die transportierten Güter in dem betrachteten Fall sind hochwertige Elektrowerkzeuge. Für die Strecke im Sattelzug sind die Palettenvarianten individualisiert, also genau auf das Ladegut und den Transportwagen abgestimmt und gewährleisten so eine optimale Flächennutzung. Die Fracht wird im Hub umschlagen und in Einzelcontainer verladen. Diese werden dann separat voneinander zum Hafen gebracht, um von dort aus zu den jeweiligen unterschiedlichen Destinationen verschifft zu werden. In diesem Anwendungsfall konzentriert sich die CO2-Footprint-Berechnung auf den innerdeutschen Transport. Der Seeweg wird nicht weiter berücksichtigt. Die Güter werden zunächst mit einem Sattelzug von der Produktion im Raum Stuttgart zum Distributionshub für Nordeuropa und den interkontinentalen Absatz mit einem Sattelzug transportiert. Hier beträgt die Transportdistanz ca. 700 km. Es kommt zu keiner Leerfahrt, da ein externer Dienstleister beauftragt wird und dieser andere Güter aus dem Norden Deutschlands wieder in den Süden transportiert. Dort werden die Güter konfektioniert sowie fertig verpackt und sind daher als Volumengut zu interpretieren. Die Container mit den vorkonfektionierten Waren werden dann einzeln per Lkw vom Hub in den Hafen gebracht. Für eine Fahrt vom Hub zu Hafen werden pro Strecke 50 km veranschlagt. Eine Leerfahrt pro Transport wird fällig. Der Lkw

kommt leer vom Hafen zurück zum Hub bzw. transportiert einen leeren Container dort hin. Die Ergebnisse von Berechnung und Allokation sind in Abbildung 4-26 dargestellt. Wie erwartet ist der logistische CO₂-Footprint bei der ersten Teilstrecke viel größer als bei der zweiten. Allerdings zeigen sich eindeutig die Skaleneffekte, welche bei der Nutzung eines größeren Verkehrsträgers entstehen. Im vorliegenden Fall emittiert der Sattelzug pro Tonnenkilometer Transportleistung über 60 Prozent weniger CO₂ als der kleinere Firmen-Lkw. Dies liegt jedoch auch daran, dass im zweiten Transportabschnitt eine Leerfahrt zu berücksichtigen ist und die Transportgüter vorher im Distributionshub verpackt wurden und somit für ein nahezu gleiches Gewicht mehr Platz im Container benötigen. Insgesamt werden bei einer Transportleistung von 4538 Tonnenkilometern in der erweiterten Betrachtung 792 kg CO₂ emittiert, in der engen 622 kg.

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Teilstrecke 1	4480 tkm	767 kg CO ₂ e	603 kg CO ₂ e
Teilstrecke 2	58 tkm	25 kg CO ₂ e	20 kg CO ₂ e
Gesamt	4538 tkm	792 kg CO ₂ e	622 kg CO ₂ e

Abbildung 4-26: Emissionen in Fallstudie 8

9. Maschinenbau (Vertrieb): Bei dem in Fallstudie neun untersuchten Unternehmen handelt es sich um einen mittelständischen Maschinenbauer mit Sitz in Duisburg. Das Unternehmen ist nach mehreren Expansionen europaweit tätig. Es befindet sich in einer weiteren Expansionsphase und möchte neue europäische Märkte erschließen. Zurzeit beschäftigt das Unterneh-

men ca. 1000 Mitarbeiter in Duisburg und weitere 200 Mitarbeiter in weiteren bereits bestehenden Niederlassungen. Bislang wurden logistische Entscheidungen fast ausschließlich fremdvergeben. Das Unternehmen arbeitete mit einer Vielzahl von Speditionen und Logistikdienstleistern zusammen. Jedoch führte eine mangelnde Kostentransparenz zu der Notwendigkeit, bestehende Logistikkonzepte zu überarbeiten und zu dem Wunsch strategische Logistikkentscheidungen fortan selbst zu treffen. Vor dem Hintergrund der steigenden Energiekosten und einer ökologischen Neuausrichtung der Geschäftspolitik wird das Binnenschiff als Verkehrsträger zunehmend interessanter. Duisburg hat den größten Binnenhafen Europas. Über den Rhein als wichtigste Wasserstraße in Europa können alle wichtigen Märkte bedient werden. Sogar Transporte nach Rotterdam und somit der weltweite Warenexport sind denkbar. Durch die Überarbeitung der Logistikprozesse sollen die Kostentransparenz erhöht und Einsparpotenziale voll ausgeschöpft werden. Zudem ergibt sich durch die Nutzung von Binnenschiffen als primärer Verkehrsträger eine höhere Umweltverträglichkeit der Transportleistungen. Auch sollen Möglichkeiten gefunden werden einen Teil des Distributionslagers in die Distributionskanäle zu verlegen, um Lagerkosten zu sparen. Bei den transportierten Gütern im vorliegenden Fall handelt es sich um Maschinenteile einer Spezialanfertigung für einen Kunden in der Rhein-Main-Region. Die Maschinenteile werden in insgesamt drei Container verladen und rheinaufwärts transportiert. Hierzu wird ein Binnenschiff der Jowi-Klasse genutzt. Es kann etwa 450 Standardcontainer transportieren und ist für die Fahrt nahezu ausgelastet. Da das Schiff zu einer Reederei gehört und von Mainz aus weiterfährt, muss keine Leerfahrt allokiert werden.

Im vorliegenden Szenario wird von einer Transportentfernung von rund 270 km ausgegangen. Zudem werden Zwischenstopps in weiteren Häfen auf dem Weg von Duisburg nach Mainz vernachlässigt. Es wird von einer konstanten Auslastung des Schiffs während des Transports ausgegangen. Aufgrund der Verteilung der Transportgüter auf Container entfällt die Berechnung der Transportleistung in Tonnenkilometern. Sie wird durch eine Angabe der Transportleistung in TEU-Kilometern substituiert,



Abbildung 4-27: Ausgangssituation in Fallstudie 9

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Teilstrecke 1	810 TEU-km	55 kg CO ₂ e	46 kg CO ₂ e
Gesamt	810 TEU-km	55 kg CO ₂ e	46 kg CO ₂ e

Abbildung 4-28: Emissionen in Fallstudie 9

also die Anzahl an transportierten Containern mit der Anzahl an gefahrenen Kilometern multipliziert. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 4-28 dargestellt. Auffällig sind die geringen CO₂-Emissionen für diese spezifische Lieferung. Diese ergeben sich aus dem Umstand, dass Binnenschiffe generell einen CO₂-günstigen Verkehrsträger darstellen sowie der Tatsache, dass lediglich drei Container von etwa 450 Standardcontainern an Bord zu dieser spezifischen Lieferung gehören und somit die Allokationsbedingungen sehr günstig sind. Insgesamt zeigt die vorliegende Fallstudie die Vorteile, welche sich aus der Nutzung alternativer Verkehrsträger zum Straßentransport hinsichtlich des CO₂-Footprints ergeben können. Diese Vorteile werden jedoch durch Nachteile hinsichtlich Flexibilität und Geschwindigkeit erkaufte. Weder ist ein Binnenschiff in der Lage eine Versorgung auf der letzten Meile zu gewährleisten, noch kann es von der Transportgeschwindigkeit mit dem Lkw konkurrieren. Hinzu kommt, dass viele Regionen Europas gar nicht mit dem Schiff zu erreichen sind oder große Umwege in Kauf genommen werden müssen. Diese Art von Transporten eignet sich also typischerweise nur für bestimmte Szenarien.

10. Maschinenbau (Vertrieb): Das betrachtete Unternehmen aus Fallstudie 10 ist ein Anlagen- und Maschinenbauer aus Krefeld. Das Unternehmen ist ein Konzernverbund aus 23 Unternehmen mit den drei Geschäftsbereichen Maschinen- und Anlagenbau, Nukleartechnik und Gußtechnik. Es operiert weltweit und erwirtschaftete im vergangenen Geschäftsjahr mit seinen knapp 3.000 Mitarbeitern über 500 Mio. Euro. Der Fachbereich Maschinen- und Anlagenbau, welches der größte Geschäftsbereich des Unternehmens ist, hat sich auf die Fertigung von Maschinen zur Produktion von plattenförmigen

Werkstoffen und Anlagen zur Oberflächenvergütung spezialisiert. Das mittelständische Unternehmen hat in den Spezialbereichen weltweite Marktanteile von bis zu 60 Prozent und ist in einigen Segmenten Weltmarktführer. Der Vertrieb in aufstrebende Märkte Asiens und Osteuropas hat für das Unternehmen seit mehreren Jahren einen hohen Stellenwert. Die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens hängt von der Effizienz der Logistikkette ab. Die Kunden legen dabei nicht nur Wert auf niedrige Kosten für die Bereitstellung der Anlagen sondern vermehrt auch auf eine nachhaltige Beschaffungsstrategie. Die Automobilindustrie ist eine der wichtigsten Branchen in der Metropole Chennai in Indien. Dort spielt auch die Nutzfahrzeugindustrie eine wichtige Rolle. Der Maschinen- und Anlagenbauer lieferte einem Nutzfahrzeughersteller in Chennai im vergangenen Jahr eine Produktionsanlage bestehend aus mehreren Pressen, die seitdem die Fahrzeugkarosserie in Form bringen. Hierfür schickte das Unternehmen die Anlagen in dreißig 20-Fuß-Containern mittels Containerschiff von Hamburg nach Chennai (vgl. Abbildung 4-29). Die Seeroute führte durch das Mittelmeer und den Suezkanal und querte dann den Indischen Ozean. Die Transportstrecke von Hamburg nach Chennai beträgt 13.460 km. Das Containerschiff benötigte 21 Tage für den Transport der Fracht bis nach Indien. Das Gesamtgewicht der Produktionsanlage betrug 720 Tonnen, wobei das Containerschiff eine maximale Zuladung von 7000 TEU aufweist. Das Transport-Szenario wurde mit Hilfe des CO2-Footprint-Rechners bewertet und dokumentiert. Das Unternehmen erhielt eine transparente Darstellung der ökologischen Auswirkungen, die bei der logistischen Bereitstellung der Produktionsanlage anfielen. Dabei dienen die gewonnen Ergebnisse als Entschei-

dungsgrundlage für zukünftige Expansionsentscheidungen. Neben den harten Fakten zur Transportleistung und -kosten werden die ökologischen Größen berücksichtigt und als Entscheidungsgrundlage für zukünftige Standortentscheidungen des Unternehmens zur Hilfe genommen. Das Unternehmen möchte aus den gewonnenen Erkenntnissen den Standort für den Bau großer Anlagen in Zukunft genauer abwägen und dabei möglichst alle Einflussgrößen berücksichtigen und transparent darstellen.

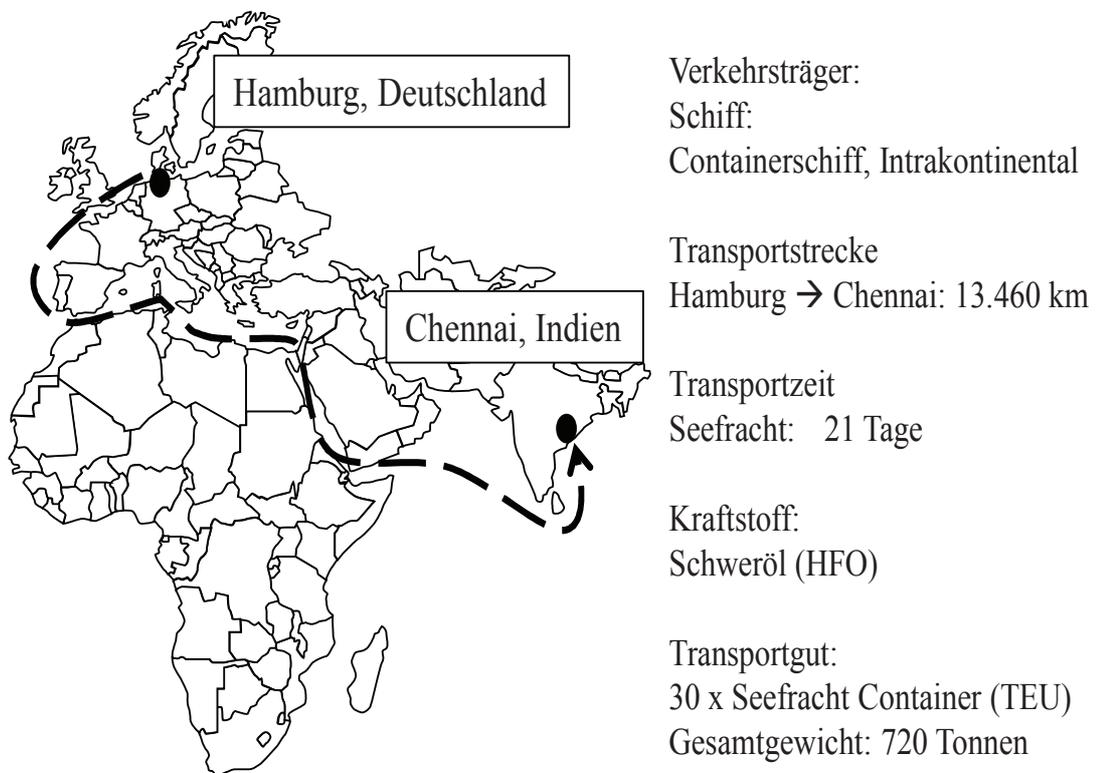


Abbildung 4-29: Szenario-Beschreibung für Fallbeispiel 10

	Transportleistung	Well-to-Wheel-Emissionen	Tank-to-Wheel-Emissionen
Seefracht	9,7 Mio. tkm	63,3 t CO ₂ e	58,5 t CO ₂ e

Abbildung 4-30: Transportleistung und Treibhausgas-Emissionen des Transports nach Indien

Die Überlegungen des Unternehmens gehen dahin, Produktionsanlagen dieser Größe, direkt vor Ort herzustellen. Der CO₂-

Footprint-Rechner lieferte dem Unternehmen geeignete Kennzahlen um die ökologischen Auswirkungen des Logistikprojekts der Produktionsanlage realistisch darzustellen. Abbildung 4-30 stellt die wichtigsten Ergebnisgrößen der Fallstudie, die mit Hilfe des CO2-Footprint-Rechners gewonnen wurden dar. Für die gesamte Produktionsanlage wurde eine Transportleistung von 9,7 Mio Tonnenkilometern aufgewendet. Dabei kam es zu gesamten Emissionen in Höhe von 63,3 Tonnen CO₂e. Well-to-Wheel-Emissionen berücksichtigen neben den direkten Emissionen auch solche Abgase, die bei der Bereitstellung des Kraftstoffs entstehen. Tank-to-Wheel-Emission hingegen berücksichtigen lediglich die CO₂-Emissionen, die beim Transport auf dem Containerschiff entstanden sind. Diese Emissionen sind bei dem Transport der Produktionsanlage für den Nutzfahrzeughersteller in Höhe von 58,5 Tonnen CO₂e angefallen.

4.6 Lessons Learned

Die Fallstudien haben gezeigt, dass CO₂-Emissionen bei der Bereitstellung von Energie und der Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen. Bezogen auf die CO₂-Emissionen in der Logistik korrelieren sie linear mit dem Energieverbrauch und hängen stark von der Art des Energieträgers ab. Aufgrund des Übergewichts der durch den Transport verursachten CO₂-Emissionen steht die Berechnung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen im Gütertransport im Mittelpunkt der CO₂-Reduzierung in der Logistik. Anhand der durchgeführten Untersuchungen zur Entstehung von CO₂-Emissionen in der Logistikkette, konnte die Entstehung von CO₂-Emissionen sys-

tematisiert werden, welche Unternehmen einen Überblick über die Haupttreiber des CO₂-Ausstoßes in den einzelnen Logistikabschnitten bietet. Das strukturierte Bewertungsmodell liefert Unternehmen Aussagen über die CO₂-Emissionen und Energieverbräuche der eigenen Logistikkette. Mittels Szenarioanalyse konnten die teilnehmenden Unternehmen alternative Routen und Transportmodalitäten simulieren, um unter den gegebenen Restriktionen einen CO₂-effizienten Transport zu erreichen. Mit Hilfe des Bewertungsmodells konnten sie außerdem die Potenziale zur Reduzierung von CO₂-Emissionen ihrer Logistikkette abschätzen. Die gewonnene Transparenz half den Unternehmen mit gezielten CO₂-Reduzierungsmaßnahmen ihren CO₂-Footprint zu minimieren. Dabei sind die Maßnahmen an die Gestaltungsfelder der Beschaffungs-, Produktions-, Distributions-, Entsorgungs-, Rückführungs-, Handels-, City-Logistik sowie die der Logistik der „letzten Meile“ anzupassen. In den Fallstudien wird ersichtlich, dass eine Optimierung der Logistik und damit eine Reduzierung der CO₂-Emissionen anhand von drei Ansätzen verfolgt werden kann. Hierzu gehören die Verbesserung der Logistikstrukturen und Optimierung der Logistikprozesse sowie ein nachhaltiges Logistikkonzept. Logistikstrukturen können verbessert werden, indem Logistikdienstleister mit eingebunden werden. Da sie Spezialisten auf ihrem Fachgebiet sind haben sie weitreichende Kontakte zu Betreibern von Infrastruktureinrichtungen im Straßen-, Schienen-, Luftfracht- und Seeverkehr. Dadurch können sie auf Strukturen zurückgreifen, die einen Warenumschlag oder eine Kommissionierung wirtschaftlich ermöglichen. Ein weiterer Punkt zur Verbesserung der Logistikstruktur ist die Schaffung eines Logistik-Verbunds mit Wettbewerbern oder Lieferanten, die den-

selben Beschaffungs- oder Absatzmarkt bedienen. Durch den Zusammenschluss können aufgrund von Skaleneffekten größere Logistikstrukturen aufgebaut werden. Die Fallstudien haben auch gezeigt, dass eine CO2-Footprint-Optimierung Maßnahmen umfasst, die das Ziel haben, Logistikprozesse nachhaltiger und damit umweltverträglicher zu gestalten. Die Prozessoptimierung geht häufig mit der ökonomischen Kostenreduzierung einher. Ein Beispiel ist die Verpackungsoptimierung. Hierbei wird weniger Verpackungsmaterial verbraucht, was zum einen zur Konsequenz hat, dass das Verpackungsvolumen sinkt und zum anderen die Transportkapazitäten besser ausgenutzt werden können. Eine weitere Logistikprozessoptimierungsmaßnahme ist die Erzielung von Skaleneffekten durch die Bündelung von Transporten. Dies kann auch unter Zuhilfenahme eines Transportdienstleisters geschehen, wenn die eigenen Transportvolumen nicht ausreichend sind. Vorteil dieser Transportkonsolidierung ist, dass Transportdienstleister hierdurch oftmals im Stande sind Linienverkehre oder Sammeltouren aufzustellen, die einen höheren Auslastungsgrad ermöglichen. Wie aus den Fallstudien eindeutig hervorgegangen ist, hängt der CO2-Footprint einerseits von der Transportleistung, aber auch von dem Transportmittel ab. Die Einflussgröße, die jedoch die Effizienz des Prozesses darstellt ist der Auslastungsgrad. Hohe Auslastungsgrade bewirkten in den beschriebenen Fallstudien eine hohe CO2-Footprint-Reduzierung. Neben den Auslastungsgraden beschreibt der Anteil an Leerfahrten die Effizienz der durchgeführten Logistikprozesse. Leerfahrten dienen nicht der Bereitstellung von Ressourcen oder Gütern und sind daher zu vermeiden. Durch die in den Fallstudien beschriebene Allokation werden Leerfahrten auf den Transport der tatsächlich

versendeten Güter aufsummiert. Kritische Überlegung eines jeden Optimierungsansatzes sollte jedoch sein, die Notwendigkeit des Prozesses an sich zu bewerten. Die Vermeidung von unnötigen Transporten stellt die effizienteste Optimierungsmaßnahme dar. Eine weitere Maßnahme zur Optimierung der Logistikprozesse stellt der Einsatz alternativer Transportmittel oder intermodaler Transportmittel dar. Ziel sollte es sein, Transporte von der Straße auf die Schiene zu verlagern. Aufgrund des wesentlich geringeren Schadstoffausstoßes von Güterzügen bedeutet dies eine erhebliche Verminderung der Transportemissionen. Wie eine weitere Fallstudie darlegte, sollten Flugfrachtverkehre möglichst vermieden werden, da die Emissionen um ein Vielfaches ansteigen. Flugfrachtverkehre sollten nur in äußerst zeitkritischen Logistikprozessen verwendet werden. Im Zuge technischer Entwicklungen werden in Zukunft auch alternative Transportmittel wie elektrische Nutzfahrzeuge weiter in den Betrachtungsfokus rücken. Als dritter Gestaltungsbereich lassen sich die Logistikkonzepte definieren. Wie aus den Fallstudien hervorgeht, ist die Unternehmensstrategie zur konzeptionellen Auslegung der Logistik von entscheidender Bedeutung für die ökologischen Auswirkungen. So ist zum Beispiel die Definition von zeitkritisch eine Perspektive der Unternehmensführung. In einem Fallbeispiel bewirkte die kurzfristige Berücksichtigung eines Kundenwunsches die Auftragsänderung einer längerfristig ausgelegten Logistikkette. Hier gilt es abzuwägen inwiefern Kundenwünsche nicht nur ökonomisch sondern auch ökologisch sinnvoll zu bedienen sind. Eine weitere Optimierungsmaßnahme, die auf oberster Unternehmensebene entschieden werden muss, ist die Berücksichtigung logistischer Eigenschaften in der Produktentwicklung. Eine frühzeitige Einbindung in

die Entwicklung ermöglicht eine kompatible Auslegung der Geometrie zu Standardmaßen in der Logistik und eine entsprechende Gestaltung von Transportverpackungen. Eine weitere Möglichkeit zur CO2-Footprint-Optimierung von Logistikkonzepten bietet die Reduzierung von Transportmengen durch Anpassung der Beschaffungsstrategie oder eine Entschleunigung der Belieferungsfrequenz. Dies sind beides Maßnahmen die in der strategischen Beschaffung definiert werden müssen. Die Fallstudien zeigten, dass eine Beschaffung auf Vorrat und eine lokale Produktion oder Bereitstellung ökologisch sinnvoller sind. Letztlich haben die Fallstudien den Unternehmen vor allem eines deutlich gemacht: Mit Hilfe des CO2-Footprint-Rechners waren die Unternehmen im Stande die eigenen Umwelteinflüsse zu bilanzieren und damit die Auswirkungen der Logistik transparent darzustellen. Den Unternehmen wird hiermit eine Möglichkeit gegeben nicht nur ökonomische Einflussgrößen ihrer Transportprozesse zu messen sondern auch ökologische. Gerade vor dem Hintergrund der Globalisierung und der Frage nach dem richtigen Produktionsstandort sind diese Informationen eine wichtige Grundlage für die Entscheidungsfähigkeit der Unternehmensführung. Erst auf Grundlage von richtigen und detaillierten Informationen lassen sich nachhaltige und damit wettbewerbsfähige Entscheidungen treffen.

5 Strategien zur CO₂-Reduzierung in der Logistik

Um die CO₂-Emissionen in der Logistik zu reduzieren, sind Ansätze aus den Bereichen Fahrzeuge und Antriebe, Transport- und Lieferkonzepte, Informationsvernetzung sowie CO₂-Kompensation zu analysieren und hinsichtlich ihres Beitrags zur Senkung des CO₂-Ausstoßes zu bewerten.

5.1 Einführung rollwiderstandsarmer Reifen

Der straßengebundene Landverkehr muss Maßnahmen zur Steigerung der ökologischen Effizienz treffen, auch um im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern nicht zurück zu fallen. Im vergangenen Jahrzehnt konnte der CO₂-Ausstoß des Nutzfahrzeugsektors bei steigender Fahrleistung bereits konstant gehalten werden. Zu einer weiteren Reduzierung der CO₂-Emissionen stehen insbesondere Fahrwiderstände im Fokus. Hierbei spielt der Rollwiderstand der Reifen eine wesentliche Rolle. Den zentralen Ansatzpunkt zur Reduzierung dieses Fahrwiderstands bildet die Bereifung eines Nutzfahrzeugs. Reifen können somit zur Senkung der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen beitragen. Dadurch kann die Transportbranche gesetzliche und gesellschaftliche Anforderungen erfüllen und bleibt weiterhin wettbewerbsfähig. Bei Nutzfahrzeugen gehen auf einer repräsentativen Fahrstrecke durchschnittlich 70 Prozent der eingesetzten Energie durch Reibungs- und Wärmeverluste verloren (vgl. Wildhagen et al. 2011). Luft- und Rollwiderstand tragen zu diesen Verlusten mit 30 Prozent bei. Insgesamt beträgt der Anteil des Reifenrollwiderstands am Gesamtfahrwiderstand im Fernverkehr bei einer Sattelzugmaschine mit

Dreiachsaufleger 35 Prozent bis 40 Prozent (vgl. Lehmann 2011). Der Rollwiderstand ist derjenige Fahrwiderstand, den Fahrbahn und Reifen der Fahrbewegung entgegensetzen. Er berechnet sich aus dem Rollwiderstandsbeiwert multipliziert mit der Normalkraft. Hauptsächlich wird er durch die Fahrbahnverformung, die Walkarbeit des Reifens sowie durch die Reibung zwischen Fahrbahn und Reifen infolge minimaler Verschiebungen des Reifenprofils auf der Fahrbahn hervorgerufen. Ursache für den Rollwiderstand sind die viskoelastischen Materialeigenschaften des Reifens. Bei jeder Verformung und Reibung des Reifens auf der Fahrbahn entsteht Wärme, die an die Umwelt verloren geht. Der größte Anteil des Rollwiderstands bei Reifen entfällt zu fast 60 Prozent auf den Laufstreifen. Reifenwulst und Reifengürtel sind für bis zu 22 Prozent beziehungsweise bis zu 12 Prozent des Rollwiderstands verantwortlich. Der Rollwiderstand verteilt sich nicht gleichmäßig auf alle Achsen eines Gespanns. Die Reifen am Trailer des Gespanns tragen etwa 60 Prozent des Rollwiderstands bei, die Antriebsachse 25 Prozent und die Lenkachse etwa 15 Prozent. Aufgrund des Reifenprofils ist der Rollwiderstand von Trailer und Lenkachsenreifen dabei geringer als der von Antriebsreifen. Durch die Reduzierung des Rollwiderstands der Reifen an den einzelnen Achsen um ein Kilogramm pro Tonne lassen sich 1,3 Liter Kraftstoff einsparen. Dies entspricht verringerten CO₂-Emissionen in Höhe von 3500 Gramm. Zur Hebung der CO₂-Einsparpotenziale müssen alle am Reifenherstellungsprozess beteiligten Unternehmen einen Beitrag leisten. Eine konstruktive Maßnahme der Reifenhersteller besteht beispielsweise in der Entwicklung von Breitreifen. Sie können anstelle von Zwillingstreifen an der Hinterachse des Gespanns verwendet werden.

So wird der Rollwiderstand reduziert, wodurch der Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen um 2 Prozent gesenkt werden können (vgl. VDA 2008). Weitere Ansatzpunkte der Reifenhersteller zur Senkung des Rollwiderstands können in der Veränderung der Laufstreifengeometrie und der Optimierung der Reifenkontur liegen. Die Kautschukhersteller leisten einen Beitrag durch die Entwicklung neuartiger rollwiderstandsreduzierender Gummimischungen wie Solution Styrene Butadien Kautschuk (Lanxess 2010). Durchschnittlich wird jede dritte Tankfüllung zur Überwindung des Rollwiderstands verbraucht. Neu auf den Markt gebrachte Reifen, die über innovative technische Eigenschaften verfügen, weisen einen um 10 Prozent geringeren Rollwiderstand als ihre Vorgängerprodukte auf. Im Fernverkehr ist der Rollwiderstand und damit der Reifen für 40 Prozent des Fahrwiderstandes verantwortlich. Damit entfallen 40 Prozent des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen auf die Reifen. Bei einem Verbrauch von 35 Litern auf 100 km und einer jährlichen Laufleistung von 200.000 km ergeben sich durch eine zehnpromzentige Reduzierung des Rollwiderstands jährliche Kraftstoffeinsparungen in Höhe von 2800 Liter. Damit können pro Fahrzeug etwa 7,4 Tonnen CO₂ im Jahr eingespart werden. Eine Spedition mit einer Flottengröße von 50 Fahrzeugen kann ihren CO₂-Ausstoß um rund 370 Tonnen reduzieren. Auch der Reifenfülldruck ist von hoher Bedeutung. Nur bei korrektem Reifendruck federt der Reifen gerade genug, um die Last zu tragen. Ist der Druck geringer, fällt die Federung stärker aus als notwendig. Dann treten stärkere Walkbewegungen auf, die den Rollwiderstand und damit den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen unnötig erhöhen. Zudem erhöht sich der Verschleiß der Reifen, was die Kilometerleistung negativ be-

einflusst. (vgl. Goodyear 2011) Ein zu niedriger Reifendruck wirkt um bis zu 8 Prozent verbrauchssteigernd. Vor dem Hintergrund, dass bis zu 30 Prozent aller Nutzfahrzeuge mit zu niedrigem Reifendruck fahren, sind die Einsparpotenziale offensichtlich (vgl. VDA 2008). Der Kraftstoffverbrauch steigt bei einem Fahrzeug mit einem um 0,6 Bar zu niedrigen Reifendruck jährlich um mehr als 700 Liter an. Bei einer Spedition mit 50 Fahrzeugen beläuft sich der Mehrverbrauch somit auf über 35000 Liter. Die damit verbundenen Umweltbelastungen durch den vermehrten Ausstoß von Treibhausgasen beläuft sich jährlich auf mehr als 93 t CO₂. Zur Vermeidung von Minderdrücken in Nfz-Reifen ist eine regelmäßige Kontrolle erforderlich. Der Fahrer kann dabei durch Reifendruckkontrollsysteme unterstützt werden. Auch falsch justierte Achsen haben einen negativen Einfluss auf den Rollwiderstand eines Lkw-Gespans. Jedes falsch justierte Rad erhöht den Energieverbrauch. Die Reibung der Reifen auf der Straße erhöht sich und damit der Kraftstoffverbrauch. Bei einer schräg versetzten Spur erhöhen sich Verbrauch und CO₂-Emissionen um bis zu 4,5 Prozent. Bei einer nicht parallel abgestimmten Spur sogar um bis zu 18,5 Prozent (vgl. Goodyear 2011). In den nächsten 10 Jahren wird der Rollwiderstand von Reifen durch Innovation und technische Weiterentwicklungen voraussichtlich um weitere 30 Prozent reduziert werden können. Die Umweltbelastung des straßengebundenen Transportverkehrs durch CO₂-Emissionen wird damit auch in Zukunft weiter verringert (vgl. Lehmann 2011). Eine Ökobilanz ermöglicht die Betrachtung der Umweltbelastung eines Nutzfahrzeugreifens über seinen gesamten Lebenszyklus. Von der Herstellung bis hin zur Verwertung können Potenziale zur Vermeidung von Umweltbelastungen

aufgedeckt werden. Die Nutzungsphase des Reifens ist für die höchsten Umweltbelastungen verantwortlich. Sie verursacht 95 Prozent der gesamten CO₂-Emissionen und 86 Prozent der gesamten Schadstoffemissionen. Im Rahmen der Herstellung der Rohmaterialien, der Produktion, dem Transport und dem Recycling des Reifens entstehen 5 Prozent der CO₂-Emissionen (vgl. Nikolin 2008). In der Phase der Rohstoffverarbeitung und Fertigung fallen 11,7 Prozent der Schadstoffemissionen an. Die verbleibenden 2,7 Prozent der Umweltbelastungen entfallen auf die Phasen Entsorgung und Transport. Somit liegen offensichtlich die größten Potenziale zur Reduzierung der Umweltauswirkungen der Reifen in der Nutzungsphase. Die beschriebenen Ansätze zur Verminderung des Rollwiderstands der Reifen haben daher große Effekte auf seine Ökobilanz. Neben CO₂ tragen Reifen während ihrer Nutzungsphase außerdem zur Emission der Schadgase SO₂ und NO_x und CH₄ bei. Durch die Verwendung von Silica und Silan in der Laufstreifenmischung anstatt von Ruß verringert sich der Rollwiderstand und die atmosphärischen Umweltwirkungen werden reduziert. Allerdings treten bei der Substitution von Ruß durch Silica während der Produktion des Reifens geringfügig erhöhte Belastungen des Abwassers auf, die jedoch gegenüber den erzielbaren Vorteilen in der Nutzungsphase vernachlässigbar sind. Auch Maßnahmen, welche die Nutzungsphase des Reifens verlängern, können zur Verbesserung der Umweltbilanz des Reifens beitragen. Dazu gehört beispielsweise das mehrmalige Nachschneiden und Runderneuern. So werden Rohstoffe eingespart und Schadstoffemissionen reduziert. In der Verwertungsphase können durch die Nutzung von Reifen zur Energiegewinnung im Rahmen der Zementerstellung oder in einem Reifenkraftwerk zusätzlich mi-

neralische oder fossile Ressourcen eingespart werden. Es gibt zwei Verfahren für die Herstellung von runderneuten Reifen, die sich bewährt haben. Bei beiden Verfahren ist Voraussetzung, dass nur ausgesuchte und geprüfte Karkassen zum Einsatz kommen. Auch der Produktionsprozess ist bei beiden Verfahren bis zum Zeitpunkt der Aufbringung des Laufstreifenmaterials und der Vulkanisation vergleichbar. Bei der Heißrunderneuerung ist die Aufbringung des Laufstreifenmaterials mit dem Herstellungsprozess eines Neureifens nahezu identisch. Qualitativ hochwertige heißrunderneuerte Lkw-Reifen werden von Wulst zu Wulst erneuert. Der wesentliche Vorteil dieses Prinzips liegt hierbei in der Erneuerung der Seitenwände, so dass die Qualität des heißrunderneuten Reifens mit der eines Neureifens vergleichbar ist (vgl. Continental 2011). Bei der Kaltrunderneuerung wird ein bereits profilierter und vorvulkanisierter Laufstreifen auf die abgeraute Karkasse aufgebracht. Dieser Laufstreifen wird zusammen mit einer unvulkanisierten Bindeplatte unter gleichbleibendem Zug auf die abgeraute Karkasse gelegt, um bereits vor der Vulkanisation eine optimale Anpassung an die Reifenkontur und eine bestmögliche Verbindung mit der Karkasse im Autoklaven zu gewährleisten (vgl. Aktrans 2011). Eine weitere Lkw-reifen-spezifische Technologie zur Optimierung der Gesamtkosten ist das Nachschneiden des Reifenprofils. Es ist eine einfache und effiziente Möglichkeit, die Kilometerleistung zwischen 25 und 30 Prozent zu erhöhen und gleichzeitig die Treibstoffkosten zu senken. Bereits bei der Herstellung des nachschneidefähigen Reifens wird eine dickere Gummischicht aufgebracht, um das Profil des Reifens später nachschneiden zu können ohne dadurch seine Festigkeit und Widerstandsfähigkeit zu beeinträchtigen. Der Reifen wird

bei einer Restprofilhöhe von zwei bis vier Millimetern nachgeschnitten. Mit einer Profilhöhe von sechs bis acht Millimetern bietet der nachgeschnittene Reifen dann zusätzlich ca. 50.000 Kilometer Fahrleistung im Autobahneinsatz. Durch das Nachschneiden werden neue, scharfe Profilkanten erzielt ohne die Festigkeit des Reifens oder die Widerstandsfähigkeit der Karkasse zu beeinträchtigen. Zusätzliche Nachschneideindikatoren, die beim Nachschneiden der Orientierung dienen, gewährleisten, dass die Karkasse unverletzt bleibt. Neben der erhöhten Laufleistung des Reifens hat die Technologie auch Auswirkung auf den Rollwiderstand des Reifens. Das Nachschneiden erfolgt in der Phase, in welcher der Rollwiderstand des Reifens am niedrigsten ist. Da sich bei einem abgenutzten Reifen das Gummiprofil weniger stark verformt, erwärmt er sich auch weniger, weist demzufolge einen niedrigeren Rollwiderstand auf und verbraucht dadurch weniger Kraftstoff. Nimmt man für einen Neureifen bei einem 40-Tonner-Sattelschlepper einen fiktiven Rollwiderstand von 100 an, besitzt ein Reifen, der bis zur Verschleißanzeige abgenutzt ist, nur noch einen Rollwiderstand von 60. Der Kraftstoffverbrauch ist dann zwischen sechs und zehn Prozent niedriger. Für einen Sattelzug im Güterfernverkehr wird durch das Nachschneiden der Reifen eine Kraftstoffsparnis von circa zwei Litern auf hundert Kilometer erreicht (vgl. o. V. 2007). Der Einsatz von rollwiderstandsarmen Reifen birgt sowohl hohe ökologische Potenziale als auch wirtschaftliche Vorteile für den Spediteur. Diese können jedoch nur umgesetzt werden, wenn die Spediteure über diese Einsparungen in detaillierter Weise informiert werden. Hierzu wurde daher im Rahmen einer Studie der Forschungsstelle ein Tool entwickelt, das eine Quantifizierung und Visualisierung der Einsparpoten-

ziale ermöglicht. Das Fleet-Tool unterstützt öffentliche und private Flottenbetreiber die ökonomischen und ökologischen Potenziale rollwiderstandsarmer Reifen für die eigene Flotte individuell zu berechnen. Das Fleet-Tool liefert ein praxisgerechtes Rechenmodell, um die Potenziale zur Senkung der CO₂-Emissionen sowie der laufenden Kosten bei der Einrüstung von rollwiderstandsarmen Reifen zu berechnen. Außerdem werden weitere Maßnahmen zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz berücksichtigt und transparent dargestellt. Entsprechend der Anforderungen der europäischen Flottenbetreiber ermöglicht das Tool dabei die Eingabe der individuellen Flotte und die Berechnung spezifischer Maßnahmen zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz der Fahrzeugflotte. Neben der Wirkung von rollwiderstandsarmen Reifen wird auch die Wirkung von Schulungen, der Spureinstellung, dem Luftdruck, der Beladung und anderen Maßnahmen auf den Kraftstoffverbrauch berücksichtigt. Neben klassischen Pkw und Lkw können auch die Einsparpotenziale von Müllfahrzeugen und anderen relevanten kommunalen Fahrzeugkategorien berechnet werden. Das Fleet-Tool erfüllt den dringenden Informationsbedarf der europäischen Flottenbetreiber und stellt die Wirkung von Maßnahmen zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz dar. Zudem werden die ökonomischen und ökologischen Potenziale konkret berechnet und visuell auf unterschiedliche Art und Weise dargestellt. Die fehlende Kenntnis der Einsparpotenziale führt dazu, dass lediglich 10 Prozent der Flottenbetreiber daran glauben, die Ziele der EU bis 2020 - den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emission der gesamten Flotte gegenüber 1990 um 20 Prozent zu senken – zu erreichen (vgl. Goodyear 2011; Goodyear Dunlop 2013). Mit Hilfe des Fleet-Tools können Flottenbetreiber die ökonomi-

schen und ökologischen Auswirkungen von Maßnahmen zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz der eigenen Fahrzeugflotte berechnen. Im Vergleich zu bestehenden Tools zur Berechnung der Kraftstoffeffizienz ist das Fleet-Tool das erste Tool, das es ermöglicht, entsprechend der Eingaben durch den Nutzer die Potenziale einer individuellen Fahrzeugflotte zu berechnen. Dabei können nicht nur schwere Nutzfahrzeuge sondern auch leichte Nutzfahrzeuge und sogar Pkw mit in die Berechnung einbezogen werden. Durch die visuelle Darstellung der Ergebnisse kann der Nutzer ohne zusätzlichen Aufwand erkennen, welche der eingegebenen Fahrzeuge das meiste Potenzial aufweisen und wie sich die Potenziale auf die einzelnen Maßnahmen aufteilen. Diese fahrzeugspezifische und ganzheitliche visuelle Darstellung der Ergebnisse stellt ebenso ein Alleinstellungsmerkmal des Fleet-Tools dar. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist die monetäre Berücksichtigung von CO₂-Emissionseinsparungen. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis CO₂-Emissionen, ähnlich wie im industriellen Bereich schon üblich, auch bei öffentlichen und privaten Flotten zu einem gewissen Teil bezahlt werden müssen. Weiterhin steigt bereits heute das ökologische Bewusstsein der Kunden, so dass viele Flottenbetreiber CO₂-neutrale Fahrzeugflotten betreiben. Für dieses Ziel werden in der Regel CO₂-Emissionszertifikate gekauft, um die verursachten Emissionen zu neutralisieren. Durch die Einsparung von CO₂-Emissionen müssen dementsprechend weniger Zertifikate gekauft werden, was zu einer konkreten Kostensenkung führt. Diese Einsparung kann unter anderem mit Hilfe des Fleet Tools berechnet werden. Das Fleet-Tool zeigt den Flottenbetreibern bislang unberücksichtigte ökonomische und ökologische Potenziale zur Steigerung der Kraftstoff-

effizienz auf und liefert die notwendige Transparenz, um die Herausforderungen bis 2020 erfolgreich zu bewältigen und die Ziele der EU zu erreichen. Weiterhin unterstützt es die Flottenbetreiber bei der Investitionsentscheidung in Maßnahmen zur Steigerung der Kraftstoffeffizienz. Zur Veranschaulichung der Einsparpotenziale von Kosten und CO₂-Emissionen wurde für einen kommunalen Fuhrpark eine Beispielrechnung durchgeführt. Ein kommunaler Fuhrpark besteht im Durchschnitt aus 42 Prozent Sonderfahrzeugen, 10 Prozent Lkw ohne Sonderaufbau, 1 Prozent Bussen, 16 Prozent Transportern, 2 Prozent Kompaktvans, 17 Prozent Pkw sowie 12 Prozent sonstige Fahrzeuge. (vgl. KommunalTechnik 2007). Kommunale Sonderfahrzeuge werden zu unterschiedlichsten Zwecken eingesetzt, so dass sich die Nutzungsart und das Fahrprofil innerhalb der Sonderfahrzeugklasse deutlich unterscheiden können. Relevante kommunale Sonderfahrzeuge sind:

- Müll- und Entsorgungsfahrzeuge,
- Kehrfahrzeuge,
- Kanalreinigungsfahrzeuge sowie
- Straßenbetriebsfahrzeuge,
- Feuerwehrfahrzeuge,
- Winterdienst und
- Linienbusse.

Im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge wurden die Klassen des Geräteträgers und des Transporters angenommen. Die Pkw-Klasse besteht einzig aus Personenkraftwagen. Um ein realistisches Potenzial ermitteln zu können, wurde eine Gleichverteilung für die Sonderfahrzeuge angenommen. Anhand von Re-

cherchen innerhalb kommunaler Fuhrparks konnten realistische Prämissen bezüglich der Start-Stopp-Intensität, dem aktuellen Kraftstoffverbrauch, der jährlichen Fahrleistung, dem Anteil an Stadt-, Land- und Autobahnfahrten, der Reifenanzahl sowie der Kraftstoffart für die jeweiligen Fahrzeugtypen bestimmt werden. Grundlage stellte ein Fuhrpark mit insgesamt 650 Fahrzeugen dar. Aufgrund eines Anteils von 12 Prozent an sonstigen Fahrzeugen, die nicht berücksichtigt werden, reduziert sich der Fuhrparkgesamtheit auf 572 Fahrzeuge (vgl. Akademie für Kommunalfahrzeugtechnik 2011). Für diesen Fuhrpark können im Jahr Einsparungen von circa 150.000 Euro generiert werden. Über die Lebensdauer der Reifen summieren sich die Einsparungen auf etwa 1,5 Millionen Euro. Gleichzeitig wird der Kohlendioxid-Ausstoß der Flotte im Jahr um circa 280 Tonnen reduziert. Bezogen auf die Lebensdauer entspricht dies einer Emissionsreduktion um 2.800 Tonnen. Kennzeichnend für die Berechnung der Einsparungen über die Laufzeit ist die differenzierte Betrachtung der Reifenlebensdauer. Aufgrund von chemischen Alterungseinflüssen ist die Lebensdauer eines Reifens auf maximal 10 Jahre begrenzt. Spätestens nach 10 Jahren kann der Reifen nicht mehr genutzt werden, so dass die potenzielle Laufleistung des Reifens nicht mehr erreichbar ist (vgl. Wiesinger 2007). Besonders hervorzuheben ist, dass die genannten Einsparungen alleinig durch einen Reifenwechsel erzeugt werden. Durch die Kombination mit weiteren Einsparmaßnahmen können öffentliche und private Fahrzeugflotten noch energieeffizienter gestaltet werden und in der Beispielrechnung bis zu 5,2 Millionen Euro einsparen. Das Fleet-Tool für öffentliche und private Fahrzeugflotten ist in einem Microsoft-Excel-Demonstrator und speziell in mehreren Excel-

Tabellenblättern realisiert. Das erste Tabellenblatt „Fuhrpark“ dient der Abfrage der benutzerrelevanten Daten und der Speicherung des eingegebenen Fuhrparks und ist mit einer weißen Farbe in der Datenblattleiste hinterlegt. Im Anschluss folgen die Visualisierungsdatenblätter in blau. Hier werden die Ergebnisse der einzelnen Fahrzeugtypen oder der Flotte ausgegeben. Die Datenblätter sind: Kundennutzen, Potenzialanzeige, Kostenpotenziale, Kosten pro Jahr, Treibstoffverbrauch, CO₂-Ausstoß, Kosten Laufzeit Invest, Einfluss Reifenfülldruck, Amortisation sowie Kosten CO₂ neutrale Fahrt. Das gelbe Datenblatt „Kalkulationsergebnisse“ stellt alle Rechenergebnisse in geordneter Reihenfolge dar. Beginnend mit dem Ist-Zustand bezüglich des Kraftstoffverbrauchs in Liter und Euro sowie dem CO₂-Ausstoß in kg werden die Einsparpotenziale pro Jahr und über die Laufzeit der Einsparmaßnahmen aufgezeigt. Rote Tabellenblätter markieren die Datenbanken der drei Fahrzeugklassen Nutzfahrzeuge („Variablen Nfz C3“), leichte Nutzfahrzeuge („Variablen L Nfz C2“) sowie Personenkraftwagen („Variablen Pkw C1“). In diesen Datenbanken sind spezifische Charakteristika der Fahrzeugklassen hinterlegt, die für die Berechnung benötigt werden. Der Nutzer hat die Möglichkeit die Variablen anzupassen und somit den Komplexitätsgrad der Anwendung zu steuern. Die beiden letzten Datenblätter, welche grau hinterlegt sind, dienen als interne Berechnungsblätter und sind für den Nutzer nur von geringer Relevanz. Diese sind erforderlich, um die Ergebnisse für die Fahrzeugflotten sowie die Daten für die Visualisierung zu erzeugen. Bei der Anwendung des Tools werden zu Beginn die relevanten Benutzereingaben abgefragt, welche als Input-Variablen bei der Berechnung genutzt werden. Nach der Auswahl des Fahrzeugtyps werden einzig die

Abfragefenster eingeblendet, die für diesen Fahrzeugtyp relevant sind. Zur Kenntlichmachung von Eingabe-, Vorgabe- und Berechnungswerten wird in der Eingabemaske ebenfalls ein Farbschema verwendet. Weiße Felder müssen eigenständig vom Nutzer ausgefüllt werden, während blaue Felder mit Vorgabewerten gefüllt werden, welche durch den Nutzer angepasst werden können. Graue Felder stellen Berechnungszellen dar, die nicht beschrieben werden dürfen.

Für den Fahrzeugtyp „Pkw“ werden folgende Eingabe- und Vorgabefelder dargestellt:

- Anzahl der Fahrzeuge [Stk],
- durchschnittlicher Verbrauch [l/100km],
- Reifeneffizienzklasse der aktuellen Reifen,
- potenzielle Laufleistung der aktuellen Reifen,
- Rollwiderstandsbeiwert der aktuellen Reifen [kg/t],
- Reifeneffizienzklasse der zukünftigen Reifen,
- potenzielle Laufleistung der zukünftigen Reifen,
- Rollwiderstandsbeiwert der zukünftigen Reifen [kg/t],
- Mehrpreis für einen rollwiderstandsarmen Reifen [€],
- Kraftstoffart,
- Kraftstoffpreis [€/l],
- jährliche Fahrleistung [km],
- Anteil der Stadtfahrten [Prozent],
- Anteil der Landfahrten [Prozent],
- Anteil der Autobahnfahrten [Prozent],

- idealer Reifendruck laut Hersteller [bar],
- gemessener Reifendruck [€],
- Schulungsplanung,
- Beladung mit unnötigem Gepäck sowie
- Fahrweise des Fahrers.

Die potenzielle Laufleistung sowie die Rollwiderstandsbeiwerte der Reifen werden abhängig von der Reifeneffizienzklasse automatisch mit Durchschnittswerten gefüllt. Für eine höhere Ergebnisschärfe wird dem Nutzer die Möglichkeit geboten, die voreingestellten Werte zu überschreiben. Diese Felder stellen folglich nach obiger Definition Vorgabefelder dar. Im Unterschied zum Fahrzeugtyp „Pkw“ spielen bei den leichten Nutzfahrzeugen „Geräteträger“ und „Transporter“ die Fahrweise des Fahrers sowie die Beladung mit unnötigem Gepäck eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund werden bei leichten Nutzfahrzeugen diese Abfragen ausgeblendet. Zusätzlich erfolgt jedoch die Abfrage nach der Relevanz von Reifenwechsel. Je nach Relevanz werden Reifenwechsel- und Lagerkosten bei der Berechnung der absoluten Einsparungen berücksichtigt und haben somit einen Einfluss auf die Amortisation der Investition. Für Pkw muss die Reifenwechsel-Thematik nicht betrachtet werden, da Reifenwechsel für Pkw als Standardverfahren anzusehen sind. Einen erheblichen Einfluss auf den Verbrauch eines Fahrzeugs hat das Fahrzeuggewicht. Während bei Pkw das Gesamtgewicht nicht stark variieren kann und damit vernachlässigbar ist, spielt es bei leichten Nutzfahrzeugen eine erhebliche Rolle. Daher wird im Rahmen der Abfrage das durchschnittliche Gewicht, der Ladefaktor in Prozent, das bedeutet die volumenmäßige Ausfüllung der Ladefläche, sowie die Maximalbe-

ladung abgefragt. Somit ist es möglich den Kraftstoffverbrauch exakt zu bestimmen. Ebenfalls einen großen Einfluss auf den Verbrauch eines Fahrzeugs nimmt die Start-Stopp Intensität ein. Durch häufiges Anhalten und Anfahren wird der Kraftstoffverbrauch erheblich erhöht. Nutzfahrzeuge werden im Tool aufgrund der Achszahl unterschiedlich berücksichtigt. Das Gros der Fahrzeuge besitzt zwei Achsen. Lkw dagegen werden durch Lenk-, Antriebs- und Trailerachse charakterisiert. Aufgrund der unterschiedlichen Reifenprofile an den Achsen verteilt sich der Rollwiderstand eines Sattelzuges nicht gleichmäßig über die genannten Achsen. Die Reifen an der Lenkachse tragen zu circa 15 Prozent, die der Antriebsachse zu etwa 25 Prozent und die Trailerreifen zu 60 Prozent des Rollwiderstands bei (vgl. Wildemann 2012c). Somit ist bei Lkw eine detailliertere Betrachtung der Achsen erforderlich. Es ist der Fall denkbar, dass ein Fuhrparkbetreiber Reifen mit verschiedenen Effizienzklassen auf den Achsen nutzt. Diese verschiedenen Fälle werden im Tool durch Abfrage der Reifeneffizienzklassen pro Achse berücksichtigt. Zusätzlich werden für Nutzfahrzeuge die Anzahl der Reifen abgefragt. Pkw und leichte Nutzfahrzeuge besitzen grundsätzlich vier Reifen während für Nutzfahrzeuge die Anzahl variiert. Wie bereits erwähnt, ist für Nutzfahrzeuge das Beladungsgewicht essenziell für die Berechnung des Verbrauchs und wird in der Eingabemaske wie oben beschrieben abgefragt. Des Weiteren werden für Nutzfahrzeuge die Planung von Schulungen, die Spureinstellung, das Nachschneideverhalten, die Relevanz des Reifenwechsels sowie die Start-Stopp Intensität mittels mehrerer Dropdown Menüs abgefragt. Die Einstellung der Spur eines Fahrzeugs hat erheblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch. Bei einer schräg versetzten Spur er-

höht sich der Verbrauch um 4,5 Prozent. Bei einer nicht parallel abgestimmten Spur um bis zu 18,5 Prozent (vgl. Goodyear 2011). Das Nachschneideverhalten eines Reifens beeinflusst zum einen die Lebensdauer eines Reifens und zum anderen den Rollwiderstandsbeiwert. Generell lässt sich feststellen, dass durch Nachschneiden die Kilometerleistung um 25 Prozent bis 30 Prozent erhöht und der Kraftstoffverbrauch um 6 Prozent bis 10 Prozent verringert werden kann. Die Abfragen für Nutzfahrzeuge mit zwei Achsen umfassen demnach:

- Anzahl der Fahrzeuge [Stk],
- durchschnittlicher Verbrauch [l/100km],
- Anzahl der Reifen [Stk],
- Reifeneffizienzklasse der aktuellen Reifen,
- potenzielle Laufleistung der aktuellen Reifen,
- Rollwiderstandsbeiwert der aktuellen Reifen [kg/t],
- Reifeneffizienzklasse der zukünftigen Reifen,
- potenzielle Laufleistung der zukünftigen Reifen,
- Rollwiderstandsbeiwert der zukünftigen Reifen [kg/t],
- Mehrpreis für einen rollwiderstandsarmen Reifen [€],
- Kraftstoffart,
- Kraftstoffpreis [€/l],
- jährliche Fahrleistung [km],
- Anteil der Stadtfahrten [Prozent],
- Anteil der Landfahrten [Prozent],
- Anteil der Autobahnfahrten [Prozent],

- idealer Reifendruck laut Hersteller [bar],
- gemessener Reifendruck [€],
- durchschnittliche Beladung [t],
- Ladefaktor [Prozent],
- Maximalbeladung [t],
- Schulungsplanung,
- Spureinstellung,
- Nachschneiden,
- Reifenwechsel relevant sowie
- Start-Stopp Intensität.

Für Busse werden die durchschnittliche Beladung sowie die Maximalbeladung anhand der Passagieranzahl ermittelt. Ansonsten sind die Abfragen analog zum Nutzfahrzeug.

Die Berechnungslogik des Tools ist stufenweise aufgebaut. Startpunkt der Berechnungen stellen die Ist-Verbräuche der einzelnen Fahrzeugkategorien dar. Es werden somit abhängig von den Benutzereingaben die aktuellen Verbräuche ermittelt, die im Folgenden die Basis für die Einsparberechnungen darstellen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Berechnungslogiken im Folgenden getrennt nach Fahrzeugklassen dargestellt:

Fahrzeugklasse Pkw: Der jährliche Ist-Verbrauch von Pkw lässt sich bestimmen, indem die Anzahl der Fahrzeuge mit dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch pro 100 km und der jährlichen Fahrleistung multipliziert und durch 100 km dividiert wird.

$$\text{Verbrauch} = \text{Anzahl Fahrzeuge} * \varnothing \text{ Verbrauch} * \frac{\text{Jährliche Fahrleistung}}{100 \text{ km}}$$

Der jährliche CO₂-Ausstoß berechnet sich indem der Verbrauch mit dem Energieinhalt der Kraftstoffsorte multipliziert wird. Die monetären Auswirkungen des Kraftstoffverbrauchs können durch Multiplikation des Kraftstoffverbrauchs mit dem Preis pro Liter Kraftstoff berechnet werden. Ausgehend vom aktuellen Verbrauch der Fahrzeugklasse werden die Einsparpotenziale, welche bei Durchführung der Maßnahmen entstehen, berechnet. Als bedeutendste Maßnahme ist hier natürlich der Reifenwechsel zu nennen. Bei einem Wechsel zu rollwiderstandsarmen Reifen kann der Rollwiderstand eines Fahrzeugs deutlich gesenkt werden. Es wird somit zur Berechnung des Einsparpotenzials, der Kraftstoffverbrauch durch den Rollwiderstand bei alter Bereifung mit dem Kraftstoffverbrauch durch den Rollwiderstand bei energieeffizienter Bereifung verglichen. Die Differenz stellt die mögliche Kraftstoffeinsparung dar. Aufgrund der unterschiedlichen Rollwiderstandsbeiwerte bei Fahrten in der Stadt, auf dem Land sowie auf der Autobahn ist hier eine differenzierte Betrachtung notwendig. Der Rollwiderstand des alten Reifens berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Verbrauch}_{\text{Rollwiderstand}} &= \text{Verbrauch}_{\text{Ist}} * \text{Luftdruckeinfluss} \\ &* (\text{Anteil}_{\text{Stadt}} * \text{Rollwiderstand}_{\text{Stadt}} + \text{Anteil}_{\text{Land}} * \text{Rollwiderstand}_{\text{Land}} \\ &+ \text{Anteil}_{\text{Autobahn}} * \text{Rollwiderstand}_{\text{Autobahn}}) \end{aligned}$$

Bei den neuen Reifen wird das Ergebnis mit der prozentualen Reduktionswert aufgrund des Reifenwechsels multipliziert. Für die Berechnung der Einsparpotenziale über die Laufzeit wird das Einsparpotenzial pro Jahr mit der potenziellen Laufleistung eines Reifens multipliziert und durch die jährliche Laufleistung dividiert. Einschränkend gilt hier die Bedingung, dass Reifen maximal 10 Jahre aufgrund von chemischen und physikalischen

Alterungserscheinungen genutzt werden können. Zur Berechnung der absoluten Einsparungen werden von den Einsparungen über die Laufzeit die Investitionskosten subtrahiert und die geringeren Kosten aufgrund von einer reduzierten Kaufintensität addiert. Im Detail bedeutet dies, dass der Mehrpreis des rollwiderstandsarmen Reifen von den Einsparungen abgezogen werden, aber positive Effekte aufgrund der längeren Laufleistung ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Da rollwiderstandsarme Reifen in der Regel für eine höhere Kilometerleistung genutzt werden können, wird die Häufigkeit eines Reifenkaufs reduziert und es wirkt somit ein positiver Effekt auf die absoluten Einsparungen über die Laufzeit. Zur Berechnung der Einsparungen bei Anpassung des Luftdrucks wird der Verbrauch der Fahrzeugklasse um den vorher einfließenden Luftdruckeinfluss bereinigt. Da hier und bei allen weiteren Einsparmaßnahmen keine Investitionskosten anfallen oder nicht mit einer ausreichend hohen Ergebnisschärfe bestimmt werden können, sind die Einsparungen über die Laufzeit und die absoluten Einsparungen im Tool identisch. Die Einsparungen durch eine Schulung der Fahrer, einer Anpassung des unnötigen Gepäcks und Anpassung der Fahrweise werden aufbauend auf den bereits bestimmten Einsparungen kumuliert anhand der prozentualen Einsparungen oder Literweisen Einsparungen pro 100 km bestimmt. Zur Berechnung der Amortisationszeit, die hier in gefahrenen Kilometern ausgedrückt wird, werden allein die Einsparungen durch den Reifenwechsel betrachtet. Somit wird sichergestellt, dass die Amortisationszeit nicht durch anderweitige Maßnahmen künstlich verbessert wird.

$$\text{Amortisation}_{\text{km}} = \frac{\text{Investitionskostendifferenz}_{\text{Reifen}}}{(\text{Kosten pro km}_{\text{Alt}} - \text{Kosten pro km}_{\text{neu}} + \frac{\text{Einsparungen}_{\text{Wechsel}}}{\frac{\text{Anzahl}_{\text{Fahrzeuge}}}{\text{Fahrleistung}}})}$$

Fahrzeugklasse leichtes Nutzfahrzeug: Der Ist-Verbrauch von leichten Nutzfahrzeugen wie Geräteträgern oder Transporten, wird durch die Anzahl der Fahrzeuge, die jährliche Fahrleistung, dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch, der Beladung sowie der Start-Stopp-Intensität bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzart und Beladung kann der Verbrauch eines leichten Nutzfahrzeuges stark variieren. Aus diesem Grund ist es unumgänglich, die Beladung der Fahrzeuge zu berücksichtigen. Außerdem spielt die Start-Stopp-Intensität eine entscheidende Rolle für den Kraftstoffverbrauch. Häufige Stopps mit anschließendem Anfahren erhöhen den Verbrauch signifikant und werden folglich ebenfalls in die Berechnung miteinbezogen. Der Kraftstoffverbrauch leichter Nutzfahrzeuge berechnet sich demnach wie folgt:

$$\text{Verbrauch}_{\text{Ist}} = \text{Anzahl}_{\text{Fahrzeuge}} * \varnothing\text{Verbrauch} * \frac{\text{jährliche Fahrleistung}}{100 \text{ km}} * \frac{\varnothing\text{Beladung}}{\text{Ladefaktor} * \text{Maximalbeladung}} * \text{Einfluss}_{\text{Start-Stop}}$$

Der Ladefaktor sowie der Einfluss durch die Start-Stopp-Häufigkeit stellen prozentuale Größen dar. Der Ladefaktor beschreibt die volumenmäßige Ausfüllung des Fahrzeugs. Der Start-Stopp-Einfluss beschreibt die Kraftstofferhöhung durch häufige Stopps. Da ein Wechsel von Sommer- auf Winterreifen bei leichten Nutzfahrzeugen nicht als standardmäßige Praxis angesehen werden kann, spielen somit die Reifenwechsel- und Lagerkosten bei der Berechnung der absoluten Einsparungen eine Rolle. Aus diesem Grund wird die Berechnungslogik, wie sie für die Fahrzeugklasse Pkw beschrieben wurde, um die Lager- und Wechselkosten erweitert. Folglich sind die absoluten Einsparungen bei Einberechnung der Reifenwechsel- und Lagerkosten geringer. Da für leichte Nutzfahrzeuge als weitere

Einsparmaßnahmen einzig die Anpassung des Reifenluftdrucks und die Schulung der Fahrer eine Rolle spielen, können die Berechnungen der Fahrzeugklasse Pkw mit den oben beschriebenen Anpassungen verwendet werden. Bei Nutzfahrzeugen spielt bei der Berechnung des Ist-Verbrauchs das Nachschneiden der Reifen eine Rolle. Wie bereits beschrieben kann durch das Nachschneiden der Reifen der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs um 6 Prozent bis circa 10 Prozent reduziert werden. Da das Tool einen konservativen Ansatz verfolgt, wird hier eine Kraftstoffersparnis von 6 Prozent angenommen. Somit erweitert sich die Berechnung des aktuellen Jahresverbrauch um den Nachschneidefaktor. Die Berechnung der Einsparungen durch den Reifenwechsel ist analog zum leichten Nutzfahrzeug durchzuführen. Bei der Berechnung der Einsparungen durch Anpassung des Reifenluftdruckes wird aufgrund der höheren Drücke eine veränderte Regressionsformel verwendet. Dies wirkt sich durch eine leicht veränderte Rechnung aus, hat aber ansonsten keine Auswirkungen auf die Berechnungslogik. Weitere Einsparmaßnahmen sind die Schulung der Fahrer sowie die Einstellung der Spur des Fahrzeugs. Bei nicht eingestellter Spur sind Verbrauchsnachteile für das Fahrzeug zu erwarten, die durch eine korrekte Einstellung vermieden werden können. Somit verringert sich der Kraftstoffverbrauch nach Einstellung der Spur um einen definierten Prozentsatz, abhängig von der Ausgangssituation (vgl. Wildemann 2013).

5.2 Verbesserung der Aerodynamik

Die Aerodynamik beeinflusst die Höchstgeschwindigkeit, die Geräuschentwicklung und den Kraftstoffverbrauch eines Nutz-

fahrzeugs. Ausgedrückt und zusammengefasst werden die Eigenschaften der Aerodynamik durch den Luftwiderstandsbeiwert (c_w -Wert), einer dimensionslosen Kennzahl. Der Luftwiderstand ergibt sich dabei aus der Verdrängung der Luft und aus der Reibung der an der Fahrzeugoberfläche vorbeiziehenden Luft. Die aerodynamischen Eigenschaften eines Nutzfahrzeugs werden daher vor allem durch die Form von Fahrerhaus und Aufbauten, den Fahrzeugunterboden sowie die Gestaltung der Radkästen beeinflusst. Eine günstige Gestaltung des Fahrerhauses sowie kleine Spaltmaße zum Aufbau helfen dabei, Verwirbelungen zu vermeiden und damit den Luftwiderstand sowie den Spritverbrauch zu senken (vgl. Wildemann 2012b). Aufgrund des quadratischen Zusammenhangs von Geschwindigkeit und Luftwiderstand steigt die Bedeutung der Aerodynamik mit zunehmender Geschwindigkeit. Da somit der Widerstand mit zunehmender Geschwindigkeit exponentiell ansteigt, nehmen Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen zu (vgl. Volkswagen 2011). Zudem erhöhen sich die Betriebskosten des Fahrzeugs.

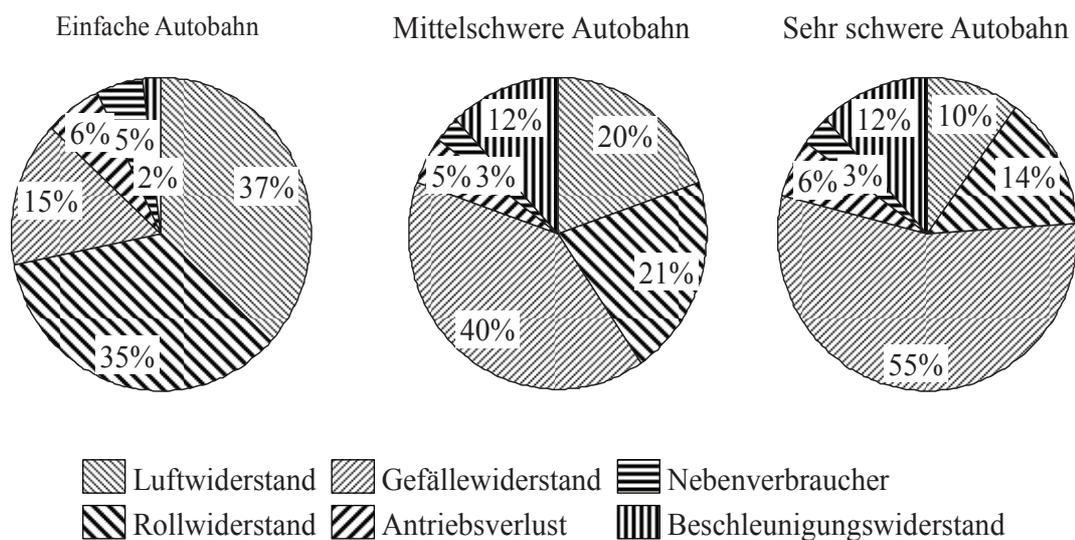


Abbildung 5-1: Energiebedarf eines 40 Tonnen Sattelzugs (vgl. Intra 2014)

Auf einer Autobahnfahrt eines 40 Tonnen Sattelzuges hat der Luftwiderstand einen Anteil von 10 bis 37 Prozent am Energieverbrauch, siehe Abbildung 5-1. Gering ist der Anteil dabei bei einer anspruchsvollen Topographie, beispielsweise auf der Autobahn A7 bei den Kasseler Bergen. Bei Mittelschweren Topographien, wie auf der A8 München – Augsburg, beträgt der Anteil 20 Prozent und auf einfachen Topographien wie von Berlin nach Hamburg, 37 Prozent. Beispielhafte Maßnahmen zur Senkung des Luftwiderstands sind die Anpassung der Bugschürze sowie ein Dachspoiler. So lässt sich durch An- und Abströmkörper eine gute seitliche Überströmung der Räder erreichen. Ein Radspoiler reduziert weiterhin die Verwirbelungen im Radhaus. Ein Dachspoiler auf dem Fahrerhaus sorgt für einen besseren Luftstrom am Aufbau beziehungsweise Auflieger (vgl. Wildemann 2012b; Intra 2014). Abbildung 5-2 veranschaulicht die Einsparungen für die verschiedenen Autobahn-Typen bei einer Verbesserung des c_w -Wertes von 0,5 auf 0,3 durch ein Versuchsfahrzeug. Für die einfache Autobahn wurde dabei eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 88 Kilometern pro Stunde angenommen, für die mittelschwere 80 Kilometer pro Stunde und für die sehr schwere Autobahn 68 Kilometer pro Stunde.

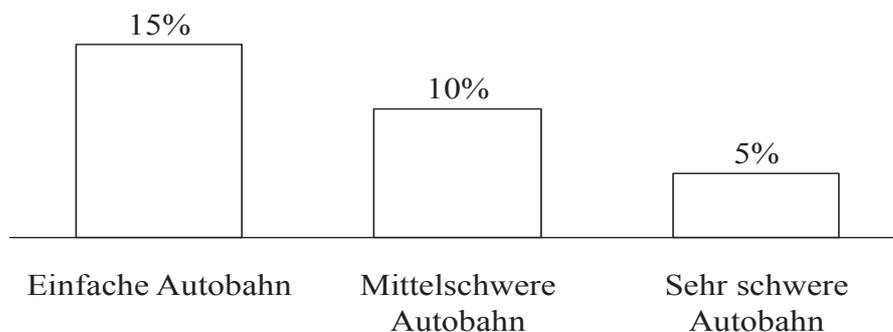


Abbildung 5-2: Einsparungen durch reduzierten c_w -Wert (vgl. Intra 2014)

5.3 Substitution konventioneller Antriebe durch E-Antriebe

Während in der innerbetrieblichen Logistik elektrische Antriebe bereits verbreitet sind, beispielsweise bei Gabelstaplern und Flurförderzeugen, ist im Straßenverkehr ihr Anteil derzeit noch gering. Ein weiterer Ansatz zur Senkung der CO₂-Emissionen liegt daher in diesem Bereich. Die Elektromobilität wird von der Automobil- und der Energieindustrie als dominante und zukunftsfähige Technologie angesehen. Bereits heute herrscht weitestgehend Konsens darüber, dass es zu E-Mobility langfristig keine Alternative geben wird (vgl. Bain & Company 2010). Auch die Bundesregierung weist in ihrer Maßnahmenkonkretisierung zur Energiewende darauf hin, dass die Zukunft den Elektroautos gehört. Aus diesem Grund verspricht die Entwicklung von E-Mobility-Konzepten aus Sicht einzelner Logistikunternehmen erhebliche Potenziale in Bezug auf die Reduktion der CO₂-Emissionen und die Senkung ihrer Kraftstoffkosten. Eine Reihe von verfügbaren Konzepten zur E-Mobility wurden bereits erfolgreich erprobt und eingeführt. Hierfür lassen sich erste Beispiele aus dem Logistikbereich anführen. Die Deutsche Post AG hat damit begonnen, ihren Fuhrpark mit E-Fahrzeugen auszustatten. Hierbei handelt es sich um Prototypen, die im Rahmen des Projektes getestet werden sollen. Die Deutsche Post AG verfolgt das Ziel, einen bedeutenden Teil ihres Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge umzurüsten. Zusammen mit Partnern aus der Zulieferindustrie soll ein Elektrofahrzeug entwickelt werden, welches zur Zustellung von Briefen und Paketen geeignet ist. Für die Deutsche Post sind bereits jetzt mehr als 3.500 Fahrzeuge mit Elektro- und Hybridantrieben sowie alter-

nativen Kraftstoffen auf der Straße, davon 60 Elektrofahrzeuge im Briefbereich (vgl. Kruschke 2011). Zu berücksichtigen ist, dass es verschiedene Formen der E-Mobility gibt (vgl. Beckmann 2003). Im Vordergrund stehen Lösungen mit Elektromotoren und Brennstoffzellen sowie vor allem Hybridansätze. Es muss berücksichtigt werden, dass E-Mobility-Konzepte sich nicht universell für alle Anwendungszwecke einsetzen lassen, siehe Abbildung 5-3. Bei der E-Mobility für Nutzfahrzeuge ist zwischen Hybridtechnologie und Elektromobilität zu differenzieren. Hybridtechnologie zeichnet sich durch zwei Motoren (Elektromotor und Verbrennungsmotor) sowie zwei Energiespeicher (Kraftstofftank und Akkumulator) aus. Dabei sind verschiedenste Fahrzeugkonfigurationen in Abhängigkeit von dem Zusammenspiel aus Verbrennungs- und Elektromotor möglich. (vgl. Wallentowitz. et al. 2009; Wildemann 2012a) Im Folgenden werden die Formen der E-Mobility kurz charakterisiert (vgl. Diez 2010; Deutsche Post DHL 2012; Wildemann 2012a): Micro-Hybride sind mit einem Verbrennungsmotor und einem kleinen Elektromotor/-generator sowie einem Akku geringer Kapazität ausgestattet. Bei Stillstand wird der Verbrennungsmotor abgestellt und bei Weiterfahrt mit Hilfe des Elektromotors gestartet.

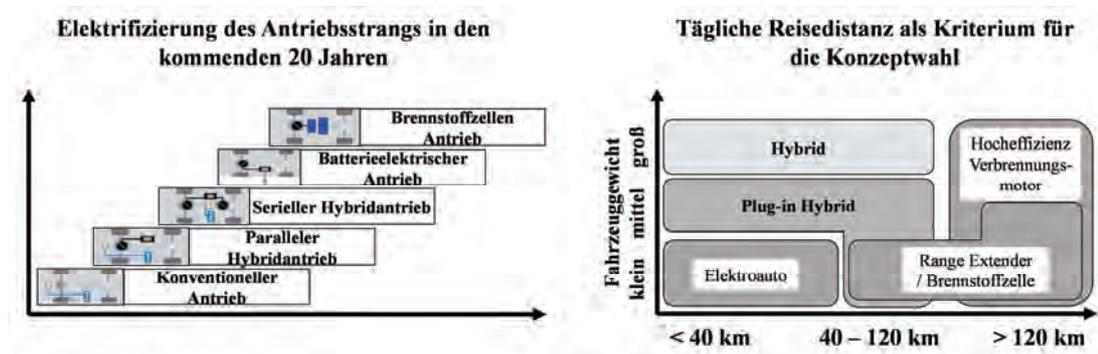


Abbildung 5-3: Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Geringe Mengen der Bremsenergie können rekuperiert werden. Das Fahrzeug kann nur bei laufendem Verbrennungsmotor fahren. Mild-Hybrid-Fahrzeuge besitzen neben einem Verbrennungsmotor Elektromotoren und Akkus. Dabei unterstützt der Elektromotor den Verbrennungsmotor speziell beim Anfahren und Beschleunigen. Ein größerer Teil der Bremsenergie wird rekuperiert und für den weiteren Antrieb nutzbar gemacht. Der Antriebsstrang ist als Parallel-Hybrid ausgelegt. Ein Voll-Hybrid verfügt über leistungsfähige Elektromotoren und Akkus, die es ermöglichen zeitweise rein elektrisch zu fahren. Hier wird zwischen parallelem, seriellem oder Misch-Hybrid unterschieden. Bremsenergie kann rekuperiert werden. Eine Sonderform der Hybrid-Fahrzeuge stellt der Plug-in-Hybrid dar. Dem Aufbau nach handelt es sich um einen Voll-Hybrid, der auch mit Strom aus der Steckdose geladen werden kann. Zur Vergrößerung der Reichweite wird ein Verbrennungsmotor als „Reichweitenverlängerer“ (Range Extender) integriert. Der Verbrennungsmotor erzeugt über einen Generator Strom, wenn die Batterie erschöpft ist. Eine Brennstoffzelle ist ein Energiewandler. In der Brennstoffzelle reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff. So wird die Brennstoffzelle zu einer Stromquelle für Elektrofahrzeuge. Batterieelektrische Fahrzeuge (battery electric vehicle, BEV) werden rein elektrisch betrieben. Die Energie stammt aus einer Batterie, die am Stromnetz aufgeladen wird. Verschiedene Hersteller von Transportern und sogar Lkw arbeiten mit Hochdruck an der Entwicklung von verschiedenen Elektronutzfahrzeugen. Im Folgenden werden zwei Beispiele, ein Transporter mit Elektromotor und ein elektrisch betriebener 18-Tonnen Lkw vorgestellt. Beide Fahrzeuge sind bei unterschiedlichen Unternehmen bereits im Einsatz. Diese bei-

den Beispiele verdeutlichen, dass sich E-Mobility durchaus für Logistikanwendungen im Straßenverkehr eignet. Dies sind zwei Beispiele für reine Elektrofahrzeuge (BEV), die ökologisch und technisch das Aushängschild von E-Mobility-Konzepten darstellen. Der Mercedes-Benz Vito E-Cell ist bereits seit Ende 2010 bei der Deutschen Post DHL für die Brief- und Verbundzustellung im Rahmen von Pilotprojekten im Einsatz. Mit einer Motorleistung von 70 kW bringt es der Vito E-Cell auf eine Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Maximal kann der Transporter der Deutschen Post DHL bis zu 755 kg Nutzlast aufnehmen (vgl. Deutsche Post DHL 2013). Die Leistungsdaten des Mercedes-Benz Vito E-Cell sind in Abbildung 5-4 zusammengefasst. Ausgestattet ist der Mercedes-Benz Vito E-Cell mit einer Lithium-Ionen Batterie mit einer Größe von 36 kWh, was bei einem Verbrauch von 25,2 kWh/100 km eine Reichweite bis zu 130 km zulässt. Laut Angaben des Herstellers dauert das Laden mit 400 V bei vollständig entladener Batterie ca. 5 Stunden (vgl. Mercedes-Benz 2014).

Leistungsdaten: Mercedes-Benz Vito E-Cell

Leistung: 70 kW

Max. Gesch: 80 km/h

Reichweite: 130 km

Batterie: Li-Ion, 36 kWh
Vollladung in ca. 5 Stunden

Abmessungen: H: 1.880 mm / L: 5.0100 mm / B: 1.900 mm

Gesamtgewicht: 3050 kg, Leergewicht: 2295 kg, Max. Zuladungsgewicht: 755 kg



Abbildung 5-4: Leistungsdaten des Mercedes-Benz Vito E-Cell (vgl. Deutsche Post DHL 2013)

Der Mercedes-Benz Vito E-Cell wurde insbesondere für Kurrier-, Express- und Paketdienstleister entwickelt und für Kurzstrecken mit zahlreichen Stopps optimiert. Da der durchschnittliche Kunde mit einem Transporter im Kurzstreckenverkehr etwa 50 bis 80 km am Tag zurücklegt, erfüllt der Vito E-Cell also durchaus die Anforderungen des Marktes. Derzeit ist es nur möglich das Fahrzeug zu leasen (vgl. GreenGear 2014). Als größter Logistikdienstleister der Welt zählt neben dem Mercedes-Benz Vito E-Cell auch noch der Iveco Electric Daily, der Renault Kangoo Z.E. und der selbstkonzipierte StreetScooter zur Elektrofahrzeugflotte der Deutschen Post DHL (vgl. Deutsche Post DHL 2013). Im Juli 2013 wurde in der Schweiz der weltweit erste 18-Tonnen Lkw mit Elektroantrieb vorgestellt (Leistungsdaten des E-Force-One vgl. Abbildung 5-5). Laut Hersteller liegt der Anwendungsbereich dieses Lkw im innerstädtischen und regionalen Liefer- und Stückverkehr. Zwei wassergekühlte Hybrid Synchron Motoren mit 408 PS Leistung beschleunigen den Lkw auf bis zu 87 km/h, doch insbesondere im innerstädtischen Stop-and-Go Verkehr zeigt der Elektromotor mit einem Wirkungsgrad von 97 Prozent seine Leistung. Die maximale Reichweite beträgt 300 km und der Verbrauch liegt bei 80 - 110 kWh/100 km in der Stadt. Dies entspricht etwa 8 bis 11 Liter Diesel pro 100 km, was eine deutliche Reduzierung von Treibstoffkosten und CO₂-Ausstoß im Vergleich zu einem konventionellen Lkw dieser Größe hervorruft. Die beiden je 120 kWh umfassenden Lithium-Eisenphosphat Batterieeinheiten (Gewicht je 1300 kg) können innerhalb von 6 Stunden wieder aufgeladen werden (Ladeleistung: 400 V, 63 Ampere und 44 kW). Alternativ lassen sich die beiden Batterieeinheiten innerhalb von 10 Minuten komplett austauschen.

Leistungsdaten: E-Force-One

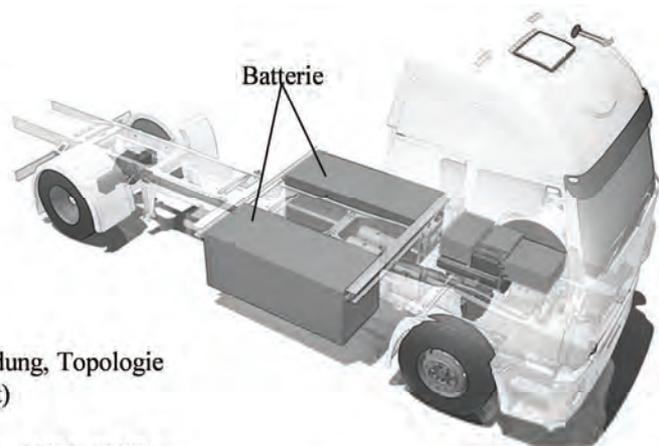
Leistung: 300 kW (408 PS)

Max. Gesch: 87 km/h

Reichweite: 200 – 300 km
(Abhängig von Zuladung, Topologie
und Geschwindigkeit)Batterie: LiFePO₄, 2x120kWh, 400V, 2600kg
Vollladung mit 44 kW in 6 Stunden, Voll redundantes BatteriesystemMotor: 2x Hybrid Synchron Motor wassergekühlt, Wirkungsgrad max. 97%
Voll redundantes Antriebssystem

Abmessungen: H: 3.800 mm / L: 9.305 mm / B: 2.550 mm / Radstand: 5.300 mm

Gesamtgewicht: 18 Tonnen, Leergewicht: 8 Tonnen, Max. Zuladungsgewicht: 10 Tonnen

**Abbildung 5-5: Leistungsdaten des E-Force-One (vgl. E-Force 2014)**

Maximal kann der Lkw 10 Tonnen Nutzlast aufnehmen. Ein solcher E-Force-One fährt derzeit in der Schweiz beispielsweise bei einer Einzelhandelskette, die Frischprodukte verkauft und einer großen Schweizer Brauerei (vgl. E-Force 2014). Preislich ist der E-Force One ungefähr doppelt so teuer wie ein konventionell betriebener Lkw dieser Größe. Da im Stückgutverkehr meist keine Reichweiten über 300 km gefordert werden, ist die Reichweite des E-Force-One durchaus ausreichend. Da der Lkw emissionsfreies Fahren ermöglicht, eignet er sich sehr gut zur Verbesserung des CO₂-Footprints. So können bei einer angenommenen jährlichen Fahrleistung von 75.000 Kilometern etwa 40 Tonnen CO₂ eingespart werden. Diese und andere Fahrzeuge sorgen dafür den CO₂-Footprint zu verbessern. Die Einsparung an CO₂-Emissionen entlang der Logistikkette durch elektrische Nutzfahrzeuge wird dabei durch eine schnelle

Marktdiffusion begünstigt, denn diese sorgt für einen höheren Anteil an E-Fahrzeugen in den Fuhrparks. Die Diffusion hängt von der Entwicklung verschiedener technologischer, volkswirtschaftlicher, politischer und kundenseitiger Einflussgrößen ab. Die Komplexität der Prognose dieser Variablen ist ursächlich für die starke Streuung bestehender Diffusionsszenarien (vgl. Stahlecker et al. 2011). Bezüglich der Einflussgrößen sind vier Grundkategorien oder Schlüsselvariablen zu betrachten (vgl. Diez 2010):

- Total Cost of Ownership (TCO) der Fahrzeugkonzepte,
- politische Regularien wie Subventionen oder Emissionsbeschränkungen,
- Strategien der Automobil- und Nutzfahrzeughersteller sowie
- Akzeptanz der Kunden am Markt.

Hierbei bilden die Total Cost of Ownership den Schlüsselfaktor künftiger Marktentwicklungen. Momentan sind die Total Cost of Ownership von E-Fahrzeugen höher als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Durch die Weiterentwicklung der Batterietechnik ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Kosten für beide Antriebsarten annähern werden (vgl. Bentenrieder/Kleinhaus 2010). Neben den Fahrzeugkosten sind besonders die Kosten von Strom und Erdöl entscheidend. So sind bei einem Ölpreis von dauerhaft über 140 Dollar pro Barrel die Kosten für Hybrid- und Elektrofahrzeuge wettbewerbsfähig mit Verbrennungsmotoren. Dies bedeutet jedoch auch, dass bei einer moderaten Ölpreisentwicklung die Marktattraktivität von E-Fahrzeugen als gering einzustufen ist. Weiterhin haben politische Regularien wie Subventionsmodelle einen starken Einfluss

auf die Wirtschaftlichkeit von E-Fahrzeugen. An den Beispielen von Dänemark und Israel sind E-Fahrzeuge bereits bei einem Ölpreis von 70-80 Dollar pro Barrel wettbewerbsfähig (vgl. Book et al. 2009). Weitere Treiber sind Regulierungen wie CO₂-Grenzwerte. Sollten diese bis 2050 sehr stark verschärft werden, beispielsweise auf 10 Gramm CO₂/km, so führt dies zu einer vollständigen Diffusion der Elektromobilität, da solche Grenzwerte mit Verbrennungsmotoren nicht zu erreichen sind (vgl. McKinsey 2011). Derart ehrgeizige Grenzwerte stellen jedoch extreme Ausprägungen dar, so dass bis 2030 mit keiner Verdrängung der Verbrennungsmotoren allein auf Basis von gesetzlichen Vorschriften zu rechnen ist (vgl. Wildemann 2012a). Zudem sind die Strategien der Automobilhersteller alltagstauglich und kundenorientiert zu gestalten. Bislang werden Mobilitätskonzepte im Bereich der Elektromobilität von den Kunden teilweise abgelehnt, da sie nicht genug auf deren Bedürfnisse ausgerichtet sind. Insbesondere die kurzen Reichweiten und mangelnde Ladeinfrastruktur führen bei konservativen Fahrern zu Vorbehalten gegenüber E-Fahrzeugen. Daher stehen die Automobil- und Nutzfahrzeughersteller von der Herausforderung, gemeinsam mit Energiekonzernen Infrastrukturkonzepte zu etablieren, welche eine Massenanzahl ermöglichen. Nur durch eine intensive Innovationsleistung in der Automobilindustrie ist eine großflächige Diffusion möglich. Ferner ist hierfür eine Steigerung der Kundenakzeptanz notwendig. Daher ist eine verbraucherorientierte Kommunikationspolitik hilfreich, um Vorbehalte zu beseitigen und damit die Diffusion der E-Fahrzeuge zu ermöglichen. Die Studien zur Marktdurchdringung der Elektromobilität geben abweichende Marktanteile an. Viele von ihnen bilden dabei Szenarien, die sowohl einen posi-

tiven als auch einen negativen Entwicklungspfad anhand von Zukunftsprojektionen über die Entwicklung verschiedener Einflussgrößen aufzeigen. So geht eine Studie der Unternehmensberatung Kienbaum und der Universität Duisburg-Essen davon aus, dass es bis zum Jahr 2020 etwa 800.000 E-Fahrzeuge im Pkw-Bereich geben wird, was einem Marktanteil von circa 7 Prozent entspricht (vgl. Proff et al. 2013). Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt geht hingegen nur von 150.000 elektrisch betriebenen Pkw bis 2020 aus (vgl. Brokate et al. 2013). Das Fraunhofer Institut für Systemforschung in Innovation (ISI) erwartet je nach Entwicklung unter anderem oben diskutierter Einflussgrößen bis 2020 von 200.000 bis 1.000.000 E-Fahrzeugen (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge) (vgl. Wietschel et al.). Auf diesen Annahmen basierend ist mit einer sukzessiven Diffusion der Elektromobilität zu rechnen, welche in drei Phasen erfolgt. Zunächst erfolgt eine Erprobung verschiedener Konzepte in der Pionierphase. In der anschließenden Konsolidierungsphase setzen sich verschiedene Konzepte durch und es werden Standards gesetzt. In der dritten Phase wird die Diffusion abgeschlossen und ein Gleichgewichtszustand entsteht. Es ist dabei davon auszugehen, dass die Elektromobilität in urbanen Räumen höhere Marktanteile erreichen wird als in ländlichen Regionen (vgl. Wildemann 2012a). Auch für die verschiedenen Logistikprozesse aus Kapitel 3 wird die Diffusion unterschiedlich ausfallen. Hierbei werden für die Produktionslogistik, die City-Logistik und für die Logistik der letzten Meile die höchsten Anteile von E-Fahrzeugen angenommen, da dort die zurückgelegten Strecken stets innerhalb der Reichweiten der E-Fahrzeuge liegen. Bei den anderen Prozessen ist die Verbreitung der Elektromobilität von den gefahrenen Strecken und

transportierten Gütern abhängig. Positiv wirken sich dabei kurze Distanzen sowie ein geringes Gewicht und Volumen der transportierten Güter aus.

5.4 Minimierung der Leerfahrten durch Internetportale

Eine weitere Möglichkeit, um die CO₂-Emissionen in der Logistik zu reduzieren ist eine Minimierung der Leerfahrten. Dies erfolgt unter anderem mit Frachtbörsen, welche Angebot und Nachfrage nach Transportdienstleistungen zusammenbringen. So werden dort Laderaumkapazitäten oder Transportaufträge angeboten beziehungsweise nachgefragt. Transport- und Logistikunternehmen bieten hierbei ungenutzten Laderaum an, um so eine höhere Auslastung ihrer Fahrzeuge zu erreichen und die Leerfahrten zu verringern. Den Verladern bietet sich damit die Möglichkeit, kostengünstig eigene Fracht transportieren zu lassen, sofern deren Start- und Zielort in der Nähe einer Route mit noch freier Kapazität liegt. So geben die Logistikunternehmen genau an, von wo nach wo ein Transport stattfindet, wie viel Kapazität noch vorhanden ist und wann der Transport durchgeführt werden soll. Die Verloader können nun in der Frachtbörse einsehen, welche Transporteure auf einer passenden Route unterwegs sind und noch über freie Kapazitäten verfügen. Umgekehrt inserieren auch die Verloader ihre Transporte in der Frachtbörse. Hierbei geben sie an, zu welchem Zeitpunkt und auf welcher Strecke die Ware transportiert werden soll. Nun können die Speditionen die Anfragen einsehen und mit den Aufträgen ihr Transportmanagement optimieren, das heißt ungenutzten Laderaum oder gar ganze Leerfahrten reduzieren (vgl. Hompel/ Heidenblut 2011). Die Internettechnologie er-

möglichst es dabei, die Logistikprozesse informationstechnisch zu vernetzen. Hierzu gehört beispielsweise der elektronische Datenaustausch EDI sowie Anbindung der unternehmensinternen Enterprise-Resource-Planning-Systeme (ERP) (vgl. Krol/Keller 2005). Aus der Verringerung der Leerfahrten folgt eine Senkung der CO₂-Emissionen. Die ökologischen und ökonomischen Effekte einer Frachtbörse sollen im Folgenden an zwei Fallstudien aus dem produzierenden Gewerbe erläutert werden. So wurde bei einem Reifenhersteller eine elektronische Plattform zur Transportvergabe eingeführt. Hierbei ist der Verlader über ein geschlossenes System mit etwa 50 Frachtführern vernetzt. Er hinterlegt seinen Bedarf an Transportkapazität, welchen die Spediteure mit einem Angebot bezüglich der Frachtrate versehen. Nun entscheidet der Disponent, welcher Frachtführer den Auftrag erhält. Neben finanziellen Aspekten gehen auch Erfahrungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit und bereits erfolgreicher Zusammenarbeit in die Entscheidung mit ein. Bislang werden auf diese Weise täglich Aufträge für etwa 350 Lkw erteilt. Durch die höhere Auslastung von etwa 95 Prozent ergibt sich eine deutliche Einsparung der Frachtkosten. Zudem lässt sich der administrative Aufwand beim Verlader reduzieren. Durch die integrierten Informationssysteme erfolgt die Abrechnung der Transporte aus der Frachtbörse automatisch. Aufgrund der geringeren Anzahl an Leerfahrten der Spediteure konnte der CO₂-Ausstoß um 9 Prozent reduziert werden. Eine weitere Fallstudie zeigt die Effekte beim Transport von Baumaschinen. Neben einer Verbesserung der logistischen Leistungen innerhalb der Logistikkette sollten durch die Reduzierung der Leerkilometer die Frachtkosten reduziert und die Wirkung der Logistik auf die CO₂-Bilanz verbessert werden. Die Logistik-

dienstleister verringerten dabei ihre Leerfahrten durch Anschlussladungen und Dreiecksverkehre. Dies wurde unter anderem durch die verbesserte Planungsbasis auf Seiten der Dienstleister ermöglicht, da durch die Frachtbörse die zu vergebenden Transporte früher und ausführlicher kommuniziert wurden. Ausgangspunkt zur Implementierung der Frachtbörse waren die hohen Transportkosten sowie der stark gestiegene Verwaltungsaufwand zur Koordination der Transporte bei über 1.000 Logistikdienstleistern. Darüber hinaus war die Aufschlüsselung der angefallenen Transportkosten auf einzelne Transporte und die Zuweisung derselbigen auf die dabei transportierten Güter auf Grund einer ungenügenden Datenbasis nicht möglich. Des Weiteren können die beauftragten Logistikdienstleister einem konkreten Transport derzeit nicht zugeordnet werden. Die Auswahl einer geeigneten Logistikplattform wurde in einem zweistufigen Verfahren vorgenommen. In einem ersten Schritt wurden alle auf dem Markt relevanten Logistikplattformen auf Ihre Eignung hin überprüft. Fünf Logistikplattformen wurden anschließend auf Basis eines standardisierten Fragenkatalogs interviewt und bewertet. Daraus wurden drei Logistikplattformen in die engere Wahl genommen. In einem zweiten Schritt wurden die Anbieter der drei Logistikplattformen zu einem Vorstellungstermin eingeladen. Bei diesem Präsentationstermin wurde insbesondere auf die Anpassungsfähigkeit der Frachtbörsen und auf die Anforderungen des Unternehmens sowie auf die Berücksichtigung der an den Präsentationen anwesenden Frachtdisponenten Wert gelegt. Die Vergabeplattform unterstützt die Frachtdisponenten dabei, per Mausklick die optimalen Logistikdienstleister für alle anfallenden Transportaufträge zu finden. Sie vernetzt die Frachtdisponenten elektronisch mit den

Logistikdienstleistern. Dadurch können alle Logistikdienstleister zeitgleich über den aktuellen Bedarf an Transportkapazität informiert werden. So entstand die Transparenz, die für die rechtzeitige, sichere und Kosten minimierende Vergabe der Aufträge notwendig ist. Für die Logistikdienstleister ist die Plattform der zentrale Platz, auf dem sie jederzeit alle aktuell zu vergebenden Frachtaufträge einsehen und entsprechende Angebote abgeben können. Dadurch kann jeder Auftrag kostenoptimal abgewickelt werden, denn Leerkilometer werden reduziert. Um die Komplexität und den Aufwand bei der Einführung und Inbetriebnahme möglichst gering zu halten, sah der Zeitplan zwei Ausbaustufen vor. In der ersten Ausbaustufe werden etwa ein Drittel der Standorte an die Logistikplattform angebunden. Mit diesen Teilnehmern wurden vorher Workshops durchgeführt, in denen die Logistikplattform vorgestellt wurde. Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Frachtdisponenten die Vorzugslogistikdienstleister definiert, die in der ersten Ausbaustufe integriert werden sollen. Die nächsten Schritte sehen die Schulung der Frachtdisponenten sowohl auf Unternehmensseite als auch auf Seiten der Logistikdienstleister vor. Die zweite Ausbaustufe integrierte die übrigen Standorte. Zudem wurden im Zuge der zweiten Ausbaustufe Anpassungen an der Logistikplattform vorgenommen und die Ergebnisse aus dem Online-Betrieb kontinuierlich evaluiert. Ferner wurde mit den Teilnehmern der zweiten Ausbaustufe Workshops durchgeführt, um die Logistikplattform vorzustellen und um die Vorzugslogistikdienstleister auszuwählen. Die Plattform zur Transportvergabe dokumentierte alle angefallenen Transportdaten, so dass Auswertungen der Transportbewegungen, der Transportkosten, der beauftragten Logistik-

dienstleister, der transportierten Güter und des CO₂-Ausstoßes über einen frei definierbaren Betrachtungszeitraum ermöglicht und transparent dargestellt werden können.

5.5 Optimierung der Containerbeladung und Behältersysteme

Die Optimierung der Beladung und des Handlings von Ladungsträgern wie Behälter, Paletten und Container stellt eine weitere Möglichkeit dar, den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Die Ladungsträger bewirken dabei ein Zusammenfassen mehrerer Güter in logistischen Prozessen. Sind die Ladungsträger zudem vereinheitlicht, werden standardisierte und automatisierte Prozesse ermöglicht. Darüber hinaus erlauben die standardisierten Ladungsträger eine höhere Auslastung der Fahrzeuge. Dadurch sinkt die Anzahl an Fahrten, weshalb die CO₂-Emissionen reduziert werden können. Auch die Beladung der Ladungsträger an sich birgt hier Potenziale, da sie ebenfalls eine höhere Beladung der Fahrzeuge und somit eine höhere Auslastung ermöglichen. Um eine optimale Beladung von Paletten und Containern sicherzustellen, existieren vielfältige Lösungsansätze. Ihre Grundstruktur ist dabei jedoch einheitlich. So sind stets eine Menge von Ladungsträgern vorhanden, welche einen nach Breite, Länge und Höhe definierten Stauraum bereitstellen. Weiterhin existiert eine Menge von Stückgütern beziehungsweise Packstücken mit gegebenen Formen und Abmessungen, mit denen die Paletten und Container beladen werden sollen. Dabei soll der Stauraum möglichst gut genutzt werden. Hierzu wurde ein Stauplan gesucht, aus dem hervorgeht, wie die Packstücke den Ladungsträgern zuzuordnen und schließlich inner-

halb dereranzuordnen sind. Nun ergeben sich aufbauend auf der gemeinsamen Grundstruktur verschiedene zu lösende Beladungsprobleme. Hierbei kann zunächst nach der Anzahl der Ladungsträger unterschieden werden, welche Stauraum bereitstellen. Bei einem einzelnen Ladungsträger reicht der Stauraum oft nicht aus, um alle Packstücke unterzubringen. Die Lösung ist somit dann optimal, wenn möglichst viele Packstücke auf dem Ladungsträger platziert werden können und wenig Stauraum ungenutzt bleibt. Bei mehreren Ladungsträgern hingegen werden ausreichend Ladungsträger angenommen, um alle Packstücke aufzunehmen. Die optimale Lösung liegt dann vor, wenn die benötigte Anzahl an Ladungsträgern minimal ist. Paletten- und Containerbeladung unterscheiden sich dabei, da für Paletten oft die räumliche Dimension vernachlässigt wird. Bei Containern hingegen ist die vertikale Ausdehnung von Stauraum und Packstücken stets zu berücksichtigen. Am Beispiel des Packproblems der Containerbeladung werden im Folgenden die Problemformulierung sowie Lösungsverfahren zur optimalen Beladung aufgezeigt. Die Containerbeladung sei dabei wie folgt charakterisiert: Im Container mit definierter Länge, Breite und Höhe sind Packstücke anzuordnen, welche sich in Klassen einteilen lassen, innerhalb derer die Packstücke identische Abmessungen aufweisen, welche ebenfalls mit Länge, Breite und Höhe vorgegeben sind. Der Container soll nun mit einem möglichst hohen Gesamtvolumen an Packstücken beladen werden, das heißt, der ungenutzte Stauraum des Containers ist zu minimieren. Die Packstücke sollen weiterhin so angeordnet werden, dass sie sich innerhalb des Containers befinden, nicht überlappen und dabei vollständig auf dem Containerboden oder auf anderen Packstücken ruhen. Ist nun das Volumen der Packstücke

im Container maximal, so ist der Stauplan optimal. Um solche Beladungsprobleme zu lösen, werden in der Praxis verschiedene heuristische Verfahren eingesetzt (vgl. Wäscher 2008). Diese erstellen die Baupläne sukzessive, wobei nach dem so genannten Wall-Building Approach, Column-Building Approach oder dem Layer Approach vorgegangen wird (vgl. Davies/ Bischoff 1999). Beim Wall-Building Approach wird vor der hinteren Seitenwand des Containers eine Wand aus Packstücken aufgebaut, wobei unterschiedlich tiefe Packstücke verwendet werden können. Durch das sukzessive Errichten weiterer Wände vor den bereits bestehenden Wänden wird der Container befüllt. Der Column-Building Approach unterscheidet sich dadurch, dass anstatt vollständiger Wände Säulen aus einzelnen übereinander gestapelten Packstücken auf der Containergrundfläche platziert werden (vgl. Bischoff/ Ratcliff 1995). Diese beiden Ansätze haben sich bei der Beladung von Containern mit stark unterschiedlichen Packstücken bewährt. Der Layer Approach hingegen ist bei ähnlich beschaffenen Packstücken besser geeignet. Hierbei wird der Container vom Boden her nacheinander mit einschichtigen Lagen beladen. Jede Lage wird unter Berücksichtigung der Packfläche und des noch vorhandenen Vorrats an Packstücken gebildet. Die Packflächen sind stets rechteckig, wobei die erste Lage mit der Grundfläche des Containers übereinstimmt. Neue Lagen entstehen auf den bereits angeordneten Packstücken (vgl. Wäscher 2008). Bei der Erstellung von Stauplänen für die Containerbeladung sind in der Praxis verschiedene Bedingungen und Anforderungen zu beachten. Hierzu zählt die Stabilität der Ladung, das heißt ein Verrutschen der Ladung soll verhindert werden. Zudem ist das Gesamtgewicht der Ladung zu beachten, welches eine gewisse

Höchstgrenze nicht überschreiten darf. Weiterhin ist auf eine gleichmäßige Gewichtsverteilung im Container zu achten sowie auf eine vorgegebene Packstückorientierung, beispielsweise ausschließlich vertikal orientiert. Darüber hinaus ist es bei besonders großen oder schweren Artikeln sinnvoll, diese entweder direkt auf dem Containerboden oder zumindest in geringer Höhe zu platzieren. Dies erleichtert die Handhabung und belastet die darunter liegenden Packstücke weniger. Zudem ist gegebenenfalls eine Gruppierung von Packstücken zu berücksichtigen, beispielsweise aufgrund der gemeinsamen Lieferung zu einem Kunden oder aufgrund hoher Priorität der Zustellung. So sind gemeinsam an Kunden gelieferte Waren bereits im Stauplan als Gruppe anzuordnen, um Umladeprozesse zu vermeiden. Hierzu zählt auch ein Anordnen der Packstücke in der Reihenfolge der Entladung. Diese Aspekte werden in den vorgestellten Verfahren bereits teilweise berücksichtigt. So sorgt der Layer Approach durch seine lagenweise Anordnung der Güter vom Boden her bereits für eine hohe Stabilität der Ladung (vgl. Bischoff/ Ratcliff 1995). Beim Wall-Building Approach lässt sich durch ähnliche, der Containermitte gegenüberliegende Wände eine gleichmäßige Gewichtsverteilung erzeugen (vgl. Gehring/ Bortfeld 1997; Davies/ Bischoff 1999). Durch eine der Entladungsreihenfolge entsprechenden Anordnung der Säulen ist es beim Column-Building Approach möglich, Umladevorgänge zu reduzieren und ein schnelles Entladen der Waren zu gewährleisten (vgl. Bischoff/ Ratcliff 1995). Um die Staupläne zur Containerbeladung zu erstellen, ist kommerzielle Software am Markt verfügbar, welche von Unternehmen aus verschiedenen Branchen genutzt wird (vgl. Wäscher 2008). Aufgrund der höheren Auslastung der Ladungsträger und Lkw durch Bela-

dungskonzepte kann eine Reduzierung der Anzahl an Fahrten von durchschnittlich etwa 5 Prozent erreicht werden. Insbesondere in der Beschaffungs- und Distributionslogistik liegt dieser Anteil höher und auf diese Weise lassen sich hohe CO₂-Einsparungen erreichen. Behälterkreislaufsysteme stellen eine weitere Möglichkeit dar, den CO₂-Ausstoß zu senken. Sie bilden ein integriertes Produktions-, Transport-, Lager- und Verpackungssystem mit Leergutrückführung, siehe Abbildung 5-6. Die Art und Form der verwendeten Behälter sind dabei das Ergebnis einer typenspezifischen Behälterentwicklung. Wichtige Merkmale von Behälterkreisläufen sind dabei:

- Einsatz standardisierter und logistikgerechter Behälter,
- EDV-gestützte Steuerung des Kreislaufs,
- Leerbehälterdisposition sowie
- Kooperation aller Partner in der Transportkette.

Um einen transparenten und effizienten Materialfluss zu erreichen, sind die Behälter in ein Kreislaufsystem zu integrieren.

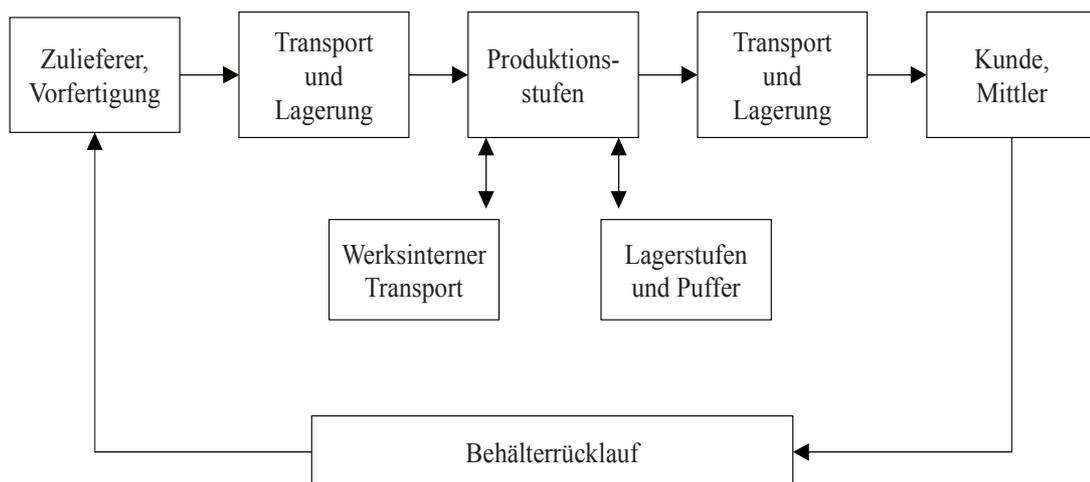


Abbildung 5-6: Behälterkreislaufsystem (vgl. Wildemann 2014b)

Die Kreisläufe basieren dabei auf Quelle-Senke-Beziehungen und können auf verschiedenen Ebenen eingesetzt werden, bei-

spielsweise innerhalb von Produktionshallen sowie über die Produktion hinweg unter Einbezug der Lieferanten und der Montage. Weiteres Potenzial lässt sich über die Betrachtung der vollständigen Logistikkette realisieren. Bei der Entwicklung eines Behälterkreislaufsystems sind zunächst das Empfindlichkeitsprofil des Packgutes und das Anforderungsprofil der Logistikkette zu ermitteln. Hieraus entstehen anschließend der Anforderungskatalog und das Eignungsprofil der Behälter. Auf Basis dieser Schritte wird der Behälter gestaltet und es entstehen Prototypen, welche einen Prüfungsprozess hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen durchlaufen. Mit einem erfolgreich betriebenen Behälterkreislaufsystem lassen sich vielfältige Potenziale entlang der Logistikkette realisieren. So lässt sich insbesondere beim Transport und in der Lagerung eine hohe Volumennutzungsdichte erreichen (vgl. Wildemann 1995a). Dies wird sowohl durch einen hohen Füllgrad der Behälter als auch der Lager und Transportmittel mit Behältern ermöglicht. Auf diese Weise ist, ähnlich wie bei der eingangs diskutierten Containerbeladung, eine höhere Auslastung der Transportmittel möglich, was sich positiv auf den CO₂-Footprint auswirkt.

5.6 Milkrun-Konzept

Ursprünglich zur Senkung der Logistikkosten entwickelt und implementiert, eignet sich das Milkrun-Konzept ebenfalls dazu, den CO₂-Footprint zu verbessern. So wird vor der Einführung des Milkruns die flexible Zusammenstellung optimaler Touren den Spediteuren überlassen, die ihre spezifischen Transport- und Lagerstrukturen optimal auslasten können. Dabei kann die Identifizierung potenzieller Rundtouren von Seite der Indust-

rieunternehmen die Lkw-Auslastung jedoch noch weiter steigern. Somit wird beim Milkrun eine Route von den Lieferanten zu den Werken definiert, auf der eine oder mehrere Sendungen ohne Umschlag durch den Spediteur transportiert werden, siehe Abbildung 5-7.

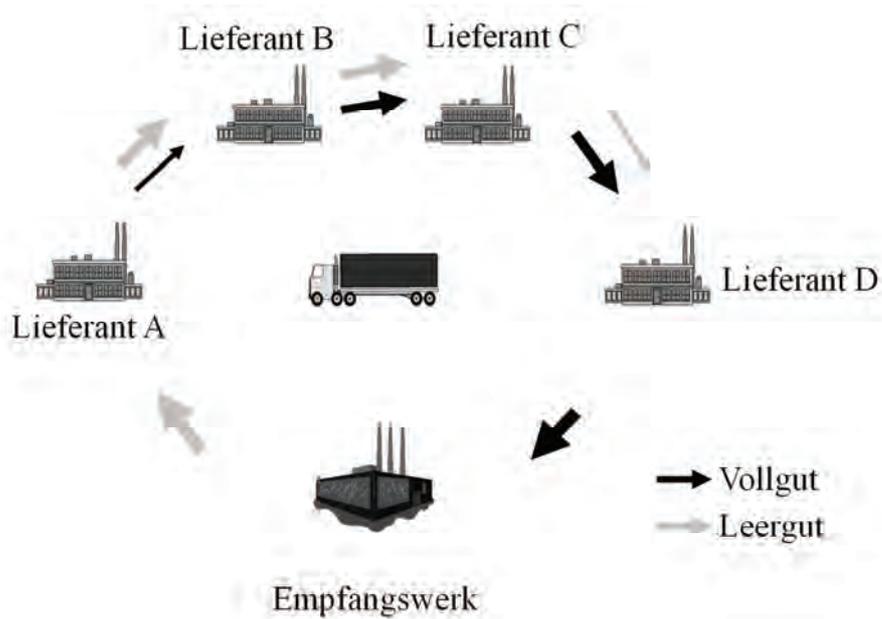


Abbildung 5-7: Milkrun-Konzept (vgl. Wildemann 2014d)

Ist die Rundtour sorgfältig geplant, so ist eine deutliche Auslastungssteigerung von 60-70 Prozent auf durchschnittlich 90 Prozent zu erzielen (vgl. Wildemann/ Niemeyer 2006). Dadurch lassen sich die Kosten für den Transport sowie der CO₂-Footprint nachhaltig senken (vgl. Bretzke/ Barkawi 2012). Das Konzept der Milkruns basiert auf dabei dem Wissensvorsprung der Kunden über ihre Lieferstrukturen und Transportbedarfe. Die entscheidenden Eingangsinformationen für die Milkrun-Bildung sind: Transportstetigkeit der Bedarfe, Standorte der Lieferanten, Lieferzeiten für die Transporte und Anlieferzeitpunkte im Werk. Bei einer hinreichenden Stetigkeit der Transportbedarfe des Gesamttransportvolumens bzw. eines Mindes-

tanteils des Transportvolumens ist eine Vorausplanung der Transportabläufe möglich. Ein Rückgriff auf den Flexibilitäts-spielraum der Spediteure für Mengen –und Zeitschwankungen ist dann nicht erforderlich. Bei einer hinreichenden Konzentration von Lieferanten in einem regionalen Gebiet können Standardtouren entlang der Lieferantenstandorte zusammengestellt werden. Durch Abstimmung von Lieferzeiten der Transporte, Abholzeiten bei den Lieferantenwerken und Anlieferzeitpunkte in den Werken können Standardzeiten ermittelt werden, an denen sich die Touren orientieren. Durch Übernahme des Auslastungsrisikos der Transportmittel entfällt auch die Grundlage für Risikozuschläge der Spediteure. Dabei können auf Seite von Industrie und Spedition weitere Potenzialquellen zur Verbesserung des CO₂-Footprints genutzt werden. So ist bei Abruf von Transportleistungen für eine gebündelte Sendungsabholung bei mehreren Abholorten nur eine einzelne Tour zu fahren. Dies senkt den CO₂-Ausstoß der Fahrzeuge erheblich im Vergleich zu mehreren Einfahrten. Auch durch die Mitnahme des Leerguts bei Anlieferung lassen sich Strecken einsparen, da keine separate Abholung des Leerguts erfolgen muss. Zur Entwicklung von Milkruns hat sich in den Projekten eine analytische Vorgehensweise bewährt. Dabei können Milkruns sowohl für bestehende Transportsysteme als auch für neu zu etablierende Logistikstrukturen gebildet werden. Ausgangsbasis ist eine Logistik-Datenbank, welche historische Daten über die Lieferantenstrukturen, Bedarfsdaten, Verpackungs- und Transportbedingungen sowie Transportkosten enthält. Auf Basis einer Analyse der zeitlichen Randbedingungen für den Transport wird die Anzahl der anzufahrenden Lieferanten für eine Belieferungsregion festgelegt. Auf Basis von Abholfrequenz und

Transportmenge sowie Transportmengenschwankung werden einzelne Milkrun-Optionen zu Clustern konsolidiert und anschließend die Transportreihenfolge festgelegt. Nach einer zeit- und kostenorientierten Bewertung der Optionen können die besten Optionen ermittelt werden, siehe Abbildung 5-8. Bei der Planung neuer Logistikstrukturen wie sie beispielsweise bei der Logistikplanung für neue Produktprojekte erfolgt, können bei entsprechender Datentransparenz die Lieferanten-, Verpackungs- und Transport-Plandaten verwendet werden. Für die Analyse der Bedarfe und Transportkosten ist eine Ableitung von historischen Bedarfsschwankungen und Transportkostenstrukturen des Produktvorgängers hilfreich. Der richtige Zeitpunkt für die auslastungsorientierte Konsolidierungsplanung liegt nach Abschluss der Behälterplanung und vor Serienanlauf, da zu diesem Zeitpunkt meist das Optimum an Datentransparenz und Verhandlungsspielraum erzielt wird (vgl. Wildemann/Niemeyer 2006). Als Fallbeispiel für die erfolgreiche Einführung des Milkrun-Konzepts wird ein Zulieferer aus der Automobilbranche herangezogen.

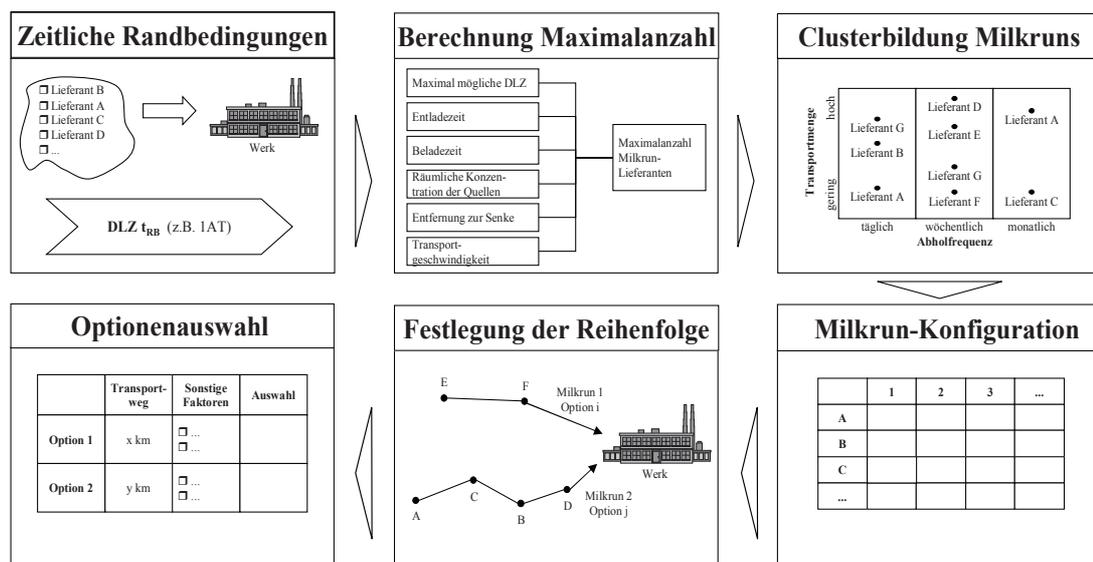


Abbildung 5-8: Entwicklung von Milkrun-Routen (vgl. Wildemann 2014d)

Seine Ausgangssituation war durch ein undifferenziertes Beschaffungstransportkonzept gekennzeichnet. Durch das Konzept der Konsolidierung konnten nur geringe Vorteile erzielt werden, denn oft waren die Entfernungen zu Kunden und Lieferanten geringer als zum Konsolidierungszentrum, weshalb sich die Disponenten in diesen Fällen für eine direkte Lieferung entschieden. So entstanden viele Kleinstlieferungen bei gleichzeitig hohen Leergut-Transportkosten. Die vielen kleinen Lieferungen an eine große Anzahl an Entladestellen trieben die Beschaffungstransportkosten in die Höhe und sorgten für eine Intransparenz bei den Spediteuren. Die Lieferantendisziplin war zudem gering, weshalb häufig die Liefertermine nicht eingehalten wurden. Zur Implementierung des Milkrun-Konzepts erfolgte daher zunächst eine Analyse der Transportmengen, woran sich eine Ausplanung der Milkruns mit Routen, Soll-Zeitplänen mit Zeitfenstern, Volumenkontingenten, etc. anschloss. Zur Bestimmung der optimalen Anlieferhäufigkeiten der Milkruns wurde dabei das Volumen-Gewichts-Portfolio verwendet (vgl. Abbildung 5-9).

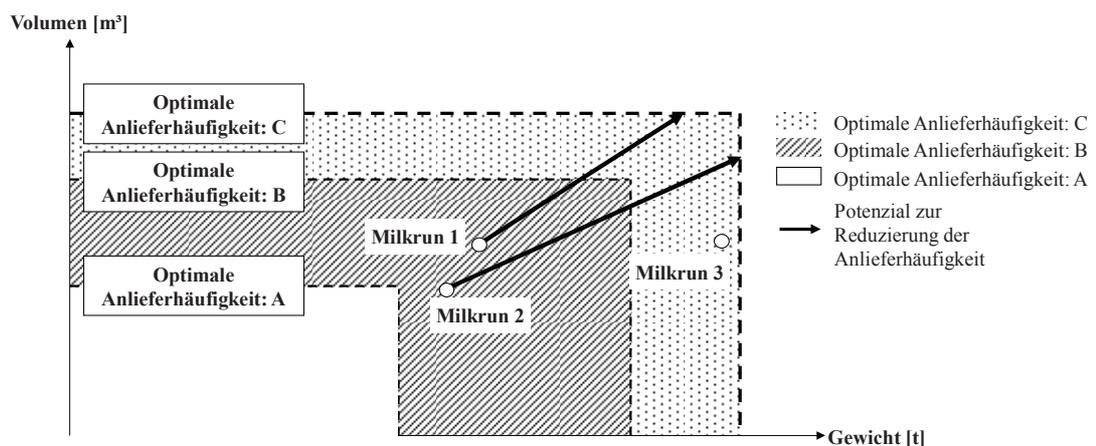


Abbildung 5-9: Volumen-Gewichts-Portfolio zur Bestimmung der Anlieferhäufigkeiten

Eine anschließende Überprüfung und Verbesserung im Rahmen des Milkrun-Controllings stellte die zielführende Umsetzung sicher. Somit konnten die Beschaffungstransportkosten im Vergleich zum vorher eingesetzten Konsolidierungskonzept um bis zu 47 Prozent reduziert werden, vgl. Abbildung 5-10. Durch weniger Leerfahrten sowie eine höhere Auslastung der Transportfahrzeuge ließ sich der CO₂-Ausstoß senken. Weiterhin führten konstantere Transportmengen, eine Reduzierung von Blindleistung in Form von Standzeiten an Be- und Entladestellen zur Hebung weiterer Potenziale. In einer weiteren Fallstudie konnte durch die Implementierung eines Milkrun-Konzepts bei einem Hersteller von Bussen die kostenintensive Einzelzustellung durch Expresslieferungen teilweise ersetzt werden. Neben den eingesparten Wegen führte die Maßnahme durch eine Anlieferung außerhalb der üblichen Zustellungszeiten zu einer starken Senkung der CO₂-Emissionen. Dies wurde durch personalfreie Abgabepunkte ermöglicht, welche über eine elektronisch gesicherte Zugangsbeschränkung eine kontrollierte nächtliche Zustellung sicherstellen.

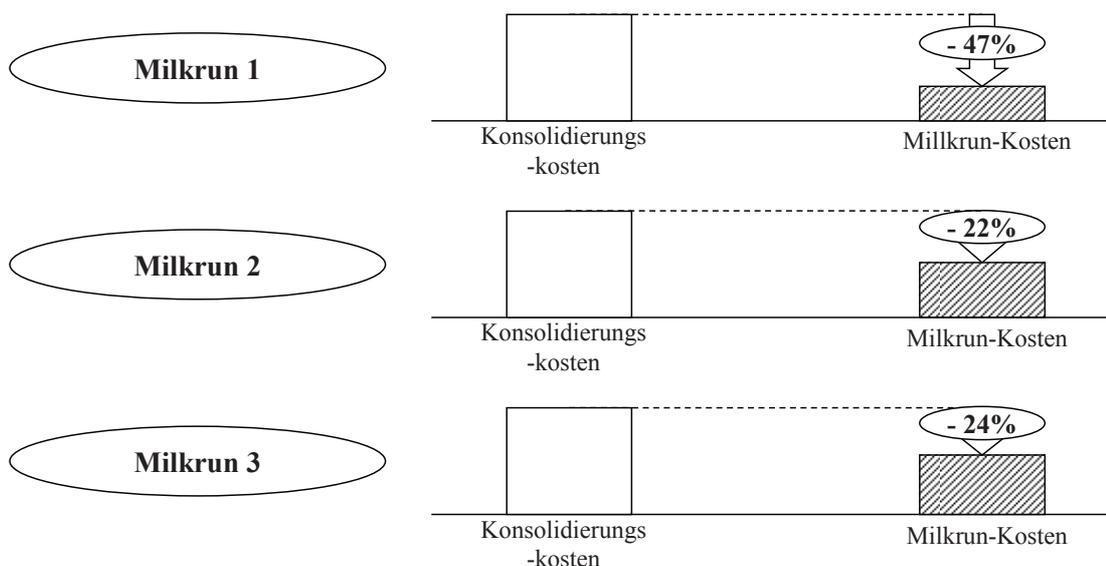


Abbildung 5-10: Kosteneinsparung durch Milkrun-Konzept

So konnten die Touren mit der geringsten Kilometerzahl ausgewählt werden, weil es keine Wunschanlieferzeiten einzuhalten galt. Da ein Teil der Touren in den späten Abendstunden stattfand, konnte die Belieferungen spritsparend ohne Staus und Stopp-and-go-Verkehr durchgeführt werden (vgl. Bretzke/ Bar-kawi 2012). Bei einem Automobilzulieferer führte die Einführung von Milkruns ebenfalls zu einer Senkung des CO₂-Ausstoßes. Hierzu wurden in den beiden konfigurierten Routen mehrere Lieferanten in fester Reihenfolge angefahren. Die so zusammengelegten Transporte ersetzten die Einzeltransporte, was zu einer geringeren Anzahl an Fahrten führte bei gleichzeitig höherer Auslastung der Fahrzeuge (vgl. Padmanabha/ Ajit-kumar 2007). In diesen Fallbeispielen konnten mit Hilfe dieses Konzepts die betrachteten Transportkosten nachhaltig um durchschnittlich um 30 Prozent gesenkt werden. Der CO₂-Footprint sank parallel dazu. Dies lässt sich durch die höhere Auslastung der Transportmittel, kürzere Transportwege durch kombinierte Touren sowie eine Verringerung des Leerkilometeranteils durch Leergutmitnahme bei Anlieferung erreichen.

5.7 Fahrertrainings

Fahrgewohnheiten und Fahrstil des Fahrzeugführers haben ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs. So kann eine aggressive Fahrweise die durch Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz erreichten Einsparungen zunichtemachen. Spezielle Fahrerschulungen offenbaren weitere Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz. Die realisierbaren Kraftstoffeinsparungen belaufen sich auf 5 bis 10 Prozent. Die während der Schulung vermittelten In-

formationen zu sparsamen Fahren helfen den Fernfahrern, ihre Fahrweise entsprechend anzupassen. Beispielsweise muss der Fahrzeugführer darauf achten, schnell auf Reisegeschwindigkeit zu beschleunigen, vorausschauend zu fahren und das Fahrzeug so lange wie möglich rollen zu lassen (vgl. Volvo Trucks 2011). Weitere Maßnahmen sind das Einhalten konstanter Geschwindigkeiten, auch unter Nutzung des Tempomats, sowie das Fahren bei niedrigen Drehzahlen und frühes Hochschalten. Weiterhin lässt sich Sprit durch das Abschalten des Motors an roten Ampeln einsparen (vgl. Deutsche Post DHL 2012; FedEx 2013). Das Fallbeispiel zum erfolgreichen Spritsparen durch Fahrertrainings liefert der Gewinner des Green Freight & Logistics Award 2008. Der ausgerufene Preis zeichnet Unternehmen aus den Bereichen Logistik, Lebensmittel- und Abfallwirtschaft aus, die Vorreiter bezüglich eines umweltgerechten Fuhrparks sind. So schulte das Gewinner-Unternehmen seine Fahrer zu effizienter Fahrweise und sparte dabei bei 155 Lkw über 650.000 Liter Diesel pro Jahr ein. Dies entspricht einer jährlichen Senkung des CO₂-Ausstoßes von etwa 1.740 Tonnen. Die eingesparten Kraftstoffkosten wurden dabei zu jeweils 50 Prozent auf Fahrer und Unternehmen aufgeteilt (vgl. MyLogistics 2014). Ein weiteres Fallbeispiel liefert ein Logistikdienstleister aus dem Textilbereich. Er sparte durch Fahrerschulungen und die Nutzung rollwiderstandsarmer Reifen 100.000 Liter Diesel in einem Jahr ein, was einer Senkung der CO₂-Emissionen von etwa 270 Tonnen entspricht (vgl. Meyer 2012). Um die Mitarbeiter nach der Schulung auch weiterhin zu sparsamer Fahrweise zu ermuntern, eignen sich Anreizsysteme. Die Anreize sind Möglichkeiten für Mitarbeiter eines Unternehmens ihren eigenen Nutzen zu erhöhen. Dies kann durch mate-

rielle oder immaterielle Anreize geschehen (vgl. Becker 2001). Materielle Anreize sind beispielsweise Löhne und Gehälter sowie Sozialleistungen, Zulagen und Erfolgsbeteiligungen. Immaterielle Anreize sind zum Beispiel Weiterbildungen, Karrieresysteme und Erweiterung der Tätigkeiten um interessante Aufgabenfelder (vgl. Brandenburg 2001). Zu beachten ist dabei, dass bei der Einführung der Anreizsysteme eine nachvollziehbare Bezugsgröße bestimmt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die Mitarbeiter das Kriterium, beispielsweise die Senkung des Spritverbrauchs, als Ziel erkennen. Anreizsysteme sind mittlerweile in den meisten Unternehmen implementiert, beispielsweise im Lohn-/Gehaltssystem. Durch eine geplante Veränderung und Steuerung solcher Anreizsysteme werden diese zu einem Instrument des Managements, um verschiedenste Ziele durchzusetzen. Weiterhin lassen sich auf allen Hierarchieebenen im Unternehmen zusätzliche Anreizsysteme einsetzen, wobei sie jedoch unterschiedliche Merkmale aufweisen. So beziehen sich die Anreize für das obere Management auf andere Bezugsgrößen (beispielsweise Umsatzbeteiligung) als in der Ausführungsebene, welche beispielsweise Prämien für Arbeitsergebnisse vorsieht (vgl. Brandenburg 2001; Seidel 1990). Bereits heute nehmen die Anreizsysteme im Kontext der Nachhaltigkeit eine wichtige Stellung ein. Insbesondere bei messbaren Kriterien wie der Einsparung von Material in der Produktion sowie Energie in Form von Strom oder Kraftstoff in der Logistik, sind Anreizsysteme gut anwendbar und daher bereits weit verbreitet. Daher sind derartige Systeme zur Verwirklichung von Umweltschutzziele besonders gut geeignet. Die materiellen und immateriellen Anreize bieten hierzu Möglichkeiten, die Lkw-Fahrer zu einer umweltschonenderen Fahrweise zu bewe-

gen, um so den CO₂-Footprint zu senken. Ist dabei die zusätzliche Wertschöpfung, beziehungsweise die Einsparung aufgrund der angepassten Fahrweise größer als die hierfür vorgesehene Prämie, so resultiert daraus eine höhere Öko-Effizienz für das Unternehmen. Weiterhin kann auf diese Weise das Anreizsystem zu einer Kostensenkung beitragen (vgl. Schaltegger et al. 2007).

5.8 Reduzierung von Sonderfahrten

Fehler in der Planung führen gegebenenfalls zu Terminabweichungen, aus denen sich Lieferengpässe entlang der Wertschöpfungskette ergeben können. Um einen Produktionsstopp zu verhindern, werden Sonderfahrten oder sogar Sonderflüge notwendig, damit die benötigten Güter rechtzeitig am Verwendungsort zur Verfügung stehen. Solche Sondertransporte wiederum verschlechtern den CO₂-Footprint und sind daher zu vermeiden. Um die Planungsgenauigkeit zu erhöhen, welche zur Vermeidung von Sonderfahrten beiträgt, können verschiedene Konzepte verwendet werden. Die Quick Response wird durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie möglich gemacht und erfasst somit die Marktnachfrage direkt beim Kunden und in Echtzeit (vgl. Diruf 1994). Hiermit kann der Lieferant aus dem Abgleich der bisherigen Liefermengen und Abverkaufsmengen die Bestände im Lager des Kunden ermitteln und Abweichungen von den prognostizierten Verkaufsmengen erkennen, siehe Abbildung 5-11. Die Abweichungen berücksichtigt der Lieferant anschließend in seiner Bedarfsermittlung, um seine Produktionspläne anzupassen (vgl. Krcmar 2005). Zur Übertragung der Daten sind Electronic Data Interchange (EDI)-

Systeme zu empfehlen, welche über die Verarbeitung großer Datenmengen hinaus eine automatische Überwachung und Steuerung der Prozesse erlauben (vgl. Pfohl 2009). Durch diesen Ansatz können drohende Engpässe frühzeitig identifiziert und verhindert werden. Die Methode des Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR) nutzt ebenfalls die Informations- und Kommunikationstechnologie. Sie ermöglicht eine gemeinsame Planung über die Unternehmensgrenzen hinweg, wobei zum Datenaustausch EDI-Systeme und internetbasierte Lösungen eingesetzt werden. CPFR aggregiert Bedarfswerte aus verschiedenen Absatzkanälen, auf welche die Partner einer Lieferkette zugreifen. Somit können die Nutzer mögliche Änderungen in den Abrufen in Echtzeit ermitteln und entsprechend in der Planung von Produktion und Logistik berücksichtigen. Dieser Ansatz hilft somit dabei, die Planung der einzelnen Akteure zu verbessern und die Aktivitäten entlang der Supply-Chain zu synchronisieren (vgl. Werner 2011). Der Regelkreis des CPFR veranschaulicht Abbildung 5-12. Vendor Managed Inventory (VMI) hingegen ist eine Dienstleistung des Lieferanten für seinen Kunden.

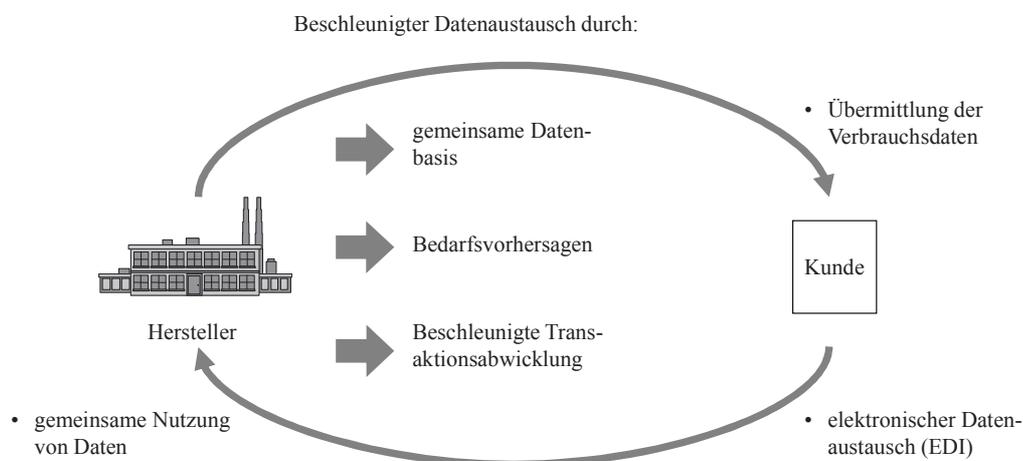


Abbildung 5-11: Quick Response Konzept (vgl. Wildemann 2014c)

Hierbei übernimmt er die Disposition seiner Produkte im Unternehmen des Kunden. Der Lieferant sichtet dabei die Verbrauchsdaten in kurzen Intervallen mittels eines VMI-Systems, welches ihm ermöglicht, die Datenbanken seiner Kunden einzusehen und damit die Lagerbestände abzurufen. Somit kann er die Auffüllung der Bestände bei Kunden selbstständig übernehmen, denn beim Erreichen eines festgelegten Dispositionsgrenzwerts wird eine Bestellanforderung erzeugt. Für ein funktionierendes VMI müssen die Lieferanten neben den Beständen auch die aktuellen Bedarfszahlen und Absatzprognosen der Kunden kennen, um ihre eigene Produktion und Lieferung möglichst gut daran ausrichten zu können. Dies setzt ein hohes Maß an Vertrauen zwischen den Partnern in der Lieferkette voraus (vgl. Quick et al. 2012). Am Fallbeispiel eines Automobilzulieferers führte das VMI-Konzept zu einer starken Senkung der Sonderfahrten. Denn mögliche Engpass-Situationen werden transparent, da die Partner jederzeit online über anstehende Bedarfe und Lieferungen informiert sind.

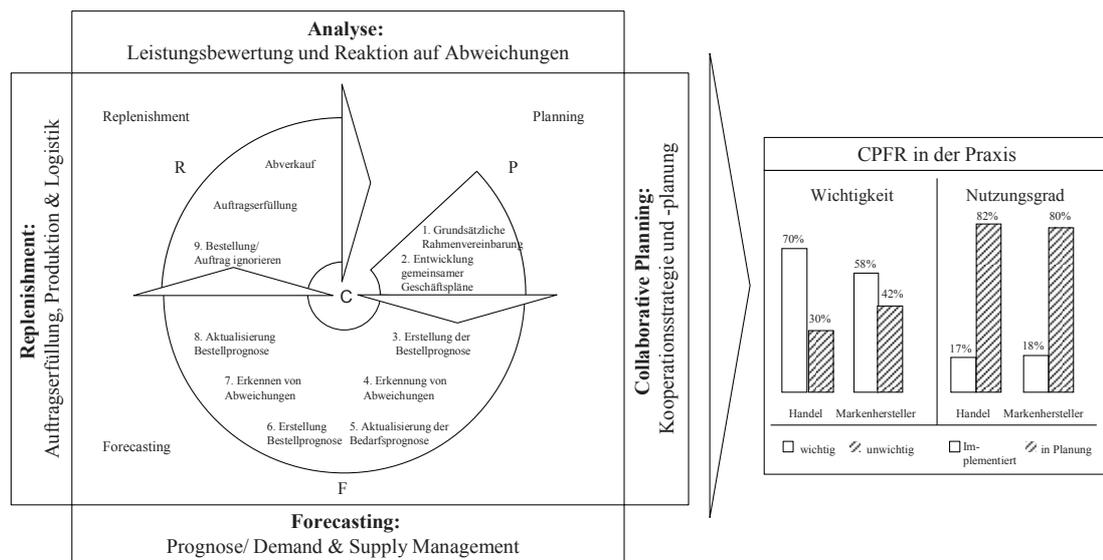


Abbildung 5-12: Regelkreis des CPFR-Konzepts (vgl. Wildemann 2014c)

Durch die Einsicht in die aktuelle Bestands- und Bedarfssituation ergibt sich für den Lieferanten eine verbesserte Planung (vgl. Seidenschwarz 2008). Die vorgestellten Konzepte ermöglichen eine genaue Planung der Logistikprozesse sowie eine vorausschauende Vermeidung von Engpässen. Dies reduziert den Bedarf an Sonderfahrten, wodurch sich der CO₂-Footprint verbessert.

5.9 Qualitätsmanagement in der Logistik

Um das Qualitätsmanagement in der Logistik zu verankern, sind die Bereiche Genauigkeit der Planung, Erreichung der Qualitätsziele und Entstörmanagement zu beachten. Eine hohe Planungsgenauigkeit basiert dabei auf einer hohen Informationsdichte und -qualität. Diese stellen geeignete betriebliche Informationssysteme sicher. Die Qualitätsziele in der Logistik bestehen aus Pünktlichkeit, beziehungsweise Termintreue, Lieferfähigkeit, sowie Sendungsqualität. Die Termintreue bezeichnet dabei die Einhaltung der zugesagten Lieferzeiten. Die Lieferfähigkeit beurteilt, wie häufig der vom Kunden gewünschte Liefertermin zugesagt werden kann, und die Sendungsqualität bezeichnet vollständige, unversehrte und mangelfreie Lieferungen. Weitere Qualitätsziele der Logistik sind die Flexibilität gegenüber Änderungen, die Informationsbereitschaft sowie die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Transportmittel, Anlagen und Systeme. Die Flexibilität bezieht sich dabei auf Änderungen von Anforderungen des Kunden oder seines Sortiments sowie die schnelle Anpassung auf Schwankungen, beispielsweise durch Saisonalität. Die Informationsbereitschaft meint eine Auskunft über beispielsweise den Liefertermin, Liefersta-

tus und die Sendungsherkunft (vgl. Gudehus 2010). Insbesondere in produzierenden Unternehmen ist eine hohe Logistikqualität notwendig, da sich dort logistische Fehler direkt auf den Wertschöpfungsprozess auswirken. So führen beispielsweise Engpässe im Logistiksystem direkt zu Störungen in den Produktionsprozessen. Solchen Störungen in der Logistik und Produktion ist daher mit geeigneten Konzepten zur Entstörung zu begegnen. Hierzu eignet sich das Entstörmanagement. Es beinhaltet organisatorische Regelkreise, um trotz Störeinflüssen die aufgestellten Pläne optimal zu erfüllen. Hierzu werden die Abweichungen richtig gewertet, was die Schäden und Folgeschäden reduziert. Die zwei Basisstrategien zur Entstörung beruhen dabei auf der Verminderung der Störungsfrequenz (Prävention) sowie der Erhöhung der Entstöreffizienz (Reaktion). Strategien zur Verminderung der Störungsfrequenz zielen darauf ab, auf Basis von Erkenntnissen der Ursache-Wirkungszusammenhänge von Störungen diese im Vorfeld der eigentlichen Aufgabendurchführung zu verhindern oder zu reduzieren. Dies setzt voraus, dass Ressourcen, die bislang nur zur reaktiven Bekämpfung von Störungen nun gezielt zur präventiven Entstörung genutzt werden. Dadurch lassen sich die Störungskosten stark reduzieren. Im Gegensatz zur langfristig angelegten Senkung der Störfrequenz bezieht sich die Entstöreffizienz auf den kurzfristigen Bereich der Entstörung. Hierbei zielt die Effizienz auf kurze Störungszeiten sowie einen hohen Wirkungsgrad. Dabei können organisatorische, personelle und technische Maßnahmen unterschieden werden. Bei den organisatorischen Maßnahmen ist darauf zu achten, dass eine Zentralisierung der Entstörkompetenz aus den unterschiedlichen Fachabteilungen erfolgt, um eine integrative Strategieplanung

und Maßnahmenkoordinierung sicherzustellen. Die Durchführung der Entstörung ist jedoch möglichst dezentral durch die betroffenen Bereiche abzuwickeln. Personelle Maßnahmen zur Erhöhung der Entstöreffizienz richten sich in erster Linie auf eine Sensibilisierung der Mitarbeiter gegenüber Störungen. Hierfür sind potenzielle Störungsketten im Logistikbereich darzustellen und ein Verständnis hinsichtlich der Gesamtwirkung von Störungen herzustellen. Zudem sind die Mitarbeiter dahingehend auszubilden, Entstörungen weitgehend selbstständig durchführen zu können. Maßnahmen zur technischen Entstörung sind anlagenbezogene Maßnahmen wie Verschleißminderung im Rahmen der Instandhaltung sowie kurze Melde- und Diagnosezeiten (vgl. Wildemann 1995b). Das Störpotenzial in den Logistikprozessen ist teilweise beträchtlich. Aufgrund der Größe der Material- und Informationsnetzwerke ist es oft nicht möglich, alle Abhängigkeiten bereits in der Planung zu berücksichtigen. Dies sorgt für Unbestimmtheit und Unvorhersehbarkeit. Die daraus resultierenden Störungen, vor allem Engpässe, betragen in der Beschaffungs- und Produktionslogistik etwa 8-12 Prozent. Ursachen sind hier Engpässe, welche aus einer Mengendifferenz oder Falschlieferung sowie Terminverzügen resultieren. In der Distributionslogistik sowie Handelslogistik, Logistik der „letzten Meile“ und „City-Logistik“ beträgt aus den genannten Gründen das Störpotenzial 3-5 Prozent. Eine weitere Ursache für Störungen in der Distribution sind die Rückführungen durch Käufe im Internet. In der Entsorgungslogistik hingegen ist das Störpotenzial mit 1-3 Prozent eher gering. In der Rückführlogistik beträgt es durch geringe Planbarkeit und starke Schwankungen 25-40 Prozent. Diese Zahlen verdeutlichen den Handlungsbedarf bezüglich der Implementie-

rung eines geeigneten Entstörmanagements. So sind Strukturen zu schaffen, um Störungen frühzeitig zu erkennen und durch Gegenmaßnahmen zu reduzieren. Dabei kann zwischen kurz-, mittel- und langfristigem Störungsmanagement unterschieden werden, siehe Abbildung 5-13. Hierzu sind Regelkreise zur Entstörung in den Unternehmen einzuführen. Der grundsätzliche Ablauf besteht dabei aus vier Phasen (vgl. Abbildung 5-14). Zunächst ist in Phase 1 die Störung zu identifizieren, das heißt die Abweichung zwischen Führungs- und Regelgröße aufzuzeigen. Hierbei kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, welche je nach Störungsempfindlichkeit der Führungsgröße sowie deren Gewichtung im Zielsystem des Unternehmens ausgewählt werden können. Bei elementaren Zielgrößen, wie beispielsweise Termin- und Mengenzielen ist ein permanenter Soll-Ist-Vergleich auf Rückmeldungsbasis durchzuführen. Ereignisorientierte Störungsmeldungen beziehen sich auf die operative Ebene und somit eher auf Anlagen und Kapazitäten als auf Aufträge und Produkte. Bei seltenen Störgrößen reicht dieses Verfahren aus.

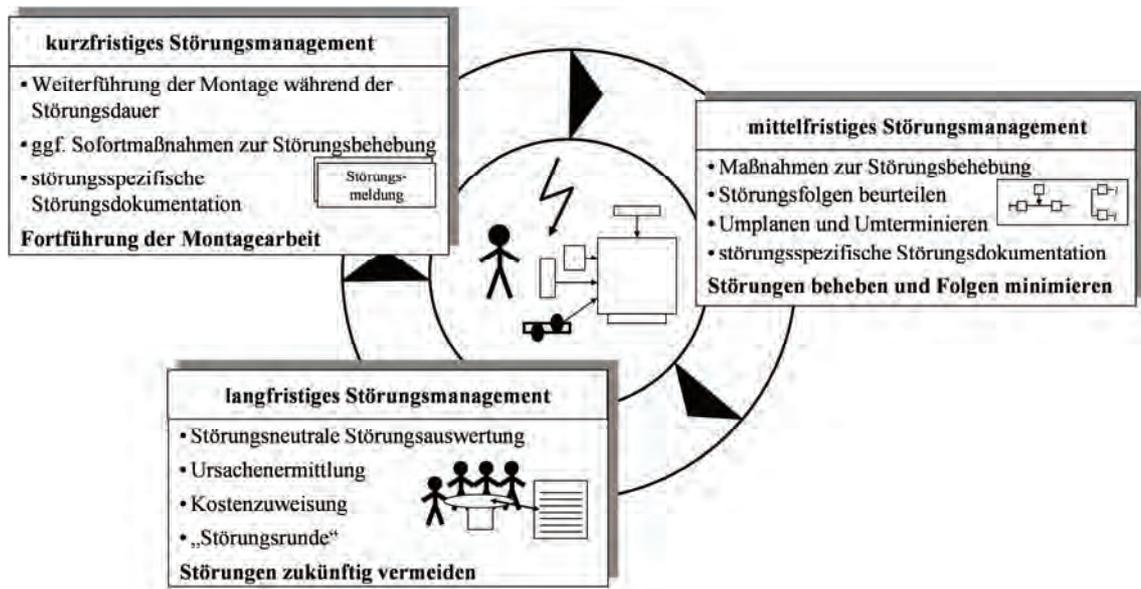


Abbildung 5-13: Mehrstufiges Entstörmanagement

Eine weitere Methode, die statistische Prozesskontrolle (SPC), setzt sich ständig wiederholende Abläufe voraus. Bewegen sich die Störausprägungen stetig innerhalb gewisser Bandbreiten, so ist die SPC einzusetzen. Das Logistikcontrolling hat als übergeordnetes Verfahren der Störungsidentifizierung die Aufgabe, eine langfristige Erfassung und Dokumentation aller Störungen zu gewährleisten. Auf Basis dieser Daten ist es möglich, strategische Abweichungen zu erfassen, um gezielte Langfristmaßnahmen zur Beseitigung durchzuführen. In Phase 2 wird die Störung lokalisiert. Aufbauend auf der Identifikation wird dabei der genaue Störort festgestellt. Hierzu ist auch zu klären, wie das Umfeld beschaffen ist, um anschließend zielgerichtete Maßnahmen einführen zu können. Zudem ist zu klären, welche Funktion gestört ist, beispielsweise eine Bearbeitungs-, Förder-, Steuerungs- oder administrative Funktion. In der darauffolgenden Störungsbewertung in Phase 3 ist die Art der Störung sowie deren Ursache zu ermitteln um herauszufinden, ob ein kompletter Ausfall von Funktionen oder nur ein reduziertes Leistungs-

potenzial vorliegt. Weiterhin ist festzustellen, ob die Störung kurz- oder langfristig wirksam ist sowie sich auf einen abgegrenzten Bereich beschränkt oder auf den gesamten Betriebsablauf ausweitet. Hierauf folgt eine Störungswirkungsanalyse, welche untersucht, welche Zielgrößen gefährdet sind und welche Effekte resultieren können. Stellt Phase 3 die Notwendigkeit zum Eingriff fest, so sind die vorliegenden Störungen aufbauend auf der Störungswirkungsanalyse zu priorisieren. Phase 4 behandelt die eigentliche Entstörung. Hierzu sind zunächst Notfallpläne zu erarbeiten, welche es ermöglichen, die Störungen zu überbrücken und deren Ursachen langfristig zu beseitigen.

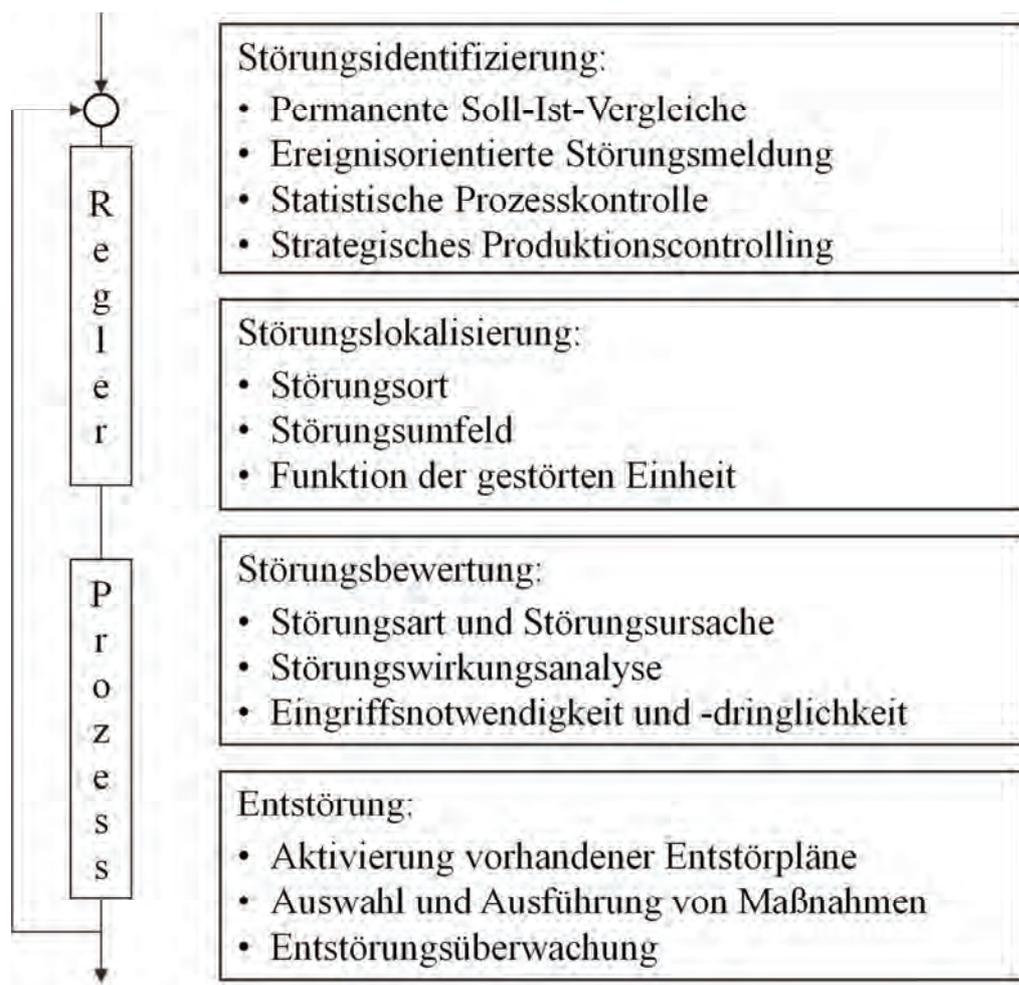


Abbildung 5-14: Ablauf des Entstörregelkreises

Diese Pläne legen fest, wie beim Auftreten solcher vorzugehen ist. Solche Standards helfen dabei, zügig Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Das Kriterium für die Standardisierung bezieht sich dabei hauptsächlich auf die Dokumentierbarkeit der am Prozess beteiligten Arbeitsabläufe sowie deren Material- und Informationsflüsse. So sollte jede Station bekannt sein, an der Material oder Information verändert, weiterverarbeitet oder gespeichert wird. Dazu gehören auch die Zeitanteile, die für Transport zwischen den Stationen, beispielsweise in der Produktion, sowie bei der Bearbeitung an einer Station benötigt werden. Auch der Umfang des Umlaufbestands ist zu erfassen, um eine Standardisierung zu erreichen. Ein solcher Phasenplan hilft dabei, ein formalisiertes Entstörmanagement zu gewährleisten. Weiterhin wird sichergestellt, dass Störungen nach ihrer Wirkung und Dringlichkeit mit gezielten Maßnahmen abgestellt werden. Anstelle einer improvisierten Störungsbeseitigung tritt ein standardisierter Ablauf für Entstörprozesse in Kraft, welcher einen zweckgerichteten Ablauf der Einzelaktivitäten festlegt (vgl. Wildemann 1992). Das folgende Fallbeispiel behandelt ein Beschaffungs- und Bereitstellungssystem, welches den beiden Logistikprozessen Beschaffungs- und Produktionslogistik zuzuordnen ist. Das betrachtete Fertigungssystem besteht dabei aus Warenannahme, Materiallager, Fertigungslinien sowie Entstörleitstand. Es wird eine 100 Prozent-Versorgung der Linien, geringe Bestände und kurze Durchlaufzeit angestrebt. Die Störungsideifizierung für den Bereich der Materiallogistik erfolgt mit einer Kombination der vorgestellten Verfahren. Die Sensoren werden somit nur dann aktiviert, wenn Störungen auftreten – sie dienen daher nicht zur Beschaffungs- und Bestellabwicklung. Zudem ist es möglich, eine Störmeldung durch die für

beide Bereiche ermittelten Daten auszulösen. Ist daher das benötigte Material einer Teilenummer nicht im Linienpuffer, so wird dies dem Entstörleitstand gemeldet. Eine Abweichung des Pufferbestands wird zudem durch die statistische Prozesskontrolle in Form von sporadischen Inventuren erfasst. Bei der Störungslokalisierung ist festzustellen, welche Linie und welche Puffer betroffen sind. Weitere Informationen über das Störungsfeld beinhalten die momentane Belastungs- und Bestands-situation der Linie sowie deren Ausweichlinien. In der Störungsbewertung wird die Störungsart ermittelt. Im vorliegenden Beispiel waren fehlerhafte und falsche Teile im Puffer. Die Ursachen hierfür waren Falschbuchungen sowie falsche Materialkennzeichnungen. Die Störungswirkungsanalyse betrachtete anschließend die gesamte logistische Kette, um die Eingriffsnotwendigkeit zu ermitteln. Im Rahmen der Entstörung wurde zunächst geprüft, ob der Fehlbestand des Linienpuffers durch den Materialbestand im Lager ausgeglichen werden kann. Da dies zutraf, wurde eine Lagerausfassung mit höchster Priorität veranlasst. Dazu waren entsprechende Transportkapazitäten zur Verfügung zu stellen. Da diese Störgrößen häufiger auftraten, wurden langfristige Maßnahmen getroffen, um eine schnelle Störungsbeseitigung zu ermöglichen. Hierzu gehörte, den Bereitstellungsweg erst bei Warenannahme festzulegen, um alternative Verwendungsmöglichkeiten im Störfall sicherzustellen (vgl. Wildemann 1992).

5.10 Strukturentscheidungen

Die Logistikstruktur von Unternehmen lässt sich durch ihre vertikale (Anzahl an Stufen) und horizontale (Anzahl Werke, La-

ger, Umschlagpunkte auf den Stufen) Struktur charakterisieren. Als einfachste Form der vertikalen Struktur gelten die Direktbelieferungen. Sie weisen ökologische und ökonomische Vorteile auf, da hier kein Zwischenlager existiert und somit Flächen und Lagerkosten vermieden werden. Weiterhin ist aus diesem Grund die zurückgelegte Transportstrecke zwischen Quelle und Senke stets am kürzesten. In vielen Fällen ist jedoch die Transporteffizienz geringer, da die Transportmittel bei der Direktbelieferung einzelner Kunden oft nicht voll ausgelastet sind. Hierbei weisen mehrstufige Logistikstrukturen durch die Möglichkeit zur Konsolidierung von Frachten Vorteile auf, da sich auf diese Weise im Hauptlauf die Auslastung der Transportmittel erhöhen lässt und die Anzahl an Fahrten gesenkt werden kann (vgl. Souren 2012). Dies gilt insbesondere für internationale Transporte, bei denen die Güter große Distanzen zurücklegen. Vor allem bei Transporten mit Schiffen und im Schienenverkehr ist eine mehrstufige Logistikstruktur zu verwenden. Die Konsolidierung ist auch in der horizontalen Logistikstruktur von großer Bedeutung. So ermöglicht die Einrichtung eines Zentrallagers die Bündelung großer Mengen von den Produktionsstätten bis zu diesem Lager (vgl. Kohn/ Hüge-Brodin 2008). Ähnlich wie bei der Direktbelieferung besteht hierbei jedoch der Nachteil, dass die nächste Stufe, ob Lager oder Kunde, oft weiter entfernt ist. Bei einer dezentralen Lagerstruktur hingegen sind die Strecken zum Kunden kürzer, auf denen die Fahrzeuge oft nur gering ausgelastet sind. Diese Struktur geht jedoch mit geringeren Bündelungsmöglichkeiten bei der Anlieferung an diese Lager einher. Aufgrund der divergierenden Struktur, insbesondere auf der letzten Stufe mit wenig Lagern und vielen Kunden, sind die Vorteile durch Bündelung in der Zustellung

zum Kunden jedoch größer als bei der Anlieferung an die Lager. Daher sind die insgesamt zurückgelegten Strecken sowie die damit einhergehenden CO₂-Emissionen bei der dezentralen Struktur geringer (vgl. Souren 2012). Den transportbedingten ökologischen und ökonomischen Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile bei der Lagerung entgegen, welche durch den höheren Flächenverbrauch sowie die insgesamt höheren Bestände begründet sind (vgl. Matthews/ Hendrickson 2003). Die eingangs diskutierte Bündelung von Transporten lässt sich in drei miteinander in Wechselwirkung stehenden Dimensionen charakterisieren. So behandelt die quantitative Bündelung die Erhöhung der in einem Transport beförderten Mengen an Gütern. Hierzu ist die Transportmittelauslastung zu steigern, siehe Abschnitt 0. Die räumliche Bündelung hingegen befasst sich mit den oben diskutierten zentralen und dezentralen Lagerstrukturen. Die dritte Dimension, die zeitliche Bündelung, ergibt sich durch die Transportlosgrößen der Güter sowie dem Rhythmus der Transportbeziehung. Hierbei stehen sich als Extremformen die Just-in-Time- und Just-in-Sequence-Belieferungen, welche für Lieferungen kleiner Mengen nach dem Pull-Prinzip stehen und die auf dem Push-Prinzip beruhende Lieferung größerer Mengen in kompletten Ladeeinheiten gegenüber. Just-in-Time ist ein heute weit verbreitetes Gestaltungskonzept und Organisationsansatz, welcher auf eine Vermeidung von Lagerhaltung abzielt, indem das richtige Material in der richtigen Menge und Qualität unmittelbar zum richtigen Zeitpunkt in der Fertigung angeliefert wird (vgl. Wildemann 2001a). Dieses Konzept der Beschaffungslogistik eignet sich besonders für Unternehmen, deren Produktionsfokus auf Gütern mit hohem Verbrauchswert und einer mittleren bis hohen Verbrauchsstetigkeit liegt. Bei

gegebenen Rahmenbedingungen können daher gebundenes Kapital und Durchlaufzeiten reduziert werden. Das schnelle Aufdecken von Qualitätsproblemen ist ein weiterer Vorteil. Das Just-in-Sequence-Konzept stellt eine Weiterentwicklung von Just-in-Time dar (vgl. Wildemann 2001a). Es ermöglicht neben den Anlieferzeitpunkten auch eine spezifische Sequenzierung der angelieferten Güter entsprechend des Produktionsprozesses. Aufgrund der Wertschöpfungsorientierung und der Vermeidung nicht wertschöpfender Tätigkeiten in der logistischen Kette sind die Just-in-Time- und Just-in-Sequence-Konzepte ein fester Bestandteil der Logistik in vielen Branchen (vgl. Walzl/ Wildemann 2014). Aus ökologischer Sicht ist der wichtigste Kritikpunkt an Just-in-Time und Just-in-Sequence die Senkung der gelieferten Mengen, da durch eine angestrebte bestandsarme Produktion die Lieferfrequenz ausschließlich auf den Rhythmus der Produktion abgestimmt wird. Aufgrund des Verzichts auf die zeitliche Bündelung reduziert sich die Auslastung der Transportmittel und es findet eine häufigere Lieferung statt, weshalb der transportbedingte CO₂-Ausstoß oft zunimmt. Maßnahmen, um die Emissionen zu reduzieren, sind eine Ansiedlung des Lieferanten in der Nähe des Kunden oder der Aufbau eines Just-in-Time-Lagers. Insbesondere bei einer Produktion des Lieferanten in der Nähe seines Kunden sinken die zurückgelegten Strecken. Bei einem Lager vor Ort steigt zumindest die Auslastung der Transportmittel im Hauptlauf des Lieferanten, weshalb sich der CO₂-Footprint verbessert (vgl. Souren 2012). Auch in der Distributionslogistik ist die Nähe eines Lagers oder Umschlagspunkts zum Verladeort von Vorteil. Ein Fallbeispiel hierfür kommt aus der Kurier-, Express- und Paketbranche. So hat sich ein Dienstleister bei der Standortwahl

eines Hubs am Standort eines Großkunden aus dem Teleshopping-Bereich orientiert. Durch die unmittelbare räumliche Nähe – beide Standorte sind fördertechnisch miteinander verbunden – ergeben sich neben einer Verkürzung der Lieferzeiten weitere Vorteile bezüglich der Verbesserung des CO₂-Footprints. Durch die Einsparung von 800.000 Transportkilometern pro Jahr reduziert sich der Emissionswert pro befördertem Paket von 244 auf 170 Gramm CO₂, was einer Reduzierung um 30 Prozent entspricht (vgl. o. V. 2009; Bretzke/ Barkawi 2012).

5.11 Fremdbezug logistischer Leistungen

Die Fremdvergabe logistischer Leistungen an Logistikdienstleister stellt eine weitere Möglichkeit dar, den CO₂-Footprint zu verbessern. Logistikdienstleister sind gewerbliche Unternehmen, die hauptsächlich logistische, aber auch fertigungsnahe Dienstleistungen für Dritte anbieten und erbringen. Die Leistungen gehen dabei über reine Transportleistungen hinaus und umfassen beispielsweise eine kundenbezogene Lagerung, Kommissionierung oder Fakturierung. Weitere Mehrwertleistungen sind Montagetätigkeiten sowie das Retourenmanagement (vgl. Weber et al. 2007; Heidenblut/ Hompel 2008). Aufgrund der Spezialisierung der Dienstleister auf Logistikprozesse liegen Skalen- und Verbundeffekte vor, welche eine Effizienzsteigerung logistischer Prozesse unterstützen (vgl. Schmied/ Knörr 2012; Carbone/ Stone 2005). Die Spezialisierung ermöglicht es weiterhin, beim Einsatz der in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Maßnahmen zur Verbesserung des CO₂-Footprints, besonders große Vorteile zu erreichen. Ein großer Hebel stellt dabei die Bündelung von Frachten dar, wel-

che es ermöglicht, die Auslastung der Fahrzeuge zu erhöhen sowie die zurückgelegten Strecken und den Anteil an Leerfahrten zu reduzieren. Auch ein verstärkter Einsatz des kombinierten Verkehrs wird durch die Frachtkonsolidierung möglich. Weitere Maßnahmen betreffen die Einrichtungen der Logistikdienstleister wie Büros und Lagerräume bezüglich Strom- und Gasverbrauch für Beleuchtung und Heizung. Eine Messung des Energieverbrauchs hilft dabei, diesen in einem weiteren Schritt zu senken und somit den CO₂-Footprint weiter zu verbessern (vgl. Lieb and Lieb 2010). Zur Vergabeentscheidung ist es daher sinnvoll, den CO₂-Footprint eigener Logistikleistungen mit den entsprechenden Werten von Logistikdienstleistern zu vergleichen. Weist der Dienstleister dabei geringere CO₂-Footprintwerte auf, lohnt sich die Vergabe im Hinblick auf diese Zielgröße. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Verlader solche Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emissionen nicht oder nur teilweise selbst durchführen können, beispielsweise aufgrund ihrer geringen Unternehmensgröße oder fehlenden Spezialisierung auf logistische Prozesse (vgl. Schmied/ Knörr 2012). Ein Fallbeispiel zur erfolgreichen Senkung des CO₂-Ausstoßes behandelt einen Logistikdienstleister, der für gebündelte Frachten verstärkt den kombinierten Verkehr einsetzt. Durch die Verlagerung von täglich 98.000 Lkw-Fahrten auf die Schiene kann er den CO₂-Ausstoß um 17.000 Tonnen pro Tag senken (vgl. DB Schenker 2014). Weitere Maßnahmen sind die Bündelung europaweiter Transporte mit Hilfe von Hubs, um Leerfahrten zu vermeiden und die Auslastung zu erhöhen. Durch einen vertakteten öffentlichen Güternahverkehr zwischen den Städten wird die Auslastung der Lkw weiter erhöht sowie die Fahrten reduziert. Im Bereich der „City-Logistik“ wird eine

intelligente Routenführung auf Basis von Tourenplanungs- und -steuerungssystemen verwendet, um die zurückgelegten Distanzen und somit Spritverbrauch und CO₂-Emissionen zu reduzieren (vgl. Müller-Steinfahrt 2010). Ein weiteres Fallbeispiel behandelt die Reduzierung von Leerfahrten, welche durch leere Wechselbehälter verursacht wurden. Durch Maßnahmen wie eine verbesserte Kapazitätsplanung, Steigerung der Rückladungen sowie ein Training für die Disponenten konnte der Anteil an Leerfahrten stark reduziert werden, weshalb der CO₂-Ausstoß je verkauftem Frachtkilometer um über 25 Prozent sank (vgl. Deutsche Post DHL 2012).

5.12 Informationsflussgestaltung

Effiziente Informationsflussstrukturen unterstützen das Ziel einer Verbesserung des CO₂-Footprints. Sie sind erforderlich für die Planung, Steuerung und Koordination des physischen Materialstroms zwischen Kunden und Lieferanten. Das Ziel ist es dabei, die benötigten Informationen zur Materialbewegung an alle beteiligten Partner zu übermitteln. Die Informationsbereitstellung erfolgt dabei zwischen dem Abnehmer, seinen Lieferanten und den Logistikdienstleistern, wodurch eine vereinfachte und effiziente Anpassung der Versorgung an die Erfordernisse des Abnehmers angestrebt wird. Durch geringe Reaktionszeiten der Geschäftspartner sowie eine robuste Informationsübertragung lassen sich Störungen schnell beheben und Planungsfehler zügig ausgleichen. Dies soll die Logistikkosten reduzieren, welche beispielsweise durch Sonderfahrten entstehen, die auf mangelhafte Informationsgüte zurückzuführen sind. Damit wird auch der CO₂-Ausstoß gesenkt. Das Informations-

system soll dabei auch eine bessere Kommunikation an den Schnittstellen zwischen den verschiedenen Gliedern der Wertschöpfungskette ermöglichen. Dadurch werden Verluste, beispielsweise durch hohe Bestände oder Sonderfahrten, reduziert. Diesen Kosten stehen jedoch höhere Informationsversorgungskosten gegenüber, so dass ein Kostenminimum zwischen den Kosten für die Informationsversorgung sowie den Folgekosten durch fehlende Information gefunden werden muss. Bei der Informationsversorgung ist darauf zu achten, den Klärungsaufwand zwischen den Unternehmen zu minimieren, indem die Informationen übersichtlich und verständlich dargestellt werden. Dadurch wird unter anderem eine genaue Definition von Datenfeldern und -inhalten erreicht. Dies sorgt auch für die notwendige Akzeptanz des Systems bei den betroffenen Mitarbeitern, was eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb darstellt. Hierzu gehören schnelle Reaktions- und Antwortzeiten des Systems sowie benutzerfreundliche Schnittstellen zwischen System und Mitarbeiter. Darüber hinaus ist die unternehmerische Gesamtplanung in die Entwicklung des Informationssystems miteinzubeziehen. So sind insbesondere Veränderungen der Fertigungstiefe, Standortverlagerungen und Veränderungen der Einkaufsstrategien zu berücksichtigen. Um das Informationssystem zu gestalten, ist im Rahmen der Ist-Analyse des Informationsflusses zunächst der Planungsablauf, die Belegorganisation und Planungsgrößen sowie Informationsdurchlaufzeiten zu betrachten. Zur anschließenden Erstellung des Sollkonzepts ist eine Bedarfsaufstellung von Funktionen zu erarbeiten, die das Informationssystem zu leisten hat. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, welche Aufgaben bereits von anderen Informationssystemen wie Produktionsplanungs- und –

steuerungssystemen erfüllt werden. Diese Systeme sollten mit dem Informationssystem zwischen Abnehmer, Lieferant und Logistikdienstleistern gekoppelt oder sogar in das System integriert werden. Der Schwerpunkt bei der Einführung eines neuen Informationssystems liegt auf der Organisation der Bestellabwicklung und auf dem Datenaustausch der beteiligten Partner. Um hierfür ein geeignetes Abrufsystem einzuführen, ist der interne und externe Informationsfluss zu betrachten. Die Untersuchung der innerbetrieblichen Informationsabläufe zwischen Vertrieb und Einkauf/Beschaffung verdeutlicht dabei den Zusammenhang zwischen Bedarf und Bestellung. Weiterhin ist der externe Informationsablauf zwischen Einkauf und Lieferanten zu analysieren. Hierbei soll der Prozess der Materialbereitstellung beim Abnehmer bis zum entsprechenden Abruf beim Lieferanten erfasst werden. Bevor Lieferabrufe definiert und Informationssysteme eingeführt werden, ist es erforderlich, die Belegorganisation, die Entstehungsorte der Belege sowie deren Erstellungsinstanzen zu identifizieren. Dabei ist zu prüfen, welche Informationsträger eingesetzt werden und wie der Lieferant die Informationen erhält. Diese Analyse deckt gegebenenfalls redundante Informationsabläufe auf. Zudem können identische Stammdatenkataloge bei Abnehmer und Lieferanten den Informationsumfang von Abrufen stark reduzieren. Dadurch lässt sich eine wirtschaftliche Datenübertragung erreichen, die eine Abrufinformation lediglich aus Teilenummer, Bedarfstermin und Menge ermöglicht, während die übrigen Daten wie beispielsweise Lieferant, Anliefer- und Verwendungsort im Teilstammsatz enthalten sind. Zudem sollte die Anzahl an Entscheidungsstufen bei der Beschaffung von Teilen gering sein, da dies die Sicherheitsbestände reduziert, die auf jeder Ebene

kalkuliert werden. Weiterhin führt eine geringere Anzahl Planungsebenen zu einer geringeren Planungsvarianz. Daher sollten die Planungsvorgaben zentral überwacht werden, wobei ein zentraler Informationsspeicher auch bei dezentralen Entscheidungsbefugnissen eine Möglichkeit zur zielkonformen Auftragsbefüllung darstellt. Werden die internen und externen Informationsflüsse integriert, ermöglicht dies eine automatische Übertragung von Änderungen im Produktionsprogramm des Herstellers in den Dispositionssysteme der Lieferanten. Diese Information über den Bedarf des Abnehmers verhilft dem Lieferanten und den Logistikdienstleistern zu einer vorausschauenden Planung ihrer Transportgüter und Routen. Dadurch kann eine höhere Auslastung der Fahrzeuge erreicht werden sowie eine geringere Häufigkeit an Sonderfahrten. Beides sorgt dafür den CO₂-Ausstoß zu senken. Besonderes Augenmerk bei der Kooperation von Abnehmer, Lieferanten und Logistikdienstleistern liegt dabei auf der Fristigkeit der gegenseitigen Geschäftsverbindungen und ihres wertmäßigen Volumens. So sind Lieferanten mit längerfristigen Beziehungen zum Abnehmer frühzeitig in dessen Planungsprozess miteinzubinden. Dies ermöglicht es dem Lieferanten, die Güter rechtzeitig bereitzustellen und seine Produktion entsprechend der Verbrauchsmengen und –zeitpunkte des Kunden zu steuern. Ebenfalls wird die Transparenz der Versorgungssituation erhöht und wirkt sich daher positiv auf den Aufwand der Bestellabwicklung aus. Der notwendige Datenaustausch zwischen den Partnern entlang der Wertschöpfungskette kann hierbei beispielsweise über Electronic Data Interchange stattfinden. Eine solche elektronische Datenfernübertragung sorgt unter anderem für Produktivitätsgewinne, da eine manuelle oder mehrfache Dateneingabe nicht

notwendig ist. Hierdurch sinkt auch die Fehlerrate bei der Informationsübertragung. Durch geringe Reaktionszeiten der Geschäftspartner sowie eine robuste Informationsübertragung lassen sich Störungen schnell beheben und Planungsfehler zügig ausgleichen (vgl. Wildemann 2010). Der Informationsfluss ist dabei eng an den Materialfluss anzubinden. Um eine besonders gute und sichere Verknüpfung von Material und Daten zu erreichen, eignet sich die RFID-Technologie. Dabei werden die physischen Objekte, welche die Prozesse durchlaufen, mit Transpondern versehen, die es erlauben, die Objekte teil- oder vollautomatisch zu identifizieren. Auf Basis des geringen Erfassungsaufwands sowie die verbesserte Informationslage können Ressourcen eingespart werden. Dies liegt insbesondere an der höheren Prozessqualität durch RFID-Systeme, welche eine bessere Liefertreue bei kürzeren Durchlaufzeiten und geringeren Inventurkosten ermöglichen. Neben diesen Vorteilen trägt die RFID-Technologie weiterhin dazu bei, den CO₂-Footprint zu verbessern, da sie die Planungssicherheit erhöht sowie die Retouren reduziert (vgl. Gille 2010). Am Fallbeispiel eines großen Automobilherstellers soll der Einsatz der RFID-Technologie aufgezeigt werden. Das Unternehmen setzt das System unter anderem für Spezialbehälter ein, die innerhalb der Produktionsstätten und zwischen den Werken verkehren und empfindliche Press- und Montageteile transportieren. Bislang werden die Behälter auf den Leergutplätzen von Mitarbeitern zeitaufwendig gesucht und erfasst. Zudem war die manuelle Erfassung der Einlagerungsdaten, insbesondere an welchem Stellplatz sich der Behälter befindet, fehlerhaft. Aufgrund dieser mangelnden Transparenz konnte nicht immer sichergestellt werden, dass genügend Behälter vorhanden waren. Als Konse-

quenz daraus mussten aus anderen Standorten Behälter geliefert werden. Diese Sonderfahrten sollten reduziert werden genauso wie das Risiko eines Produktionsausfalls durch die Zeitverzögerung bei der Behälterbereitstellung. Die RFID-Tags wurden auf 10.000 Spezialbehältern installiert und unterstützten dabei Transparenz über den Material- und Behälterfluss zu erreichen. Dies reduzierte den Suchaufwand, den Behälterschwund sowie die Sonderfahrten (vgl. Mucha 2006). Dadurch konnte der CO₂-Footprint in der Logistik verbessert werden. Ein weiteres Fallbeispiel ist der Einsatz einer GPS-Ortung von Wechselbrücken bei einem großen Logistikdienstleister. So wurden im Hauptlauf von Paketen 12.500 Wechselbrücken mit einem elektronischen Ortungssystem ausgestattet. Dies erleichtert die Rückführung der Behälter in das Logistiknetz und sorgt neben einer Reduzierung des Bestands zur Verringerung von Leerfahrten. Die Ortungsmodule erhielten Solarzellen und Bewegungssensoren. Damit lassen sich Informationen über den Ort der Wechselbrücke gewinnen und ob sie in Bewegung ist. Weiterhin wird dabei der Ladezustand des Akkus überwacht. Diese Bestandsmeldungen und Statusinformationen werden über Middleware an den Logistikdienstleister übertragen, welcher nun die nächstgelegenen Umschlagpunkte ermittelt. So reduzieren sich die zurückgelegten Wege leerer Wechselbrücken sowie die Sonderfahrten. Dieses Projekt dient dazu, zunächst die CO₂-Emissionen des logistischen Teilprozesses zu ermitteln und verursachungsgerecht zuzuordnen. Anschließend wird eine Reduzierung der CO₂-Emissionen angestrebt (vgl. Gilles et al. 2013). Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der CO₂-Emissionen ist der Einsatz von Verkehrsinformationssystemen. Sie ermitteln zunächst den Verkehr sowie Zusatzinformationen

wie Baustellen und andere Störungen. Auf Basis dieser Daten berechnet ein Verkehrsmanagementsystem die aktuelle Verkehrssituation. Dies wird über Informationssysteme an die Verkehrsteilnehmer übermittelt, um Staus zu umfahren, wodurch sich die Emissionen reduzieren lassen (vgl. Siemens AG 2011). Am Fallbeispiel einer Spedition führte eine solche Stauvermeidung zu einer hohen CO₂-Einsparung. Dies erklärt sich aus dem höheren Spritverbrauch während eines Staus. So steigt am Beispiel eines Staus von fünf Kilometern Länge der Verbrauch von etwa 1,7 Litern auf 6,5 Liter je 100 Kilometer an. Auf ein Jahr gesehen entstehen so Mehremissionen in Höhe von 2.800 Kilogramm je Fahrzeug. Bei den 400 Fahrzeugen im Fuhrpark führt dies zu über 1.100 Tonnen CO₂ im Jahr (vgl. Hanke 2011). Durch die Nutzung alternativer Routen auf Basis der Verkehrsinformationssysteme sowie eine Innenstadtbelieferung in den frühen Morgenstunden statt während der Hauptverkehrszeit ließ sich der CO₂-Ausstoß der Flotte reduzieren.

5.13 CO₂-Kompensation

Die bisher behandelten Maßnahmen zielten auf eine Reduzierung der CO₂-Emissionen durch vorbeugende Maßnahmen. Daneben gibt es Möglichkeiten, mittels CO₂-Kompensationsanbieter Emissionen ausgleichen, welche sich nicht vermeiden lassen. Dies kann durch Projekte zum Klimaschutz erfolgen, beispielsweise durch den Bau eines Windparks oder einer Wasserkraftanlage in Schwellenländern (vgl. Sterk/ Bunse 2005). Weitere Projekte befassen sich mit Aufforstung, Acker- und Grünlandbewirtschaftung sowie Ödlandbegrünung (vgl. Feess 2014). Durch die Unterstützung solcher Projekte erhalten die

Unternehmen Emissionszertifikate. Mit einem solchen Zertifikat ist das Unternehmen berechtigt, eine bestimmte Menge an Treibhausgasen zu emittieren (vgl. Sterk/ Bunse 2005). Der Handel mit Emissionszertifikaten und damit die Kompensation findet dabei im regulierten und im freiwilligen Markt statt. Beim regulierten Markt wird der Handel im Rahmen des Kyoto-Protokolls von einer Behörde der Vereinten Nationen organisiert und überwacht. Kraftwerke und große CO₂-Emittenten aus der Stahl-, oder Zementindustrie sowie Metallindustrie sind dazu verpflichtet, an diesem Emissionshandel teilzunehmen. Die am Markt bestehenden Zertifikatspreise sollen die Investitionsentscheidungen von Unternehmen beeinflussen und in Richtung umweltfreundlicher Technologien lenken. Dieser gewünschte Steuerungseffekt wird am Beispiel von Gas- und Kohlekraftwerken deutlich, denn erst durch das Einbeziehen der Emissionsrechtspreise wird das emissionsärmere Gaskraftwerk günstiger als das Kohlekraftwerk (vgl. Ulreich 2010). Der freiwillige Markt findet außerhalb des Kyoto-Systems statt. Erworbene Zertifikate können nicht im Rahmen des regulierten Markts gehandelt werden. Die Berechnung der Emissionsreduktion durch Klimaschutzprojekte findet mit einem Vergleich zwischen der Situation bei der Durchführung des Projekts und dem Referenzszenario statt, bei dem kein Projekt durchgeführt wird. Der Differenz entsprechend werden die Emissionszertifikate ausgegeben (vgl. Brohmann et al. 2010). Ein großer Logistikdienstleister hat sich im Rahmen des freiwilligen Zertifikathandels bei einem Klimaprojekt engagiert, welches die Erneuerung von Heiz- und Dampfkesseln fördert. Im konkreten Fall wurde eine kohlebefeuerte Kesselanlage durch eine Biomasseheizung ersetzt, wodurch jährlich 800 Tonnen CO₂ eingespart werden

(vgl. Falk 2008). Im vorliegenden Fallbeispiel können damit sämtliche Dienstreisen der 100 Mitarbeiter, die innerhalb eines Jahres mit dem Firmenwagen durchgeführt wurden, kompensiert werden. Ein anderer großer Logistikdienstleister engagiert sich im Rahmen des freiwilligen Zertifikathandels bei einem Klimaprojekt im südlichen Afrika. Die eingesparten Emissionen unterstützen dabei, den Päckchen- und Paketversand hierzulande CO₂-neutral zu gestalten. Konkret geht es im Projekt um den Einsatz effizienter Brennholzkocher, welche die traditionellen Kocher über offenem Feuer ersetzen. Dabei werden die Menge an benötigtem Feuerholz und somit die Emissionen stark reduziert. Insgesamt lassen sich durch den Einsatz von 10.000 Kochern jährlich etwa 20.000 Tonnen CO₂ einsparen (DHL 2013). Ein anderer Dienstleister mit Kunden aus der Automobil- und Konsumgüterindustrie beteiligt sich im Rahmen des freiwilligen Zertifikathandels in einem Klimaprojekt in Afrika, welches Haushalte mit Solarstrom versorgt. Dieser Strom, der hauptsächlich für Lampen verwendet wird, ersetzt eine Verfeuerung von Kerosin in herkömmlichen Lichtquellen. Dadurch kann der teure Brennstoff ersetzt sowie die Emissionen aus der Verbrennung des fossilen Energieträgers eingespart werden. Auf diese Weise konnten im Jahr 2013 insgesamt etwa 780 Tonnen CO₂ kompensiert werden. Dies neutralisiert die Emissionen aus den Tätigkeiten der Firmenverwaltung sowie vier Prozent der durchgeführten Transporte (vgl. o. V. 2014).

5.14 Verlagerung des Transports auf die Schiene

Die Verlagerung des Gütertransports von der Straße oder der Luft auf die Schiene unterstützt dabei, den CO₂-Footprint zu

verbessern. Dies erfolgt in zweierlei Hinsicht: Zum einen ist der Schienentransport weniger emissionsintensiv als der Transport auf der Straße, zum anderen sorgt die Verlagerung für eine Verkehrsentslastung auf der Straße. Durch diese Entlastung werden die Staus reduziert, wodurch sich ebenfalls Emissionen einsparen lassen (vgl. Bretzke/ Barkawi 2012). Insbesondere beim Transport von Containern ist der Transport auf der Schiene attraktiv. Dabei führen Eisenbahnverkehrsunternehmen mit eigenen Zügen den Transport aus und mieten die hierfür notwendigen Trassen von Infrastrukturunternehmen an. So kann beispielsweise eine Verbindung von Seehäfen bis zu den Zielbahnhöfen durch Shuttle-Züge erfolgen. Bei hoher und regelmäßiger Auslastung kommen auch Ganzzüge in Betracht. Der Schienentransport weist dabei neben niedrigeren CO₂-Emissionen auch eine hohe Transportleistung sowie einen geringen Flächenbedarf auf (vgl. Stiegeler 2007). Auch für transkontinentale Transporte zwischen Europa und Asien kommt der Schienenverkehr infrage. Insbesondere für Verlader, welche die teure Luftfracht meiden und eine schnellere Alternative zur Seefracht suchen, ist der transkontinentale Bahnverkehr interessant. Dabei sind die Bahnstrecken je nach Route mehrere tausend Kilometer kürzer als der Seeweg, wobei auch mögliche Engpässe beim Umschlag in den Häfen umgangen werden (vgl. Bretzke/ Barkawi 2012). So verkehren beispielsweise Züge zwischen mehreren Städten in Deutschland und China. Dreimal wöchentlich fährt ein Frachtzug von Chongqing nach Duisburg und legt dabei in 16 Tagen über 10.000 km zurück. Die Strecke des Zugs führt dabei über den Nordwesten Chinas, Russland, Kasachstan, Weißrussland und Polen nach Deutschland. Der Zug ist bis zu 650 Meter lang und kann 51 Container transpor-

tieren. Darin befinden sich unter anderem Elektronik-Artikel, Baustoffe, Bekleidung und Maschinenteile. Der Zugverkehr begann im Jahr 2011 mit einer wöchentlichen Verbindung. Aufgrund der starken Zunahme des Frachtaufkommens finden heute wöchentlich drei Fahrten statt (vgl. Seidel 2014). Eine weitere Zugverbindung von China nach Deutschland verkehrt seit 2013 von Zhengzhou nach Hamburg. Dieser Transport wird von der Hafentwicklungsgesellschaft von Zhengzhou organisiert und außerhalb Chinas von einem großen Logistikdienstleister aus Deutschland abgewickelt. Ein erster Güterzug zwischen China und Deutschland verkehrte bereits 2008 von Peking nach Hamburg (vgl. o. V. 2013). Die Vorteile der Frachtzüge nutzt ein großer Automobilhersteller. In diesem Fallbeispiel werden ausgehend aus zwei Produktionsstandorten im Süden und im Osten Deutschlands regelmäßig in das Werk im Nordosten Chinas transportiert. So wurden auf diese Weise bis Mitte 2012 etwa 6.500 Container mit Fahrzeugteilen auf circa 180 Zügen aus den beiden Werken nach China gesendet. Hierbei wird die etwas längere Route über die Transsibirische Eisenbahn durch Russland verwendet, was den Aufwand der Zollformalitäten im Vergleich zur alternativen Strecke über Kasachstan reduziert. Für die circa 11.000 km lange Strecke benötigt der Frachtzug mit 23 Tagen nur etwa halb so lang wie der Transport per Schiff. Aufgrund der verschiedenen Spurweiten auf der Strecke müssen die Container zweimal umgekrant werden, um die Breitspur in Weißrussland und Russland nutzen zu können. An der russisch-chinesischen Grenze wird wieder auf Züge der Normalspur umgeladen (vgl. o. V. 2011; DB Schenker 25.05.2012). Zur Lagerung und Kommissionierung errichtete der Logistikdienstleister nahe dem ostdeutschen Werke ein

Logistikzentrum. Dort werden die Container beladen, um sie anschließend per Lkw zum Verladebahnhof zu bringen.

5.15 Warenstromverteilung auf effiziente Verkehrsträger

Eine weitere Strategie, um den CO₂-Footprint zu verbessern, besteht darin, den jeweils effizientesten Verkehrsträger einzusetzen. Dies erfolgt unter anderem im multimodalen Verkehr. Er bezeichnet den Gütertransport mit mindestens zwei Transportmitteln (vgl. Bukold 1996). Durch den Einsatz mehrerer Transportmittel können deren jeweilige Kosten- und Umweltvorteile miteinander kombiniert werden, um die Transportkette zu verbessern. Der Warenstrom lässt sich auf diese Weise auf die effizientesten Verkehrsträger verteilen. So können beispielsweise durch den kombinierten Einsatz von Schienen- und Straßenverkehr die Umweltfreundlichkeit der Bahn mit der Flexibilität der Lkw verbunden werden (vgl. Trost 1999). Hierbei ist jedoch zwischen dem gebrochenen und dem kombinierten Verkehr zu unterscheiden. So werden beim gebrochenen Verkehr beim Wechsel des Transportmittels auch die Transportbehälter gewechselt, was mit hohem Aufwand verbunden ist. Beim kombinierten Verkehr indessen bleiben die Güter während des gesamten Transportes in denselben Ladungsträgern, das heißt auch beim Umschlag. Üblicherweise werden für den kombinierten Verkehr genormte Ladegefäße wie beispielsweise Container oder Wechselbrücken verwendet. Der Container ist dabei an kein Transportmittel gebunden und kann damit im kombinierten Verkehr gut eingebunden werden. Standard-Container, welche nach ISO normiert sind, haben eine Länge von 20 oder 40 Fuß (etwa 6 beziehungsweise 12 Meter), eine

Höhe von 8,6 Fuß (etwa 2,5 Meter) und eine Breite von 8 Fuß (etwa 2,4 Meter) (vgl. Hachtel/ Holzbaur 2010). Der Handlingaufwand ist dabei stark reduziert, da ein Umladen des Inhalts entfällt – es muss nur der Container umgeschlagen werden. Wechselbrücken sind im Gegensatz zu den Containern flexibler bezüglich ihrer Abmessungen, denn sie lassen sich auf die Maße von Europaletten anpassen. Weiterhin ist für einen Wechsel des Lkw kein Kran erforderlich, da Wechselbrücken Stützen mitführen, welche heruntergeklappt werden. Der Lkw senkt sich anschließend ab und fährt unter der Wechselbrücke heraus. Da die Wechselbrücken jedoch nicht stapelbar sind, werden sie überwiegend im Straßen- und Schienentransport eingesetzt. Der kombinierte Verkehr wird vorwiegend für den Transport großer Gütermengen über große Distanzen verwendet. Er bietet jedoch nur dann Vorteile, wenn ein Großteil der zurückgelegten Strecke, das heißt der Hauptlauf, von der Bahn oder dem Schiff durchgeführt wird – hierbei lassen sich Kosten- und Umweltvorteile realisieren. Der CO₂-Footprint wird dabei reduziert, da Bahn und Schiff geringere CO₂-Emissionen je Tonnenkilometer aufweisen als Lkw. Der Vor- und Nachlauf, welche meist mit Lkw erfolgen, sollten so gering wie möglich gehalten werden (vgl. Stiegeler 2007). Die hohe Flexibilität und Netzdichte des Lkw ist im Vor- und Nachlauf wichtig und daher kaum zu vermeiden, um alle Quellen und Senken zu erreichen (vgl. Hoepke 2007). Die Streckenlänge, ab der sich der Einsatz des kombinierten Verkehrs kostenseitig lohnt, liegt bei 300 km. Bei geringeren Distanzen übersteigen die Umschlagskosten die Vorteile durch den günstigeren Hauptlauf per Bahn oder Schiff. Die nachfolgende Abbildung 5-15 zeigt diese Ergebnisse auf. Hierbei verursacht der Transport auf der Schiene bei zuneh-

mender Distanz geringere Kosten als der Transport per Lkw. Der Vor- und Nachlauf wird auf der Straße durchgeführt. Der Verlauf der Kostenkurve entspricht daher jenem der Straße. Die Sprünge in der Kurve des kombinierten Verkehrs stehen für die Umschlagskosten an den Schnittstellen zwischen Vor-, Haupt-, und Nachlauf. Hierbei wird angenommen, dass bei den Verkehrsträgern keine entfernungsabhängige Kostendegression eintritt und sich Vor- und Nachlauf jeweils in Richtung der frachtpflichtigen Entfernung bewegen.

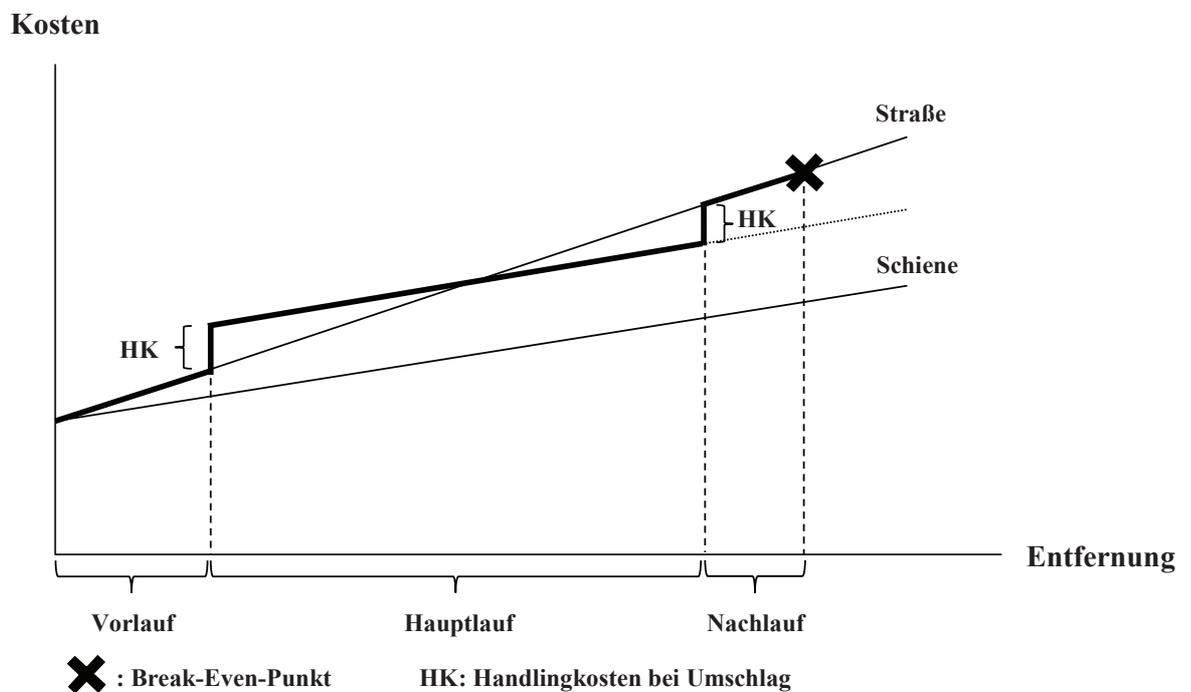


Abbildung 5-15: Kostenstruktur des kombinierten Verkehrs (vgl. Bretzke/ Bar-kawi 2012)

Auch im Zeitprofil ergibt sich ein ähnliches Bild. So kann die Bahn schneller fahren (etwa 100 Stundenkilometer) als der Lkw (etwa 60 Stundenkilometer), allerdings sind dabei die Umschlagszeiten an den Terminals zu berücksichtigen. Anhand dieser Geschwindigkeiten sowie eines durchschnittlichen Vor- und Nachlaufs von jeweils 30 km bei einer Terminalaufent-

haltsdauer von durchschnittlich einer Stunde ergibt sich eine zeitdefinierte Break-even-Entfernung von 450 km. Ab dieser Distanz weist der kombinierte Transport eine kürzere Fahrzeit auf als der Straßentransport (vgl. Gudehus 2010). Bezüglich der CO₂-Einsparung ermittelte die Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr in Frankfurt am Main bei 20 repräsentativ ausgewählten europäischen Transportkorridoren eine Einsparung von durchschnittlich 56 Prozent (vgl. Seidelmann 2007).

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung der weltweiten Handelsströme ..	27
Abbildung 1-2: Relative Entwicklung der CO ₂ -Emissionen...	28
Abbildung 1-3: Zusammenhang zwischen Trends und Notwendigkeit der CO ₂ -Footprint- Optimierung	29
Abbildung 1-4: Vorgehensweise	52
Abbildung 2-1: Übersicht der Fallstudien	60
Abbildung 2-2: Zusammenfassung der Fallstudienanalyse.....	63
Abbildung 2-3: Übersicht der Expertengespräche	65
Abbildung 3-1: Logistikdefinitionen	76
Abbildung 3-2: Weltweite Verteilung von Treibhausgasemissionen in der Logistik	102
Abbildung 3-3: Transportleistung in Deutschland im Jahr 2010, inklusive Transportleistung von Ausfuhren und Einfuhren.....	104
Abbildung 3-4: CO ₂ Emissionen in Deutschland im Jahr 2010, inklusive der Emissionen durch Ausfuhren und Einfuhren.....	105
Abbildung 3-5: Effizienz der Verkehrsträger basierend auf Transportleistung und den subsequenten CO ₂ Emissionen in Deutschland inklusive Ein-und Ausfuhren	106
Abbildung 4-1: Abgrenzung der Emissionsbereiche.....	115
Abbildung 4-2: Funktionsanalyse der auf dem Markt erhältlichen Softwarelösungen für die CO ₂ - Footprint-Berechnung in der Logistik.....	122
Abbildung 4-3: Abgrenzung der CO ₂ -Footprint- Berechnungsmöglichkeiten.....	137

Abbildung 4-4: Vorgehensweise zur Berechnung von Energieverbrauch und CO ₂ -Emissionen bei Transportdienstleistungen	144
Abbildung 4-5: Entfernungsbasierte Methode zur Abschätzung des Kraftstoffverbrauchs	148
Abbildung 4-6: Berechnung der Fahrzeugwiderstände	149
Abbildung 4-7: Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen	151
Abbildung 4-8: Allokation der Ergebnisgrößen auf die Teilstrecke	152
Abbildung 4-9: Kalkulation Gesamtenergieverbrauch sowie Gesamt-Emissionen	153
Abbildung 4-10: Funktionsweise des CO ₂ -eLOG-Rechners.	157
Abbildung 4-11: Ausgangssituation für Fallstudie 1	164
Abbildung 4-12: CO ₂ -Emissionen in Fallstudie 1	165
Abbildung 4-13: Szenario-Beschreibung für Fallstudie 2.....	167
Abbildung 4-14: Ergebnisdarstellung von Fallstudie 2.....	168
Abbildung 4-15: Szenario-Beschreibung für Fallstudie 3.....	170
Abbildung 4-16: Ergebnisdarstellung von Fallstudie 3.....	171
Abbildung 4-17: Szenario-Beschreibung der Fallstudie 4	173
Abbildung 4-18: Wöchentliche Transportleistung und CO ₂ - Emissionen	174
Abbildung 4-19: Szenario-Beschreibung für Fallstudie 5.....	176
Abbildung 4-20: Jährliche Transportleistung sowie – Emissionen der Zulieferer	177
Abbildung 4-21: Szenario-Beschreibung von Fallstudie 6	180
Abbildung 4-22: Jährliche Transportleistung und -Emissionen	181
Abbildung 4-23: Ausgangssituation für Fallstudie 7	183
Abbildung 4-24: Emissionen aus Fallstudie 7	184

Abbildung 4-25: Ausgangssituation für Fallstudie 8	185
Abbildung 4-26: Emissionen in Fallstudie 8	187
Abbildung 4-27: Ausgangssituation in Fallstudie 9	189
Abbildung 4-28: Emissionen in Fallstudie 9	190
Abbildung 4-29: Szenario-Beschreibung für Fallbeispiel 10.	192
Abbildung 4-30: Transportleistung und Treibhausgas- Emissionen des Transports nach Indien.....	193
Abbildung 5-1: Energiebedarf eines 40 Tonnen Sattelzugs...	219
Abbildung 5-2: Einsparungen durch reduzierten c_w -Wert	220
Abbildung 5-3: Elektrifizierung des Antriebsstrangs.....	222
Abbildung 5-4: Leistungsdaten des Mercedes-Benz Vito E-Cell	224
Abbildung 5-5: Leistungsdaten des E-Force-One	226
Abbildung 5-6: Behälterkreislaufsystem	238
Abbildung 5-7: Milkrun-Konzept.....	240
Abbildung 5-8: Entwicklung von Milkrun-Routen.....	242
Abbildung 5-9: Volumen-Gewichts-Portfolio zur Bestimmung der Anlieferhäufigkeiten	243
Abbildung 5-10: Kosteneinsparung durch Milkrun-Konzept	244
Abbildung 5-11: Quick Response Konzept.....	249
Abbildung 5-12: Regelkreis des CPFR-Konzepts.....	250
Abbildung 5-13: Mehrstufiges Entstörmanagement	254
Abbildung 5-14: Ablauf des Entstörregelkreises	256
Abbildung 5-15: Kostenstruktur des kombinierten Verkehrs	277
Abbildung 7-1: Willkommensbildschirm des CO2-Footprint-Tools	300
Abbildung 7-2: Registrierungsformular des IT-Tools.....	301
Abbildung 7-3: Übersichtsbildschirm des IT-Tools.....	302
Abbildung 7-4: Spezifikation des Gesamtsystem im IT-Tool	303
Abbildung 7-5: Bearbeitungsmaske der Teilstrecken	304

Abbildung 7-6: Frachtgutbearbeitung im IT-Tool	305
Abbildung 7-7: Allokation der Frachtgüter auf die Teilstrecken im IT-Tool	306

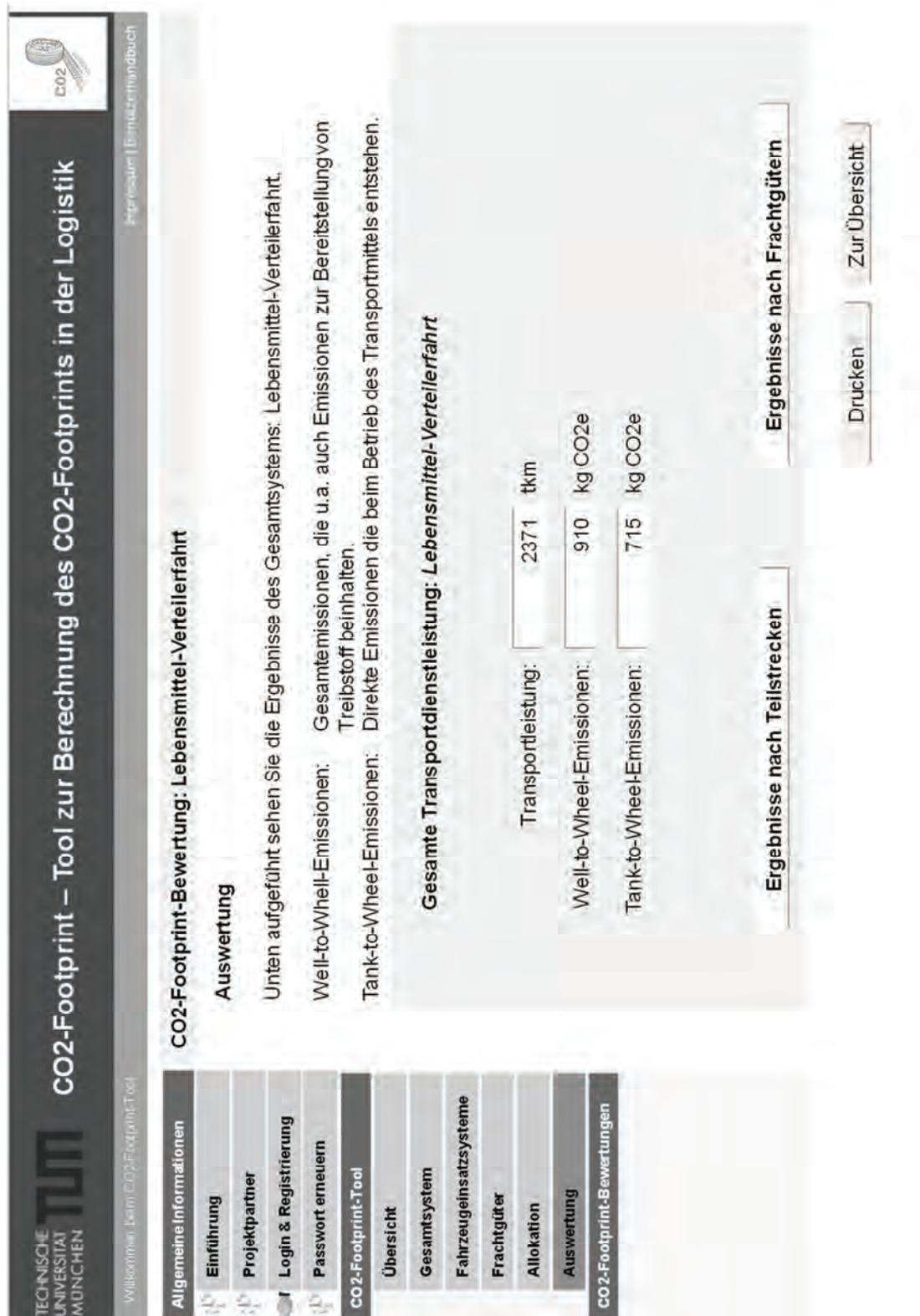


Abbildung 7-8: Ergebnisdarstellungsmöglichkeit im IT-Tool

7 Anhang

Methodensteckbriefe

Internetportale

Beschreibung

Leerfahrten lassen sich durch Internetportale reduzieren. Dies erfolgt mit Frachtbörsen, welche Angebot und Nachfrage nach Transportdienstleistungen zusammenbringen. Auf den Frachtbörsen werden Laderaumkapazitäten oder Transportaufträge angeboten beziehungsweise nachgefragt. Transport- und Logistikunternehmen bieten hierbei ungenutzten Laderaum an, um so eine höhere Auslastung ihrer Fahrzeuge zu erreichen und die Leerfahrten zu verringern. Den Verladern bietet sich damit die Möglichkeit, kostengünstig eigene Fracht transportieren zu lassen, sofern deren Start- und Zielort in der Nähe einer Route mit noch freier Kapazität liegt.

Vorgehensweise

1. Identifikation relevanter Logistikplattformen und Prüfung ihrer generellen Eignung
2. Bewertung der Logistikplattform über Interviews und Erstellen einer Vorauswahl
3. Überprüfung der Anpassungsfähigkeit der Frachtbörsen auf die Anforderungen des Unternehmens
4. Auswahl der geeignetsten Frachtbörse
5. Integration der Frachtbörse in Logistikprozesse

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Bessere Planungsbasis für Dienstleister und Möglichkeit zu Anschlussladungen und Dreiecksverkehre erhöht Auslastung
- Höhere Auslastung und Verringerung der Leerfahrten führt zu Senkung der CO₂-Emissionen

Quelle: vgl. Hopmel/Heidenblut (2011)

Optimierung der Containerbeladung

Beschreibung

Eine optimale Beladung der Ladungsträger soll eine hohe Beladung der Fahrzeuge und damit eine höhere Auslastung der Fahrzeuge ermöglichen. Hierzu existieren verschiedene Algorithmen, welche den definierten Stauraum mit möglichst vielen Packstücken beladen, so dass wenig Stauraum ungenutzt bleibt. Paletten- und Containerbeladung unterscheiden sich dabei, da für Paletten oft die räumliche Dimension vernachlässigt wird. Bei Containern hingegen ist die vertikale Ausdehnung von Stauraum und Packstücken stets zu berücksichtigen. Die Packstücke sollen weiterhin so angeordnet werden, dass sie sich innerhalb des Containers befinden, nicht überlappen und dabei vollständig auf dem Containerboden oder auf anderen Packstücken ruhen. Ist nun das Volumen der Packstücke im Container maximal, so ist der Stauplan optimal.

Vorgehensweise

Wall-Building Approach:

1. An hinterer Seitenwand Wand aus Packstücken aufbauen
2. Sukzessiv weitere Wände vor der bereits bestehenden Wand errichten

Column-Building Approach:

1. An hinterer Seitenwand Säulen aus Packstücken aufbauen
2. Sukzessive weitere Säulen aus Packstücken auf der Containergrundfläche platzieren.

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Bessere Beladung der Fahrzeuge ermöglicht den Transport größerer Gütermengen
- Höhere Auslastung der Fahrzeuge ermöglicht Reduzierung von CO₂-Emissionen

Quellen: vgl. Wäscher (2008); Davies/Bischoff (1995)

Behältersysteme

Beschreibung

Behälterkreislaufsysteme bilden ein integriertes Produktions-, Transport-, Lager- und Verpackungssystem mit Leergutrückführung. Die Art und Form der verwendeten Behälter sind dabei das Ergebnis einer typenspezifischen Behälterentwicklung. Wichtige Merkmale von Behälterkreisläufen sind dabei:

- Einsatz standardisierter und logistikgerechter Behälter,
- EDV-gestützte Steuerung des Kreislaufs,
- Leerbehälterdisposition sowie
- Kooperation aller Partner in der Transportkette.

Um einen transparenten und effizienten Materialfluss zu erreichen, sind die Behälter in ein Kreislaufsystem zu integrieren:

Vorgehensweise

1. Empfindlichkeitsprofil des Packguts und Anforderungsprofil der Logistikkette ermitteln
2. Behälter gestalten und Prototypen für Prüfungsprozess erstellen
3. Prüfungen durchführen und Behälter gegebenenfalls anpassen
4. Behältersystem einführen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

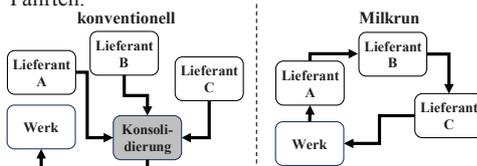
- Hohe Volumennutzungsdichte bei Transport und Lagerung durch hohen Füllgrad der Behälter und Transportmittel
- Höhere Auslastung der Fahrzeuge durch Behältersysteme ermöglicht Reduzierung von CO₂-Emissionen

Milkrun-Konzept

Beschreibung

Das Milkrun-Konzept besteht in der Umgehung von Konsolidierungspunkten (z.B. Umschlagsanlagen) zur Reduzierung der Fahrtenanzahl und der Transportkilometer bei optimaler Auslastung der LKW. Das Unternehmen fährt also seine Lieferanten in einer festen Route und zu festen Terminen an, um dort eine feste Menge an benötigten Teilen einzusammeln.

Das Ziel des Milk Run Konzeptes ist eine Senkung der Logistikkosten und des CO₂-Ausstoßes durch die bessere Ausnutzung der Transportkapazitäten und weniger/kürzerer Fahrten.



Vorgehensweise

1. Geeignete Artikel mit XYZ-Analyse bestimmen
2. Clustering der Lieferanten nach Abholfrequenz, Mengenkonzanz und geographischen Aspekten
3. Bildung von Milkrun-Routen sowie Bewertung der Kosten und CO₂-Einsparungen
4. Auswahl der optimalen Route sowie Erstellung des Zeitplans
5. Durchführung von Lieferanten-Workshops und Testläufen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Reduzierung der Anzahl zurückgelegter Strecken sowie der gefahrenen Distanzen durch kombinierte Touren
- Deutliche Auslastungssteigerung der Fahrzeuge führen zu Verbesserung des CO₂-Footprints

Trans- und Multimodalverkehr

Beschreibung

Der Gütertransport mit mindestens zwei Transportmitteln wird als multimodaler Verkehr bezeichnet. Durch den Einsatz mehrerer Transportmittel können deren jeweilige Kosten- und Umweltvorteile miteinander kombiniert werden, um die Transportkette zu verbessern. So können beispielsweise durch den kombinierten Einsatz von Schienen- und Straßenverkehr die Umweltfreundlichkeit der Bahn mit der Flexibilität der LKW verbunden werden. Hierbei ist jedoch zwischen dem gebrochenen und dem kombinierten Verkehr zu unterscheiden. So werden beim gebrochenen Verkehr beim Wechsel des Transportmittels auch die Transportbehälter gewechselt, was mit hohem Aufwand verbunden ist. Beim kombinierten Verkehr indessen bleiben die Güter während des gesamten Transportes in denselben Ladungsträgern, also auch beim Umschlag. Der Handlingaufwand ist daher reduziert.

Vorgehensweise

1. Auswahl geeigneter Güter und Strecken für multimodalen Transport
2. Clusterung der Güter nach Möglichkeiten zu gemeinsamem Transport im Hauptlauf
3. Bildung von Containerladungen für kombinierten Verkehr unter Berücksichtigung von Transportzeiten, Anzahl Lieferanten bzw. Empfängern, Gewicht und Volumen der Güter, etc.
4. Durchführung des kombinierten Verkehrs

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Kosten- und Zeitvorteile des multimodalen Verkehrs ab 350 km Entfernung
- Verbesserung des CO₂-Footprints, da Bahn und Schiff geringere CO₂-Emissionen je Tonnenkilometer aufweisen als LKW

Quellen: vgl. Bukold (1996); Trost (1999); Gudehus (2010)

Fahrertrainings

Beschreibung

Trainings sind Veranstaltungen, in denen Mitarbeiter Fertigkeiten erwerben oder verfeinern sollen. Diese Methode der Personalentwicklung kann individuell an die betroffenen Mitarbeiter in ihrem Inhalt und ihrer Methodik angepasst werden.

Fahrertrainings helfen dabei, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Die während der Schulung vermittelten Informationen zu sparsamem Fahren helfen den Fernfahrern, ihre Fahrweise anzupassen. Beispielsweise muss der Fahrzeugführer darauf achten, schnell auf Reisegeschwindigkeit zu beschleunigen, vorausschauend zu fahren und das Fahrzeug so lange wie möglich rollen zu lassen. Weitere Maßnahmen sind das Einhalten konstanter Geschwindigkeiten, auch unter Nutzung des Tempomats, sowie das Fahren bei niedrigen Drehzahlen und frühes Hochschalten.

Vorgehensweise

1. Trainingsziele festlegen
2. Kriterien zur Überprüfung des Lernerfolgs ableiten
3. Trainingsmaßnahmen entwickeln
4. Maßnahmen durchführen
5. Lernerfolg überprüfen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Steigerung der Energieeffizienz durch Fahrertrainings: Kraftstoffeinsparung bei Transporten von 5 bis 10 %
- Kraftstoffeinsparung führt zu geringeren CO₂-Emissionen

Quellen: vgl. Volvo Trucks (2011); DHL (2012); FedEx (2013)

Quick Response

Beschreibung

Fehler in der Planung führen gegebenenfalls zu Terminabweichungen, aus denen sich Lieferengpässe entlang der Wertschöpfungskette ergeben können. Um einen Produktionsstopp zu verhindern, werden Sonderfahrten notwendig.

Um die Planungsgenauigkeit zu erhöhen, welche zur Vermeidung von Sonderfahrten beiträgt, kann beispielsweise Quick Response verwendet werden. Hierbei wird mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie die marktnachfrage in Echtzeit direkt beim Kunden erfasst. Hiermit kann der Lieferant aus dem Abgleich der bisherigen Liefermengen und Abverkaufsmengen die Bestände im Lager des Kunden ermitteln und Abweichungen von den prognostizierten Verkaufsmengen erkennen. Die Abweichungen berücksichtigt der Lieferant anschließend in seiner Bedarfsermittlung, um seine Produktionspläne anzupassen

Vorgehensweise

1. Elektronischen Datenaustausch (EDI) zwischen den Partnern implementieren
2. Gemeinsame Datenbasis erstellen und Bedarfe prognostizieren
3. Übermittlung der Verbrauchsdaten von Kunden an Hersteller
4. Abweichungen von prognostizierten Verkaufsmengen ermitteln
5. Produktionspläne beim Hersteller anpassen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Höhere Planungsgenauigkeit durch bessere Planungsbasis mit Kundendaten ermöglicht Reduzierung der Sonderfahrten
- Weniger Sonderfahrten verbessern CO₂-Footprint

Quellen: vgl. Diruf (1994); Kremer (2005); Pfühl (2009)

Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment

Beschreibung

Fehler in der Planung führen gegebenenfalls zu Terminabweichungen, aus denen sich Lieferengpässe entlang der Wertschöpfungskette ergeben können. Um einen Produktionsstopp zu verhindern, werden Sonderfahrten notwendig.

Um daher die Planungsgenauigkeit zu erhöhen, kann beispielsweise Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment (CPFR) verwendet werden. Dies ermöglicht eine gemeinsame Planung über die Unternehmensgrenzen hinweg, wobei zum Datenaustausch EDI-Systeme und internetbasierte Lösungen eingesetzt werden. CPFR aggregiert Bedarfszahlen aus verschiedenen Absatzkanälen, auf welche die Partner einer Lieferkette zugreifen. Somit können die Nutzer mögliche Änderungen in den Abrufen in Echtzeit ermitteln und entsprechend in der Planung von Produktion und Logistik berücksichtigen.

Vorgehensweise

1. Grundsätzliche Rahmenvereinbarung schließen und gemeinsame Geschäftspläne entwickeln
2. Elektronischen Datenaustausch (EDI) zwischen den Partnern implementieren
3. Gemeinsame Datenbasis und Bestellprognosen erstellen
4. Abweichungen erkennen und bei Planung in Produktion und Logistik berücksichtigen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Höhere Planungsgenauigkeit durch bessere Planungsbasis ermöglicht Reduzierung der Sonderfahrten
- Weniger Sonderfahrten verbessern CO₂-Footprint

Quelle: vgl. Werner (2011)

Vendor Managed Inventory

Beschreibung

Vendor Managed Inventory (VMI) ist eine Dienstleistung des Lieferanten für seinen Kunden. Hierbei übernimmt er die Disposition seiner Produkte im Unternehmen des Kunden. Der Lieferant sichtet dabei die Verbrauchsdaten in kurzen Intervallen mittels eines VMI-Systems, welches ihm ermöglicht, die Lagerbestände abzurufen. Somit kann er die Auffüllung der Bestände bei Kunden selbstständig übernehmen, denn beim Erreichen eines festgelegten Dispositionsgrenzwerts wird eine Bestellanforderung erzeugt. Für ein funktionierendes VMI müssen die Lieferanten neben den Beständen auch die aktuellen Bedarfszahlen und Absatzprognosen der Kunden kennen, um ihre eigene Produktion und Lieferung möglichst gut daran ausrichten zu können. Dies setzt ein hohes Maß an Vertrauen zwischen den Partnern in der Lieferkette voraus.

Vorgehensweise

1. Grundsätzliche Rahmenvereinbarung schließen
2. Elektronischen Datenaustausch (EDI) zwischen den Partnern implementieren
3. Gemeinsame Datenbasis und Bestellprognosen erstellen
4. Lagerbestände abrufen und Bestellanforderung erzeugen
5. Selbstständiges Auffüllen der Bestände durch Dienstleister oder Lieferanten

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Ausgleich von Angebots- und Nachfragerhythmen sowie automatisierter Warennachschub ermöglichen bessere Produktionsplanung beim Hersteller
- Weniger Sonderfahrten durch bessere Planung und damit Reduzierung der CO₂-Emissionen

Quelle: vgl. Quick et al. (2012)

Entstörmanagement

Beschreibung

Engpässe im Logistiksystem führen direkt zu Störungen in den Produktionsprozessen. Das Entstörmanagement beinhaltet organisatorische Regelkreise, um trotz Störeinflüssen die aufgestellten Pläne optimal zu erfüllen. Hierzu werden die Abweichungen richtig gewertet, was die Schäden und Folgeschäden durch Störungen reduziert. Die zwei Basisstrategien zur Entstörung beruhen dabei auf der Verminderung der Störungsfrequenz (Prävention) sowie der Erhöhung der Entstöreffizienz (Reaktion). Strategien zur Verminderung der Störungsfrequenz zielen darauf ab, auf Basis von Erkenntnissen der Ursache-Wirkungszusammenhänge von Störungen diese im Vorfeld der eigentlichen Aufgabendurchführung zu verhindern oder zu reduzieren. Hierzu sind Regelkreise zur Entstörung in den Unternehmen einzuführen.

Vorgehensweise

1. Störungsidentifikation (Soll-Ist-Vergleiche, ereignis-orientierte Störungsmeldung, statistische Prozesskontrolle)
2. Störungslokalisierung (Ort, Umfeld sowie Funktion gestörter Einheit)
3. Störungsbewertung (Art und Ursache, Wirkungsanalyse, Eingriffsnotwendigkeit)
4. Entstörung (Auswahl und Ausführung von Maßnahmen, Entstörüberwachung)

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Vermeidung von Engpässen ermöglicht Reduzierung der Sonderfahrten
- Weniger Sonderfahrten verbessern CO₂-Footprint

ERP-Systemauswahl und Implementierung

Beschreibung

Die ERP-Systemauswahl und Implementierung beinhaltet die Durchführung eines systematischen Auswahlprozesses geeigneter ERP-Systemanbieter sowie die Ausgestaltung eines zweckmäßigen ERP-Einführungsprozesses zur Unterstützung der Geschäftsprozesse des Unternehmens. In diesem Zusammenhang kommt der sorgfältigen Planung des ERP-Einführungsprozesses besondere Bedeutung zu. Die erfolgversprechende Vorgehensweise manifestiert sich in der gleichzeitigen Betrachtung der Prozessreorganisation und -optimierung sowie der Gestaltung des ERP-Auswahl- und Implementierungsprozesses. Das generelle Vorgehen wird anhand von vier Modulen beschrieben.

Vorgehensweise

1. Auditierung der IT- und Prozesslandschaft und Identifikation von Schwachstellen sowie zukünftiger Anforderungen an das System
2. Prozessreorganisation und -optimierung
3. Auswahl des ERP-Systems
4. Entwicklung Implementierungsfahrplan mit konkreten Zielvorgaben und erforderlichen Maßnahmenpaketen

Wirkungen auf CO2-Footprint

- Schneller Datenaustausch und gute Planungsbasis ermöglicht Reduzierung von Planungsfehlern, Engpässen und Sonderfahrten
- Weniger Sonderfahrten verbessern CO2-Footprint

Strukturentscheidungen

Beschreibung

Die Logistikstruktur von Unternehmen lässt sich durch ihre vertikale (Anzahl an Stufen) und horizontale (Anzahl Werke, Lager, Umschlagpunkte auf den Stufen) Struktur charakterisieren.

Mit der Standort-, Lager-, Verkehrsträger/-mittel- und Tourenplanung können geeignete Kombinationen gewählt werden, um Transport- und Lagerkosten sowie CO2-Emissionen zu senken. Mehrstufige Logistikstrukturen weisen hierbei durch die Möglichkeit zur Konsolidierung von Frachten Vorteile auf, da sich auf diese Weise im Hauptlauf die Auslastung der Transportmittel erhöhen lässt und die Anzahl an Fahrten gesenkt werden kann. Die Konsolidierung ist auch in der horizontalen Logistikstruktur von großer Bedeutung. So ermöglicht die Einrichtung eines Zentrallagers die Bündelung großer Mengen von den Produktionsstätten bis zu diesem Lager.

Vorgehensweise

1. Standortplanung: Anzahl und räumliche Anordnung der Standorte von Lagern und Umschlagpunkten
2. Analyse der Belieferungsformen und Transportparameter (Menge, Lieferfrequenz, etc.)
3. Wahl der Verkehrsmittel mit Fokus auf CO2-Effizienz
4. Tourenplanung mit Fokus auf CO2-Einsparung
5. Berechnung CO2-Ersparnis

Wirkungen auf CO2-Footprint

- Verbesserte Logistikstruktur ermöglicht Reduzierung der Anzahl zurückgelegter Strecken sowie Verringerung zurückzulegender Distanzen
- Reduzierung der CO2-Emissionen durch kürzere Strecken und geringere Anzahl Strecken

Just-in-Time

Beschreibung

Bei Just-in-Time (JIT) / der produktionssynchronen Beschaffung wird versucht, die Lagerhaltung zu vermeiden, indem das richtige Material in der richtigen Menge und Qualität unmittelbar zum richtigen Zeitpunkt in der Fertigung angeliefert wird. Die Methode eignet sich besonders für Teile mit hohem Verbrauchswert, die zeitnah produziert und lagerlos versorgt werden.

Ziel der Produktionssynchronen Beschaffung ist es, Bestände abzubauen und damit Kosten einzusparen.

Ein Teil der Kosten wird auf den Lieferanten verlagert; im Rahmen einer partnerschaftlichen Zusammenarbeit kann die Methode aber auch Vorteile für beide Seiten bringen.

Vorgehensweise

1. Geeignete Materialien durch kombinierte ABC- / XYZ-Analyse identifizieren
2. Bewertung und Auswahl der geeigneter Lieferanten - wichtiger Betrachtungsgegenstand: Einführung gemeinsamer Qualitätskonzepte.
3. Inner- und zwischenbetriebliche Abläufe bei Abnehmer und Lieferant synchronisieren
4. Konzept umsetzen und durch ständige Ergebniskontrollen begleiten

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Prinzipbedingt häufige Lieferung kleiner Mengen
- Sinkende Auslastung der Fahrzeuge und Verschlechterung des CO₂-Footprints
- Keine negativen Wirkungen bei Nähe des Lieferanten zum Kunden oder Aufbau eines Just-in-Time-Lagers beim Kunden

Just-in-Sequence

Beschreibung

Man spricht von JIS, wenn Teile zu dem Zeitpunkt, zu dem sie verbaut werden sollen, durch einen externen Lieferanten in der richtigen Reihenfolge (sequenzgerecht) angeliefert werden. Zur Steuerung von JIS werden Sequence-Inlining-Systeme eingesetzt. JIS ist eine Weiterentwicklung des Just in Time – Gedankens und auch der Direktbelieferung der Linie. Bei der Bereitstellung nach dem JIS-Verfahren sorgt der Zulieferer nicht nur dafür, dass die benötigten Module rechtzeitig in der notwendigen Menge angeliefert werden, sondern auch, dass die Reihenfolge (Sequence) der benötigten Module stimmt.

Vorgehensweise

1. Geeignete Materialien durch kombinierte ABC- / XYZ-Analyse identifizieren
2. Synchronisation der inner- und zwischenbetrieblichen Abläufe bei Abnehmer und Lieferant
3. Überprüfung der Maschinen- und Personalkapazität
4. Zusätzlichen Kommunikationsaufwand mittels EDI-Manager durchführen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Prinzipbedingt häufige Lieferung kleiner Mengen
- Sinkende Auslastung der Fahrzeuge und Verschlechterung des CO₂-Footprints
- Keine negativen Wirkungen bei Nähe des Lieferanten zum Kunden oder Aufbau eines Just-in-Sequence-Lagers beim Kunden

Fremdvergabe Logistikleistungen

Beschreibung

Bei einer Fremdvergabe logistischer Leistungen werden Prozesse wie Transporte, Lagerung, Kommissionierung und Fakturierung durch spezialisierte Logistikdienstleister übernommen. Durch die Spezialisierung der Dienstleister entstehen Skalen- und Verbundeffekte. Sie ermöglichen eine Effizienzsteigerung der logistischen Prozesse. Ein großer Hebel stellt dabei die Bündelung von Frachten dar, welche es ermöglicht, die Auslastung der Fahrzeuge zu erhöhen sowie die zurückgelegten Strecken und den Anteil an Leerfahrten zu reduzieren. Auch ein verstärkter Einsatz des kombinierten Verkehrs wird durch die Frachtkonsolidierung möglich.

Vorgehensweise

1. Identifikation potenzieller logistischer Prozesse zur Fremdvergabe
2. Bestimmung des CO₂-Footprints der selbst ausgeführten logistischen Prozesse
3. Finden von Logistikdienstleistern mit passendem Angebot der Leistungsübernahme
4. Prüfen der Einsparungen von CO₂-Emissionen durch den Fremdbezug logistischer Leistungen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Erhöhte Transparenz des CO₂-Footprints
- Skalen- und Verbundeffekte erhöhen Effizienz und senken CO₂-Emissionen

RFID in der Logistik

Beschreibung

Um eine besonders gute und sichere Verknüpfung von Material und Daten zu erreichen, eignet sich die RFID-Technologie. Dabei werden die physischen Objekte, welche die Prozesse durchlaufen, mit Transpondern versehen, welche es erlauben, die Objekte teil- oder vollautomatisch zu identifizieren. Auf Basis des geringen Erfassungsaufwands sowie die verbesserte Informationslage können Ressourcen eingespart werden. Dies liegt insbesondere an der höheren Prozessqualität durch RFID-Systeme, welche eine bessere Liefertreue bei kürzeren Durchlaufzeiten und geringeren Inventurkosten ermöglichen.

Vorgehensweise

1. Identifikation der relevanten Materialflüsse
2. Installation der Infrastruktur (Lese- und Schreibgeräte)
3. Anbindung der Infrastruktur an IT-Systeme
4. Transponder auf relevante Objekte anbringen
5. Objekte teil- oder vollautomatisch erfassen und damit Materialfluss steuern

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Höhere Planungssicherheit reduziert Sonderfahrten
- Weniger Retouren reduzieren Anzahl zurückgelegter Strecken
- Weniger zurückgelegte Strecken und Sonderfahrten verbessern CO₂-Footprint

Verkehrsinformationssysteme

Beschreibung

Verkehrsinformationssysteme ermitteln zunächst den Verkehr sowie Zusatzinformationen wie Baustellen und andere Störungen. Auf Basis dieser Daten berechnet ein Verkehrsmanagementsystem die aktuelle Verkehrssituation. Dies wird über Informationssysteme an die Verkehrsteilnehmer übermittelt, um Staus zu umfahren, wodurch sich die Emissionen reduzieren lassen. Dies erklärt sich aus dem höheren Spritverbrauch während eines Staus. So steigt am Beispiel eines Staus von fünf Kilometern Länge der Verbrauch von etwa 1,7 Litern auf 6,5 Liter je 100 Kilometer an.

Auch die Nutzung alternativer, kürzerer und/oder schnellerer Routen ist auf Basis der Verkehrsinformationssysteme möglich.

Vorgehensweise

1. Identifikation der relevanten Fahrzeuge
2. Installation der Infrastruktur (Telematik)
3. Anbindung der Infrastruktur an Verkehrsmanagementsystem

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Kürzere Strecken durch bessere Routenplanung
- Stauumfahrung durch Alternativrouten
- Kürzere Strecken und Stauumfahrung ermöglichen Reduzierung der CO₂-Emissionen

Quelle: vgl. Baumann (2011)

CO₂-Kompensation

Beschreibung

Die CO₂-Kompensation dient dem Ausgleich von CO₂-Emissionen, die nicht zu vermeiden sind. Eine Möglichkeit dieses CO₂-Ausgleichs für Unternehmen stellt die Unterstützung in Klimaschutzprojekten dar. Durch die aktive Teilnahme in solchen Klimaschutzprojekten erhalten Unternehmen Emissionszertifikate. Diese berechtigen dazu, eine bestimmte CO₂-Menge zu emittieren. Der Handel mit Emissionszertifikaten, und damit die Kompensation, findet dabei im regulierten und im freiwilligen Markt statt. Beim regulierten Markt wird der Handel im Rahmen des Kyoto-Protokolls von einer Behörde der Vereinten Nationen organisiert und überwacht. Der freiwillige Markt findet außerhalb des Kyoto-Systems statt.

Vorgehensweise

1. Erfassung von Emissionsquellen (Aufnahme von An- und Abtransporten, Pendelverkehren, etc.)
2. Berechnung, Zusammenfassung und Abgrenzung der ermittelten Emissionen
3. Auswahl von Maßnahmen zur Kompensation (bspw. Klimaschutzmaßnahmen, inter- und intra-betrieblicher Ausgleich in der Lieferkette)
4. Durchführung der ausgewählten Maßnahmen

Wirkungen auf CO₂-Footprint

- Verbesserung des CO₂-Footprints durch Zertifikatehandel und Kompensation

Quellen: vgl. Sterck/ Bunse (2005); Diefenbacher/ Rodenhäuser (2009); Ulreich (2010); Brohmann et al. (2010); Deutsche Post (2014)

Aerodynamik verbessern

Beschreibung

Die Aerodynamik beeinflusst die Höchstgeschwindigkeit, die Geräuschentwicklung und den Kraftstoffverbrauch eines Nutzfahrzeugs. Die aerodynamischen Eigenschaften eines Nutzfahrzeugs werden vor allem durch die Form von Fahrerhaus und Aufbauten, den Fahrzeugunterboden sowie die Gestaltung der Radkästen beeinflusst. Eine günstige Gestaltung des Fahrerhauses sowie kleine Spaltmaße zum Aufbau helfen dabei, Verwirbelungen zu vermeiden und damit den Luftwiderstand sowie den Spritverbrauch zu senken. Aufgrund des quadratischen Zusammenhangs von Geschwindigkeit und Luftwiderstand steigt die Bedeutung der Aerodynamik mit zunehmender Geschwindigkeit. So hat auf einer Autobahnfahrt eines 40 Tonnen Sattelzuges der Luftwiderstand einen Anteil von 10 bis 37 % am Energieverbrauch.

Vorgehensweise

Konstruktive Maßnahme, welche für den Anwender kein Ablaufmodell aufweist.

Wirkungen auf CO2-Footprint

- Geringere Verwirbelungen am Fahrzeug
- Sinkender Spritverbrauch reduziert CO2-Emissionen

Einsatz alternativer Antriebe

Beschreibung

Der Verbrauch fossiler Energieträger für Transportprozesse kann durch E-Antriebe reduziert werden. Die technischen Lösungen der Fahrzeuge mit E-Antrieb unterscheiden sich nach Aufbau und Leistung. Neben rein elektrischen Fahrzeugen, wie batterieelektrischen oder Brennstoffzellenfahrzeugen, existieren verschiedene Formen von hybriden Antrieben. Politische Regularien und Subventionen beeinflussen die Wirtschaftlichkeit von elektrisch betriebenen Fahrzeugen zusätzlich.



Vorgehensweise

1. Anforderungen an Fahrzeuge bestimmen (abhängig von Nutzungsprofil und Ladeinfrastruktur)
2. Identifikation relevanter Fahrzeuge
3. Wirtschaftlicher Vergleich von Fahrzeugen mit verschiedenen Antrieben mittels Total Cost of Ownership-Rechnung
4. Berechnung der CO2-Footprint-Verringerung durch E-Antriebe

Wirkungen auf CO2-Footprint

- Geringerer Spritverbrauch oder CO2-neutraler Transport
- Sinkender Spritverbrauch reduziert CO2-Emissionen
- Verbesserung des Unternehmensbildes aus Kundensicht

Berechnungslogik der Einsparungen durch rollwiderstandsarme Reifen

Die Berechnungslogik des Flottentools aus Kapitel 5.1 ist stufenweise aufgebaut. Startpunkt der Berechnungen stellen die Ist-Verbräuche der einzelnen Fahrzeugkategorien dar. Es werden somit abhängig von den Benutzereingaben die aktuellen Verbräuche ermittelt, die im Folgenden die Basis für die Einsparberechnungen darstellen. Aus Übersichtlichkeitsüberlegungen werden die Berechnungslogiken im Folgenden getrennt nach Fahrzeugklassen dargestellt:

Fahrzeugklasse Pkw:

Der jährliche Ist-Verbrauch von Pkw lässt sich bestimmen, indem die Anzahl der Fahrzeuge mit dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch pro 100 km und der jährlichen Fahrleistung multipliziert und durch 100 km dividiert wird.

$$\text{Verbrauch} = \text{Anzahl Fahrzeuge} * \varnothing \text{ Verbrauch} * \frac{\text{Jährliche Fahrleistung}}{100 \text{ km}}$$

Der jährliche CO₂-Ausstoß berechnet sich indem der Verbrauch mit dem Energieinhalt der Kraftstoffsorte multipliziert wird. Die monetären Auswirkungen des Kraftstoffverbrauchs können durch Multiplikation des Kraftstoffverbrauchs mit dem Preis pro Liter Kraftstoff berechnet werden. Ausgehend vom aktuellen Verbrauch der Fahrzeugklasse werden die Einsparpotentiale, welche bei Durchführung der Maßnahmen entstehen, berechnet. Als bedeutendste Maßnahme ist hier natürlich der Reifenwechsel zu nennen. Bei einem Wechsel zu rollwiderstandsarmen Reifen kann der Rollwiderstand eines Fahrzeugs deutlich gesenkt werden. Es wird somit zur Berechnung des Einsparpotentials, der Kraftstoffverbrauch durch den Rollwiderstand bei alter Bereifung mit dem Kraftstoffverbrauch verursacht durch

den Rollwiderstand bei energieeffizienter Bereifung verglichen. Die Differenz stellt die mögliche Kraftstoffeinsparung dar. Aufgrund der unterschiedlichen Rollwiderstandsbeiwerte bei Fahrten in der Stadt, auf dem Land sowie auf der Autobahn ist hier eine differenzierte Betrachtung notwendig. Der Rollwiderstand des alten Reifens berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Verbrauch}_{\text{Rollwiderstand}} &= \text{Verbrauch}_{\text{Ist}} * \text{Luftdruckeinfluss} \\ &* (\text{Anteil}_{\text{Stadt}} * \text{Rollwiderstand}_{\text{Stadt}} + \text{Anteil}_{\text{Land}} * \text{Rollwiderstand}_{\text{Land}} \\ &+ \text{Anteil}_{\text{Autobahn}} * \text{Rollwiderstand}_{\text{Autobahn}}) \end{aligned}$$

Bei den neuen Reifen wird das Ergebnis mit der prozentualen Reduktionswert aufgrund des Reifenwechsels multipliziert.

Für die Berechnung der Einsparpotentiale über die Laufzeit wird das Einsparpotential pro Jahr mit der potentiellen Laufleistung eines Reifens multipliziert und durch die jährliche Laufleistung dividiert. Einschränkend gilt hier die Bedingung, dass Reifen maximal 10 Jahre, aufgrund von chemischen und physikalischen Alterungserscheinungen, genutzt werden können. Zur Berechnung der absoluten Einsparungen werden von den Einsparungen über die Laufzeit die Investitionskosten subtrahiert und die geringeren Kosten aufgrund von einer reduzierten Kaufintensität addiert. Im Detail bedeutet dies, dass der Mehrpreis des rollwiderstandsarmen Reifen von den Einsparungen abgezogen werden, aber positive Effekte aufgrund der längeren Laufleistung ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Da rollwiderstandsarme Reifen in der Regel für eine höhere Kilometerleistung genutzt werden können, wird die Häufigkeit eines Reifenkaufs reduziert und es wirkt somit ein positiver Effekt auf die absoluten Einsparungen über die Laufzeit.

Zur Berechnung der Einsparungen bei Anpassung des Luftdruckes wird der Verbrauch der Fahrzeugklasse um den vorher einfließenden Luftdruckeinfluss bereinigt. Da hier und bei allen weiteren Einsparmaßnahmen keine Investitionskosten anfallen oder nicht mit einer ausreichend hohen Ergebnisschärft bestimmt werden können, sind die Einsparungen über die Laufzeit und die absoluten Einsparungen im Tool identisch. Die Einsparungen durch eine Schulung der Fahrer, einer Anpassung des unnötigen Gepäcks und Anpassung der Fahrweise werden aufbauend auf den bereits bestimmten Einsparungen kumuliert anhand der prozentualen Einsparungen oder Literweisen Einsparungen pro 100 km bestimmt.

Zur Berechnung der Amortisationszeit, die hier in gefahrenen Kilometern ausgedrückt wird, werden alleinig die Einsparungen durch den Reifenwechsel betrachtet. Somit wird sichergestellt, dass die Amortisationszeit nicht durch anderweitige Maßnahmen künstlich verbessert wird.

$$\text{Amortisation}_{\text{km}} = \frac{\text{Investitionskostendifferenz}_{\text{Reifen}}}{\left(\text{Kosten pro km}_{\text{Alt}} - \text{Kosten pro km}_{\text{neu}} + \frac{\text{Einsparungen}_{\text{Wechsel}}}{\frac{\text{Anzahl}_{\text{Fahrzeuge}}}{\text{Fahrleistung}}} \right)}$$

Fahrzeugklasse leichtes Nutzfahrzeug:

Der Ist-Verbrauch von leichten Nutzfahrzeugen, wie Geräteträgern oder Transporten, wird durch die Anzahl der Fahrzeuge, die jährliche Fahrleistung, dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch, der Beladung sowie der Start-Stopp-Intensität bestimmt. Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzart und Beladung kann der Verbrauch eines leichten Nutzfahrzeuges stark variieren. Aus diesem Grund ist es unumgänglich, die Beladung der Fahrzeuge zu berücksichtigen. Außerdem spielt die Start-Stopp-Intensität eine entscheidende Rolle für den Kraftstoff-

verbrauch. Häufige Stopps mit anschließendem Anfahren erhöhen den Verbrauch signifikant und werden folglich ebenfalls in der Berechnung berücksichtigt. Der Kraftstoffverbrauch leichter Nutzfahrzeuge berechnet sich demnach wie folgt:

$$\text{Verbrauch}_{\text{Ist}} = \text{Anzahl}_{\text{Fahrzeuge}} * \varnothing\text{Verbrauch} * \frac{\text{jährliche Fahrleistung}}{100 \text{ km}} * \frac{\varnothing\text{Beladung}}{\text{Ladefaktor} * \text{Maximalbeladung}} * \text{Einfluss}_{\text{Start-Stop}}$$

Der Ladefaktor sowie der Einfluss durch die Start-Stopp-Häufigkeit stellen prozentuale Größen dar. Der Ladefaktor beschreibt die volumenmäßige Ausfüllung des Fahrzeugs. Der Start-Stopp-Einfluss beschreibt die Kraftstofferhöhung durch häufige Stopps.

Da ein Wechsel von Sommer- auf Winterreifen bei leichten Nutzfahrzeugen nicht als standardmäßige Praxis angesehen werden kann, spielen somit die Reifenwechsel- und Lagerkosten bei der Berechnung der absoluten Einsparungen eine Rolle. Aus diesem Grund wird die Berechnungslogik, wie sie für die Fahrzeugklasse Pkw beschrieben wurde, um die Lager- und Wechselkosten erweitert. Folglich sind die absoluten Einsparungen bei Einberechnung der Reifenwechsel- und Lagerkosten geringer. Da für leichte Nutzfahrzeuge als weitere Einsparmaßnahmen einzig die Anpassung des Reifenluftdruckes und die Schulung der Fahrer eine Rolle spielen, können die Berechnungen der Fahrzeugklasse Pkw, mit den oben beschriebenen Anpassungen, verwendet werden.

Fahrzeugklasse Nutzfahrzeug

Bei Nutzfahrzeugen spielt bei der Berechnung des Ist-Verbrauchs das Nachschneiden der Reifen eine Rolle. Wie bereits beschrieben kann durch das Nachschneiden der Reifen der

Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs um 6 Prozent bis circa 10 Prozent reduziert werden. Da das Tool einen konservativen Ansatz verfolgt, wird hier eine Kraftstoffersparnis von 6 Prozent angenommen. Somit erweitert sich die Berechnung des aktuellen Jahresverbrauchs um den Nachschneidefaktor. Die Berechnung der Einsparungen durch den Reifenwechsel ist analog zum leichten Nutzfahrzeug durchzuführen. Bei der Berechnung der Einsparungen durch Anpassung des Reifenluftdruckes wird aufgrund der höheren Drücke eine veränderte Regressionsformel verwendet. Dies wirkt sich durch eine leicht veränderte Rechnung aus, hat aber ansonsten keine Auswirkungen auf die Berechnungslogik. Weitere Einsparmaßnahmen sind bei Nutzfahrzeugen die Schulung der Fahrer sowie die Einstellung der Spur des Fahrzeugs. Bei nicht eingestellter Spur sind Verbrauchsnachteile für das Fahrzeug zu erwarten, die durch eine korrekte Einstellung vermieden werden können. Somit verringert sich der Kraftstoffverbrauch nach Einstellung der Spur um einen definierten Prozentsatz, abhängig von der Ausgangssituation.

Sonderfall Bus:

Omnibusse, als Sonderfall der Nutzfahrzeugkategorie, unterscheiden sich von normalen Nutzfahrzeugen durch den Einsatzzweck. Es werden keine Güter sondern Personen transportiert. Es ist daher nicht sinnvoll, die Beladung und den Ladefaktor abzufragen. Es sind vielmehr die Anzahl der Passagiere, die Maximalanzahl an Passagieren sowie der Platzfaktor, das heißt die Ausfüllung des Busses, von Interesse. Mittels des durchschnittlichen Gewichts eines Deutschen von 75 kg kann somit auf die Gewichtsbelastung und folglich auch auf den Verbrauch

geschlossen werden. Alle weiteren Berechnungen erfolgen analog zur beschriebenen Nutzfahrzeug Berechnungslogik.

Sonderfall Lkw:

Lastkraftwagen mit mehr als zwei Achsen sind für die Berechnung der Einsparungen differenziert zu betrachten. Aufgrund des unterschiedlichen Einflusses der Achsreifen auf den Rollwiderstand, sind alle drei relevanten Achsen zur Berechnung heranzuziehen. In der Eingabemaske werden daher, wie bereits beschrieben, die aktuelle Reifenklasse sowie die gewünschte Reifenklasse pro Achse abgefragt. Der Ist-Verbrauch kann analog zum Nutzfahrzeug bestimmt werden, alle anschließenden Rechnungen werden jedoch auf die unterschiedlichen Achsen abgestimmt. Somit erfolgt zur Bestimmung des Verbrauchs aufgrund des Rollwiderstands nach einem Reifenwechsel, die Reduktion anhand des gewichteten Anteils der Achse.

$$\begin{aligned} \text{Reduktion}_{\text{Rollwiderstand,Gesamt}} \\ = \text{Gewichtung}_{\text{Lenkachse}} * \text{Reduktion}_{\text{Lenkachse}} + \text{Gewichtung}_{\text{Antriebsachse}} \\ * \text{Reduktion}_{\text{Antriebsachse}} + \text{Gewichtung}_{\text{Trailerachse}} * \text{Reduktion}_{\text{Trailerachse}} \end{aligned}$$

Bei der Berechnung der absoluten Einsparungen erhöht sich die Komplexität aufgrund der verschiedenen Achsen. Es sind verschiedene Fälle zu betrachten, da an den unterschiedlichen Achsen verschiedene Reifeneffizienzklassen montiert sein können.

- Fall 1: Alle Achsen sind mit Standardreifen bestückt
- Fall 2: Die Lenk- und die Antriebsachse sind mit Standardreifen bestückt, die Trailerachsen mit rollwiderstandsarmen Reifen

- Fall 3: Die Antriebs- und Trailerachse sind mit Standardreifen bestückt, die Lenkachse mit rollwiderstandsarmen Reifen
- Fall 4: Die Lenk- und die Trailerachse sind mit Standardreifen bestückt, die Antriebsachse mit rollwiderstandsarmen Reifen
- Fall 5: Nur die Lenkachse ist mit Standardreifen bestückt, die Antriebs- und Trailerachsen mit rollwiderstandsarmen Reifen
- Fall 6: Nur die Antriebsachse ist mit Standardreifen bestückt, die Lenk- und Trailerachsen mit rollwiderstandsarmen Reifen
- Fall 7: Nur die Trailerachse ist mit Standardreifen bestückt, die Lenk- und die Antriebsachse sind rollwiderstandsarmen Reifen
- Fall 8: Alle Achsen sind mit rollwiderstandsarmen Reifen bestückt

Abhängig von den individuellen Fahrzeugcharakteristika können somit die jährlichen absoluten Einsparungen ermittelt werden.

Bei der Berechnung der potentiellen Gesamtleistung der Reifen muss ebenfalls mittels der Gewichtung der Achsen ein Mittelwert bestimmt werden. Erst so ist es möglich, von den jährlichen Einsparungen auf die Einsparungen über die Laufleistung zu schließen (vgl. Wildemann 2013).

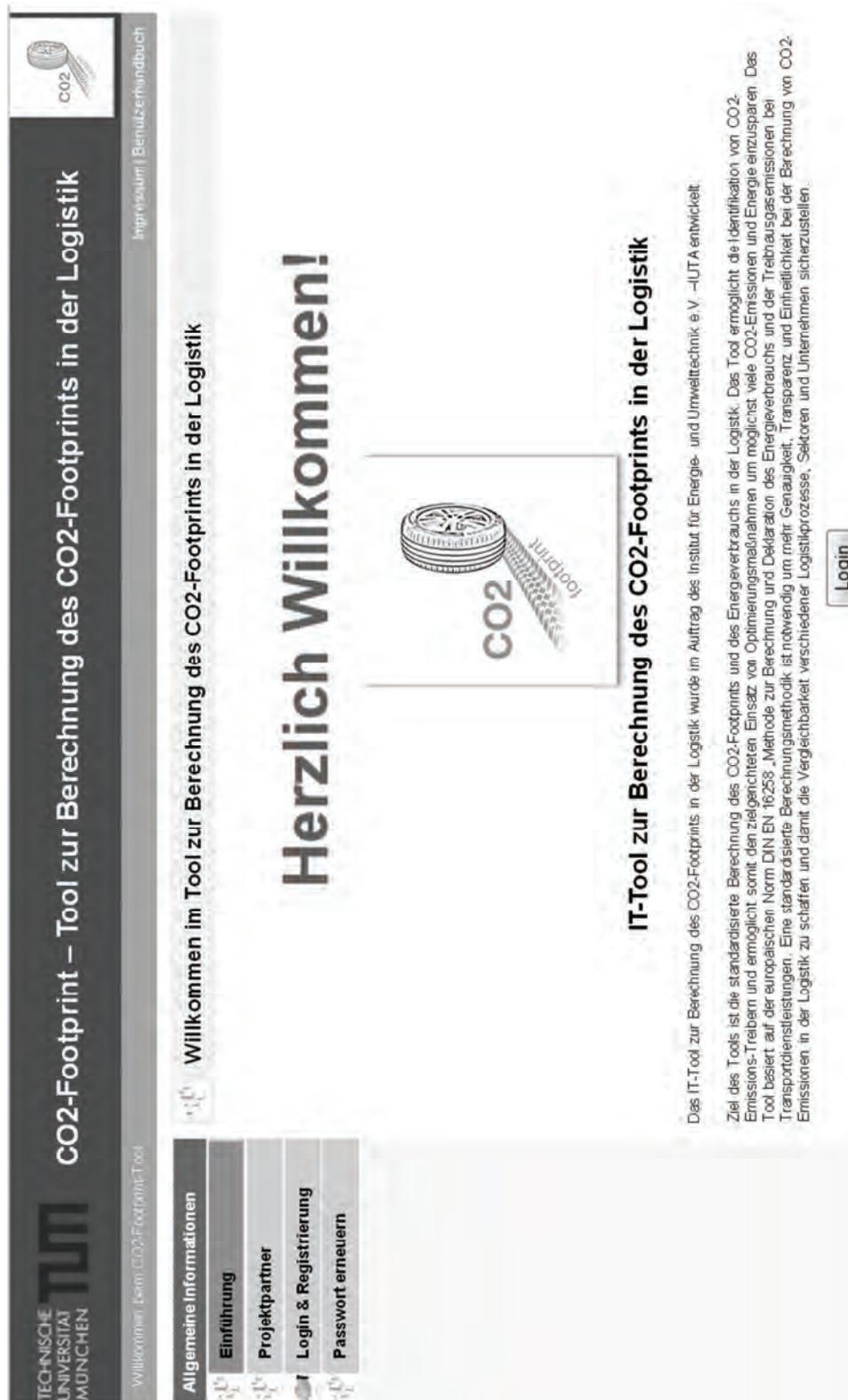


Abbildung 7-1: Willkommensbildschirm des CO2-Footprint-Tools

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

CO2-Footprint – Tool zur Berechnung des CO2-Footprints in der Logistik

Impressum | Benutzerrhandbuch

Willkommen beim CO2-Footprint-Tool

Allgemeine Informationen

- Einführung
- Projektpartner
- Login & Registrierung**
- Passwort erneuern

1.1 Registrierung zur Nutzung des Tools

Vielen Dank für Ihr Interesse am CO2-Footprint-Tool.

Um das Tool vollständig nutzen zu können, ist eine Registrierung notwendig. Die Registrierung ist kostenlos. Bitte füllen Sie hierzu das untenstehende Formular aus.

Durch die Registrierung erhalten Sie Zugriff auf:

- CO2-Footprint Messung

Email: Passwort: **Login**

Name*:

Firma*:

E-Mail-Adresse*:

* Pflichtangaben **Registrieren**

Abbildung 7-2: Registrierungsformular des IT-Tools

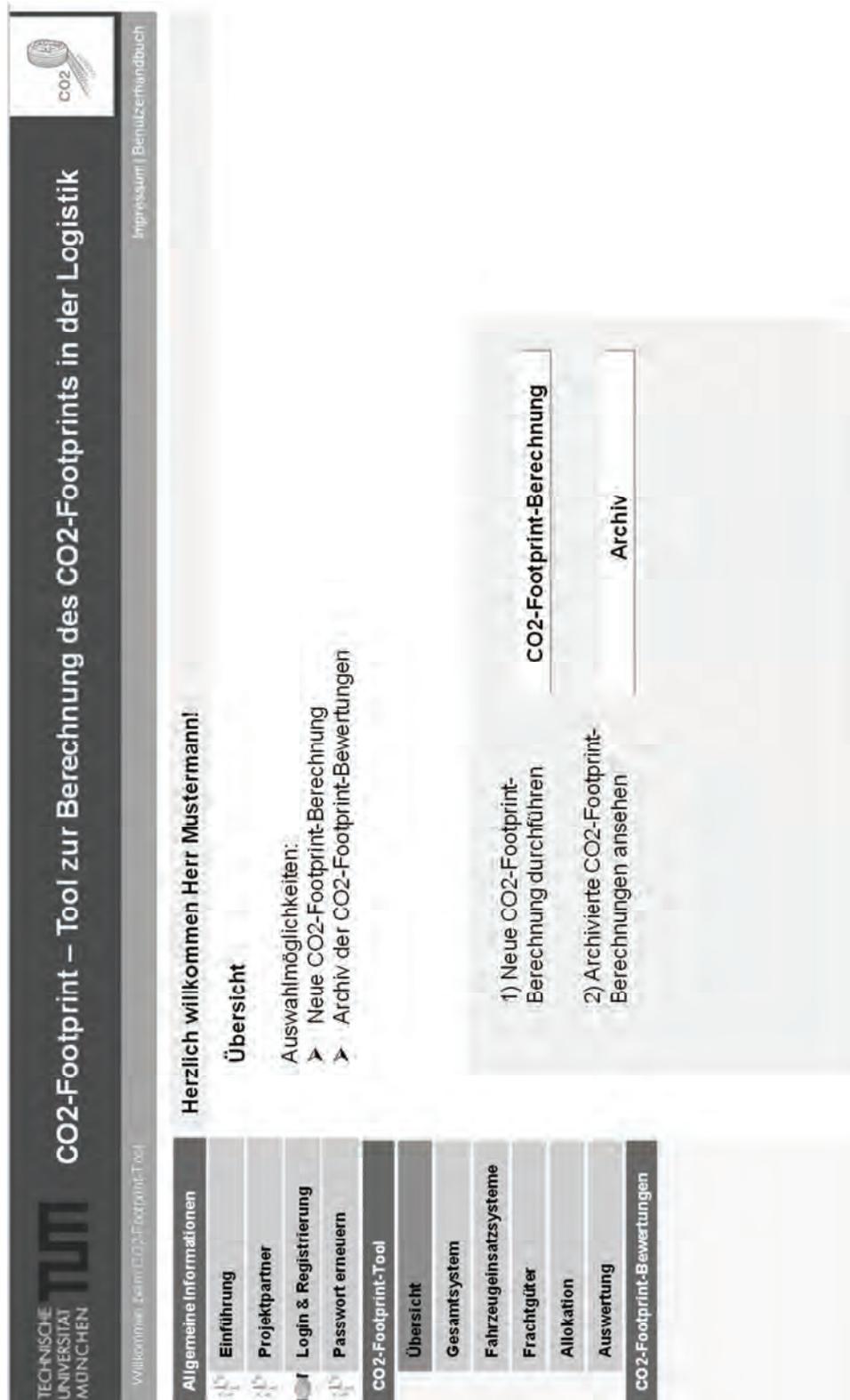


Abbildung 7-3: Übersichtsbildschirm des IT-Tools

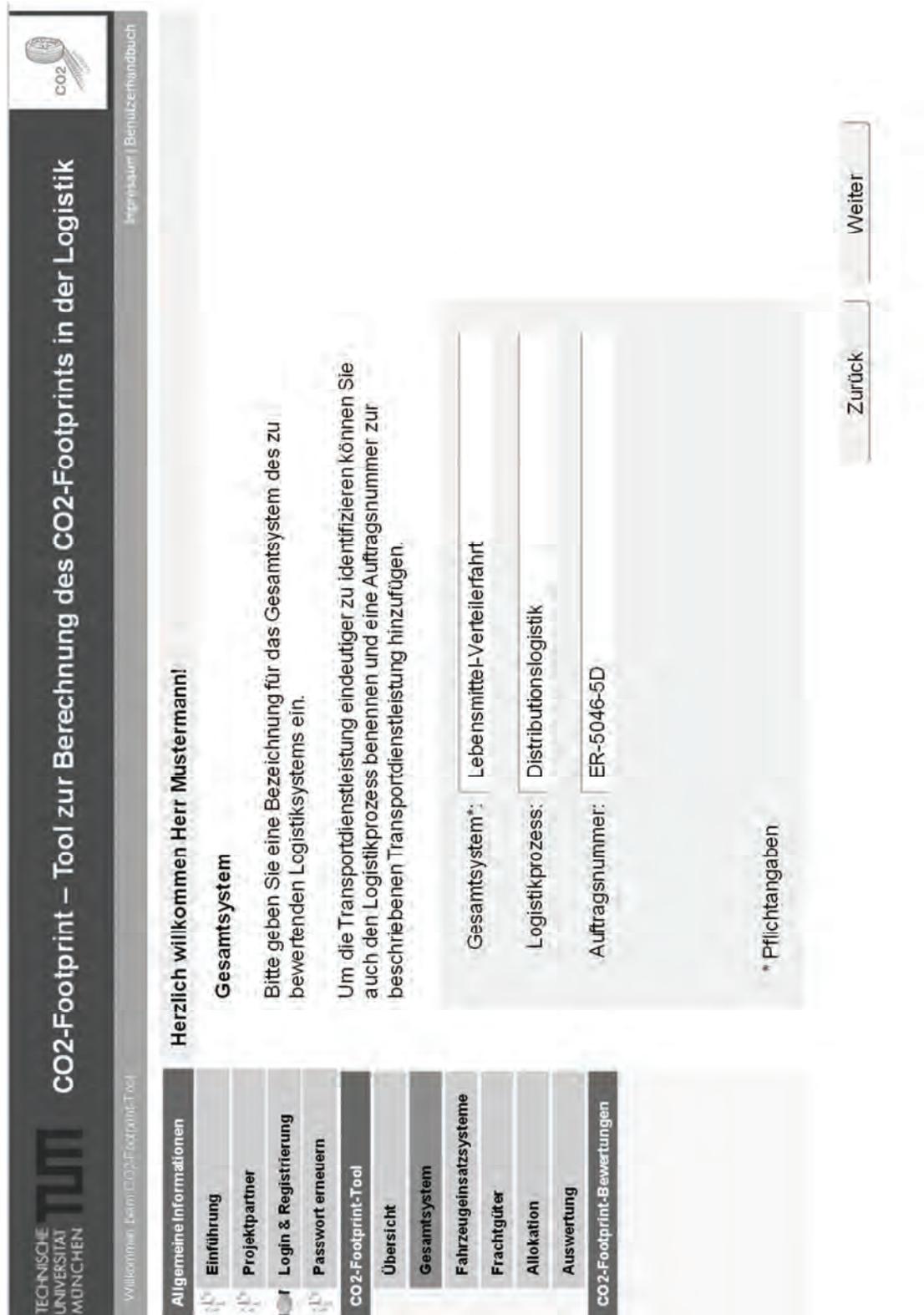


Abbildung 7-4: Spezifikation des Gesamtsystem im IT-Tool

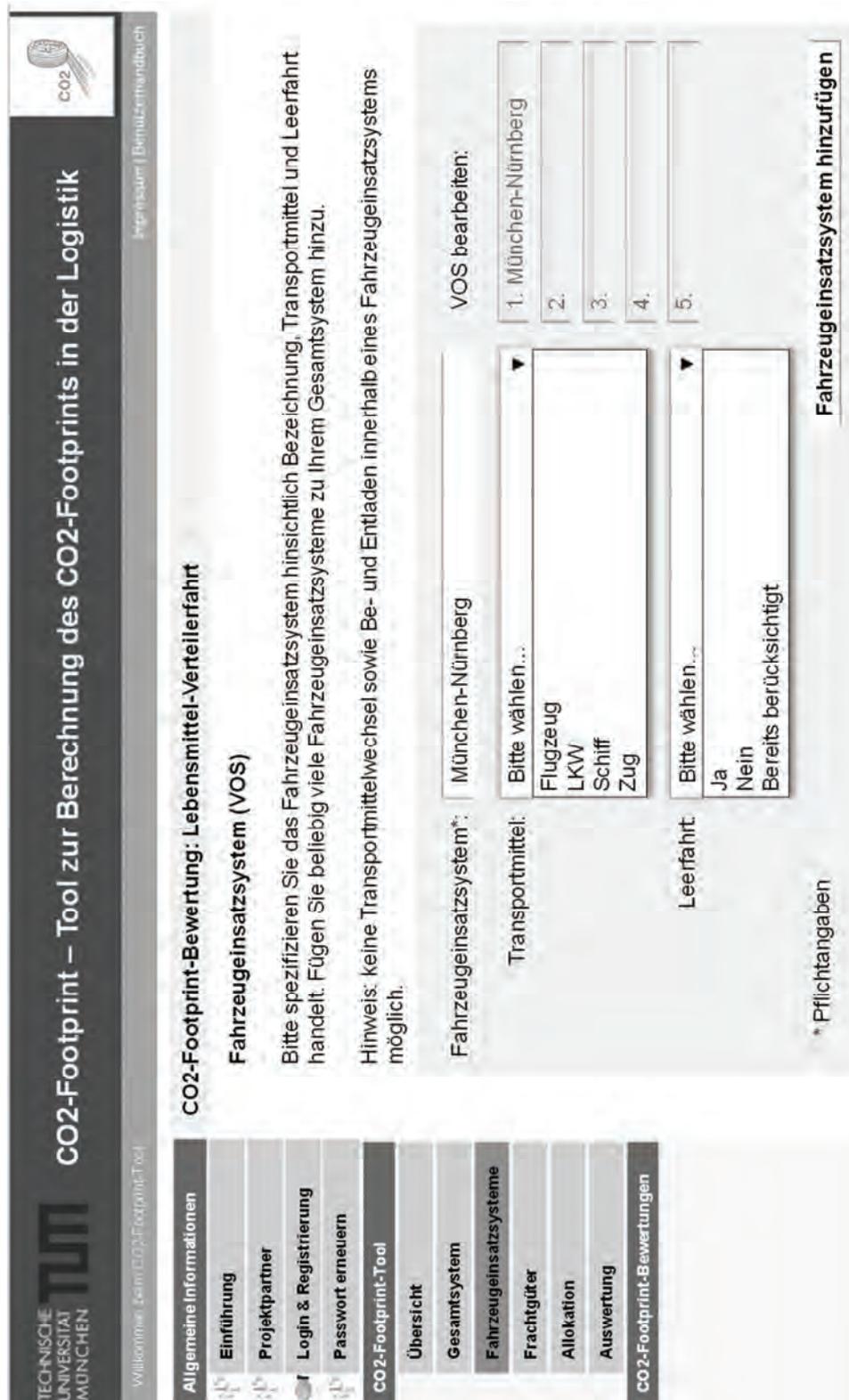


Abbildung 7-5: Bearbeitungsmaske der Teilstrecken

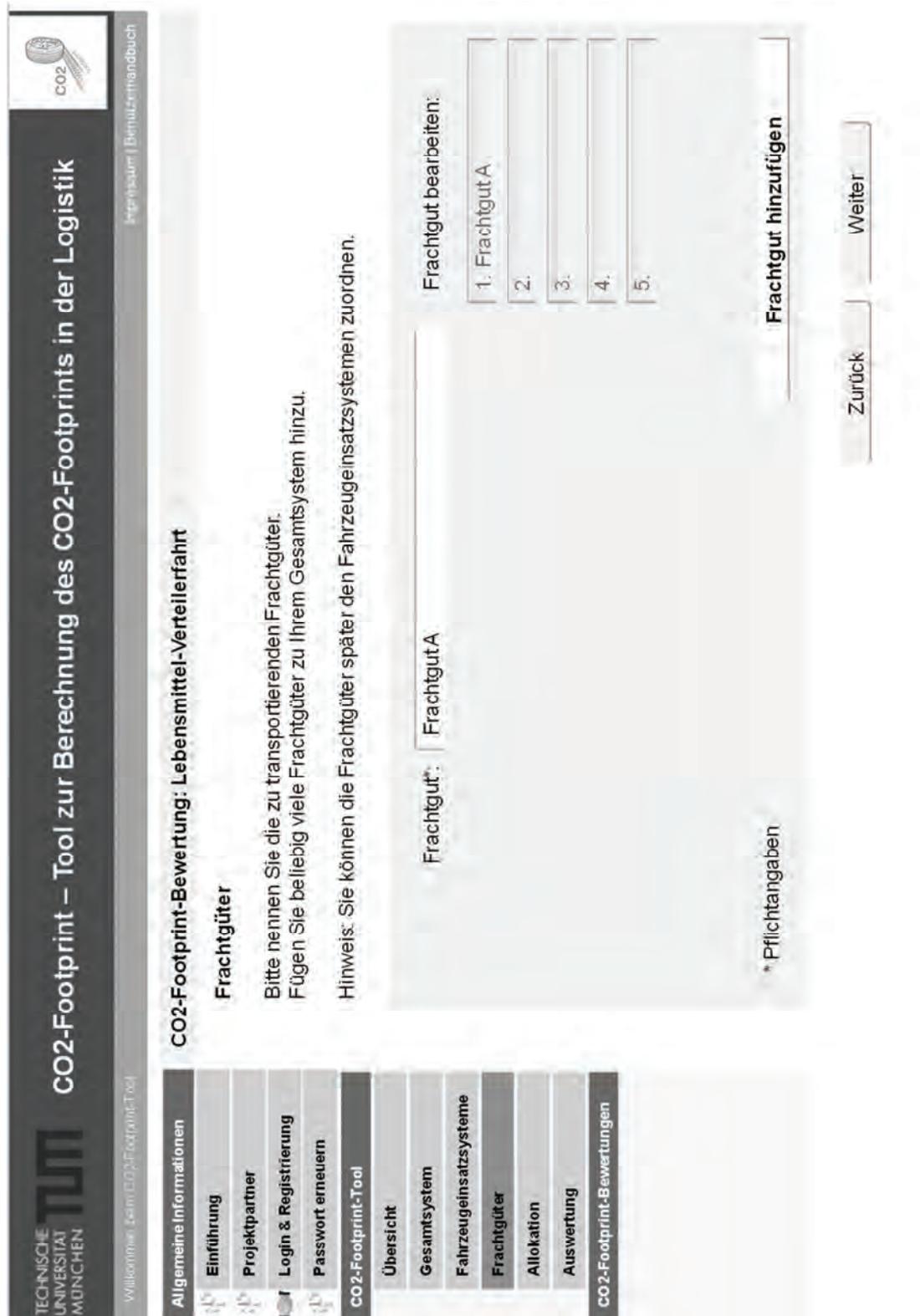


Abbildung 7-6: Frachtgutbearbeitung im IT-Tool

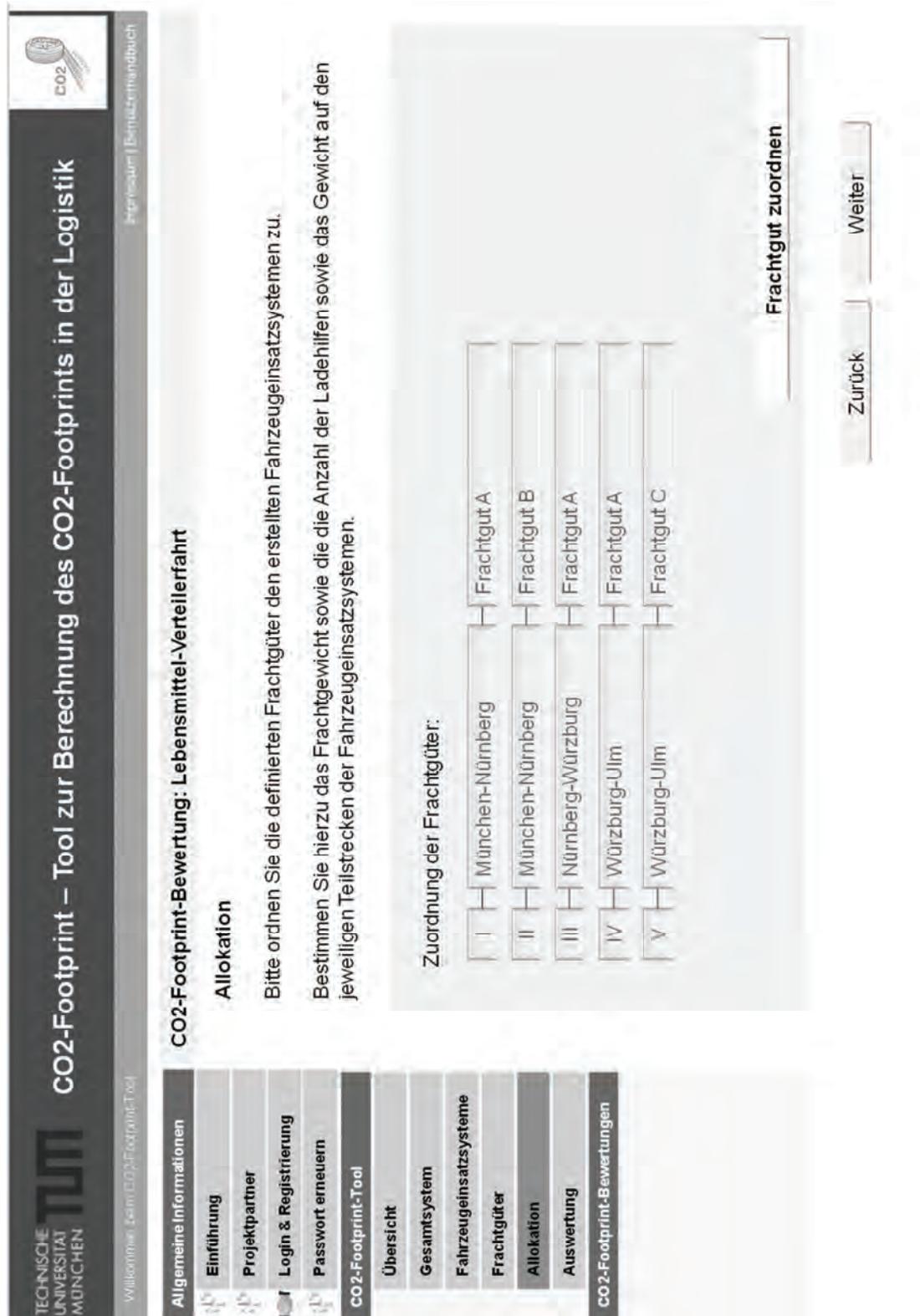


Abbildung 7-7: Allokation der Frachtgüter auf die Teilstrecken im IT-Tool

The screenshot displays the 'Auswertung' (Evaluation) section of the 'CO2-Footprint-Bewertung: Lebensmittel-Verteilerfahrt' tool. The interface includes a navigation menu on the left with options like 'Allgemeine Informationen', 'Einführung', 'Projektpartner', 'Login & Registrierung', and 'Passwort erneuern'. The main content area shows a summary of results:

- Gesamte Transportdienstleistung: Lebensmittel-Verteilerfahrt**
- Transportleistung: 2371 tkm
- Well-to-Wheel-Emissionen: 910 kg CO2e
- Tank-to-Wheel-Emissionen: 715 kg CO2e

Buttons for 'Ergebnisse nach Teilstrecken', 'Ergebnisse nach Frachtgütern', 'Drucken', and 'Zur Übersicht' are visible at the bottom of the results section.

Abbildung 7-8: Ergebnisdarstellungsmöglichkeit im IT-Tool

8 Literaturverzeichnis

Akademie für Kommunalfahrzeugtechnik (2011): Trends, Kostenreduzierung mit System, unternehmerische Verantwortung übernehmen, der Führerschein allein reicht nicht mehr aus.

Aktrans (2011): Das Verfahren. Online verfügbar unter <http://www.arktrans.de/das-verfahren.html>.

Allemeyer, W.; Malina, R.; Preistrup, M. (2010): Leitfaden City-Logistik. Erfahrungen mit Aufbau und Betrieb von Speditionskooperationen. Hg. v. Deutscher Städtetag. Berlin.

Allianz pro Schiene (2013): Treibhausgas Emissionen nach Sektoren (EU-27). Online verfügbar unter <http://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/%202011/039-klimagipfel-in-durban/co2-emissionen-eu-sektoren.pdf>.

Aronsson, H.; Brodin, M. (2006): The Environmental Impact of Changing Logistics Structures. In: *The International Journal of Logistics Management* 3, S. 394–415.

Bain & Company (2010): Zum E-Auto gibt es keine Alternative.

Becker, F. (2001): Anreizsysteme als Instrumente der strukturellen Mitarbeiterführung. In: C. Antoni, E. Eyer, J. Kutscher, A. Kluge und T. Webers (Hg.): *Das flexible Unternehmen - Arbeitszeit, Gruppenarbeit, Entgeltsysteme*. Düsseldorf: Symposium Publishing.

Beckmann, H. (2003): *Supply Chain Management. Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen*. Berlin: Springer.

Bentenrieder, M.; Kleinhans, c. (2010): Elektromobilität: Powerplay um Gewinnzonen und Kundenzugang. In: *automotivemanager* (1), S. 7–9.

Beucker, Severin (2005): Ein Verfahren zur Bewertung von Lieferanten auf der Grundlage von Umweltwirkungen unter Berücksichtigung von Prozesskosten. Stuttgart: Jost-Jetter (429).

Bischoff, E. E.; Ratcliff, M. (1995): Issues in the development of approaches to container loading. In: *Omega* 23, S. 377–390.

BMU (2012): Erneuerbare mobil. marktfähige Lösungen für eine klimafreundliche Elektromobilität. 1. Aufl. Berlin. Online verfügbar unter http://www.erneuerbar-mobil.de/de/mediathek/dateien/ergebnisbroschuere-erneuerbar-mobil_bf.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2014.

Bojanowski, Axel (2013): Uno-Bericht. Klimawandel ändert unsere Welt grundlegend. In: *Spiegel Online*, 27.09.2013 (Onlineausgabe). Online verfügbar unter <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/klima-5-ipcc-report-des-uno-klimarats-in-stockholm-2013-a-924789.html>, zuletzt geprüft am 10.01.2014.

Book, M.; Groll, M.; Mowquet, X.; Rizoulis, D.; Sticher, G. (2009): The Comeback of the Electric Car - How real, how soon and what must happen next. Online verfügbar unter <http://www.bcg.de/documents/file15404.pdf>.

Bosselmann, Marten (2011): Grüne Logistik - alles im grünen Bereich? Bundesverband Internationaler Express- und Kurierdienste e.V. RKW- Arbeitskreis Handelslogistik. Berlin, 16.06.2011. Online verfügbar unter <http://www.rkw->

kompetenzzentrum.de/uploads/media/2011_Dok_AK-Handel-VT-BIEK.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2014.

Boston Consulting Group (2011): Powering Autos to 2020
BCG, The Era of the Electric Car.

Bowersox, Donald J.; Closs, David J. (1996): Logistical management. The integrated supply chain process. New York: McGraw-Hill Companies.

Brand, Marius; Herrmann, Florian (2012): Elektromobile Wertschöpfungskette. Strategische Allianzen und internationale Zusammenarbeit. In: *Produktionsmanagement* 107 (10), S. 717–721.

Brandenberg, A. (2001): Anreizsysteme zur Unternehmenssteuerung - Gestaltungsoptionen, motivationstheoretische Herausforderungen und Lösungsansätze. Wiesbaden: Universitätsverlag.

Bretzke, Wolf-Rüdiger; Barkawi, Karim (2012): Nachhaltige Logistik. Antworten auf eine globale Herausforderung. 2., Aufl. 2012. Berlin: Springer Berlin.

Brohmann, B.; Fritsche, U.; Grießhammer, Rainer; Hartman, R.; Seebach, D. (2010): Positionspapier Klimakompensation. Hg. v. Öko-Institut e.V.

Brokate, J.; Özdemir, E.; Kugler, U. (2013): Der Pkw-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt. Szenario-Analyse im Auftrag des Mineralölwirtschaftsverbandes. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Bukold, S. (1996): Kombiniertes Verkehr Schiene/Straße in Europa.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2011): Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge. Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRi. Online verfügbar unter <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/abschlussbericht-libri.pdf>, zuletzt geprüft am 26.04.2014.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2012): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Braunschweig. Online verfügbar unter <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/batterierecycling/abschlussberichte-recycling/abschlussbericht-lithorec.pdf>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2014): Energiedaten. Gesamtausgabe. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe,did=476134.html>, zuletzt geprüft am 21.05.2014.

Bundesregierung (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität. Berlin.

Burghardt, Falko (2013): Gestaltung anpassungsfähiger Logistiksysteme. Handlungsempfehlungen zur Ausgestaltung der strategischen Erfolgsfaktoren ; Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Unternehmenslogistik ; eine theoretische und empirische Analyse der produzierenden Industrie. 1. Aufl. München: TCW, Transfer-Centrum (73).

Capgemini (2012): Electric Vehicles. A Force for the Future. Online verfügbar unter http://www.capgemini.com/resource-?????cess/resource/pdf/Electric_Vehicles__A_Force_for_the_Future.pdf.

Carbone, V.; Stone, M. (2005): Growth and relational strategies used by the European logistics service providers: Rationale and outcomes. In: *Transportation Research Part E* 41 (6), S. 495–510.

Chouinard, M.; D'Amours, S.; Ait-Kadi, D. (2005): Integration of reverse logistics activities within supply chain information systems. In: *Computers in Industry* 56, S. 105–124.

Continental (2011): Lkw-Reifen. Online verfügbar unter http://www.contionline.com/generator/www/de/de/continental/transport/allgemein/home/index_de.html.

Daimler AG; Vattenfall Innovation GmbH (2011): Elektrifizierung von Mercedes-Benz Kleintransportern in Entwicklung und Produktion. Stuttgart. Online verfügbar unter <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/wirtschaftsverkehrfeldversuche/abschlussberichte-wirtschaftsverkehr/abschlussbericht-emkep.pdf>.

Daugherty, P. J.; Richey, R. G.; Genchev, S. E.; Chen, H. (2005): Reverse Logistics. superior performance through focused resource commitments to information technology. In: *Transportation Research Part E* 41, S. 77–92.

Davies, A. P.; Bischoff, E. E. (1999): Weight distribution considerations in container loading. In: *European Journal of Operations Research* 114, S. 509–527.

DB Schenker (25.05.2012): Bislang rund 200 Containerzüge für BMW von Deutschland nach China gefahren. Online verfügbar unter

https://www.deutschebahn.com/de/konzern/im_blickpunkt/2504358/db_schenker_chinazug_20120511.html?start=200&itemsPerPage=25, zuletzt geprüft am 13.03.2014.

DB Schenker (2014): The world's greenest mode of transport is now even greener. Online verfügbar unter

https://www.rail.dbschenker.de/rail-deutschland-en/start/business_activities/additional_services/eco_plus.html.

Deutsche Post DHL (2012): Delivering Tomorrow. Logistik 2050. Unter Mitarbeit von D. Müller und K. Bonine. Hg. v. DHL.

Deutsche Post DHL (2013): Factsheets alternative Fahrzeuge. Online verfügbar unter

http://www.dpdhl.com/de/presse/pressemitteilungen/2013/co2_freie_zustellung_bonn.html, zuletzt geprüft am 09.02.2014.

DHL (2013): GoGreen Klimaschutzprojekt effiziente Brennholz-Kochersets für Lesotho.

Diez, W. (2010): Otto-, Diesel-, Elektromotor - wer amcht das Rennen? Hg. v. Industrie- und Handelskammer Region Stuttgart. Stuttgart.

DIN (2012): Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen, 2012 (DIN EN 16258).

Diruf, G. (1994): Computergestützte Informations- und Kommunikationssysteme der Unternehmenslogistik als Komponenten innovativer Logistikstrategien. In: H. Isermann (Hg.): Lo-

gistik: Beschaffung, Produktion, Distribution. Landsberg, S. 71–86.

Doherty, Sean; Hoyle, Seb (2009): Supply Chain Decarbonization. Hg. v. World Economic Forum. Genf. Online verfügbar unter <http://www.weforum.org/reports/supply-chain-decarbonization>, zuletzt geprüft am 21.05.2014.

Dyckhoff, H.; Lackes, Richard; Reese, J. (Hg.) (2004): Supply chain management and reverse logistics: Springer.

Edwards, R.; Larivé, J.F; Beziat, J.C (2011): Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context. Report version 3c, July 2011. Luxembourg: Publications Office (24952).

E-Force (2014): E-Force-One. Fehraltorf. Online verfügbar unter www.e-force.ch, zuletzt geprüft am 09.02.2014.

Eschenbächer, J.; Wiesner, S.; Thoben, K.-D. (2012): Herausforderungen und Ansätze der Elektromobilität. In: *Industrie Management* 28 (5), S. 25–28.

Falk, H. (2008): JIM.NRW Joint Implementation Modellprojekt NRW, 2008. Online verfügbar unter http://p31726.typo3server.info/fileadmin/redakteure/energie_arena/Vortraege/Wirtschaftlichkeit_Helwig_Falk_C02-Einsparung_mit_JIM.pdf.

FedEx (Hg.) (2013): FedEx Global Citizenship Report.

Feess, E. (2014): Senkenprojekte. Online verfügbar unter <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/senkenprojekte.html>, zuletzt geprüft am 19.05.2014.

Franchetti, Matthew J.; Apul, Defne (2013): Carbon footprint analysis. Concepts, methods, implementation and case studies. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (2011): Recycling für den Klimaschutz. Hg. v. ALBA Group. Fraunhofer UMSICHT. Berlin.

Fuchs, Stephan; Lohr, Korbinian; Lienkamp, Markus (2012): Bedeutung der Produktion für die CO₂-Lebenszyklusemissionen von Elektrofahrzeugen. In: *ATZ Produktion* 5 (3), S. 184–188.

Gadesmann, Karl; Kuhnert, Felix (2007): The automotive industry and climate change. Framework and dynamics of the CO₂ (r)evolution. Stuttgart.

Gehring, H.; Bortfeld, A. (1997): A genetic algorithm for solving the container loading problem. In: *International Transactions in Operations Research* 4, S. 401–418.

Gille, D. (2010): Wirtschaftlichkeit von RFID-Systemen in der Logistik. Ex-Ante-Quantifizierung der ökonomischen Effekte allgegenwärtiger Informationsverarbeitung. Wiesbaden: Gabler.

Gilles, C.; Kümmeler, R.; Plantholt, W.; Seemann, A.; Wöhle, T.; Würmser, A. (2013): Forschungsagenda Logistik. Hg. v. DVZ. Hamburg.

Godfrey, P. C.; Merrill, C.B; Hansen, J. M. (2008): The Relationship Between Corporate Social Responsibility and Shareholdervalue. An Emperical Test of the Risk Management Hypothesis. In: *Strategic Management Journal* 30, S. 425–445.

Goodyear (2011): Effizienter Kraftstoffeinsatz. Hg. v. Goodyear.

Goodyear Dunlop (2013): Fleet Fuel Efficiency. Online verfügbar unter <http://fleet-fuel-efficiency.eu/en/fuel-calculator/>.

Göpfert, Ingrid (2000): Logistik der Zukunft. Wiesbaden: Gabler.

GreenGear (2014): Mercedes-Benz Vito E-CELL: Elektro-Transporter ab Werk. Online verfügbar unter <http://www.greengear.de/mercedes-benz-vito-e-cell-technische-daten/>, zuletzt geprüft am 08.03.2014.

Grißhammer, Rainer; Hochfeld, Christian (2009): Memorandum Product Carbon Footprint. Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmub-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/memorandum_pcf_lang_bf.pdf.

Gudehus, Timm (2005): Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 3., neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.

Gudehus, Timm (2010): Logistik. Grundlagen - Strategien - Anwendungen. 4. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.

Gudehus, Timm (2012): Logistik. Studienausg. der 4. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.

Günther, Willibald A. (2009): Change to green. Handlungsfelder und Perspektiven für nachhaltige Logistik und Geschäftsprozesse. 1. Aufl. München: Huss-Verlag.

Hachtel, G.; Holzbaur, U. (2010): Management für Ingenieure. Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Hanke, C. (2011): Grüne Logistik auf dem Vormarsch.

HBK Braunschweig, Institut für Transportation Design (ITD) (2011): Konzipierung und Gestaltung elektromobiler Dienstleistungen im innerstädtischen Raum. Braunschweig.

Heidenblut, Volker; Hompel, Michael (2008): Taschenlexikon Logistik. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer. Online verfügbar unter

[http://opac.ub.tum.de/InfoGuideClient.tumsis/start.do?Login=wtum&Query=540="978-3-540-75661-3"](http://opac.ub.tum.de/InfoGuideClient.tumsis/start.do?Login=wtum&Query=540=).

Hermeier, Axel (2007): Umweltmanagement und Emissionsrecht. Eine Untersuchung der strategischen und organisatorischen Bewältigung einer neuen Aufgabenstellung im Rahmen umweltorientierter Unternehmensführung. 1. Aufl. München [u.a.]: Hampp (7).

Hoepke, E. (2007): Der Lkw im europäischen Straßengüter- und kombinierten Verkehr.

Hompel, M.; Heidenblut, V. (2011): Taschenlexikon Logistik. Berlin: Springer.

Hütter, Andrea (2013): Verkehr auf einen Blick. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 25.04.2014.

IAO (2010): Strukturstudie BWe mobil. Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. Stuttgart.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013): Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical

Science Basis. Online verfügbar unter <http://www.climatechange2013.org/>.

Intra, C. (2014): Effektivität und Effizienz in Prozessen und Produkten, 06.05.2014.

Isermann, H. (Hg.) (1975): Management-Enzyklopädie. Frankfurt [Main]: Fischer-Taschenbuch-Verlag.

ISO (2012): Treibhausgase – Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene, 2012 (ISO 14064-1).

Kahlenborn, Walter; Kabisch, Sibylle; Klein, Johanna; Richter, Ina; Schürmann, Silas (2012): Energiemanagementsysteme in der Praxis. Hg. v. Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Bundesministerium für Umwelt. Online verfügbar unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3959.pdf>, zuletzt geprüft am 15.02.2013.

Kaluza, Bernd (1998): Kreislaufwirtschaft und Umweltmanagement. Hamburg: S + W Steuer- und Wirtschaftsverlag (Bd. 17).

Kampker, Achim; Vallée, Dirk; Schnettler, Armin (Hg.) (2013): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. 1. Aufl. Berlin: Springer.

Klaus, Peter; Krieger, Winfried; Krupp, Michael (2012): Gabler, Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler.

Klug, Florian (Hg.) (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Koch, Susanne** (2012): Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Berlin: Springer Vieweg.
- Koether, Reinhard** (2012): Distributionslogistik. Effiziente Absicherung der Lieferfähigkeit. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Kohn, C.; Hüge-Brodin, M.** (2008): Centralised distribution systems and the environment: How increased transport work can decrease the environmental impact of logistics. In: *International Journal of Logistics Research and Applications* 11 (3), S. 229–245.
- KommunalTechnik** (2007): Kommunale Fuhrparks - (Inter)kommunale Fahrzeugnutzung.
- Kranert, M.; Sihler, A.** (2008): Ressourcenschutz durch Abfallwirtschaft. München: Oldenbourg-Industrieverl (Bd. 93).
- Kranke, Andre; Schmied, Martin; Schön, Andrea D.** (2011): CO₂-Berechnung in der Logistik. Datenquellen, Formeln, Standards. München: Vogel.
- Krcmar, H.** (2005): Informationsmanagement. 5. Aufl. Berlin: Springer.
- Krol, B.; Keller, S.** (2005): E-Logistics. In: *Das Wirtschaftswissenschaftliche Studium (WiSt)* 34 (1), S. 45–47.
- Krumme, Klaus** (2009): Nachhaltige Mobilität. Strategische Positionierung der Logistik. MAEKAS WORKSHOP. Zentrum für Logistik & Verkehr (ZLV), Universität Duisburg-Essen. Essen, 20.04.2009. Online verfügbar unter https://www.wiwi.uni-due.de/fileadmin/fileupload/PROJEKT-MAEKAS/PDFs/Veranstaltungen/Workshop-2009-04-20/MAEKAS-2009-04-20-Krumme-Nachhaltige_Mobilitaet.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2014.

Kruschke, G. (2011): Deutsche Post will auf Elektroautos umrüsten. Online verfügbar unter <http://www.automobilproduktion.de/2011/09/deutsche-post-will-auf-elektroautos-umruesten/>.

Lal, R.; Han, A. (2005): Tanpin Kanri. Retail Practice at Seven-Eleven Japan.

Lanxess (2010): LANXESS erweitert globale Kapazitäten für Hochleistungs-Kautschuk.

Lehmann, J. (2011): Bedeutung der neuen EU Reifen Grenzwerte und deren Einfluss auf Produkte. Hg. v. VDI.

Liebscher, Tobias; Wohlfahrt, Matthias (2010): Green SCM. Von der Einzelmaßnahme bis zur globalen ökologisch optimierten Lieferkette. Die Roadmap zur Vereinigung ökonomischer und ökologischer Effizienz. Frankfurt: Bearing Point.

Lierow, Michael (2012): B2City. Zur Zukunft des städtischen Güterverkehrs. Hg. v. Oliver Wyman. Online verfügbar unter http://www.oliverwyman.de/media/Oliver_Wyman_B2City_Zur_Zukunft_des_staedtischen_Gueterverkehrs.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2014.

Martin, Heinrich (2009): Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intra-logistik ; mit ... 39 Tab. 7., erw. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Matthews, H. S.; Hendrickson, C. T. (2003): The Economic and Environmental Implications of Centralized Stock Keeping. In: *Journal of Industrial Ecology* 6 (2), S. 71–81.

- Matthews, H. S.; Hendrickson, C. T.; Weber, C. L.** (2008): The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries. In: *Environmental Science & Technology* 42 (16), S. 5839–5842.
- McKinsey** (2007): Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland.
- McKinsey** (2011): 110.000 Jobs bis 2030: Elektroautos schaffen Wachstum und Beschäftigung in Europa. Online verfügbar unter http://www.mckinsey.de/html/presse/2011/20110105_pm_elektro_2030.asp.
- Mercedes-Benz** (2014): Vito E-Cell. Online verfügbar unter http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/van/home/vans_world/blueefficiency/technologies/e-cell.0002.html, zuletzt geprüft am 08.03.2014.
- Meyer, R.** (2012): Nachhaltigkeit durch Innovationen beim Fashion-Logistiker Meyer & Meyer: Ökologische und soziale Maßnahmen unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte. In: W. Stölzle und T. C. Lieb (Hg.): *Business Innovation in der Logistik*. Wiesbaden: Springer, S. 264–275.
- Monauni, Max; Freitag, Christian** (2012): Target Allowance. CO2-Controlling für eine nachhaltige Produktionsstrategie. In: *Industrie Management* 28 (5), S. 41–44.
- Mucha, M.** (2006): RFID-Anwenderbeispiel Volkswagen AG. Hg. v. Electronic Commerce Centrum Stuttgart-Heilbronn.
- Müller-Steinfahrt, U.** (2010): *Green Supply Chain - Gründe Beschaffungs- und Versorgungslogistik*. Veitshöchheim,

10.02.2010. Online verfügbar unter
http://www.lwg.bayern.de/weinbau/38298/linkurl_21.pdf.

MyLogistics (2014): Grüne Fracht durch sauberen Fuhrpark.
Online verfügbar unter
http://www.mylogistics.net/2008/06/12/Grüne_Fracht_durch_sauberen_Fuhrpark/.

Nationale Plattform Elektromobilität (2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.erneuerbar-mobil.de/mediathek/dateien/nep-zweiter-zwischenbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2014.

Nikolin, H.-J. (2008): 62. IAA Nutzfahrzeuge. Hg. v. Continental.

o. V. (2007): Länger fahren und Kraftstoff sparen -Micheloin-Reifen leisten in jedem Lebensabschnitt ihren Beitrag. In: *NEUE ReifenZeitung* (8), S. 40–45.

o. V. (2009): Die Brücke von Hückelhoven. In: *DVZ*, 25.04.2009 (50). Online verfügbar unter http://www.genios.de/fachzeitschriften/artikel/DVZ/20090425/die-bruecke-von-hueckelhoven/lv050hel-Aufmacher_383571_new.html.

o. V. (2011): Transeurasischer Autotransport. In: *railways*, 2011 (05), S. 26–28.

o. V. (2013): Neue Bahnverbindung nach China ist in Betrieb. In: *Die Welt*, 02.08.2013. Online verfügbar unter <http://www.welt.de/wirtschaft/article118648469/Neue-Bahnverbindung-nach-China-ist-in-Betrieb.html>, zuletzt geprüft am 13.06.2014.

o. V. (2014): Alpensped hat 2013 insgesamt 779,2 Tonnen CO₂ kompensiert. Online verfügbar unter <http://www.logbw.de/alpensped-kompensiert-50-prozent-mehr-co2-weiterer-schritt-in-richtung-klimaneutralitaet/>.

Padmanabha, R.; Ajitkumar, B. (2007): Implementation of Milk Run Logistics System in an Auto component Manufacturing Plant. In: *Sastech Journal* 6 (2), S. 27–32. Online verfügbar unter http://www.msrsas.org/docs/sastech_journals/archives/Sept2007/4.pdf.

Pandey, Divya; Agrawal, Madhoolika; Pandey, Jai Shanker (2011): Carbon footprint: current methods of estimation. In: *Environ Monit Assess* (178), S. 125–160.

Pfohl, Hans-Christian (2009): Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8. Aufl. Berlin: Springer.

Pfohl, Hans-Christian (2010): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Proff, Heike; Proff, Harald; Fojcik, T.; Sandau, J. (2013): Aufbruch in die Elektromobilität. Märkte, Geschäftsmodelle, Qualifikationen, Bewertung. Hg. v. Universität Duisburg-Essen und Kienbaum Consultants International GmbH.

Quariguasi Frota Neto, J.; Bloemhof-Ruwaard, J. M.; van Nunen, J. A. E. E.; van Heck, H. W. G. M. (2006): Designing and Evaluating Sustainable Logistics Networks. In: *International Journal of Production Economics* (2), S. 195–208.

Quick, J.; Cuber, S.; Helmig, J. (2012): Best Practices des SCM in Kunden-Lieferanten-Beziehungen. In: G. Schuh und V.

Stich (Hg.): Produktionsplanung und -steuerung 2. Evolution der PPS. 4. Aufl. Berlin: Springer, S. 92–150.

Reinhart, Gunther; Berlak, Joachim; Hüttner, Stefan; Mari, Zeyad; Reinhardt, Saskia (2008): Energie- und Ressourcenverbrauch entlang der Wertschöpfungskette. Nachhaltige und ganzheitliche Optimierung durch Green4SCM-Planungsplattform. In: *ZWF* 103 (12), S. 1064–1068.

Rodrigue, Jean-Paul; Comtois, Claude; Slack, Brian (2009): *The geography of transport systems*. 2nd ed. London, New York: Routledge.

Rogall, Holger (2008): *Ökologische Ökonomie. Eine Einführung*. 2. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

Salehi, F.; Ryssel, L.; Klötzke, F. (2012): Von B2C zu B2B durch alternative Zustelloptionen. Aktuelle Herausforderungen für Paketdienstleister im B2C-Segment. Hg. v. A.T. Kearny GmbH. A.T. Kearny GmbH. Online verfügbar unter http://www.atkearney.de/documents/856314/1214708/BIP_Von_B2C_zu_B2B_durch_alternative_Zustelloptionen.pdf/892541a9-63aa-434d-b2b3-2f146094409f, zuletzt geprüft am 22.05.2014.

Schaltegger, Stefan; Herzig, Christian; Kleiber, Oliver; Klinke, Torsten; Müller, Jan (2007): *Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen. Von der Idee zur Praxis: Managementansätze zur Umsetzung von Corporate Social Responsibility und Corporate Sustainability*. Lüneburg. Online verfügbar unter http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nachhaltigkeitsmanagement_unternehmen.pdf, zuletzt geprüft am 19.06.2013.

Schmied, M.; Knörr, W. (2012): Carbon Footprint - Teilgutachten. Monitoring für den CO₂-Ausstoß in der Logistikkette. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4306.pdf>.

Schmied, Martin; Wolfram, Knörr (2011): Berechnung von Treibhausgasen in Spedition und Logistik. Begriffe | Methoden | Beispiele. Bonn: DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V.

Seidel, E. (1990): Anreize zu ökologisch verpflichtetem Wirtschaften. In: G. Schanz (Hg.): Handbuch Anreizsysteme in Wirtschaft und Verwaltung. Stuttgart: Poeschel.

Seidel, P. (2014): Mit teurer Fracht von China nach Duisburg. In: *Kölner Stadt-Anzeiger*, 29.03.2014. Online verfügbar unter <http://www.ksta.de/politik/-mit-wertvoller-fracht-von-china-nach-duisburg,15187246,26687630.html>, zuletzt geprüft am 13.06.2014.

Seidel, Thomas; Wolff, Stefan (2007): Auf dem Weg zur Green Logistics. Messbarkeit ist der Schlüssel. Berlin. Online verfügbar unter http://www.4flow.de/fileadmin/user_upload/publikationen/veroeffentlichungen/Oekologie_Logistik-umweltgerechte_L_sungen_BVL-Kongress_2007.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2007.

Seidelmann, C. (2007): Schiene schlägt Straße. In: *Handelszeitung*, 21.03.2007.

Seidenschwarz, W. (2008): Marktorientiertes Prozessmanagement. Wie Process Mass Customization Kundenorientierung

und Prozessstandardisierung integriert. München: Franz Vahlen.

Siemens AG (Hg.) (2011): Fallstudien für Verkehrslösungen. Mehr Effizienz durch moderne Konzepte und Technologien. München.

Souren, R. (2012): Ökologisch und ökonomisch nachhaltige Gestaltung logistischer Systeme. In: H. Corsten und S. Roth (Hg.): Nachhaltigkeit. Unternehmerisches Handeln in globaler Verantwortung. Berlin: Springer, S. 133–152.

Specht, D.; Braunisch, D. (2008): Sekundärrohstofflogistik. Konzepte und Anwendungen. In: *ZWF* 103 (12), S. 875–880.

Srivastava, Samir K. (2007): Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review (9). In: *Int J Management Reviews* (1), S. 53–80. Online verfügbar unter <http://iic.wiki.fgv.br/file/view/Green%20supply-chain%20management.A%20state-of-the-art%20literaturereview.2007.Srivastava.pdf>, zuletzt geprüft am 04.04.2013.

Stahlecker, T.; Lay, G.; Zanker, C. (2011): Elektromobilität: Zulieferer für den Strukturwandel gerüstet? Online verfügbar unter http://www.stuttgart.ihk24.de/linkableblob/1392898/data/Elektromobilitaet_Zulieferer_F&Er_den_Strukturwandel_geruestet-data.pdf.

Statista: Güterumschlag in ausgewählten Küstenhäfen in China im Jahr 2011 (in Millionen Tonnen). Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/220026/umfrage/geh>

andeltes-frachtvolumen-in-den-hauptkuestenhaefen-in-china/, zuletzt geprüft am 25.04.2014.

Statista (2013): Entwicklung des weltweiten Handelsvolumens im Warenhandel von 1950 bis 2012. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/37143/umfrage/weltweites-exportvolumen-im-handel-seit-1950/>.

Statista (2014a): Güterumschlag in der deutschen Seeschifffahrt nach Hauptverkehrsbeziehungen in den Jahren 2012 und 2013 (in Millionen Tonnen). Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/165587/umfrage/gueterumschlag-in-der-seeschifffahrt-nach-hauptverkehrsbeziehungen/>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.

Statista (2014b): Umschlagvolumen der 20 größten Containerhäfen der Welt im Jahr 2013 (in Millionen TEU). Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/29697/umfrage/umschlagvolumen-der-groessten-containerhaefen-der-welt/>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.

Sterk, W.; Bunse, M. (2005): Sinnvoller Klimaschutz oder Ablasshandel? In: *Ökologisches Wirtschaften* (2), S. 9–11.

Stiegeler, J. (2007): Entwicklung des Güterverkehrs. Analysen und Handlungsalternativen unter ökologischen Aspekten.

Thomas, Joachim (2012): Umweltökonomische Analyse des Güterverkehrs 1995 bis 2010. In: *Wirtschaft und Statistik* Juni 2012 (978-3-8246-0975-8), S. 503–515.

Tietz, Bruno (1993): Der Handelsbetrieb Grundlagen der Unternehmenspolitik. 2., neubearbeitete Aufl. München: Franz Vahlen.

Trost, D. G. (1999): Vernetzung im Güterverkehr.

Ulreich, S. (2010): CO₂-Emissionshandel in der Europäischen Union. In: R. Eller (Hg.): Management von Rohstoffrisiken - Strategien, Märkte und Produkte. Wiesbaden: Gabler, S. 283–295.

VDA (2008): Das Nutzfahrzeug - umweltfreundlich und effizient. Hg. v. VDA. Frankfurt. Online verfügbar unter www.vda.de/de/downloads/492/.

Verband der Chemischen Industrie (2010): VCI-Leitfaden zur Ermittlung der CO₂-Emissionen in der Logistik der chemischen Industrie. Frankfurt, 06.07.2010. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/Downloads/127664-LFErmittlCO2EmissionenLog06072010.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2014.

Verband der Elektrotechnik (2010): Elektrofahrzeuge. Bedeutung, Stand der Technik und Handlungsbedarfe.

Verkehrsrundschau (2014): 5. Fachkonferenz „CO₂-Messung in der Logistik. Online verfügbar unter <http://www.verkehrsrundschau.de/5-fachkonferenz-co2-messung-in-der-logistik-1311522.html>, zuletzt geprüft am 28.04.2014.

Volkswagen (2011): 1-Liter-Auto.

Volvo Trucks (2011): Jeder Tropfen zählt - alles zum Thema Kraftstoffsparen. Online verfügbar unter <http://www.volvotrucks.com/trucks/germany->

mar-

ket/dede/Documents/News%20and%20media/publications/08_2011_Truck%20News%20Sonderausgabe.pdf.

VW AG; Deutsche Post DHL; Hochschule für Bildende Künste Braunschweig (2011): Erprobung nutzfahrzeugspezifischer E-Mobilität. EmiL. Wolfsburg. Online verfügbar unter <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/wirtschaftsverkehrfeldversuche/abschlussberichte-wirtschaftsverkehr/abschlussbericht-emil.pdf>, zuletzt geprüft am 26.04.2014.

Wackernagel, M.; Rees, W. (1998): Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth: New Society Publishers. Online verfügbar unter http://books.google.de/books?id=N__ujKDfXq8C.

Wallentowitz., Henning; Freialdenhoven., Arndt; Olschewski., Ingo (2009): Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen. Mit 227 Abbildungen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. Online verfügbar unter <http://books.google.de/books?id=SiLy1GVAoeoC>.

Waltl, H.; Wildemann, Horst (2014): Modularisierung der Produktion in der Automobilindustrie. Der Modulare Produktionsbaukasten von Volkswagen. 1. Aufl. München: TCW.

Wäscher, G. (2008): Paletten- und Containerbeladung. In: Dieter Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmanns (Hg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl. Berlin: Springer, S. 167–180.

- Weber, J.; Stölzle, W.; Wallenburg, C. M.; Hofmann, E.** (2007): Einführung in das Management der Kontraktlogistik. In: W. Stölzle, J. Weber, E. Hofmann und C. M. Wallenburg (Hg.): Handbuch Kontraktlogistik: Management komplexer Logistikdienstleistungen. Weinheim: Wiley-VCH.
- Weidmann, U.; Stölzle, W.; Bopp, W.; Hofmann, E.** (2012): Nachhaltige Güterfeinverteilung - Ein systematischer Ansatz. In: *Internationales Verkehrswesen* 64, S. 28–34.
- Werner, H.** (2011): Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. Wiesbaden: Gabler.
- Wiedmann, Thomas; Minx, Jan** (2007): A Definition of 'Carbon Footprint'. In: Carolyn C. Pertsova (Hg.): Ecological economics research trends. New York: Nova Science Publishers, S. 1–11.
- Wiesinger, J.** (2007): Das Reifenalter ist ein wichtiges Thema. Online verfügbar unter <http://www.kfztech.de/kfztechnik/technikprofi/reifenalter.htm>.
- Wietschel, M.; Plätz, P.; Kühn, A.; Gnann, T.**: Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge.
- Wildemann, Horst** (1992): Entstörregelkreis in der Produktionsplanung und -steuerung. In: P. Mertens, H.-P. Wiendahl und Horst Wildemann (Hg.): PPS im Wandel. Kundenorientierung und Wirtschaftlichkeit durch innovative PPS-Lösungen. München: Gesellschaft für Management und Technologie-Verlags KG, S. 253–276.
- Wildemann, Horst** (1995a): Behältersysteme. Konzepte zur Optimierung des Behälterkreislaufs. 2. Aufl. München: TCW.

Wildemann, Horst (1995b): Entstörmanagement. Realisierung störungsrobuster Wertschöpfungsprozesse. 2. Aufl.: TCW.

Wildemann, Horst (2001a): Das Just-in-Time-Konzept. Produktion und Zulieferung auf Abruf. 5. Aufl. München: TCW.

Wildemann, Horst (2001b): Logistik - Koordination von Wertschöpfungsaktivitäten. In: *FAZ*, 03.09.2001.

Wildemann, Horst (2007): Entsorgungslogistik. In: Gottfried Hösel (Hg.): Müllhandbuch. Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen, Bd. 1580. 2. Aufl. Berlin: Schmidt, S. 1–16.

Wildemann, Horst (2010): Logistik Prozeßmanagement. [Organisation und Methoden]. 5. Aufl. München: TCW, Transfer-Centrum-Verl.

Wildemann, Horst (2012a): Elektromobilität. Anforderungen an Reifen, Fahrwerk, Antrieb und Marktpotenziale. München: TCW.

Wildemann, Horst (2012b): Green Mobility. Maßnahmen zur Verringerung von CO₂-Emissionen im Vergleich.

Wildemann, Horst (2012c): Nutzfahrzeugreifen. Ökologische und ökonomische Wirkungen von Reifenverordnungen in Europa und Südamerika. München.

Wildemann, Horst (Hg.) (2012d): Wachstum durch Ressourceneffizienz. Kunden, Mitarbeiter, Lieferanten ; Tagungsband Münchner Management Kolloquium, 20. und 21. März 2012. München: TCW, Transfer-Zentrum.

Wildemann, Horst (2013): Fleet-Tool. Potenzialrechner für öffentliche und private Flottenbetreiber. München.

Wildemann, Horst (2014a): Distributionslogistik. Leitfaden zur Erzeugung von exzellenten Logistikleistungen am Point of Sales. 18. Aufl. München: TCW Transfer-Centrum-Verl (37).

Wildemann, Horst (2014b): Entsorgungslogistik. Leitfaden zur Einführung und wirtschaftlichen Gestaltung von Entsorgungskreisläufen in Industrieunternehmen. 19. Aufl. München.

Wildemann, Horst (2014c): Event Management in der Supply Chain. Leitfaden zur Steuerung ereignisorientierter Wertschöpfungsketten. 8. Aufl.

Wildemann, Horst (2014d): Logistik- und Supply Chain-Architekturen. 8. Aufl. München: TCW.

Wildemann, Horst (2014e): Nachhaltigkeit in der Supply Chain. Leitfaden für nachhaltigkeitsorientiertes Wertschöpfungsmanagement. 4. Aufl. München: TCW (109).

Wildemann, Horst; Niemeyer, A. (2006): Das Milkrun-Konzept - Logistikkostensenkung durch auslastungsorientierte Konsolidierungsplanung.

Wildhagen, M.; Beermann, R.; Ebert, J. (2011): Innovation bei Lkw-Reifen: Super-Single statt Zwilling. Hg. v. VDI.

Wilkens, Stefan (2008): Effizientes Nachhaltigkeitsmanagement. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (56).

Wolpert, Stefan (2013): "City-Logistik". Bestandsaufnahme relevanter Projekte des nachhaltigen Wirtschaftsverkehrs in Zentraleuropa. Stuttgart: Fraunhofer-Verl.

WTO (2014): STATISTICS. Merchandise trade and commercial services. Online verfügbar unter

http://www.wto.org/english/res_e/statis_e/trade_data_e.htm,
zuletzt geprüft am 25.04.2014.

9 Stichwortverzeichnis

A

Absatzkanäle	88
Aerodynamik	218
Allokation	144, 151, 152, 158
Anreizsystem	246
Anthropogene Treibhausgas-Emissionen	115
Aufbereitungslogistik	91
Auslastungsgrad	149, 153

B

Behälterkreislaufsystem	237
Beladung	234
Bellyfracht	130, 131
Berechnung	70
Berechnungsmethode	131
Berechnungsmethodik	154
Berechnungsmodell	145
Beschaffungslogistik	79
Beschaffungsprogramm	80
Beschleunigungswiderstand	149
Binnenschiffahrtsgüterverkehr	106
Bündelung	258, 261

C

Carbon Footprinting	113
City-Logistik	97
CO ₂ -Äquivalent	115, 136
CO ₂ -Effizienz	105
CO ₂ -Emissionen	100, 104, 156

CO2-Emissionfaktor	153
CO2-Emissionstreiber	149
CO2-Footprint	113
CO2-Footprint-Berechnung	120
CO2-Footprint-Ermittlung	135, 144
CO2-Footprint-Optimierung	135
CO2-Footprint-Rechner	157
CO2-Rechner der Luftfahrtgesellschaften	130
CO2-Rechner der Seereeder	131
CO2-Reduzierung	116
Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment	248
Column-Building Approach	235
Container	234
Containerbeladung	234
Corporate Carbon Footprint	136, 137
D	
Datenbank	147, 155
DIN EN 16258	118, 140, 146
Direktbelieferung	258
Direkte Emissionen	114, 138
Distickstoffmonoxid	136
Distributionslogistik	86
E	
E-Antriebe	220
EcoTransIT	124
EDI	248
Eingangsparameter	156
Elektrische Antriebe	220
Elektronutfahrzeuge	223

Emissionen	146
Emissionsbereiche	114
Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs	129
Emissionsträger	100
Emissionszertifikat	15, 269
Empirische Basis	58
Energiefaktor	151
Energieverbrauch	144, 146, 156
Entsorgungslogistik	90
Entstörmanagement	251
Expertengespräche	62, 63
<i>F</i>	
Fahrertraining	245
Fahrstil	245
Fahrzeugeinsatzsystem	118, 142, 146, 153, 157
Fallstudien	58, 162
Fallstudienanalyse	59
Fleet-Tool	204
Fluorkohlenwasserstoffe	136
Forschungsfragen	72, 73
Forschungslücken	48
Forschungsziele	48
Frachtbörse	229
Frachtgewicht	147
Funktionsanalyse	121, 133
<i>G</i>	
Gebrochener Verkehr	274
GPS-Ortung	268
Greenhouse Gas Protocol	137

Greenhouse Gas Protokoll	138
Großkreisdistanz	142, 154
Güterfeinverteilung	95
Gütertransport	102
<i>H</i>	
Handelslogistik	93
Hauptlauf	275
Hybrid	12, 221
Hypothesen	52
<i>I</i>	
Indirekte Emissionen	138
Indirekte Emissionen	114
Informationssystem	263
Internetportale	229
Intralogistik	85
ISO 14040	139
ISO 14044	139
ISO 14064	137
ISO 14067	139
ISO 16064	138
IT-Tool	155
<i>J</i>	
Just-in-Sequence	260
Just-in-Time	259
<i>K</i>	
Kalkulationssoftware	123
Klimawandel	19
Kombinierter Verkehr	262, 274

Kompensation	269
Kraftstoff	157
Kraftstoffverbrauch	147
Kyoto-Protokoll	117, 136
Kyoto-System	270
<i>L</i>	
Lagerlogistik	82
Layer Approach	235
Leerfahrt	118, 149
Leerfahrten	229, 263
Lieferantennetzwerkstruktur	81
Life-Cycle-Assessment-Tool	119
Logistics Carbon Footprint	136, 140
Logistics Emission Calculator	127
Logistik	74
Logistik der „letzten Meile“	95
Logistikdienstleister	261
Logistikplattform	231
Logistikprozesse	78
Logistikqualität	251
Logistikstruktur	257
Logistische Einrichtungen	100
Luftfrachtverkehr	110
Luftwiderstand	149, 219
<i>M</i>	
Map&Guide	128
Materialflussgestaltung	81
Mehrwertleistungen	261
Methan	136

Micro-Hybrid	221
Mild-Hybrid	222
Milkrun	239
N	
Natürliche Treibhausgas-Emissionen	115
NTM Calc	126, 127
O	
Ökobilanz	139
P	
Palette	234
Parallel-Hybrid	222
Planungsvarianz	265
Plug-in-Hybrid	222
Problemstellungen in der Logistik	29
Product Carbon Footprint	138
Product Carbon Footprint	136
Produktionslogistik	83
Produktlebenszyklus	139
Prozesskette	69, 76
Prozessmodell	74
Publicly Available Specification	139
Q	
Qualitätsziele	250
Quick Response	248
R	
Range Extender	222
Redistributionslogistik	90

Registrierung	156
Reifendruck	200
RFID	267
Rollwiderstand	149
Rollwiderstandarme Reifen	197
Rückführungslogistik	91
Runderneuerte Reifen	202
S	
Schienengüterverkehr	107
Schwefelhexafluorid	136
Seeschiffahrtsgüterverkehr	105
Sekundärrohstoffe	92
Slow-Steaming	150
Software	119, 133
Sonderfahrten	247, 263
Steigungswiderstand	149
Straßengüterverkehr	108
Strömungswiderstand	149
T	
Tank-to-Wheel -Emissionen	146
Tank-to-Wheel-CO2-Emissionen	161
Tank-to-Wheel-Emissionen	141
Tank-to-Wheel-Energieverbrauch	161
Tonnenkilometer	126, 130, 152
Total Cost of Ownership	226
Transport Emission Model	117, 134
Transportdienstleistung	140, 142, 146
Transportleistung	102
Transportmittel	147, 157

Treibhausgas	136
Treibhausgaspotenzial	113
Trends in der Logistik	21, 68
<i>U</i>	
Umrechnungsfaktor	150
<i>V</i>	
Vendor Managed Inventory	249
Verderbliche Güter	94
Verdichtungseffekt	98
Verkehrsinformationssystem	268
Verkehrsträger	20
Verwertung	93
Vorgehensweise	48
<i>W</i>	
Wall-Building Approach	235
Wechselbrücke	268, 275
Well-to-Tank-Emissionen	141
Well-to-Wheel-CO ₂ -Emissionen	161
Well-to-Wheel-Emissionen	146
Well-to-Wheel-Energieverbrauch	161
Wiedereinsatzlogistik	91
Workshops	67
<i>Z</i>	
Zwischenbetriebliche Logistik	83

