



Diplomarbeit

Wirtschaftsinformatik

Modellierungsansätze für „Green House Gas“ GHG-Emissionen in der strategischen Netzwerkplanung / -optimierung

vorgelegt von

Harry Kran

Matr.-Nr. 6287754

hkran@echo-upb.de

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom Wirtschaftsinformatiker

vorgelegt bei

Jun.-Prof. Dr. Achim Koberstein

Prof. Dr. Leena Suhl

Dr. Martin Wilk

Universität Paderborn

Fakultät Wirtschaftswissenschaften

Fachgebiet Wirtschaftsinformatik

Decision Support & Operations Research Lab

Paderborn, 09. Mai 2009

Abstract – deutsch

Klimaveränderungen rufen weltweit Politiker, Wissenschaftler, Unternehmer, ja sogar den Einzelnen zum agieren auf. Das bedeutendste Treibhausgas ist der Kohlenstoffdioxid, welcher für eine globale Erderwärmung verantwortlich gemacht wird. Der Weltklimarat formuliert Protokolle zur Emissionsreduktion auf internationaler Ebene. Im Visier sind dabei zunächst Großverbraucher, für die über den Emissionshandel rigide Restriktionen gelten. Wie viel Kohlenstoffdioxid emittiert die gesamte Distribution inklusiv ihrer Läger? Die Bewertung der CO₂-Emission, sowohl für die Güterverteilung als auch deren Lagerung, ist Aufgabe dieser Arbeit gewesen. In einem vorangehenden Kapitel wird die Regressionsanalyse als zentrales Werkzeug für eine statistische Auswertung vorgestellt. Unter dem Blickwinkel einer strategischen Bewertung, werden für den Warentransport vier Modi unterschieden: Straße, Schiene, Wasser und Luft. Im Anschluss daran zeigen einfache Modelle, was essentielle Einflussgrößen in der Distribution im jeweiligen Modus sind. In der Lagerhaltung herrscht bisher ein großes Informationsdefizit über den Energiebedarf. Häufig gibt es keine separate Energieverbrauchserfassung für Läger und nicht selten weigern sich Unternehmen die Verbräuche zu kommunizieren. Dieser Sachverhalt erschwerte die Bildung von Modellansätzen massiv. Infolgedessen sind die beiden vorgestellten Ansätze rudimentärer Art. Der Unterschied ist auf eine detaillierte und aggregierte Sichtweise zurückzuführen.

Stichworte: Regression, CO₂, Modellansätze, Nachhaltigkeit der Distribution, Logistik, Energieverbrauch im Lager, IBM Warehouse Site Planer

Abstract – englisch

Climate change calls politicians, scientist, entrepreneurs and individuals alike for action all over the world. The crucial greenhouse gas is carbon dioxide, which is held responsible for global warming. The intergovernmental panel on climate change devises protocols regarding emission reductions on the international level. The prime focus is on large-scale consumers who encounter rigid restrictions. How much carbon dioxide does your overall distribution including respective warehouses emit? The focal point of this assignment is the assessment of CO₂ emissions for both the distribution and storage of goods. In a previous chapter, regression analysis is introduced as the central tool for a statistical evaluation. In the context of a strategic evaluation, the transportation of goods is divided into four modes: Roads, Rail, Water and Air. Subsequently, basic models explain the essential parameters of distribution for each mode. Currently there is a significant lack of information with regards to the energy requirements of warehousing. Separate records of warehouse energy consumption levels are commonly neglected whilst companies seem reluctant to publish relevant consumption data. This impedes the creation of related models. Accordingly, the two approaches here illustrated are of a rudimentary nature. The difference arises from a detailed and aggregated point of view.

Keywords: regression, CO₂, model approaches, sustainability in distribution, logistic, energy consumption in the warehouse, IBM Warehouse Site Planer

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Paderborn, 09. Mai 2009

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Weltpolitische Notwendigkeit zu reagieren	2
1.3 Logistikbranche als stark wachsender Emittent.....	3
1.4 Ziel dieser Arbeit	4
 2. ANSÄTZE DER MODELLIERUNG.....	 6
2.1 Funktionsbildung.....	6
2.1.1 Einfache Regressionsanalyse.....	7
2.1.2 Multiple Regressionsanalyse	12
2.1.3 Linearisierung einer Funktion	16
2.2 Verfügbare Modellansätze zur Berechnung der Emission.....	17
2.2.1 Tremod (Transport Emission Estimation Model)	18
2.2.2 COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road-Transport)	20
2.2.3 Diverse weitere Modelle zur Emissionserfassung	23
2.3 Verfügbare Daten zur Berechnung der Emission	24
2.3.1 UNFCCC und IPCC	24
2.3.2 GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme)	24
2.3.3 Diverse weitere Datenbestände zur Emission.....	25
2.4 Zusammenfassung	26
 3. CO₂-EMISSIONSMODELLIERUNG IM TRANSPORT	 27
3.1 Abgrenzung	27
3.2 Transportmodus	28
3.2.1 Straßentransport.....	28
3.2.1.1 Fahrzeugkategorie	29
3.2.1.2 Auslastungsgrad	29
3.2.1.3 Treibstoff	30
3.2.1.4 Straßentyp und Gradient.....	31
3.2.1.5 Jahreszeit	32
3.2.2 Schienentransport	32
3.2.2.1 Traktionstyp	34
3.2.2.2 Zuglänge und Gesamtgewicht	36
3.2.3 Lufttransport.....	38
3.2.3.1 Entfernung.....	39
3.2.3.2 Flugzeugtyp.....	40
3.2.4 Wassertransport	41

3.2.4.1	Schiffsmaße	42
3.2.4.2	Frachtschifftyp	44
3.3	Emissionsmodellierung	47
3.3.1	Einfachstes Transport-Emissionsmodell	47
3.3.2	Einfaches Emissionsmodell Straße	49
3.3.3	Einfaches Emissionsmodell Schiene	50
3.3.4	Einfaches Emissionsmodell Wasser	51
3.3.5	Einfaches Emissionsmodell Luft	52
4.	CO₂-EMISSIONSMODELLIERUNG IN DER LAGERHALTUNG	53
4.1	Einführung in die Lagerhaltung	53
4.1.1	Begriffsdefinitionen	53
4.1.2	Lagersysteme / Lagerarten	55
4.1.3	Lagermittel	58
4.1.3.1	Bodenlagerung	59
4.1.3.2	Statische Regallagerung	59
4.1.3.3	Dynamische Regallagerung	60
4.1.3.4	Fördermittel mit Pufferfunktion	61
4.1.3.5	Tiefkühlager	61
4.1.4	Lagerorganisation	62
4.1.5	Fördersysteme	63
4.1.5.1	Stetigförderer	65
4.1.5.2	Unstetigförderer	66
4.2	Komplexität der Energieverbrauchsbewertung im Lager	68
4.2.1	Energieeinsatz für den Lagerbau	69
4.2.2	Energieeinsatz für die Lagernutzung	70
4.3	Detaillierter Modellansatz	74
4.3.1	Lagerbau	75
4.3.2	Lagernutzung	76
4.3.2.1	Heizung / Kühlung / Lüftung	76
4.3.2.2	Intralogistik	78
4.3.2.3	Beleuchtung	81
4.4	Aggregierter Modellansatz	84
5.	WAREHOUSE SITE PLANNER DER IBM	88
5.1	Visualisierung	90
5.2	Optimierung	90
5.3	Simulation	91
6.	FAZIT UND AUSBLICK	92

7. LITERATURVERZEICHNIS.....	93
8. ANHANG	97
8.1 Emissionsfaktoren von TREMOD.....	97
8.2 Einflussfaktoren auf den Dieserverbrauch eines LKW	102
8.3 Heizkostenberechnung	103

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AB	Autobahn
AKL	Automatisches Kleinteile Lager
AO	Außerorts
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BRE	Building Research Establishment
BRT	Bruttoregistertonne
BSH	Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COPERT	Computer programme to calculate emissions from road-transport
CORINAIR	Coordinated Information on Air Emissions
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs
DEHST	Umweltbundesamt Deutsche Emissionshandelsstelle
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEA	European Environment Agency's
EIA	Energy Information Administration
EnEV	Energieeinsparverordnung
ETS	European Emission Trading System
EU	Europäische Union
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GL	Germanischer Lloyd
gross tkm	Brutto Tonnenkilometer
HBEFA	Handbook emission factors for road transport
HRL	Hochregallager

IATA	International Air Transport Association
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IFIB	Institut für industrielle Bauproduktion
IMO	International Maritime Organization
IO	Innerorts
IPCCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LHM	Lagerhilfsmittel
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
NRT	Nettoregistertonne
PROBAS	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
RAL	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.
RBG	Regalbediengerät
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
TDW	Tons Deadweight
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
tkm	Tonnenkilometer
TREMOD	Transport Emission Estimation Model
UIC	Union internationale des chemins de fer
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
VNL	Verein Netzwerk Logistik
WSP	Warehouse Site Planner

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Veränderung der globalen mittleren Jahrestemperatur (°C), bezogen auf 1980 – 1999.	1
Abbildung 1.2:	Änderungen von Temperatur, Meeresspiegel und nordhemisphärischer Schneebedeckung	2
Abbildung 1.3:	Historische und hochgerechnete CO ₂ -Emissionswerte im Transport	4
Abbildung 2.1:	Eigene Darstellung des Spritpreis-Beispiels mit Excel	10
Abbildung 2.2:	Die geschätzte Regressionsebene im 3- dimensionalem Raum	15
Abbildung 2.3:	Excel-Grafiken mit linearem, quadratischem und kubischem Polynom	17
Abbildung 2.4:	Anteile der Treibhausgase an den Emissionen in D. (berechnet in CO ₂ -Äquivalenten) 2007	17
Abbildung 2.5:	Eingabemaske des Online-Tools EcoTransIT	23
Abbildung 2.6:	Kategorien und deren Energieverbrauch relativ zu allen kommerziellen Gebäuden in den U.S.	25
Abbildung 3.1:	Primärenergieverbrauch und Emissionen aufgeteilt nach „Fahrzeug“ und „Bereitstellung“	28
Abbildung 3.2:	Energieverbrauch einiger typischer PKW in Abhängigkeit vom Straßentyp	31
Abbildung 3.3:	Saisonaler Einfluss des Kaltstarts (PKW, Deutschland 2000), indexiert, Jahresmittel 1,0	32
Abbildung 3.4:	Beispielrechnung für den Transport von 100t von Paderborn nach Stuttgart mit EcoTransIT	33
Abbildung 3.5:	Energieverbrauch in der gesamten Kette für Elektrizität und Brennstoff	34
Abbildung 3.6:	Elektrizitäts-Mix der Eisenbahn in ausgewählten Ländern	35
Abbildung 3.7:	Energieverbrauch elektrisch betriebener Züge	36
Abbildung 3.8:	Energieverbrauch Diesel betriebener Züge	37
Abbildung 3.9:	Entkoppelung von Transportleistung und Umweltbelastung der Lufthansa	39
Abbildung 3.10:	Treibstoffverbrauch eines A320 abhängig von der Entfernung	40
Abbildung 3.11:	Güterverkehrssystem für das Emissionsmodell	48
Abbildung 4.1:	Verknüpfung der Grundfunktionen von Lagersystemen über einen gerichteten Materialfluss	56
Abbildung 4.2:	Arten der Kommissioniersysteme	57

<i>Abbildung 4.3: Blocklagerung (links) und Zeilenlagerung (rechts).....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 4.4: Fördermittelklassifizierung in Abhängigkeit der Förderkontinuität und Fördergut</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 4.5: Einteilung der Stetigförderer nach konstruktiven und funktionalen Gesichtspunkten ...</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 4.6: Systematik der Unstetigförderer</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 4.7: Ausschnitt aus dem Energieausweis für Nichtwohngebäude</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 4.8: Energiekosten führender Logistik Dienstleister in der Supply Chain.....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 4.9: Hauptenergieverbraucher im Lager, kategorisiert.....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 4.10: Beispiele für Dach- und Fassadensysteme (Sandwichpaneele)</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 4.11: Energiekostenvergleich verschiedener Heizsysteme.....</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 4.12: Energieverbrauchswerte in kWh/m² von 6 Lägern</i>	<i>87</i>
<i>Abbildung 5.1: 3-stufiges Distributionsnetzwerk.....</i>	<i>89</i>
<i>Abbildung 5.2: (a) Wo sind Debitoren, (b) wie angebunden und (c) mit welchem Volumenfluss?</i>	<i>90</i>
<i>Abbildung 5.3: (a) Ist-Situation, (b) Optimum, (c) Soll-Situation</i>	<i>91</i>
<i>Abbildung 8.1: Einflussfaktoren für den Dieserverbrauch von LWK</i>	<i>102</i>
<i>Abbildung 8.2: Beispielrechnung für Heizkosten</i>	<i>103</i>

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Gegenüberstellung von einfacher und multipler Regression (vgl. [The2006]).....	7
Tabelle 2.2:	Spritpreis x_i und Tageskilometer y_i von 20 notierten durchschnittlichen Tagesdaten.	8
Tabelle 2.3:	Eigene Berechnung der Regressionsfunktionskoeffizienten a und b	11
Tabelle 2.4:	Zahlenbeispiel für multiple Regression.....	14
Tabelle 2.5:	Hilfssummen zur Anwendung der Normalgleichungen gem. (2.7).....	14
Tabelle 2.6:	Wertepaare zur Demonstration der Güte einer Funktion	17
Tabelle 2.7:	Details über die Eigenschaften des TREMOD-Modells.....	19
Tabelle 2.8:	Details über die Eigenschaften des COPERT-Modells.....	22
Tabelle 2.9:	Beispieldaten für Produkte aus der GEMIS-Datenbank	25
Tabelle 3.1:	CO ₂ -Emissionsfaktoren gemäß Fahrzeugkategorie bei mittlerer Auslastung.....	29
Tabelle 3.2:	Gegenüberstellung von Benzin / Diesel in Deutschland	31
Tabelle 3.3:	CO ₂ -Emissionsvergleich verschiedener Transportmodi für den Güterverkehr in D., 2006	33
Tabelle 3.4:	Energieeffizienz und Emissionsfaktoren der EU-Länder, 2005	36
Tabelle 3.5:	Differenzierte Emissionsfaktoren der Elektro-Traktionen für Deutschland 2005.....	37
Tabelle 3.6:	Ausgewählte Züge und deren Energieverbräuche und Emissionen	38
Tabelle 3.7:	Emissionsfaktoren für den Lufttransport	40
Tabelle 3.8:	Emissionsfaktoren für den Lufttransport der Lufthansa, 2008	41
Tabelle 3.9:	Ausgewählte Schiffe aus der GEMIS Datenbank und deren spezifische Verbräuche	44
Tabelle 3.10:	Ausgewählte Schiffe aus der PROBAS Datenbank des UBA und deren CO ₂ -Emission.	44
Tabelle 3.11:	CO ₂ -Emission in Abhängigkeit vom Treibstoff der Schiffe	45
Tabelle 3.12:	Energieverbrauch und CO ₂ -Emission (gemittelt) der Seeschiffe für 3 Kategorien.....	45
Tabelle 3.13:	CO ₂ -Emission für Binnenschiffe abhängig von der Schiffsgröße und der Flussrichtung	46
Tabelle 3.14:	CO ₂ -Emission für Binnenschiffe (Inlandsfahrten)	46
Tabelle 3.15:	Mittlere Emissionsfaktoren für den Frachttransport in Europa	48
Tabelle 4.1:	Lagerarten und deren Unterscheidungskriterium.....	58

<i>Tabelle 4.2:</i>	<i>Diverse Lagermittel der statischen Regalläger</i>	<i>60</i>
<i>Tabelle 4.3:</i>	<i>Wichtige Kenngrößen der Lagerorganisation</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 4.4:</i>	<i>Lagerbewirtschaftungsstrategien.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 4.5:</i>	<i>Beispiele für Stetigförderer und deren Motorleistung</i>	<i>66</i>
<i>Tabelle 4.6:</i>	<i>Antriebsleistung flurgebundener Unstetigförderer</i>	<i>68</i>
<i>Tabelle 4.7:</i>	<i>Energieverbrauchsvergleich basierend auf 200m Länge, 2m/s, 700mm Behälter mit Ø 3kg Ladung</i>	<i>73</i>
<i>Tabelle 4.8:</i>	<i>Emissionswerte wichtige Baustoffe für das Lager</i>	<i>76</i>
<i>Tabelle 4.9:</i>	<i>Systemvergleiche von Erdgas für das Beheizen von Hallen</i>	<i>77</i>
<i>Tabelle 4.10:</i>	<i>Energiekostenvergleich verschiedener Heizsysteme</i>	<i>78</i>
<i>Tabelle 4.11:</i>	<i>Leistungswerte einiger Fördersysteme in kW</i>	<i>80</i>
<i>Tabelle 4.12:</i>	<i>Beleuchtungsstärken in Abhängigkeit von der Lagereigenschaft</i>	<i>81</i>
<i>Tabelle 4.13:</i>	<i>Zwei Leuchtsysteme exemplarisch mit DiaLux gegenübergestellt</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 5.1:</i>	<i>Ergebnis eines Optimierungsprozesses</i>	<i>91</i>
<i>Tabelle 8.1:</i>	<i>Höchst mögliche Differenzierung von TREMOD im Straßenverkehr</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 8.2:</i>	<i>Höchst mögliche Differenzierung von TREMOD im Schienenverkehr</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 8.3:</i>	<i>Höchst mögliche Differenzierung von TREMOD im Flugverkehr</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 8.4:</i>	<i>Höchst mögliche Differenzierung von TREMOD im Binnenschiffverkehr</i>	<i>101</i>

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Klimawandel ruft bei vielen die Notwendigkeit einer unmittelbaren Reaktion aus. Die bereits jetzt in enormem Ausmaße sichtbaren Folgen rütteln an unserem Verantwortungsbewusstsein. Während viele Wissenschaftler hier einen Wettlauf mit der Zeit sehen, beunruhigt diese prekäre Entwicklung eine große Front überhaupt nicht. Hier hat u. a. der 45. Vizepräsident der Vereinigten Staaten Al Gore mit seinem Film „An Inconvenient Truth“ die Tragweite unseres fahrlässigen Verhaltens aufgezeigt.

Der Weltklimarat (IPCC¹) berichtet in seinem letzten Sachstandsbericht 2007 (vgl. [IPCC2007a], S. 5) über eine CO₂-Emissionserhöhung um ca. 80% für die Zeit von 1970 bis 2004. Der damit einhergehende Treibhauseffekt steht in direkter Korrelation zur globalen Klimaerwärmung. Der weltweit durchschnittliche Temperaturanstieg von 1900 bis 2000 beträgt 0,74°C. Schätzungen zufolge wird sich die Erwärmung der Erdoberfläche bis zum Jahre 2100 um mindestens weitere 1,8°C erhöhen. Sollte sich nun diese Prognose bewahrheiten, droht laut dem Bericht des IPCC ein immenses Artensterben, ein durch die Eisschmelze erhöhter Meeresspiegel, eine verstärkte Ausbreitung und Übertragung von Krankheiten usw.

Die folgende Abbildung illustriert die projizierten globalen Auswirkungen von Klimaänderungen in Verbindung mit dem Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur unterschiedlichen Ausmaßes im 21. Jahrhundert.

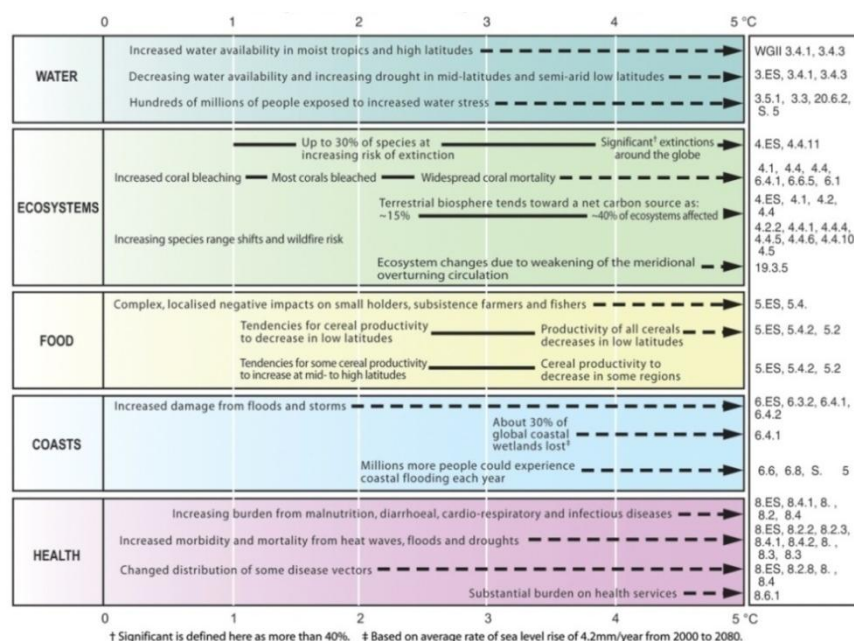


Abbildung 1.1: Veränderung der globalen mittleren Jahrestemperatur (°C), bezogen auf 1980 – 1999

Quelle: IPCC AR4, WGII, SPM, S. 16

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change – Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen

Besorgnis erregend ist das Wachstum der Erderwärmung besonders in den letzten Jahren. Im Folgenden ist in (a) die mittlere globale Änderung der Erdoberflächentemperatur, in (b) der mittlere Meeresspiegelanstieg aus Pegelmessung und Satellitendaten und in (c) die nordhemisphärische Schneebedeckung im März und April sichtbar. Die vorliegenden Änderungen beziehen sich auf das Mittel des Zeitraums 1961 – 1990 (vgl. [IPCC2007a], S6).

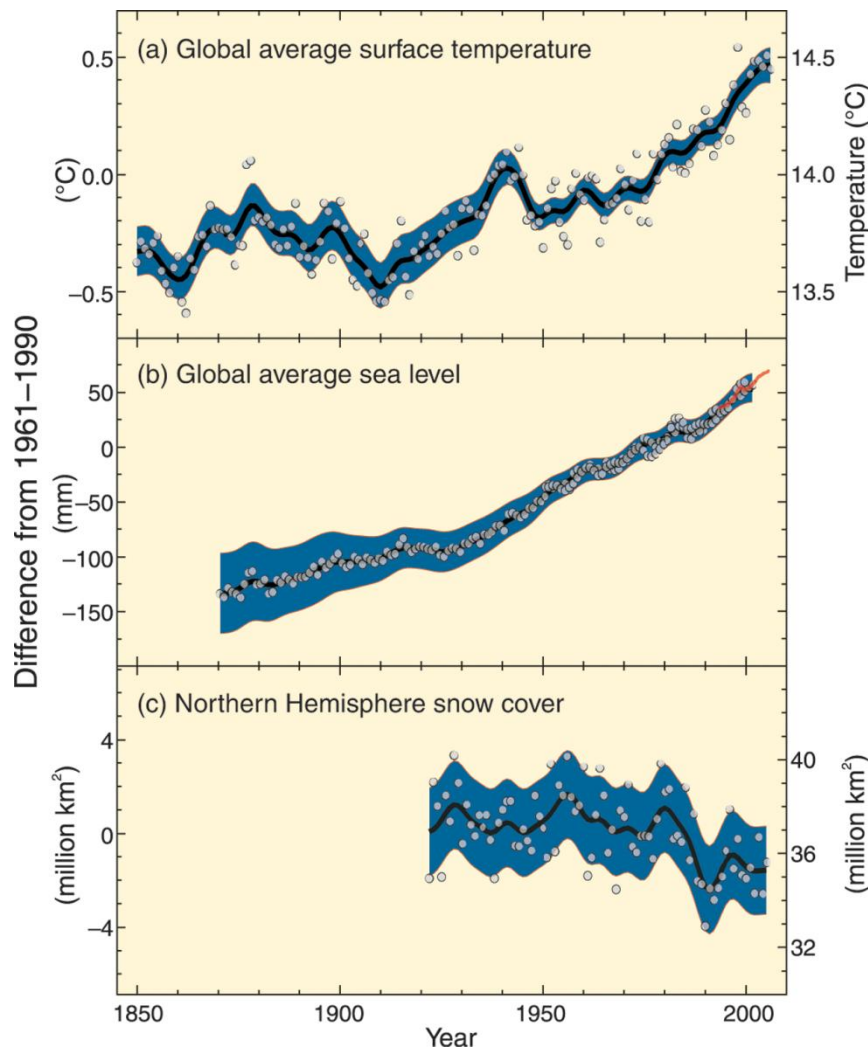


Abbildung 1.2: Änderungen von Temperatur, Meeresspiegel und nordhemisphärischer Schneebedeckung

Quelle: IPCC AR4, WGI

1.2 Weltpolitische Notwendigkeit zu reagieren

Am 11. Dezember 1997 ist erstmals ein internationales Protokoll beschlossen worden mit dem Ziel, die Treibhausgase in den Industrieländern verbindlich zu beschränken. Das sogenannte Kyoto-Protokoll weist zwei Bedingungen auf. Es sollte von mindestens 55 Staaten ratifiziert² werden und deren Kohlenstoffdioxid-Emission muss zusammengekommen mehr als 55% des Jahres 1990 ausmachen. Nachdem das Russische Parlament dieses Protokoll ebenfalls ratifiziert

² Quelle: http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php (09.05.2009)

te, konnte es am 16. Februar 2005 erstmals in Kraft treten. Damit begann die erste von drei Phasen. Am 01. Januar desselben Jahres bildete sich der EU-Emissionsrechtehandel³ (ETS), welcher als Politikinstrument fungiert, um die im Kyoto-Protokoll vorgegebenen Ziele in der Europäischen Union zu realisieren.

Die Umsetzung der Zertifikataufteilung wird in dem Nationalen Allokationsplan (NAP) geregelt. Emittenten müssen am Ende einer Periode eine Emissionsberechtigung für die CO₂-Emission in Form von Zertifikaten vorweisen. Wird mehr emittiert als die zu Beginn vorgegebene Höchstmenge, können auf dem Markt zusätzliche Zertifikate von Emittenten erworben werden, die ihr Potenzial nicht ausgeschöpft haben.

Die Zuteilungsmenge [DEHST] betrug für Deutschland in der Phase I (2005 – 2007) 499 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr. In Phase II (2008 – 2012) ist die Zuteilungsmenge auf 456,1 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr reduziert worden. In beiden Fällen war es eine 100%-Gratis Zuteilung⁴.

1.3 Logistikbranche als stark wachsender Emittent

Obwohl auf breiter Front eine umweltfreundliche Technologie zum Einsatz kommt, wächst der Emissionsanteil der Logistik immens. Hauptgrund dafür ist der stark wachsende Gütertransport. Die Arbeitsgruppe III des vierten Sachstandsberichtes vom Weltklimarat nennt in Kapitel 5 „Transport und Infrastruktur“ folgende Ergebnisse (vgl. [IPCC2007c], S. 325):

In den letzten Jahrzehnten ist die Treibhausgasmenge in keinem energienutzenden Sektor stärker gestiegen als im Transport und hier ist diese sogar im Gütertransport deutlich stärker gewachsen als in der Personenbeförderung. Weltweit wird der Gütertransport in der Stadt vorwiegend mit einem LKW abgewickelt, wobei der internationale Transport hauptsächlich verschifft wird. Dabei hängt der Gütertransport zwischen den Städten stark von der Region ab. Während in den Vereinigten Staaten alle Fahrzeugtypen in gleichem Maße vertreten sind, hat in Europa der LKW-Transport einen höheren Marktanteil (in t/km) als die Bahn. Die weltweite Treibhausgas-Emission im Transport liegt derzeit bei ca. 13%.

Die CO₂-Emission im Transport hat sich in den OECD-Ländern in den letzten 30 Jahren ungefähr verdoppelt und wird sich Schätzungen zufolge in den kommenden 50 Jahren nochmal verdoppeln.

³ European Emission Trading System, ETS

⁴ Quelle: Umweltbundesamt Deutsche Emissionshandelsstelle (<http://www.dehst.de/> - 09.05.2009)

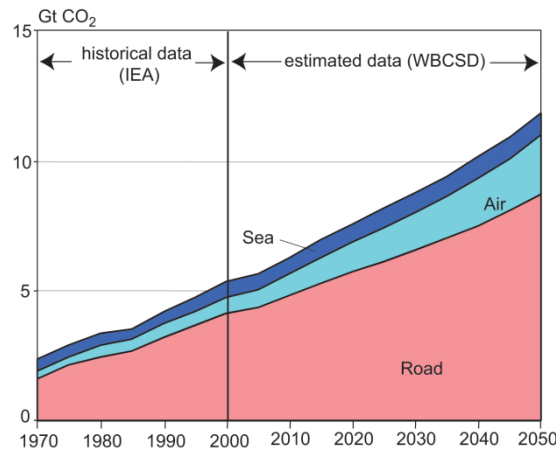


Abbildung 1.3: Historische und hochgerechnete CO₂-Emissionswerte im Transport

Quelle: IEA, 2005; WBCSD, 2004b

Interessant ist, dass der Energieverbrauch in Lagerhäusern flächenmäßig (kWh/m²) geringer ist als in den meisten gewerblichen Gebäudetypen. So beträgt der Energieverbrauch in der Lagerhaltung [EIA1999] in den Vereinigten Staaten nur 8% des Gesamtverbrauchs aller kommerziellen Gebäude⁵. Entsprechende Daten liegen für Deutschland laut Umweltbundesamt nicht vor.

Der Geschäftsführer Matthias Kramm von Vanderlande Industries GmbH stellte auf der LOGISTIK INSIDE-Konferenz „Energieeffizienz im Lager“ am 18. Oktober 2008 in Köln heraus, dass der Energiepass für Distributionszentren kommen wird, weil er vom Markt gefordert wird. Das Ergebnis dieser Konferenz, auf der rund 50 Vertreter aus Industrie, Handel und Logistikdienstleistung mit namhaften Beratern, Wissenschaftlern und Intralogistikproduktanbietern über praktische Maßnahmen zur Reduzierung des Energieeinsatzes in Logistikzentren diskutierten, war, dass Energieeffizienz im Lager bares Geld sparen kann und zum Klimaschutz beiträgt⁶.

1.4 Ziel dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, sowohl in der Distribution als auch in der Lagerhaltung Modellansätze zu formulieren, um in der strategischen Netzwerkplanung den CO₂-Emissionsanteil kostenmäßig realistisch zu ermitteln. Dabei soll mithilfe der Ökonometrie die Kausalität relevanter Einflussfaktoren in Bezug auf die Emission hin untersucht werden. Die Regressionsanalyse fungiert dabei als zentrales Hilfsmittel. Kapitel 2 gibt hier einen ersten Einblick in die theoretischen Zusammenhänge.

Da eine CO₂-Emissionsminderung unmittelbar an eine Gesamtkostenminimierung gekoppelt ist [Wilk2008], sind entsprechende Modelle nicht zuletzt wegen der politischen Notwendigkeit äußerst vorteilhaft. Eine spannende Frage ist die nach dem CO₂-Anteil für einen beliebigen

⁵ Quelle: <http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/pba99/warehouse/warehouse.html> (09.05.2009)

⁶ <http://www.logistik-inside.de/informationsgalerie-energieeffizienz-im-lager-790683.html> (09.05.2009)

Transport von A nach B in einem Netzwerk mit konkurrierenden Zielen. Dieser Fragestellung wird in Kapitel 3 nachgegangen.

Obwohl der CO₂-Anteil in der Distribution höchst interessant ist, wird sich diese Arbeit schwerpunktmäßig mit Modellansätzen für den CO₂-Anteil in der Lagerhaltung beschäftigen. Einerseits liegen darüber bisher keine nennenswerten Publikationen, Untersuchungen und aggregierte Zahlen vor und auf der anderen Seite stellt sich die Frage nach dem Einsparpotenzial bei einer effizienten Lagerhaltung.

Anmerkung:

Wenn im Folgenden von **Distribution** gesprochen wird, dann ist damit der gesamte Gütertransport zwischen Wirtschaftssubjekten gemeint. Dazu zählen sowohl private Haushalte, Betriebe als auch ihre Läger. Zu der **Lagerhaltung** zählt neben der Intralogistik auch die Ein- und Auslagerung, die Instandhaltung und das Lagermanagement.

2. Ansätze der Modellierung

Das vorliegende Kapitel befasst sich im ersten Teil explizit mit der theoretischen Möglichkeit einer Funktionsanalyse / -bildung. Dabei bleibt der unmittelbare Logistikkontext zunächst außen vor. Die Idee besteht darin, ökonometrische Modelle zu erstellen, die eine Aussage über gegebene Beziehungszusammenhänge ermöglichen. Dies ist insofern unentbehrlich, als das damit die Basis für Modelle in der Distribution und der Lagerhaltung gelegt werden soll.

Die zweite Hälfte widmet sich dem verfügbaren Datenbestand zur Modellverifikation. Dabei werden Fragen tangiert, die sich mit Institutionen auseinandersetzen, deren Datenbanken standardisierte Emissions-Parameter für Prozesse, Produkte usw. liefern. Ebenfalls interessant sind in diesem Kontext Studien, Publikationen und Projekte von Forschungseinrichtungen und wissenschaftlichen Gremien und nicht zuletzt Handlungsinitiativen der Industrie.

2.1 Funktionsbildung

Eine relativ einfache Möglichkeit aus vorhandenen Daten eine Funktion zu generieren, sofern ein linearer Zusammenhang mindestens zweier Größen vorliegt, bietet die Regressionsanalyse. Im Falle einer Nicht-Linearität besteht gegebenenfalls die Option, Funktionen zu linearisieren, d.h. in eine lineare Funktion zu überführen. Die Komplexität einer Nicht-Linearität lässt häufig nur eine Näherungslösung zu. Liegen jedoch wenige exakte diskrete Werte (z. B. Messwerte) vor, bietet sich die Interpolation an, eine kontinuierliche Funktion zu finden. Eine Interpolation stellt im gewissen Sinne eine Approximation dar, indem sie an gegebenen Stellen exakte Werte liefert, für die Stellen zwischen den Punkten jedoch eine relativ gute Annäherung.

Für folgende nicht-lineare Funktionen kann mit Hilfe der Linearisierung unter Umständen eine erhebliche Vereinfachung erreicht werden:

- **Polynomfunktion**

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x^1 + a_0 \quad n \geq 0, i \in \mathbb{N}$$

- **Exponentialfunktion**

allgemeine Form: $P(x) = a^x \quad a \in \mathbb{R}^+$

natürliche Form: $P(x) = e^x \quad e \approx 2,718$

- **Potenzfunktion**

$$P(x) = ax^n \quad a, n \in \mathbb{R}$$

- **Logarithmusfunktion**

$$P(x) = \ln x \quad x \in \mathbb{R}^+ \quad \text{Umkehrfunktion der natürlichen Exponentialfunktion}$$

Eine Approximation erfolgt jedoch immer auf Kosten der statistischen Modellgenauigkeit. Es kommt unter Umständen vor, dass dadurch statistische Modelle Fehlertherme größeren Umfangs aufweisen und infolge dessen unbrauchbar werden.

Liegt eine Sättigungsfunktion, Sigmoide Funktion, Weibull Funktion oder eine Kreisfunktion vor, so ist eine Linearisierung nicht möglich.

Einfache Regression	Multiple Regression
Eine Gerade wird in einem 2-dimensionalen Raum an eine Punktwolke angepasst. Die Gerade soll die Punkte möglichst gut widerspiegeln.	Eine k-dimensionale Fläche wird an eine Punktwolke im (k+1)-dimensionalen Raum angepasst.
Ziel: Minimierung der Summe der quadrierten Abweichungen (Residuen, Schätzfehler) der einzelnen Punkte zur Gerade.	Ziel: Minimierung der Abstände der Punkte zur Fläche. Die Fläche soll die Punkte möglichst gut abbilden.
$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min$	
Regressionsfunktion: $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$	Regressionsfunktion: $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung von einfacher und multipler Regression (vgl. [The2006])

2.1.1 Einfache Regressionsanalyse

Das Modell, das der einfachen Regressionsanalyse zugrunde liegt, besteht vorwiegend aus drei Komponenten:

- Interessierende Variable Y, auch abhängige oder endogene Variable genannt
- Erklärende Variable X, auch unabhängige oder exogene Variable genannt
- Annahme, dass zwischen den beiden Merkmalen ein funktionaler Zusammenhang der Form $y = f(x)$ besteht

Dabei geht die Regressionsanalyse einigen Fragestellungen nach, wie dem Erkennen und dem Nachweis eines Merkmalzusammenhangs (Beispiel: *Die Vermutung, dass zwischen der Motorleistung eines Autos und dem Treibstoffverbrauch ein Zusammenhang besteht, liegt nahe. Mit Hilfe der Regression kann diese Vermutung nachgewiesen und mit Zahlen belegt werden*). Sie geht aber auch explizit Fragen nach, die sich mit der Art und Größe des Zusammenhang (s. Regressionskoeffizient, S. 11) auseinandersetzen. Abschließend lassen sich Prognosen über fehlende oder zukünftige Werte ermitteln.

Anhand eines selbst konstruierten Beispiels soll nun die einfache Regressionsanalyse kurz vorgestellt werden. Die Schätzung der Parameter erfolgt dabei über die Kleinste-Quadrate-Methode.

Beispiel:

Mein Interesse besteht darin, festzustellen, welche Auswirkungen der Preis je Liter Benzin x_i (in €/l) auf die durchschnittlich gefahrenen Tageskilometer y_i (in km/d) hat. Da mein Fahrverhalten und der Transportbedarf annähernd konstant sind, frage ich mich, ob die zurückgelegten Entfernungen vom Spritpreis abhängig sind. Dazu habe ich $n = 20$ Beobachtungsdaten entnommen und diese in Tabelle 2.2 gegenüber gestellt.

i	x_i	y_i	i	x_i	y_i
1	1,00	45	11	1,46	38
2	1,20	42	12	1,49	33
3	0,97	44	13	1,32	42
4	1,05	46	14	1,01	46
5	1,09	50	15	1,20	41
6	1,28	34	16	1,47	31
7	1,56	35	17	1,34	40
8	1,00	44	18	1,02	49
9	1,22	46	19	0,99	53
10	0,95	53	20	1,39	41

Tabelle 2.2: Spritpreis x_i und Tageskilometer y_i von 20 notierten durchschnittlichen Tagesdaten

Ausgangslage ist die Vermutung, dass zwischen dem Spritpreis x_i und den Tageskilometern y_i ein linearer Zusammenhang besteht und zwar in der Form $y = \alpha + \beta x$. Hinzu kommt nun eine Störgröße ε , bei der es sich um nicht erfassbare Einflüsse, wie z. B. menschliches Verhalten o. ä. handelt. Beispielsweise nutze ich für eine gewisse Fahrt, abhängig vom Wetter, nicht mehr das Fahrrad, sondern das Auto. Wäre dieses Verhalten messbar, so ließe sich diese Größe ebenfalls als exogene Variable aufnehmen. Damit sieht die Funktion wie folgt aus:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

Die beiden Parameter α und β sind unbekannt. Diese werden durch a und b geschätzt. Das Residuum e_i einer Stichprobe gibt die Differenz zwischen $a + bx_i$ und y_i an. Ferner bezeichnet man $\hat{y}$ als den Schätzwert für y_i . Daher gilt:

$$\hat{y} = a + bx_i \text{ mit dem Residuum } e_i = y_i - \hat{y}_i$$

Eine bewährte Methode zur Ermittlung einer „guten“ Geraden ist die bereits erwähnte Methode der kleinsten Quadrate. Diese minimiert die Summe der quadrierten Abweichungen (hier: e_i) der gegebenen Punkte zur Funktion. Vorteile dieser Methode sind nach [HudNeu]:

- Eine Gerade ist eindeutig berechenbar: Es gibt genau eine Gerade, die dieses Kriterium erfüllt.
- Es kommt nicht darauf an, dass die Gerade genau durch einige Punkte geht, sondern möglichst nah an allen Punkten liegt.
- Die positiven und negativen Abstände werden quadriert und können so einander nicht mehr aufheben.
- Für die konkrete Berechnung der Parameter der Gerade wird die quadratische Funktion gegenüber der Bedarfsfunktion bevorzugt.

Laut [Auer2007] müssen noch folgende Annahmen getroffen werden:

- In Gleichung (2.1) fehlen keine relevanten exogenen Variablen und die benutzte exogene Variable x_i ist nicht irrelevant.
- Der wahre Zusammenhang zwischen x_i und y_i ist linear.
- Die Parameter α und β sind für alle n Beobachtungen (x_i, y_i) konstant.
- Der Erwartungswert für die Störgröße muss gleich Null sein.

$$E(e_i) = 0 \text{ für } i = 1 \dots n$$

- Die Varianz des Fehlers ist für alle gleich (Homoskedastie).

$$Var(e_i) = \sigma^2 \text{ für } i = 1 \dots n$$

- Die Kovarianz zweier Störgrößen ist ebenfalls gleich Null.

$$Kov(e_i, e_j) = 0 \text{ für } i \neq j \text{ und } i = 1 \dots n \text{ und } j = 1 \dots n$$

- Die Störgröße ist ungefähr normalverteilt.

$$e_i \sim NV(E(e_i), Var(e_i)) \text{ für } i = 1 \dots n$$

- Die exogene Variable x_i ist keine Zufallsvariable, sondern kann wie in einem Experiment kontrolliert werden.

Das Ziel besteht also darin, die summierten Quadrate sowohl für den Achsenabschnitt a als auch für die Steigung b zu minimieren:

$$\text{Residual Sum of Squares: } RSS = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 = S(a, b)^2 \rightarrow \min!$$

Das bedeutet, dass die Quadratsumme sowohl für a als auch für b partiell abgeleitet und die Ableitung gleich Null gesetzt werden muss.

$$\frac{\partial S^2}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial S^2}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a - bx_i) = 0$$

Durch Ausklammern und Umformen ergibt sich:

$$\sum_{i=1}^n y_i = na + b \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (2.3)$$

Aus Gleichung (2.2) folgt:

$$\sum_{i=1}^n y_i = na + b \sum_{i=1}^n x_i \Rightarrow a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.4)$$

Gleichung (2.4) kann nun in (2.3) eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i y_i &= (\bar{y} - b\bar{x}) \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^n x_i y_i &= \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i - b\bar{x} \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i &= -b\bar{x} \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i &= b \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i \right) \\ \Rightarrow b &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i} \Rightarrow b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i} \Rightarrow b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2.5) \end{aligned}$$

Gleichung (2.4) gibt nun den Achsenabschnitt an und Gleichung (2.5) die Steigung der Geraden!

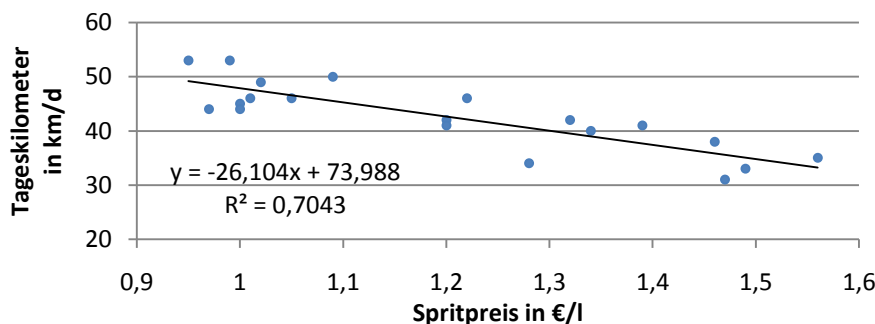


Abbildung 2.1: Eigene Darstellung des Spritpreis-Beispiels mit Excel

Nach dem Einsetzen gegebener Werte aus Tabelle 2.2 in Gleichung (2.4) und Gleichung (2.5) ergibt sich für:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{24,01}{20} = 1,2005 \text{ und für } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{853}{20} = 42,65$$

i	x_i	y_i	$x_i y_i$	$\hat{y}_i$
1	1,00	45	45,00	100,09
2	1,20	42	50,40	105,31
3	0,97	44	42,68	99,31
...			...	...
20	1,39	41	56,99	110,27
Σ	24,01	853	1003,83	2106,51

Tabelle 2.3: Eigene Berechnung der Regressionsfunktionskoeffizienten a und b

$$b = \frac{20 \cdot 1003,83 - 24,01 \cdot 853}{20 \cdot 29,6 - 24,01^2} \approx -26,104 \text{ und}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \approx 42,65 - (-26,104) \cdot 1,2005 \approx 73,988$$

$$\Rightarrow \hat{y}_i \approx 73,988 - 26,104 x_i$$

Als Fazit für das kleine Beispiel kann man festhalten, dass eine Spritpreiserhöhung von 1 €/l eine Tageskilometerreduktion von ca. 26 km/d zur Folge hätte.

Bestimmtheitsmaß

Zuletzt ist noch ein Maß für die Qualität des Modells interessant. Das Ergebnis ist ein Ausdruck der Güte des Modells. Es zeigt quantifiziert den Anteil der erklärten Variation an der gesamten Variation der endogenen Variable. Dabei sind die beiden Extreme denkbar:

- Alle Punkte liegen auf der Regressionsgerade und wir haben eine perfekte Anpassung oder
- die Regressionsgerade beschreibt die Punktwolke überhaupt nicht und das Modell erklärt gar nichts.

Es gilt daher stets (im linearen Fall):

$$\begin{array}{ccc} 0 & \leq R^2 & \leq 1 \\ \downarrow & & \downarrow \\ \text{Modell} & & \text{Modell} \\ \text{erklärt} & & \text{erklärt} \\ \text{nichts} & & \text{alles} \end{array}$$

Aufteilung des gemessenen Wertes y_i gemäß [Sch2001]:

$$\underbrace{y_i}_{\substack{\text{tatsächliche} \\ \text{Messung}}} = \underbrace{\hat{y}_i}_{\substack{\text{Modellwert} \\ a+bx_i}} + \underbrace{\hat{u}_i}_{\substack{\text{Residuum} \\ \text{(gemessener Fehler)}}} \quad (2.6)$$

Nun betrachten wir folgende Größen:

Total Sum of Squares: $TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \rightarrow \text{Variation von } Y$

Explained Sum of Squares: $ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \rightarrow \text{Variation der Regresswerte}$

Residual Sum of Squares: $RSS = \sum_{i=1}^n \hat{u}_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \text{Variation der Residuen}$

Es gilt gemäß Gleichung (2.6) der Zusammenhang:

$$\underbrace{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}_{TSS} = \underbrace{\sum_{i=1}^n \hat{u}_i^2}_{ESS} + \underbrace{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}_{RSS} \Rightarrow 1 = \frac{ESS}{TSS} + \frac{RSS}{TSS}$$

$$\Rightarrow R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \Rightarrow R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{221,34}{527,21} \approx 0,7043$$

Fazit: Es liegt ein gemäßigter Zusammenhang vor. Die Spritpreise haben keinen besonders starken Einfluss auf die zurückgelegten Tageskilometer.

2.1.2 Multiple Regressionsanalyse

Viel häufiger als die einfache Regression kommt die Mehrfachregression im Alltag zum Einsatz. Diese unterscheidet sich von der einfachen Regression nur darin, dass hier die endogene Variable y nicht nur von *einer* exogenen Variable abhängt, sondern von *mehreren*. Die meisten ökonomischen Modelle lassen sich nicht monokausal erklären, d. h. es gibt selten wirtschaftstheoretische Phänomene, die durch das Wirken einer einzigen Variable plausibel genug erklärt werden können. Daher ist der Ansatz der multikausalen Zusammenhänge oft der einzig richtig gangbare Weg.

Das Modell sieht nun wie folgt aus:

- y endogene Variable
- $x_1, \dots, x_k$ exogene Variablen
- $\beta_0, \dots, \beta_k$ Parameter
- ε als zufälliger Fehlerterm
- allg. Funktion: $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$

β_i gibt dabei die Veränderung des Erwartungswertes von y an, wenn sich x_i um eine Einheit erhöht und alle anderen Einflussgrößen konstant bleiben.

Es gelten die gleichen Annahmen wie vorhin, jedoch um eine weitere ergänzt:

- Keine Multikollinearitäten, d. h. es bestehen keine Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Einflussgrößen.

Eine ähnliche Zielfunktion ergibt sich für die multiple Regression:

$$\min_{b_0, \dots, b_k} \underbrace{\sum_{i=1}^n \left(y_i - \underbrace{b_0 - b_1 x_{1i} - \dots - b_k x_{ki}}_{\hat{y}_i} \right)^2}_{RSS}$$

Zu jedem Parameter wird eine partielle Ableitung gebildet und diese gleich Null gesetzt:

$$\frac{\partial RSS}{\partial b_0} = 0, \quad \frac{\partial RSS}{\partial b_1} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial RSS}{\partial b_k} = 0$$

Dabei entstehen $k+1$ Gleichungen mit ebenso vielen Unbekannten. Das Ergebnis dieses Gleichungssystems sind die Parameterwerte $b_0, \dots, b_k$.

Für die Schätzung des Modellwertes von $\hat{y}_i$ gilt nach wie vor:

$$\hat{y}_i = b_0 - b_1 x_{1i} - \dots - b_k x_{ki}$$

Und für das gemessene y_i gilt:

$$\underbrace{y_i}_{\text{Messung}} = \underbrace{\hat{y}_i}_{\text{Schätzung}} + \underbrace{\varepsilon_i}_{\text{Fehler}}$$

Formales Modell in Anlehnung an [Sch2001]:

Zur Koeffizientenbestimmung (Parameter) gelten folgende Normalgleichungen nach der partiellen Ableitung für die Regressfunktion $\hat{y}_i = b_0 - b_1 x_{1i} - \dots - b_k x_{ki}$:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i &= n b_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki} \\ \sum_{i=1}^n y_i x_{1i} &= b_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{1i} \\ &\dots \\ \sum_{i=1}^n y_i x_{ki} &= b_0 \sum_{i=1}^n x_{ki} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dieses Gleichungssystem in Matrizen- und Vektornotation aufgeschrieben:

$$y^T = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad b^T = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \cdots & x_{kn} \end{pmatrix}$$

$$X * X^T = \begin{pmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \cdots & \sum x_{ki} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \cdots & \sum x_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sum x_{ki} & \sum x_{ki}x_{1i} & \sum x_{ki}x_{2i} & \cdots & \sum x_{ki}^2 \end{pmatrix}, \quad Xy^T = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \vdots \\ \sum x_{ki}y_i \end{pmatrix}$$

Folgendes Gleichungssystem ergibt jetzt die notwendige Lösung:

$$XX^T b^T = Xy^T \text{ umgeformt ergibt } b^T = (XX^T)^{-1} * Xy^T$$

Einfaches Zahlenbeispiel

Aufgabe: Bestimme die Regressionsfunktion für $\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$.

Gegeben sind folgende Beobachtungswerte:

i	1	2	3	4	5	6	7	8
x_1	1	1	1	1	3	3	4	4
x_2	1	1	3	3	1	1	4	4
y	1	3	5	7	3	5	10	12

Tabelle 2.4: Zahlenbeispiel für multiple Regression

i	x_1	x_2	y	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	x_1y	x_2y
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	3	1	1	1	3	3
3	1	3	5	1	9	3	5	15
4	1	3	7	1	9	3	7	21
5	3	1	3	9	1	3	9	3
6	3	1	5	9	1	3	15	5
7	4	4	10	16	16	16	40	40
8	4	4	12	16	16	16	48	48
Σ	18	18	46	54	54	46	128	136

Tabelle 2.5: Hilfssummen zur Anwendung der Normalgleichungen gem. (2.7)

Gleichungssystem in Normalform:

$$8b_0 + 18b_1 + 18b_2 = 46$$

$$18b_0 + 54b_1 + 46b_2 = 128$$

$$18b_0 + 46b_1 + 54b_2 = 136$$

Gleichungssystem in Vektor- und Matrizennotation:

$$y^T = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 5 \\ 7 \\ 3 \\ 5 \\ 10 \\ 12 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 3 & 1 & 1 & 4 & 4 \end{pmatrix}, \quad XX^T = \begin{pmatrix} 8 & 18 & 18 \\ 18 & 54 & 46 \\ 18 & 46 & 54 \end{pmatrix}, \quad Xy^T = \begin{pmatrix} 46 \\ 128 \\ 136 \end{pmatrix}$$

$$b^T = (XX^T)^{-1} * Xy^T = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow \hat{y} = -1 + x_1 + 2x_2$$

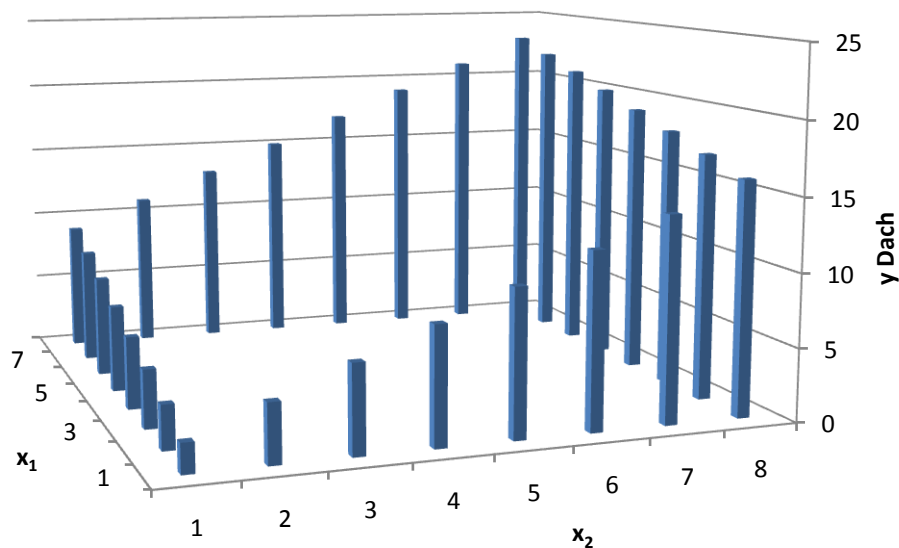


Abbildung 2.2: Die geschätzte Regressionsebene im 3- dimensionalem Raum

Hinweis: Die Werte in der Mitte sind übersichtshalber entfernt worden.

Die Ermittlung des Bestimmtheitsmaßes ist der der einfachen Regression identisch.

2.1.3 Linearisierung einer Funktion

Im Falle einer nicht-linearen Funktion kann man zunächst wie folgt unterscheiden (vgl. [Heu-Tou2008], S. 192f): Die Abhängigkeit von X und Y wird durch eine

- in X nicht-lineare Funktion, die jedoch in den Parameter linear ist oder (I)
- in X und in den Parametern nicht-linear ist (II)

beschrieben.

Beispiele	Typ
(1) $y = a \sin x + b \cos x$	(I)
(2) $y = a + bx + cx^2 + \dots$ (Polynom)	(I)
(3) $y = a + be^x + c/x$	(I)
(4) $y = ae^{bx}$	(II)

Man erkennt, dass Funktionen vom Typ (I) in den Parametern linear sind. Diese lassen sich deshalb in ein lineares (multiples) Regressionsmodell umformen. Demonstrativ sei dies am Polynom-Beispiel (2) dargestellt:

Umformung der exogenen Variablen: $x \rightarrow \tilde{x}_1$, $x^2 \rightarrow \tilde{x}_2$, $x^3 \rightarrow \tilde{x}_3 \dots$

Daraus folgt: $y = a_0 + a_1 \tilde{x}_1 + a_2 \tilde{x}_2 + \dots$

Zur Berechnung der linearisierten Funktion siehe [2.1.2]. Mit einem Polynom p -ter Ordnung in x lässt sich eine recht weite Klasse von nicht-linearen Funktionen approximieren. Ist der Funktionstyp unbekannt und liegen Beobachtungen der Funktion in Gestalt von Wertepaaren (x_i, y_i) $i = 1..n$ vor, so kann man den tatsächlichen Kurvenverlauf durch eine polynomiale Regression mit Hilfe der empirischen Methode der kleinsten Quadrate schätzen. Es wäre sinnvoll, den unbekannten Funktionsverlauf des Polynoms in einer möglichst niedrigen Ordnung zu wählen. Dazu beginnt man mit dem einfachen linearen Regressionsmodell $y = a + bx$. Eine Beurteilung der graphischen Punktwolke und der Funktion vermittelt einen Eindruck von der Güte dieser Funktion. Liegt eine erhebliche Abweichung vor, so wird die Funktion um eine Ordnung erhöht, also $y = a + bx + cx^2$ usw.

Zahlenbeispiel

y	x
2	4
4	8
3	6
2,5	5

4	9
2	2
2	12

Tabelle 2.6: Wertepaare zur Demonstration der Güte einer Funktion

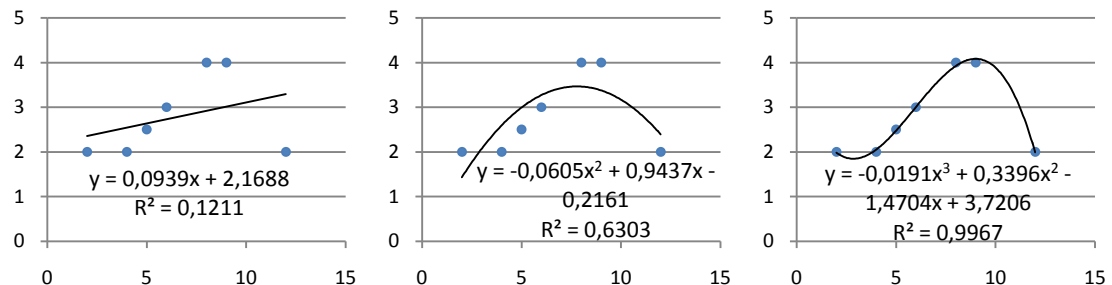
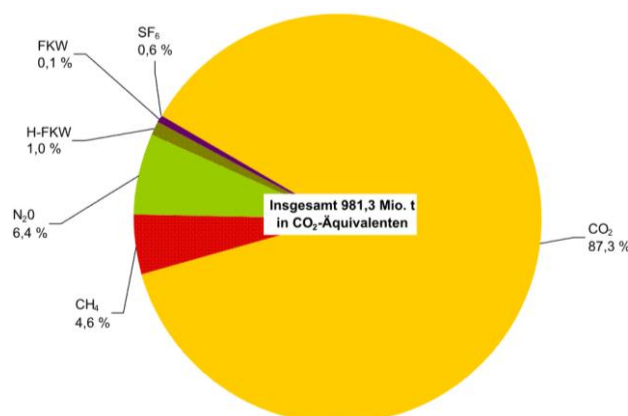


Abbildung 2.3: Excel-Grafiken mit linearem, quadratischem und kubischem Polynom

An diesem Beispiel sieht man leicht, dass es sich bei dieser Datenkonstellation um mindestens eine quadratische Funktion handelt. Das Bestimmtheitsmaß liegt im linearen Fall bei 0,1211 und erklärt somit das Modell fast gar nicht. Dagegen hat man im Falle der kubischen Funktion eine nahezu vollständige Modellerklärung mit der ermittelten Funktion.

2.2 Verfügbare Modellansätze zur Berechnung der Emission

Das Hauptaugenmerk bei der Emissionsberechnung wird von den meisten auf die im Kyoto-Protokoll genannten Treibhausgase gerichtet. Den größten Anteil macht dabei das Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus. Es folgen Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid (Lachgas, N_2O), teilhalogenierte und perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFCs) und Schwefelhexafluorid (SF_6).

Abbildung 2.4: Anteile der Treibhausgase an den Emissionen in D. (berechnet in CO_2 -Äquivalenten) 2007

Quelle: Umweltbundesamt, Presseinformation Nr. 16/2008 vom 10.03.2008

Die Erfassung der wichtigsten Klimagase Kohlenstoffdioxid und Methan wird seit dem 23. Januar 2009 weltweit primär vom japanischen Satelliten „Ibuki“⁷ vorgenommen. Das „Öko-Auge“ umrundet die Erde täglich 14-mal in einer Höhe von 666 Kilometern. An 56.000 Gaskonzentrationsmessungspunkten werden Daten erhoben. Zum Einsatz kommt ein Spektrometer, das 18.000 Farben im Infrarot der Wärmestrahlung unterscheiden kann. Dabei steigt die Infrarotabsorption, wenn die Dichte der Gase zunimmt. Im Idealfall entspricht die Messgenauigkeit vier Wassertropfen in einer 200-l-Badewanne.

Bisher erfolgt die Messung der beiden bedeutenden Gase laut der Weltraumbehörde JAXA⁸ an lediglich 282 Landstationen, vorwiegend in den USA, Europa und anderen industrialisierten Ländern.

Im Folgenden werden beispielhaft einige wichtige Modelle vorgestellt. Es sei hier schon darauf hingewiesen, dass für den Verkehrssektor die Modelle relativ gut ausgebaut sind, dagegen gibt es bisher keine nennenswerten Modelle für die energetische Bewertung von Gebäuden. Der Energieausweis eines Privathaushaltes gemäß DIN V 18599 ist mehr oder weniger der erste Ansatz für die Verbrauchserfassung in Deutschland. Berichte über Einsparpotenziale durch eine energieeffiziente Lagerführung tauchen in letzter Zeit vermehrt auf.

2.2.1 Tremod (Transport Emission Estimation Model)

Das wohl bedeutendste Transport-Emissionsmodell für den Verkehrsbereich in Deutschland ist Tremod. Entstanden ist das Modell aus einem Projekt des IFEU⁹ im Auftrag des Umweltbundesamtes. Die verwendeten Emissionsfaktoren sind mit dem „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA) abgestimmt. Dieses Handbuch ist gemeinsam vom Umweltbundesamt Berlin und dem Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) entwickelt worden. Eine weitere Datenbank ist „CITAIR“ – am Umweltbundesamt entwickelt –, deren Daten mit in die Basisdaten von Tremod eingehen. Tremod erfasst alle Verkehrstypen für den Personen- (PKW, motorisierte Zweiräder, Busse, Bahnen, Flugzeuge) und Güterverkehr (LKW, leichte Nutzfahrzeuge und Zugmaschinen, Bahnen, Schiffe, Flugzeuge). Die Basisdaten reichen von Fahr-, Verkehrsleistungen und Auslastungsgraden bis zu den spezifischen Energieverbräuchen und den Emissionsfaktoren. Eine Unterscheidung hinsichtlich der verschiedenen Straßentypen findet ebenfalls statt.

Tremod weist einen enormen Datenumfang (300MB) und eine hohe Komplexität auf. Aus diesem Grunde ist es nicht öffentlich zugänglich. Auf aggregierte Ergebnisse kann jedoch auf den Seiten des Umweltbundesamtes selektiv zugegriffen werden. Die hohe Belastung des motorisierten Straßenverkehrs auf Mensch und Umwelt führte zu einem hohen Differenzierungsniveau

⁷ http://www.jaxa.jp/projects/sat/gosat/index_e.html (09.05.2009)

⁸ Japan Aerospace Exploration Agency

⁹ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

bei der Bereitstellung der Basis- und Ergebnisdaten. Somit lassen sich je nach Anwendungsspektrum eine Vielzahl von Fragen beantworten, wie zum Beispiel (vgl. Seiten des [IFEU]):

- *Erfüllung der nationalen und internationalen Berichtspflichten der Bundesregierung im Bereich "Energie und Emissionen des Verkehrs".*
- *Vorbereitung von politischen Entscheidungen (z.B. Abgasgesetzgebung, Fördermaßnahmen); Überprüfung der Wirksamkeit von Maßnahmen in Szenarienbetrachtungen.*
- *Überprüfung von Minderungszielen, z.B. aufgrund von Verpflichtungen auf internationaler Ebene (NEC-Richtlinie, Kyoto-Protokoll).*
- *Datenbasis für Umweltkennzahlen des Verkehrs, z.B. für Ökobilanzen oder Umweltvergleiche. Konkret werden die TREMOD-Daten u.a. verwendet in Umberto, UmweltMobilCheck und EcoTransIT.*

Diese Software wird momentan vom Umweltbundesamt, von der Bundesanstalt für Straßenwesen und verschiedenen Bundesministerien, dem Verband der Automobilindustrie (seit 1996), dem Mineralölwirtschaftsverband (seit 1996), der Deutschen Bahn AG (seit 1997), der Deutschen Lufthansa (seit 2006) und der TUI (seit 2006) genutzt¹⁰.

Eigenschaften	Spezifizierung
Modelltyp	Modell zur Erstellung von Emissionsinventaren und -projektionen für mobile Quellen (anthropogene Emissionen von Luftschadstoffen) kurz- und langfristigen Projektionen
Sektorale Aggregation	Verschiedene Aggregationsebenen sind möglich, bis zur CORINAIRSNAP Ebene 3
Betrachtete Schadstoffe	NO _x , SO _x , VOC, Benzol, Toluol, Xylol, CH ₄ , CO, CO ₂ , Diesel Partikel, Staub, und Schwermetalle (Blei)
Betrachtete Emissionsquellen	Mobile Quellen (Straßen-, Schienen-, Wasser- und Luftverkehr)
Technologischer Detaillierungsgrad	Technologien, Brennstoffe, Kapazitäten, Alter, Fahrzeugladung
Zeitliche Auflösung	Jährlich, vierteljährlich und niedrigere Auflösung möglich
Räumliche Auflösung	National und niedrigere Auflösung möglich
Ausgabeformat	Windows Applikation: Microsoft Access (Version 97), Import/Export mit Excel
Verfügbarkeit	Handbuch [TREMOD], Modell verfügbar bei IFEU

Tabelle 2.7: Details über die Eigenschaften des TREMOD-Modells

Quelle: Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes siehe [UBA1999]

¹⁰ http://www.ifeu.org/index.php?bereich=ver&seite=projekt_tremod (09.05.2009)

2.2.2 COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road-Transport)

Die Microsoft Windows Software COPERT, von der Europäischen Umweltagentur (EEA¹¹) finanziert und für die CORINAIR¹²-Arbeitsgruppe der Europäischen Union „European Topic Centre on Air and Climate Change“ entwickelt, dient ebenfalls der Schadstoff-Emissionsberechnung im Straßenverkehr. Die Programmierung und Weiterentwicklung der Software erfolgt dabei durch das Fachgebiet für Angewandte Thermodynamik der Universität Thessaloniki in Griechenland. COPERT – mittlerweile in der vierten Version verfügbar – dient den Umweltministerien und statistischen Ämtern der europäischen Staaten als Hilfsmittel, um eine einheitliche emissionsrelevante Auswertung der Daten zu ermöglichen. Das zugrundeliegende Projekt CORINAIR verfolgt das Ziel, innerhalb der EU eine umfassende Harmonisierung und Standardisierung der erfassten Daten zu ermöglichen.

Die Berechnungsmethodik der Gesamtemission geht letztendlich auf die Addition einzelner Emissionsarten bzw. Straßentypen zurück (vgl. [EEA2007] S. 25ff):

$$E_{Total} = E_{Hot} + E_{Cold} + E_{Evap} \text{ bzw. } E_{Total} = E_{Urban} + E_{Rural} + E_{Highway}$$

Die verschiedenen Schadstoffe werden in vier Gruppen eingeteilt. Da die Emission wesentlich vom Fahrzeug abhängt, werden entsprechende Fahrzeugklassen, Fahrzeugkategorien und Fahrzeugschichten unterschieden. Abhängig von der verfügbaren Datenlage lässt sich mit COPERT eine sehr genaue Emissionsanalyse durchführen. Ein kurzer Einblick in das Modell zeigt die Präzision, mit der hier gearbeitet wird.

Für die Emissionsberechnung mit Warmstart gilt je nach Schadstoffgruppe:

$$E_{Hot} [g] = N * M [km] * e [g / km] \quad (\text{Gruppe 1})$$

$$E_{Hot} [g] = k * FC [kg] \text{ mit } FC [kg] = N [-] * M [km] * fc [g / km] \quad (\text{Gruppe 2})$$

$E_{Hot} [g]$: Emission in Gramm

N : Anzahl der Fahrzeuge

$M [km]$: Fahrstrecke pro Fahrzeug

$e [g / km]$: Emissionsfaktor

$FC [kg]$: Kraftstoffverbrauch

$fc [g / km]$: Kraftstoffverbrauchsfaktor

k : Reaktionsabhängiger Faktor

¹¹ European Environment Agency (EEA)

¹² Coordinated Information on Air Emissions (CORINAIR)

Für die Emissionsberechnung mit Kaltstart gilt je nach Schadstoffgruppe:

$$E_{Cold} = \beta * N * M * (e_{Hot} * (e_{Cold} / e_{Hot} - 1))$$

e_{Cold} : Tabelliertes Verhältnis der Emissionsfaktoren Cold / Hot

β : Streckenanteil mit kaltem Motor

N : Anzahl der Fahrzeuge

$M [km]$: Fahrstrecke pro Fahrzeug

Bei der β -Ermittlung handelt es sich um eine Schätzung, abhängig von der durchschnittlichen Fahrtenlänge, der durchschnittlichen Umgebungstemperatur und der Abgasnorm der jeweiligen Fahrzeugschicht. Die Normen ab Euro II verlangen für Katalysatoren ein schnelleres Erreichen der Betriebstemperatur. Dies wird entsprechend über einen Korrekturfaktor für β bei neueren Fahrzeugen berücksichtigt.

Emissionsberechnung der Verdampfung

Der Einfachheit halber werden von COPERT nur drei Hauptquellen unterschieden:

- Diurnal Emissions: Verdampfungsemissionen in g/Tag, die primär auf den Tag-und-Nacht unterschied zurückzuführen sind.
- Hot and Warm Soak Emissions: Diese entstehen nach dem Abschalten des Motors beim Abkühlen nach langen (heiß) oder kurzen (warm) Strecken in g/Fahrt.
- Running Losses: Verdampfungsverluste während der Fahrt; bei hohen Umgebungstemperaturen relevant

$$E_{Evap} = 365 * N * (e_d + S_c + S_{fi}) + R$$

mit

$$S_{fi} = q * e_{fi} * n_d$$

$$S_c = (1 - q) * (p * n_d * e_{s,hot} + w * n_d * e_{s,warm})$$

$$R = M * (p * e_{r,hot} + w * e_{r,warm})$$

N : Anzahl der Benzinfahrzeuge

e_d : täglicher Emissionsfaktor [g/Tag]

S_c : Hot-and-Warm-Soak-Anteil für Vergaser-Fahrzeuge [g/Fahrt]

S_{fi} : Hot and Warm Soak Anteil für Kraftstoffeinspritzung [g/Fahrt]

R :	Running Losses
q :	Anzahl der Fahrzeuge mit Einspritzung
n_d :	durchschnittliche Anzahl der Fahrten pro Tag
p :	Anteil längerer Fahrten
w :	Anteil der Kurzstrecken
$e_{s,hot}$:	Hot-Soak-Emissionsfaktor [g/Fahrt]
$e_{s,warm}$:	Warm-Soak-Emissionsfaktor [g/Fahrt]
$e_{r,hot}$:	Emissionsfaktor für Running Losses, heißer Motor [g/km]
$e_{r,warm}$:	Emissionsfaktor für Running Losses, warmer Motor [g/km]

Eigenschaften	Spezifizierung
Modelltyp	Modell zur Erstellung von Emissionskatastern für mobile Quellen (anthropogene Emissionen von Luftschadstoffen) mit eingeschränkten Optionen für kurzfristige Emissionsprojektionen
Sektorale Aggregation	CORINAIR SNAP Ebene 1, 2, 3 und CORINAIR kompatible Unterteilungen von SNAP Ebene 3
Betrachtete Schadstoffe	NO _x , N ₂ O, SO ₂ , VOC, CH ₄ , PM, CO, CO ₂ , NH ₃ , Dieselpartikel, und Schwermetalle (Blei, Cadmium, Kupfer, Chrom, Nickel, Selen und Zink)
Betrachtete Emissionsquellen	CORINAIR SNAP 07, 08: on-road und off-road
Technologischer Detaillierungsgrad	Technologien, Brennstoffe, Kapazitäten
Zeitliche Auflösung	jährlich bis stundenweise
Räumliche Auflösung	ländlich bis städtisch (Gitter-Auflösung: 1 * 1 km)
Ausgabeformat	Tabellenkalkulationsformate, z.B. Excel
Verfügbarkeit	Handbücher [COPERT 1997, COPERT 1999], im Internet verfügbar (zum Herunterladen) [LAT]

Tabelle 2.8: Details über die Eigenschaften des COPERT-Modells

Quelle: Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes siehe [UBA1999]

2.2.3 Diverse weitere Modelle zur Emissionserfassung

Die Europäische Kommission hat ebenfalls ein Projekt ins Leben gerufen, welches gleichzeitig eine ausführliche Datenbank zur Verfügung stellt. Diese ist jedoch explizit auf die EU15-Länder abgestimmt. Das Projekt trägt den Namen TRENDS und bedeutet „Transport and ENvironment Database System“. Diese Software eignet sich ideal zur Entscheidungsunterstützung bei der Berechnung verschiedener Umweltindikatoren.

Ein besonderes Augenmerk sei noch auf EcoTransIT gelenkt. Es ist ein von den europäischen Eisenbahngesellschaften initiiertes Projekt und wurde vom Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg entwickelt. EcoTransIT berücksichtigt nicht nur die direkte Gütertransport-Emission, sondern auch die indirekten Emissionen, die beim Erzeugen, Transport und der Verteilung der Energie anfallen. Eine Berechnung für einen Transport von A nach B kann direkt online¹³ durchgeführt werden.

EcoTransIT
EN DE FR ES NL

- Bilanzierung starten -

Was ist EcoTransIT?

- Beispielrechnung
- Allgemeine Informationen
- Berücksichtigte Einflussfaktoren
- Umweltauswirkung von Verkehr

Wem nutzt EcoTransIT?

- Zielgruppe
- Gütertransport und Umwelt

Wer steckt hinter EcoTransIT?

- Partner
- Wissenschaftliche Betreuung
- Zukünftige Vorhaben

Impressum

Was? **Wem?** **Wer?**

Eingabemodus: Erweitert

Versandort: Stadt/Stadtteil Paderborn ☒ Gleisanschluss ☐ Wasseranschluss verfügbar
Ihre Eingabe ist nicht eindeutig. Bitte geben Sie einen Ort an.

Empfangsort: Güterbahnhof Bern ☒ Gleisanschluss ☐ Wasseranschluss verfügbar
Ihre Eingabe ist nicht eindeutig. Bitte geben Sie einen Ort an.

Gewicht: 50 Tonnen Type: Volumengut (Einzelteile, Kleidung etc.)

Verkehrsträger:	Transportart	Schadstoffklasse	Beladungsgrad [%]	Leerfahrtenanteil [%]
☒ Lkw	40 Tonnen	EURO 3	30	10
☒ Zug	mittellanger Zug	Elektro	30	20
☐ Binnenschiff			31	5
☐ Seeschiff				
☒ Flugzeug				
☐ Kombinierte Verkehr / Individuelle Zusammenstellung (Route und Transportmittel) Route definieren				

Fährverbindung: normal

Umschlag definieren: Massengut

Energieeinheit: Kilowattstunde

[Berechnen](#)

Abbildung 2.5: Eingabemaske des Online-Tools EcoTransIT

So sind im Laufe der Zeit viele Projekte entstanden, auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden kann. Dazu zählt z. B. RAINS¹⁴, CASPER¹⁵, CollectER¹⁶, FOREMOVE¹⁷ und viele weitere.

¹³ <http://www.ecotransit.org/ecotransit.de.phtml> (09.05.2009)

¹⁴ Regional Air Pollution INformation and Simulation

¹⁵ CALculation Scheme for Predicting Emissions into AiR

¹⁶ Collect Emission Register

¹⁷ FORecast of Emissions from MOtor VEHICLES

2.3 Verfügbare Daten zur Berechnung der Emission

Mittlerweile haben es sich viele Organisationen, Unternehmen, ja sogar Regierungen auf die Fahne geschrieben, der Kohlenstoffdioxid-Emission mehr Bedeutung beizumessen. Aus diesem Anlass heraus entsteht weltweit eine Vielzahl von Datenbeständen, Datenbanken, Reports und sonstigen Publikationen. In diesem Abschnitt werden beispielhaft einige wichtige dieser Veröffentlichungen aufgezeigt. Es sei bereits im Vorfeld darauf hingewiesen, dass im Verkehrswesen eine rege Datenflut herrscht, wobei die Lagerhaltung bisher auch hier zu kurz gekommen ist. Auf mehrere Anfragen hin bei zentralen Stellen wie dem Umweltbundesamt, der LOGISTIK Inside und dem Geschäftsführer Matthias Kramm von Vanderlande Industries GmbH wurde die Verfügbarkeit notwendiger Emissionskoeffizienten für die Lagerhaltung in Deutschland verneint. Die EIA (Energy Information Administration) der US-Regierung ist mithin die einzige Quelle, deren Berichte detaillierte nationale Energieverbräuche der Lager im „Commercial Buildings Energy Consumption Survey“ (CBECS) von 2003 angeben.

2.3.1 UNFCCC und IPCC

Die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) und der ihm beigeordnete zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) fungieren international als zentrale Stellen im Bereich der globalen Erderwärmung. Auf den jährlichen Konferenzen, den sogenannten Weltklimagipfeln, werden Strategien und Methoden erarbeitet und vorgestellt, die zum Kampf gegen den globalen Klimawandel beitragen. Das bekannteste Protokoll, welches auf so einer Konferenz erarbeitet wurde, ist das im Jahre 1997 verabschiedete Kyoto-Protokoll.

Der wissenschaftliche zwischenstaatliche Ausschuss IPCC veröffentlicht regelmäßig Berichte in vier Kategorien. Dazu zählen die Sachstandsberichte (assessment reports), Sonderberichte (special reports), technische Berichte (technical papers) und methodologische Berichte (methodology papers). Zu dem umfassendsten Klimabericht zählt weltweit der Sachstandsbericht. Dieser ist 2007 in der 4. Fassung (AR4) veröffentlicht worden.

2.3.2 GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme)

Erklärtes Ziel dieser Datenbank ist die Bilanzierungs- und Analysemöglichkeit für Lebenszyklen von Energie-, Stoff- und Transportprozessen sowie ihrer beliebigen Kombinationen. 1987 ist sie vom Öko-Institut und der Gesamthochschule Kassel entwickelt worden und wird seitdem ständig überarbeitet. Die im letzten Jahr in der Version 4.5 erschienene Software stellt umfassende Grunddaten für Energieträger (Prozessketten- und Brennstoffdaten) bereit. Darunter fallen auch Prozesse für Verkehrsdienstleistungen, d.h. Personenkraftwagen (für Benzin, Diesel, Strom, Biokraftstoffe), Öffentliche Verkehrsmittel (Bus, Bahn) und Flugzeuge sowie Prozesse zum Gütertransport (Lastkraftwagen, Bahn, Schiffe und Pipelines), siehe dazu [GEMIS2008].

Diese Datenbank bietet eine Fülle von Informationen über Emissionen sowohl für Produkte als auch für Prozesse. Es sind Daten für 1440 Produkte und 10807 Prozesse in der letzten Version aufgelistet.

	Erdgas-DE	Benzin-2-Takt-DE	Öl-leicht-DE
spezifisches Gewicht	22,3262*10 ³ kg/TJ	23,5682*10 ³ kg/TJ	23,4687*10 ³ kg/TJ
Emissionsfaktor CO₂	55,1514*10 ³ kg/TJ	74,7122*10 ³ kg/TJ	74,3782*10 ³ kg/TJ
Emissionsfaktor SO₂	0,42783 kg/TJ	8,5512781 kg/TJ	77,367868 kg/TJ
Heizwert	33,801241 MJ/Nm ³	42,430000 MJ/Nm ³	42,610000 MJ/Nm ³
Brennwert	37,492711 MJ/Nm ³	45,393439 MJ/Nm ³	45,607000 MJ/Nm ³

Tabelle 2.9: Beispieldaten für Produkte aus der GEMIS-Datenbank

2.3.3 Diverse weitere Datenbestände zur Emission

Wie bereits angemerkt liegen für Deutschland keine Daten für die CO₂-Emission in der Lagerhaltung vor. Daher sei hier zunächst kurz das U.S. Department of Energy (EIA) vorgestellt, welches auch den Energieverbrauch in den Lagerhäusern der Vereinigten Staaten gesondert erfasst hat. In dem nationalen Bericht Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS) werden unter anderem die Energieverbräuche für kommerzielle Gebäude erfasst. Dazu wird die folgende Klassifizierung vorgenommen¹⁸:

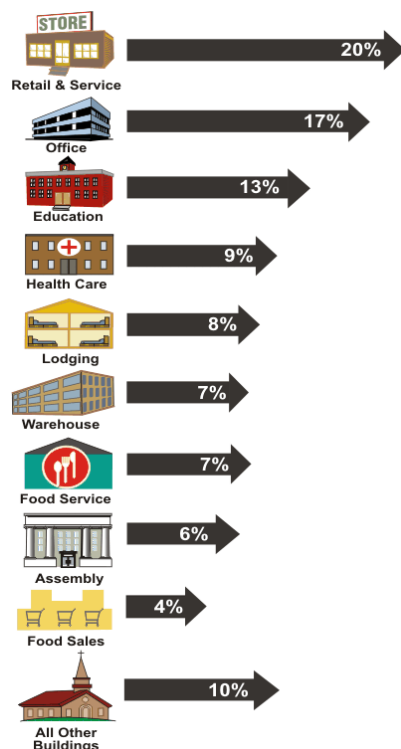


Abbildung 2.6: Kategorien und deren Energieverbrauch relativ zu allen kommerziellen Gebäuden in den U.S.

Quelle: <http://www.eia.doe.gov/kids/energyfacts/uses/commercial.html> (09.05.2009)

Hinweis: Die Werte sind gerundet und können von 100% abweichen.

¹⁸ http://www.eia.doe.gov/emeu/cbecs/building_types.html (09.05.2009)

Weitere wichtige Quellen für Emissionsfaktoren und Energieverbräuche sämtlicher Energieträger sind das bereits mehrfach erwähnte Umweltbundesamt für Deutschland, das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), die Europäische Umweltagentur (EEA), die Europäische Union, das International Institute for Sustainable Development (iisd), das Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) in dem United Kingdom und nicht zuletzt die Logistik Inside.

2.4 Zusammenfassung

Aus genannten und weiteren vorhandenen Quellen lassen sich für die Distribution alle notwendigen Informationen ermitteln. Die Modellformulierung für die Verteilung erfolgt in Kapitel 3. In Kapitel 4 wird zunächst die Komplexität einer Lagerhaltungsmodellierung aufgezeigt und anschließend werden einige mögliche Modellansätze diskutiert.

3. *CO₂-Emissionsmodellierung im Transport*

3.1 Abgrenzung

Primärziel eines motorisierten Fahrzeuges ist der Transport von Personen oder Gütern von A nach B zu einem akzeptablen Zeit- und Kostenaufwand. Aus diesem Grunde sollte eine Umweltwirkung aus der gegebenen Transportaufgabe heraus gemessen werden. Diese wird z. B. für Schadstoffe i. d. R. mit folgenden Einheiten belegt:

- Gramm Schadstoff je Person und Fahrt (Personenverkehr)
- Gramm Schadstoff je Tonne und Fahrt (Güterverkehr)

In dieser Arbeit wird nur der Kohlenstoffdioxid als das bedeutendste Treibhausgas betrachtet. Daher werden die beiden Begriffe „Emission“ und „CO₂-Emission“ nachfolgend synonym verwendet. Die Genauigkeit einer CO₂-Emissions-Erfassung für den Transport eines Gutes lässt sich beliebig genau bestimmen. Um ein Gut überhaupt von einem Ort zum anderen transportieren zu können, müssen entsprechende Fahrzeuge hergestellt werden. Diese Produktion ist ebenfalls mit enormen Umwelteinflüssen verbunden. Konkret stehen folgende Aktivitäten dabei im Vordergrund (siehe dazu [IFEU2000]):

- Bau, Betrieb, Unterhalt (z. B. Antriebsenergie) und Entsorgung der Fahrzeuge
- Bau, Betrieb, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur (Verkehrswege, Tunnel, Brücken) und anderer zum Betrieb notwendiger Anlagen (Bahnhöfe, Tankstellen, Flugplätze, ...)
- Exploration, Förderung, Umwandlung und Transport von Primärenergieträgern zur Bereitstellung der Endenergie am Fahrzeug. Im weiteren Sinne gehören dazu auch die Aufwendungen zur Erstellung, zum Unterhalt und zur Entsorgung der dazu benötigten Anlagen

So eine „Rückwärtskette“, also das Betrachten indirekter Emissionseinflussfaktoren, kann sehr lang und schnell unübersichtlich werden. Daher wird im Folgenden für Berechnungen explizit nur der direkte Umwelteinfluss maßgeblich sein. Bei einer Abweichung davon, wird darauf hingewiesen. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuge, die z. B. mit Strom betrieben werden. Hier macht es auch Sinn die Erzeugung von Strom zu berücksichtigen. In der folgenden Grafik sind die beiden relevanten Emissionsfaktoren rot hervorgehoben.

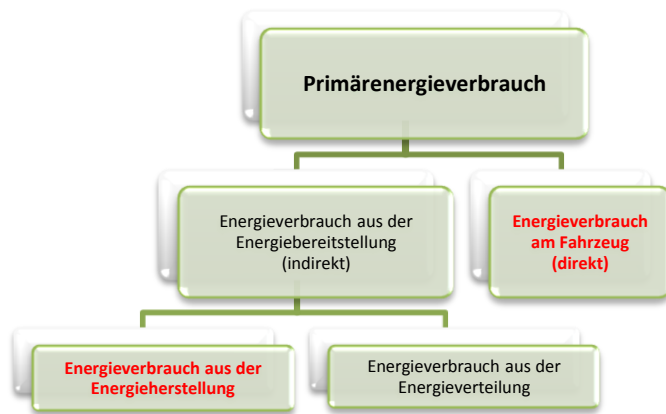


Abbildung 3.1: Primärenergieverbrauch und Emissionen aufgeteilt nach „Fahrzeug“ und „Bereitstellung“

Quelle: s. [IFEU2000]

Kontextabhängig werden als Transportmodi die Straße, Schiene, Luft und das Wasser betrachtet, wobei die Straße einen besonderen Stellenwert bekommt. Nun folgt die Beschreibung einiger Besonderheiten dieser Modi.

3.2 Transportmodus

3.2.1 Straßentransport

Der Energieverbrauch im Straßenverkehr hängt von vielen Faktoren ab. Vorab seien hier einige signifikante Aspekte genannt:

- Fahrzeugkategorie (LNF, SNF, ...)
- Auslastungsgrad (tatsächliches Gewicht durch maximale Nutzlast)
- Treibstoff (Strom, Benzin, Diesel, Hybrid, ...)
- Fahrverhalten
- Verkehrssituation (Auslastung der Straße)
- Volumengewicht (leichtes und voluminöses Gut vs. klein und schwer)
- Alter (technische Ausstattung, Euro-Norm, ...)
- Straßentyp (Stand, Land, Autobahn)
- Gradient (flach, hügelig, gebirgig)
- Jahreszeit (Herbst, Winter, Frühling, Sommer)

Bekanntlich wird das meiste Transportgut mit dem LKW befördert. Das Kraftfahrt-Bundesamt¹⁹ (KBA) berichtet von einem transportierten Gütergewicht mit deutschen Lastkraftwagen von 3.028 Millionen Tonnen und einer Beförderungsleistung von 343,4 Milliarden Tonnenkilometer im Jahre 2007. Dazu waren mehr als 400 Mio. Fahrten nötig, darunter 37% Leerfahrten. Die besondere Bedeutung des LKWs im Straßenverkehr soll entsprechend berücksichtigt werden.

¹⁹ http://www.kba.de/cln_007/nn_125268/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/deutscherlastkraftfahrzeuge__node.html?__nnn=true (09.05.2009)

Einige der o. g. Einflussfaktoren werden im Folgenden näher vorgestellt.

3.2.1.1 Fahrzeugkategorie

Vorhandene Daten vom Umweltbundesamt, der Europäischen Kommission und der Europäischen Umweltagentur (EEA) lassen mittlerweile eine recht differenzierte Aufteilung aller Fahrzeuge vornehmen, wie es z. B. bei COPERT IV ersichtlich wird. Für die gegebene Aufgabenstellung ist eine sinnvolle stark aggregierte Klassifizierung vorzunehmen. Daher wird eine Unterteilung des Straßengüterverkehrs in sechs Kategorien vorgenommen:

- PKW: Personenkraftwagen
- LNF_B: Leichtes Nutzfahrzeug Benzin bis 3,5t zul. Gesamtgewicht
- LNF_D: Leichtes Nutzfahrzeug Diesel bis 3,5t zul. Gesamtgewicht
- SNF klein: Schweres Nutzfahrzeug bis 12t zul. Gesamtgewicht
- SNF mittel: Schweres Nutzfahrzeug 12t – 30t zul. Gesamtgewicht
- SNF groß: Schweres Nutzfahrzeug ab 30t zul. Gesamtgewicht

Eine derartige Einteilung deckt für eine strategische Betrachtung die Emissionsberechnung hinreichend gut ab.

Fahrzeugtyp	Benzin	Diesel	Quelle
PKW	186 g/km	170 g/km	HBEFA ²⁰
LNF	454 g/tkm	524 g/tkm	UBA ²¹
SNF klein		250 g/tkm	UBA ²¹
SNF mittel		127 g/tkm	UBA ²¹
SNF groß		83 g/tkm	UBA ²¹

Tabelle 3.1: CO₂-Emissionsfaktoren gemäß Fahrzeugkategorie bei mittlerer Auslastung

3.2.1.2 Auslastungsgrad

Man geht im Allgemeinen davon aus, dass ein PKW bei einem Mehrgewicht von 100kg einen Mehrverbrauch von 0,5l – 1l je 100km hat. Es ist auch einleuchtend, dass das Gewicht / die Auslastung eines Fahrzeugs einen nicht unwesentlichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat. So gibt [IFEU2008] in einem aktualisierten Paper an, dass der Verbrauch eines leeren Fahrzeugs bis zu 33% geringer sein kann. Der Unterschied kann aber noch höher ausfallen, abhängig vom Fahrverhalten und dem Gradienten. Die in Schweden und Finnland zugelassenen 60-Tonner weisen dagegen ca. 10% weniger CO₂-Emission je tkm auf, als ein entsprechender 40-Tonner. Aus dieser Überlegung heraus kann vereinfachend ein linearer Zusammenhang für den Mehr- / Minderverbrauch angenommen werden:

- 0% Auslastung: 0,85
- 50% Auslastung: 1,00

²⁰ <http://www.hbefa.net/Tools/DE/MainSite.asp> (09.05.2009)

²¹ <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (09.05.2009)

- 100% Auslastung: 1,15

Der einfachste Weg um den Auslastungsgrad zu bestimmen kann wie folgt formuliert werden:

$$EV = EVF_{\text{leer}} + (EVF_{\text{voll}} - EVF_{\text{leer}}) * LF \text{ mit } LF = G / K$$

EV : Energieverbrauch einer speziellen Fracht in g/km

EVF : Energieverbrauch des Fahrzeugs in g/km

LF : Ladefaktor

G : spezielles Frachtgewicht in t

K : Ladekapazität in t

Eine wichtige Erweiterung dieser einfachen Berechnung ist die Berücksichtigung von Volumen und/oder Gewicht. So fällt für eine Fahrt unter gleichen Bedingungen ein höherer Verbrauch bei voluminösen und leichten Transportgütern an, wie z. B. von Styropor, als er für den Transport von z. B. Sand. Um diesem Problem nun Rechnung zu tragen, rechnen heute fast alle Spediteure mit dem Volumengewicht in kg. Diese Vorgehensweise erlaubt es, abhängig vom Transportgut, eine realitätsgetreuere Emissionsberechnung anzusetzen. Die IATA²² hat dafür eigens eine Formel angegeben, die auch so von vielen verwendet wird.

$$\text{Volumengewicht in t: } VG = (L * B * H) / 6$$

Die Länge, Breite und Höhe sind in m anzugeben. Dem liegt also ein Verhältnis von 1m³ zu ca. 167kg zugrunde. Durch die Variation des Dividenden lässt sich die Gewichtung des Volumens beeinträchtigen. Damit sieht die Berechnung des Ladefaktors wie folgt aus:

$$LF = \max \{G, VG\} / K$$

VG : Volumengewicht in t

3.2.1.3 Treibstoff

Für den Straßentransport kommen eigentlich nur Benzin und Diesel in Frage, daher werden diese beiden zum Vergleich gegenübergestellt.

	Benzin	Diesel	Quelle
Emissionsfaktoren für die Energiebereitstellung in Deutschland, 1999	560 g/kg	400 g/kg	[IFEU2000]
Gesamtwirkungsgrad der Energiebereitstellungskette in Deutschland, 1999	85 %	88 %	[IFEU2000]

²² International Air Transport Association

Emissionsfaktor CO ₂	268,839 g/kWh	267,824 g/kWh	GEMIS 4.2
	2,33 kg/L	2,61 kg/L	KBA

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung von Benzin / Diesel in Deutschland

3.2.1.4 Straßentyp und Gradient

Eine gängige und sich anbietende Klassifizierung der Straße wäre das Kriterium der durchschnittlichen Geschwindigkeit. Damit ergibt sich eine Einteilung in Stadt (Innerorts), Land (Außerorts) und Autobahn. Nach eigenen Berechnungen anhand der GEMIS-Datenbank, ergeben sich als Mittelwerte für Benzin/Diesel und PKW/LKW annähernd folgende Emissionsfaktoren:

- Autobahn: 1,00
- Außerorts: 0,88
- Innerorts: 1,28

Der Gradient ist die durchschnittliche Topologie eines Landes. Die genaue Ermittlung des Gradienten ist für die gegebene Fragestellung nicht nötig. Daher reicht eine Grobeinteilung in „flach“, „hügelig“ und „gebirgig“ aus. Hierzu liegen keine Studien für alle Länder vor. Eine eigene Schätzung reicht dafür aus. Eine IFEU und INFRAS Analyse für Deutschland und die Schweiz zeigt einen Energieverbrauchsunterschied von 5% - 10% bei der Berücksichtigung des Gradienten für schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Aus gegebener Analyse heraus wäre somit für Europa (vgl. [IFEU2008], S. 22) folgende Zuordnung sinnvoll:

- flach: 0,95 (Dänemark, Niederlande, Schweden)
- hügelig: 1,00 (Rest)
- gebirgig: 1,05 (Österreich, Schweiz)

Im Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1, der Bundesumweltämter Deutschland (UBA), Schweiz (BUWAL) und Österreich (UBA) wird auf S. 47 der Einfluss einer Straßenneigung auf den Energieverbrauch einiger PKW unterschieden nach Straßentyp aufgezeigt. Wie in der folgenden Grafik unschwer zu erkennen ist, senkt ein Gefälle von 6% auf allen 3 Straßentypen mit einer leichten Variation den Verbrauch um ca. 55% und hebt diesen bei 6% Steigung um bis zu 140%. Dabei haben Diesel-Fahrzeuge die größere Differenz.

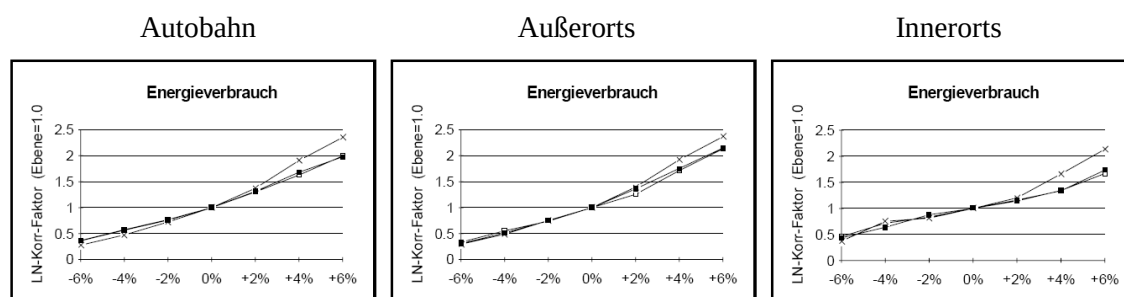


Abbildung 3.2: Energieverbrauch einiger typischer PKW in Abhängigkeit vom Straßentyp

3.2.1.5 Jahreszeit

Die Temperatur als Einflussfaktor auf die CO₂-Emission lässt sich schwer quantifizieren. Für die Emissionsberechnung einer Fahrt von A nach B aus der Vergangenheit könnte man i. d. R. die exakte Außentemperatur zu einem beliebigen Tageszeitpunkt aus einer Datenbank zu Grunde legen. Allein der Tag-Nacht-Unterschied ist nicht unerheblich. Aber für eine Fahrt in der Zukunft ist der einzig gangbare Weg die Mittelung und Konzentrierung der Temperatur auf die vier Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter. Die HBEFA-Dokumentation hat dafür beispielhaft den Einfluss der gemittelten Temperatur einer Jahreszeit auf die Kaltstart-CO₂-Emission hin untersucht. Diese Ergebnisse für ein Ø PKW im Jahre 2000 ergaben, dass die Kaltstartzuschläge im Winter im Mittel 30% - 50% höher als im Jahresmittel liegen und im Sommer dagegen ca. 50% - 70% des Jahresmittels ausmachen.

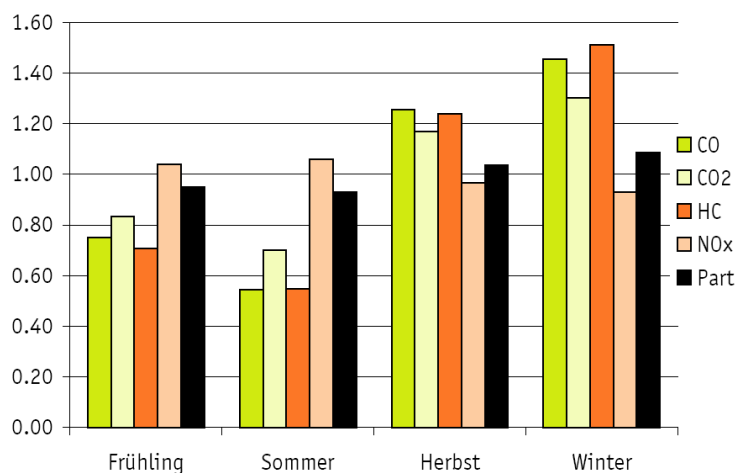


Abbildung 3.3: Saisonaler Einfluss des Kaltstarts (PKW, Deutschland 2000), indexiert, Jahresmittel 1,0

Quelle: INFRAS, Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1, Dokumentation 2004, S. 57

Eine Differenzierung nach Jahreszeit wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen, da mit Verschärfung der Abgas-Grenzwerteregulierung die Unterschiede immer mehr schrumpfen und für Deutschland so gut wie unbedeutend sind. Von Interesse wäre sicherlich die Berücksichtigung der erwähnten Klassifizierung für Länder mit extremen Temperaturen oder Temperaturunterschieden.

Weitere differenzierte Emissionsfaktoren können dem Anhang entnommen werden.

3.2.2 Schienentransport

Die Bahn stellt aus umwelttechnischer Perspektive neben dem Schiffftransport, die bisher beste Emissions-Bilanz auf. Bei durchschnittlicher Auslastung eines Verkehrsträgers ist der Primärenergieverbrauch für Diesel je 100tkm für ein Schiffes nahezu identisch, der Verbrauch eines mittleren LKWs dagegen dreimal höher und der eines Flugzeugs sogar um Faktor 20 höher. Des Weiteren nutzt die Bahn 13% regenerative Energiequellen für die Elektro-Traktion und weist somit sogar in der Energiebereitstellung emissionsfreie Anteile auf. Nach Angaben der Bahn

(vgl. [DB2006], S. 8f) sind alle neuen Triebzüge und Lokomotiven der Bahn rückspeisefähig, d. h. die enorme Wärmeenergie, die beim Bremsen freigesetzt wird, wird über eine moderne Drehstromtechnik in Strom umgewandelt und in die Oberleitungen wieder eingespeist. Allein im Jahre 2006 waren es mehr als 800 GWh und das sind immerhin 7% des gesamten Stromverbrauchs der Bahn.

Verkehrsmittel	Bahn	Binnenschiff	LKW	Flugzeug
CO ₂ in g/tkm	24	35	89	665

Tabelle 3.3: CO₂-Emissionsvergleich verschiedener Transportmodi für den Güterverkehr in D., 2006

Quelle: DB, Nachhaltigkeitsbericht 2007, S. 11

Das Projekt „EcoTransIT“ ist vom IFEU und Rail Management Consultants GmbH (RMCon) entwickelt und mittlerweile von vielen Eisenbahngesellschaften initiiert. Laut Auskunft von Wolfram Knörr vom IFEU, einem Autor vieler Publikationen aus dem Bereich „Verkehr und Umwelt“, ist EcoTransIT derzeit das genaueste Online-Emissionsberechnungswerkzeug für den Güterverkehr.

Das Ergebnis für den Transport eines Normalgutes von 100t von Paderborn nach Stuttgart mit einem 40-Tonner LKW, einem durchschnittlichen Beladungsgrad von 58%, der Schadstoffklasse EURO 3 und einem mittellangen Elektro-Zug mit demselben durchschnittlichen Beladungsgrad, sieht wie folgt aus:

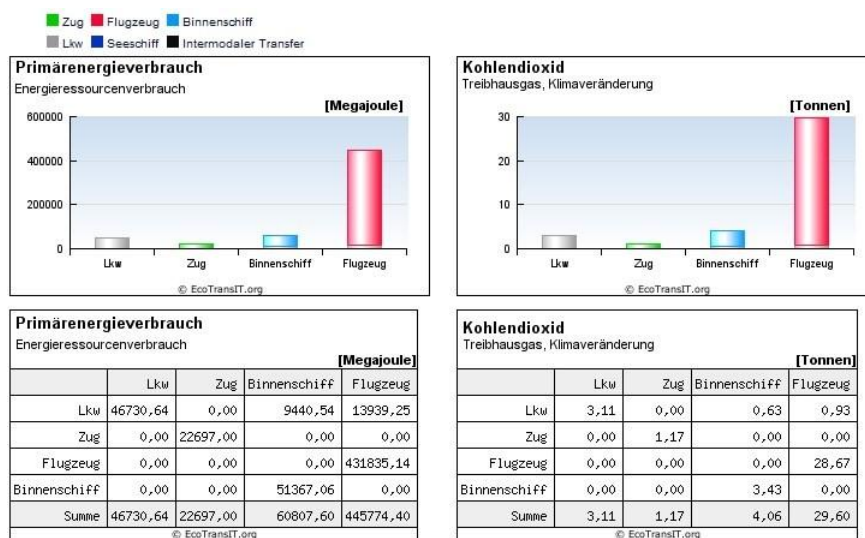


Abbildung 3.4: Beispielrechnung für den Transport von 100t von Paderborn nach Stuttgart mit EcoTransIT

Für den Schienentransport sind die wichtigsten Emissionsfaktoren die folgenden:

- Traktionstyp (Elektrizität, Diesel)
- Zuglänge und Ladung (Verhältnis von tatsächlichem zu leerem Gewicht)
- Gradient
- Fahrverhalten (Geschwindigkeit, Beschleunigung) und Luftwiderstand

3.2.2.1 Traktionstyp

Bisher sind die beiden gängigsten Antriebsarten Elektrizität und Diesel. Bei der Bahn in Deutschland waren es 2007 ca. 7% Diesel-Traktionen und 93% Elektro-Traktionen. Nach eigenen Angaben will die Bahn diese Entwicklung weiter vorantreiben, so dass der Elektro-Traktionsanteil bis 2030 auf 96% steigen soll. Des Weiteren wird der Einsatz von Erdgas und biogenen Kraftstoffen in Erwägung gezogen. Der Einfachheit halber beschränkt sich diese Arbeit auf die beiden wichtigsten Traktionen Elektrizität und Diesel. Für die Emission heißt das konkret, dass diese für Diesel direkt angegeben werden kann und für die Elektrizität ist es nötig, die indirekte Emission zu betrachten. Wie in Abbildung 3.1 angedeutet betrifft dies die Energieerzeugung, die als Emissionsfaktor zu Buche schlägt. Interessant ist dazu der folgende Vergleich zwischen diesen beiden Energieträgern. Abbildung 3.5 zeigt, dass weniger als 1/3 der Primärenergie der Elektrizität als Endenergie verwendet werden kann. Für Diesel sind das immerhin ca. 78%.

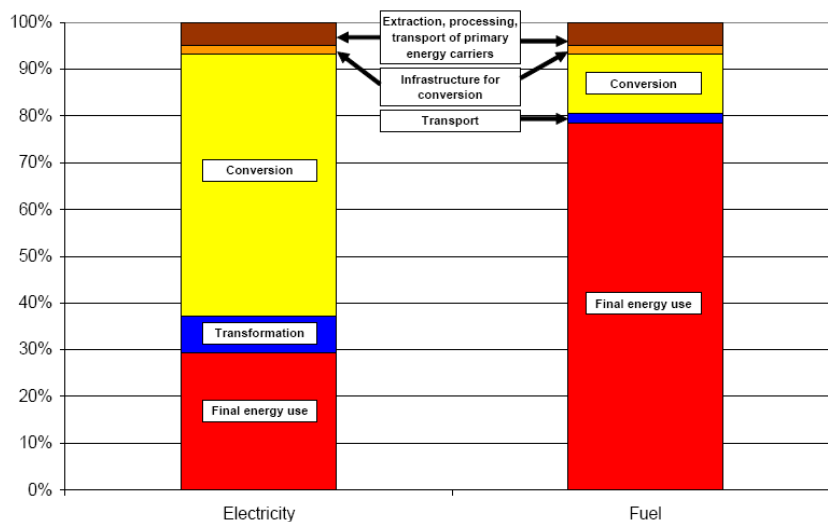


Abbildung 3.5: Energieverbrauch in der gesamten Kette für Elektrizität und Brennstoff

Quelle: IFEU, EcoTransIT – Environmental Methodology and Data, S. 15

Das große Problem, Emissionsfaktoren für Strom anzugeben, ist die Vielfalt der dafür Verwendeten Primärenergieträger in der Erzeugung, wie z. B. Öl, Kohle, Gas, Wasser, Luft usw. In Europa hat jedes Land seinen eigenen Strom-Mix. Viele Bahngesellschaften haben teilweise eigene Kraftwerke. Der Rest wird als Mix dazu gekauft. Hinter der Bereitstellung dieses Stromes stehen verschiedene Kraftwerke. So verursacht z. B. ein modernes Gaskraftwerk ca. 370g/kWh CO₂-Emission, ein Braunkohlenkraftwerk emittiert dagegen mehr als das doppelte, über 900g/kWh. Hinzu kommt, dass die Liberalisierung des Energiemarktes einen internationalen Energiehandel ermöglicht und dadurch die Identifikation der Energieträgeranteile nochmals erschwert wird. Eine naheliegende Methode Emissionsfaktoren für die Elektrizitätsproduktion zu schätzen, ist die Mittelung der Energieträger gemäß ihrem Anteil nach Land und sofern vorhanden, die Berücksichtigung der Bahneigenen Kraftwerksemissionen. Der folgenden Grafik lassen sich die Primärenergieträgeranteile für das Jahr 2005 entnehmen.

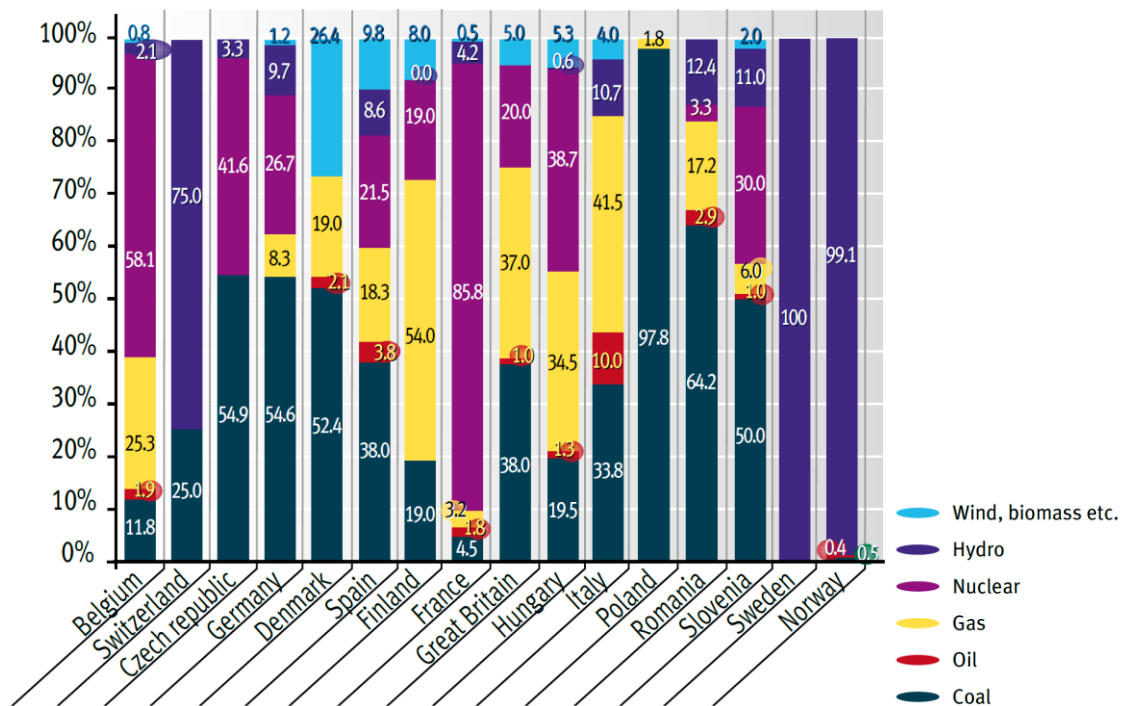


Abbildung 3.6: Elektrizitäts-Mix der Eisenbahn in ausgewählten Ländern

Quelle: UIC, Rail Transport and Environment – Facts and Figures, June 2008, S. 14

Hieraus ergeben sich die folgenden gemittelten Emissionsfaktoren der EU-Länder:

Land	Effizienz [%]	CO ₂ [kg/kWh]
AT	83	0,067
BE	31	0,253
CH	56	0,005
CZ	34	0,565
DE	31	0,592
DK	60	0,346
ES	37	0,480
FE	40	0,384
FR	28	0,069
HU	28	0,499
IT	38	0,640
LU	24	0,755
NL	45	0,407
NO	91	0,006
PL	29	0,986
PT	36	0,635
SE	43	0,015
SI	30	0,716

SK	33	0,186
UK	33	0,569

Tabelle 3.4: Energieeffizienz und Emissionsfaktoren der EU-Länder, 2005

Quelle: IFEU, EcoTransIT – Environmental Methodology and Data, S. 17

Der weltweite Fachverband des Bahnsektors UIC²³ [UIC2008] nennt für Europa eine durchschnittliche CO₂-Emission von 25g/tkm für Elektro-Traktionen.

3.2.2.2 Zuglänge und Gesamtgewicht

Der Energieverbrauch als Funktion in Abhängigkeit vom Bruttogewicht und dem Gradienten in Wh/Brutto tkm sieht laut DB, IFEU und OMIT für Elektro-Traktionen wie folgt aus.

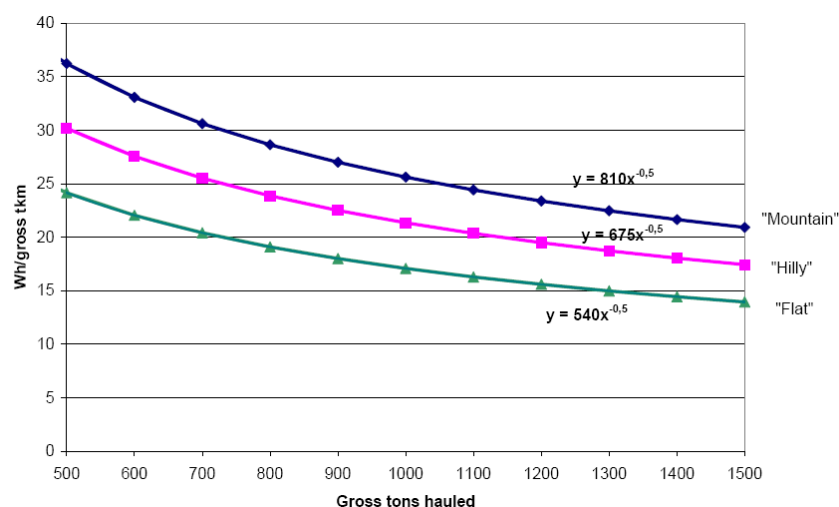


Abbildung 3.7: Energieverbrauch elektrisch betriebener Züge

Quelle: EcoTransIT – Environmental Methodology and Data, S. 23

	g/tkm	flach	hügelig	gebirgig
Kurzer Zug (500t)	schwer	23,7984	29,7776	35,7568
	mittel	28,5936	35,7568	42,8608
	leicht	35,7568	44,8144	53,6352
Mittlerer Zug (1000t)	schwer	16,8720	21,0752	25,2784
	mittel	20,2464	25,2784	30,3104
	leicht	25,2784	31,6128	37,8880
Langer Zug	schwer	19,0624	17,1680	20,6608
	mittel	16,5168	20,6608	24,7456

²³ Union internationale des chemins de fer, Sitz in Paris

(1500t)	leicht	20,6608	25,8112	30,9616
----------------	--------	---------	---------	---------

Tabelle 3.5: Differenzierte Emissionsfaktoren der Elektro-Traktionen für Deutschland 2005

Quelle: EcoTransIT – Environmental Methodology and Data, S. 23

Aus obiger Tabelle lässt sich vereinfachend folgender gemittelter Zusammenhang der Emission zum Gradienten herleiten:

- flach: 1,00
- hügelig: 1,21
- gebirgig: 1,45

Für Diesel-Traktionen ergeben sich in gleicher Abhängigkeit in g/Brutto tkm folgende Funktionen:

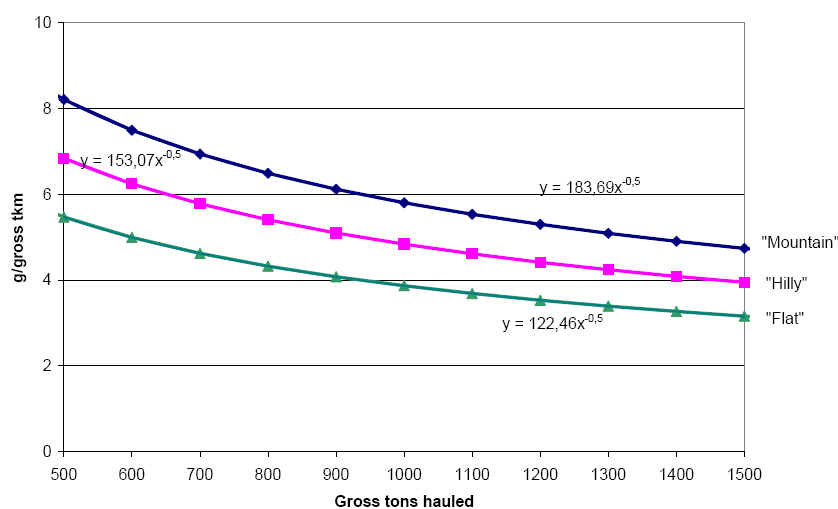


Abbildung 3.8: Energieverbrauch Diesel betriebener Züge

Quelle: EcoTransIT – Environmental Methodology and Data, S. 24

Da der Einsatz von Diesel-Traktionen verhältnismäßig gering ist, wird hierfür ein Mittelwert gemäß dem Datensatz von IFEU mit 33,1 g/tkm angesetzt.

Leistungs-Tonnenkilometer (gross tkm worked):

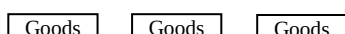
(Gewicht der Lokomotive + Gewicht der Waggons + Gütergewicht) * (gefahrne km)

**Brutto-Tonnenkilometer (gross tkm hauled):**

(Gewicht der Waggons + Gütergewicht) * (gefahrne km)

**Netto-Tonnenkilometer (netto tkm):**

(Gütergewicht) * (gefahrne km)



Wären Daten über das Eigengewicht der eingesetzten Züge verfügbar, so ließen sich die wesentlich besseren Funktionen aus Abbildung 3.7 und 3.8 verwenden. Nun aber ist der Griff zu den vorhandenen Daten des IFEU, Öko-Instituts usw. nötig, deren Werte lediglich Mittelwerte sind und sämtliche Annahmen unbekannt sind. In der folgenden Tabelle sind gerundet Werte für das Jahr 2005. Sowohl für Werte aus GEMIS als auch für CO₂-Emissionswerte der Elektro-Traktion ist die Energiebereitstellung miteinbezogen.

Land	Traktion	Tonnage in t	Energie in [kWh/km]	Energie in [Wh/tkm]	CO ₂ in [g/tkm]	Erneuerbare Energie in [%]	Quelle
DE	Elektro	100	5,83	236,030	53,421	4,6	GEMIS
DE	Elektro			851,020	53,500	4,7	UBA ²⁴
UK	Elektro			572,200	30,900	0,6	UBA ²⁴
RU	Elektro	100	6,50	212,510	39,698	5,8	GEMIS
GB	Elektro	100	5,83	158,880	29,921	0,8	GEMIS
DE	Diesel	400	28,45	148,020	26,853	6,2	GEMIS
DE	Diesel			539,480	33,100	0,3	UBA ²⁴
US	Diesel	100	6,94	84,495	22,622	0,0	GEMIS
AU	Diesel	100	7,00	78,241	21,190	36,5	GEMIS

Tabelle 3.6: Ausgewählte Züge und deren Energieverbräuche und Emissionen

3.2.3 Lufttransport

Die Güterverkehrsleistung im Lufttransport ist im Verhältnis zu allen anderen Verkehrsträgern verschwindend gering. So betrug diese Leistung laut dem Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen weniger als 0,2% der gesamten transportierten Güter in Deutschland. Sicherlich ist dieser Umstand u. a. auf die enorme Umwelteinwirkung zurückzuführen.

Güter werden im Lufttransport entweder in speziell dafür vorgesehene Frachtflugzeuge transportiert (z. B. die Lufthansa Cargo MD-11F) oder gemeinsam mit einem Passagierflugzeug. Für die Emissionsberechnung ergibt sich beim letztgenannten ein Problem. Die Lufthansa und Air France haben bis 2007 einen Wichtungsfaktor verwendet, der eine explizite Mitberücksichtigung von Sitzen, Bordküchen, Toiletten usw. zur Trennung von Fracht- und Passagieranteil ermöglichte. Denn per se ist ein Frachtflugzeug leichter als ein Passagierflugzeug. Da sich aber keine weiteren Gesellschaften dieser Berechnungsmethodik anschlossen und diese Methode international einen Sonderweg darstellte, entschied die Lufthansa auch aus dem Hintergrund der Integration von SWISS, diesen Faktor abzuschaffen (vgl. [LH2008]).

Im Folgenden die Emissionsentwicklung bei der Lufthansa AG seit 1991 bis 2007:

²⁴ <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (09.05.2009)

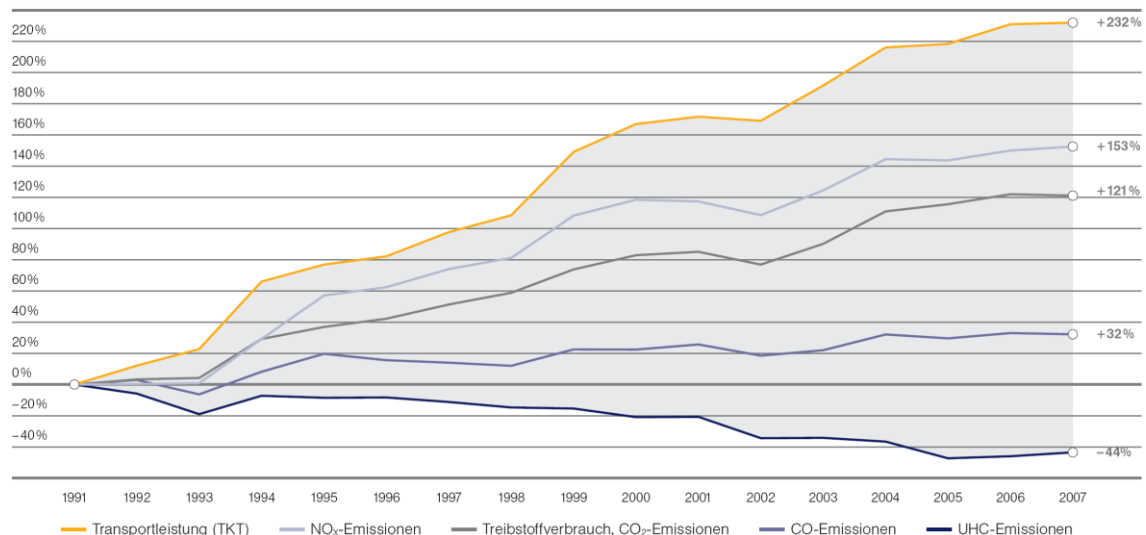


Abbildung 3.9: Entkoppelung von Transportleistung und Umweltbelastung der Lufthansa

Quelle: Lufthansa, Balance - Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit bei Lufthansa, Ausgabe 2008, S. 67

Als Einflussfaktoren auf die Emission werden für den Lufttransport die beiden folgenden Größen betrachtet:

- die Entfernung und damit der Kerosinverbrauch (Zyklus: Inland, International)
- der Flugzeugtyp (Frachtflugzeug, Passagierflugzeug)

Eine Tonne Kerosin emittiert 3,15 Tonnen CO₂. Die Lufthansa meldete für 2007 in [LH2007] einen Kerosin-Gesamtverbrauch von 2.111.111 Tonnen nur für den Gütertransport, das entspricht einer Emission von 6.650.000 Tonnen. Ab 2012 wird der gesamte Luftverkehr nach einem Richtlinienvorschlag der Europäischen Kommission in das bestehende Emissionshandelssystem der EU (EU ETS²⁵) mit einbezogen. Dies ist für die Gesellschaften zunächst mit weiteren Kosten verbunden, da ab 2012 15% der Zertifikate versteigert werden soll. Gleichzeitig wird es aber ein Ansporn sein, weitere technische Verbesserungen und Optimierungen in den jeweiligen Netzwerken vorzunehmen.

3.2.3.1 Entfernung

Es ist einleuchtend, dass Kurzstreckenflüge wesentlich ineffizienter sind, als Langstreckenflüge. In diesem Zusammenhang sei an dieser Stelle auf das Modell Pagoda der Europäischen Organisation EUROCONTROL hingewiesen, welches den Treibstoffverbrauch und die Treibhausgase des PAN-Europäischen Luftfahrtnetzwerkes schätzt. Das Handbuch [EURO2005] gibt in Abhängigkeit von der Entfernung eines Airbus A320 differenzierte Treibstoffverbräuche an. Dabei wird der internationale LTO (Landing and Take Off) – Zyklus mitberücksichtigt. Ein einziger LTO-Zyklus bei einem A320 verbraucht 802,3kg Treibstoff. Ein Zyklus ist definiert als Anflug, Landung, Rollvorgänge, Start und Steigflug unterhalb einer Grenzhöhe von 3.000 Fuß (rund

²⁵ Emission Trading Scheme

900 m). Diese Höhe wird beim Anflug bei ungefähr 20km vor Bodenkontakt erreicht und nach ungefähr 7km nach dem Bodenkontakt wieder verlassen.

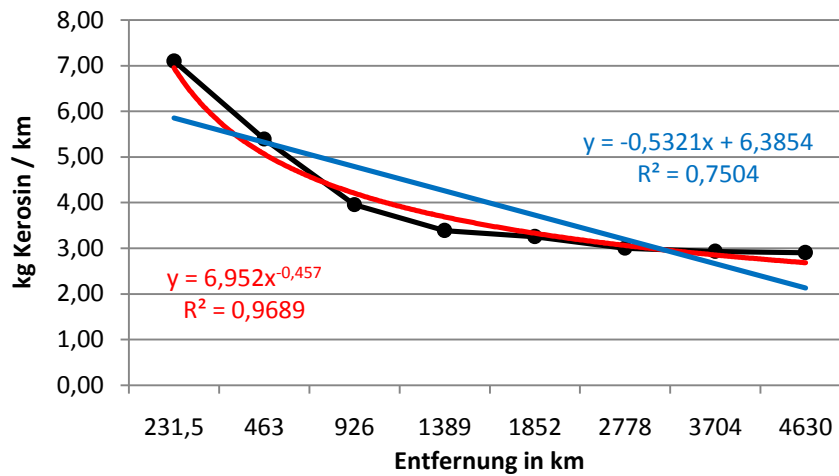


Abbildung 3.10: Treibstoffverbrauch eines A320 abhängig von der Entfernung

Quelle: Eigene Darstellung (vgl. [EURO2005], S. 6)

Für die gegebenen Messpunkte lässt sich z. B. eine „ungenauere“ lineare Funktion (blau) oder eine viel genauere Potenzfunktion (rot) ableiten. Eine Linearisierung ist in diesem Fall nicht zu empfehlen, da das Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Funktion auf eine zu schwache Abbildung der tatsächlichen Punkte hinweist.

Zur Emissionsberechnung können die folgenden Zahlen herangezogen werden:

	Inland	International	Quelle
Frachtflug CO₂ [g/tkm]	1300	725	IFEU 2005 ²⁶
Passagierflug CO₂ [g/pkm]	172	119	IFEU 2005 ²⁶
Passagierflug CO₂ [g/pkm]	291	193	GEMIS 2000

Tabelle 3.7: Emissionsfaktoren für den Lufttransport

Aus obiger Abbildung kann der Zyklus „Inland“ grob für Flüge weniger 1000km/Flug angewandt werden und wäre damit ein Kurzstreckenflug. Folgerichtig ist damit der Zyklus „International“ ein Langstreckenflug mit über 1000km/Flug

3.2.3.2 Flugzeugtyp

Nach Auskunft von Dr. Karlheinz Haag von Umweltkonzepte Lufthansa, wertet diese für ein konkretes Jahr ca. 70.000 Flüge aus und errechnet anhand der gewonnenen Daten die CO₂-Emission. Dafür wird der internationale Standardwert von 100kg / (Person und Gepäck) verwendet. Eine Zuordnung der Emission bei einem Kombiflug erfolgt 1:1. Leider ist es unmöglich konkrete Daten z. B. für die mittlere Auslastung usw. für ein Flugzeug zu erhalten. Nach Anga-

²⁶ <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (09.05.2009)

ben von Prof. Dr. Robert Sausen vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sind die Konzerne sehr zurückhaltend mit der Informationspreisgabe. Sehr häufig sind es aber wichtige Parameter für die CO₂-Emissionsberechnung. Es gibt zwar das bekannte Lufthansa-Projekt „myclimate“²⁷, welches eine CO₂-Kompensationsberechnung erlaubt, aber auch hier sind die getroffenen Annahmen unbekannt. Aus gegebener Problematik ist eine CO₂-Emissionangabe für den Lufttransport eines Gutes schwierig, da u. a. die tatsächliche mittlere Auslastung unbekannt bleibt. Die Lufthansa nennt in ihrem Nachhaltigkeitsbericht von 2008 folgende Daten:

	Frachtflug	Kombiflug
CO ₂ [g/tkm]	526	940
Kerosin [g/tkm]	226	296

Tabelle 3.8: Emissionsfaktoren für den Lufttransport der Lufthansa, 2008

Quelle: Lufthansa, Balance - Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit bei Lufthansa, Ausgabe 2008

3.2.4 Wassertransport

Ein nicht unerheblicher Teil aller Güter wird mit dem Schiff transportiert. In Deutschland lag der Anteil für 2005 laut BMVBS²⁸ bei ca. 11%. Die Meere werden als Transportwege immer beliebter. Schiffe bieten in diesem Kontext den großen Vorteil, dass sie große Mengen preisgünstig und umweltschonend transportieren können. Sie sind erheblich energieeffizienter als der Straßenverkehrs- und Luftfahrtsektor, gemessen an transportierter Menge je Entfernungseinheit.

Der Treibstoff moderner Seeschiffe setzt sich überwiegend aus einer Mischung von Schweröl (Bunker-C) und Diesel zusammen. Kleinere Seeschiffe verwenden das qualitativ hochwertigere und auch kostenintensivere Marine Diesel Oil (MDO). Die Verwendung von Schweröl (Intermediate Fuel Oil – IFO) als Energieträger stellt im Wassertransport ein ernst zu nehmendes Problem dar. Heute nutzen immer noch mehr als 90% aller großen Schiffe das IFO. Schweröl fällt bei der Raffinierung von Erdöl als Abfallprodukt an und trägt mit der Schifffahrt 3% zum internationalen Ausstoß der Treibhausgase bei. Die Internationale Seeschiffahrtsorganisation (IMO) hat beschlossen die Nutzung dieses Treibstoffs in einigen Jahren einzustellen.

Schwierig ist das Aggregieren der verschiedenen Frachtschiffe. Diese sind so vielfältig und häufig gibt es für gewisse Frachtgüter spezielle Modelle, so dass eine Kategorisierung nur grob vorgenommen werden kann. Ähnliches gilt auch für die Angabe eines Schiffmaßes, einer Größenordnung, einer Tragfähigkeit usw. Auch hier hat die Geschichte diverse Messverfahren hervorgebracht, die auch heute noch genauso in ihren Ausprägungen angewandt werden, i. d. R. abhängig davon, ob es um die Versteuerung, die Kanalnutzung usw. geht. Der Frachtschiffotyp und die Schiffmaße sind beide aussagekräftige Einflussfaktoren für die CO₂-Emission. Die Frachtschiffe lassen sich grob in zwei Kategorien unterteilen, in Binnenschiffe und Seeschiffe.

²⁷ <http://lufthansa.myclimate.org/> (09.05.2009)

²⁸ Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Zu den Binnenschiffen zählen²⁹:

- Gütermotorschiff
- Tankmotorschiff
- Containerschiff
- RoRoSchiff
- Autotransporter
- Küstenmotorschiff
- Kühlschiff

und zu den bekanntesten Seeschiffen zählen²⁹:

- Containerschiff
- Feederschiff (ein kleines Containerschiff als Zubringer)
- Stückgutschiff
- Küstenmotorschiff (auch KüMo) ein kleines Stückgutschiff
- Kühlschiff
- Massengutfrachter (auch Bulkcarrier oder Bulker genannt)
- RoRoSchiff
- Autotransporter
- Tankschiff (auch Tanker genannt)
- Schwergutfrachter

3.2.4.1 Schiffsmaße

Bevor diese verschiedenen Typen zusammengefasst werden, ist es nötig auf die bereits hingewiesen Schiffsmaße einzugehen.

Verdrängung

Grundlage dieser Angabe ist das archimedische Prinzip, welches lautet: „Die Auftriebskraft eines Körpers in einem Medium ist genauso groß wie die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums.“³⁰ Das heißt, die von einem Schiff verdrängte Wassermenge entspricht der Masse (Gewicht) eines Schiffes. Die Gewichtsangabe über die Wasserverdrängung wird seit 1920 als offizielle Angabe für Kriegsschiffe verwendet.

Tragfähigkeit (TDW, TEU)

Für Handelsschiffe ist die Gesamtmassenangabe eines Schiffes aufgrund der Ladung uninteressant. Die Tragfähigkeit (auch Tons Deadweight – TDW) eines Schiffes ist die Differenz der Wasserverdrängung des bis zur höchstzulässigen Lademarke belasteten Schiffes in Tonnen zur

²⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Frachtschiff> (09.05.2009)

³⁰ http://de.wikipedia.org/wiki/Archimedisches_Prinzip (09.05.2009)

Wasserverdrängung des unbelasteten Schiffes in Tonnen. Damit ergibt sich das Gesamtgewicht eines Schiffes aus der Addition der Tragfähigkeit und des Eigengewichtes.

Für Containerschiffe wird die Stellplatzkapazität in Anzahl der Container angegeben. Die dafür verwendete Maßeinheit ist die TEU (Standardcontainer, Twenty-foot Equivalent Unit), d. h. dass ein Containerschiff mit 1.000 TEU Stellplätze für 1.000 20-Fuß-Container hat. Ein 20-Fuß-ISO-Container hat folgende Dimensionen: Länge 6,1m (20Fuß) / Breite 2,4m (8Fuß) / Höhe 2,6m – 2,9m (8,5Fuß – 9,5Fuß) / Volumen 38,5m³ - 43m³ (1360Fuß³ - 1520Fuß³) (vgl. [UN2003]).

Raumgehalt, Tonnage

Man unterschied in Deutschland bis 1969 die Brutto- und Nettoregistertonne (BRT, NRT). Eine Registertonne entspricht ca. 2,83m³. Die BRT umfasste das gesamte Schiff, also inklusiv Aufbauten, Luken, das Deck usw. Für die NRT wurden z. B. die Besatzungsunterkünfte, die Brennstoffbunker, Pumpräume usw. abgezogen. Die Berechnung der NRT führte immer wieder bei der Hafen- und Kanaldurchfahrtsgebühr zu erheblichen Unterschieden, weil bestimmte Räume aufgrund einer spezifischen Eigenschaft des betroffenen Schiffes als Abzugsfähig diskutabel waren. Daraufhin ist vom BSH³¹ die dimensionslose Brutto- und Nettoraumzahl (BRZ, NRZ) eingeführt worden. Diese Vermessung gilt für Schiffe, die für Auslandsfahrten eingesetzt werden und eine Länge von mehr als 24m haben (s. Internationales Schiffsvermessungs-Übereinkommen, London 1969). Die Berechnung von BRZ erfolgt über folgende Formel:

$$BRZ = K_1 * V$$

$$K_1 = 0,2 + 0,02 * \log_{10} V$$

V : Gesamtvolumen in m³ des gemessenen Inhalts aller geschlossenen Räume vom Kiel bis zum Schornstein

K_1 : liegt zwischen 0,22 und 0,32 und ist von der Schiffsgröße abhängig

Die NRZ ist ein Maß für die mittlere Nutzbarkeit eines Schiffes und ist abhängig vom Inhalt der Laderäume, dem Tiefgang, der Seitenhöhe und der Anzahl der Fahrgäste. Die mit Hilfe einer speziellen Formel errechnete NRZ darf nicht kleiner sein als 0,3 BRZ. Offene Containerschiffe und Doppelhüllentanker erhalten gemäß entsprechender IMO-Vorschriften eine Reduzierung der BRZ. Diese wird im Schiffsmessbrief vermerkt³². Sowohl die BRZ als auch die NRZ sind keine Gewichtsangaben, auch besteht keine direkte Beziehung zur Tragfähigkeit eines Schiffes.

³¹ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

³² <http://www.bsh.de/de/Schifffahrt/Berufsschifffahrt/Schiffsvermessung/Vermessungsverfahren.jsp> (09.05.2009)

3.2.4.2 Frachtschifftyp

Ein Blick auf ausgewählte Datensätze der beiden Datenbanken GEMIS 4.5 und PROBAS vom UBA, zeigt den deutlichen Unterschied in der CO₂-Emission zwischen einer Binnenschifffahrt und einer Seeschifffahrt. Die CO₂-Emissionswerte aus GEMIS umfassen auch die Vorkette.

	Traktion	Jahr	kWh/km	l/100km	Tonnen	CO ₂ g/tkm
Binnenschiff	Diesel	2000	194,40	195,62	2.000	29,99
Binnenschiff	Diesel	2005	59,72	600,83	500	40,24
Massengutfrachter		2000	833,30	76433,10	300.000	9,11
International						
Überseeschiff		2000	3145,83	27907,80	120.000	8,66

Tabelle 3.9: Ausgewählte Schiffe aus der GEMIS Datenbank und deren spezifische Verbräuche

	Traktion	Jahr	g/tkm
Binnenschiff CH			58,60
Binnenschiff DE	Diesel	2005	31,70
Güterschiff DE	Diesel	2000	26,00
Binnenschiff DE	Diesel	2000	32,00
Schiff Inland		1990	34,50
Massengutfrachter		2000	8,03
Überseefrachter			8,58
Überseeschiff		2000	7,40
Überseetanker			6,98

Tabelle 3.10: Ausgewählte Schiffe aus der PROBAS33 Datenbank des UBA und deren CO₂-Emission

Seeschiffe

Im folgenden unterscheiden wir für die Seeschiffe in Anlehnung an [BORKEN1999] 3 Frachter-Kategorien:

- Allgemeine Frachter, RoRo-Schiffe und Containerschiffe
 - Tragfähigkeit: 9.000 – 23.000 Tonnen
 - sind mehr oder weniger auf allen Fahrten voll Beladen
- Schwere Frachtschiffe
 - Tragfähigkeit: ca. 40.000 Tonnen
 - i. d. R. fahren diese auf der Hinfahrt mit und auf der Rückfahrt ohne Fracht
- Tanker
 - Tragfähigkeit: 50.000 – 200.000 Tonnen

³³ Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente

- i. d. R. fahren diese auf der Hinfahrt mit (z. B. Öl) und auf der Rückfahrt ohne Fracht

Der Germanischer Lloyd (GL) rechnet mit einem CO₂-Emissionsindex in Abhängigkeit vom Treibstoff wie folgt:

Typ of Fuel	ISO Spezifikation	C _{Carbon} [g CO ₂ / t Fuel]
Diesel / Gasoil	ISA 8217 Grades DMX through DMC	3.206.000
Light Fuel Oil (LFO)	ISA 8217 Grades RMA through RMD	3.151.040
Heavy Fuel Oil (HFO)	ISA 8217 Grades RMA through RMK	3.114.400
Liquid Petrol Gas (LPG)		2.967.840
Natural Gas		2.931.200

Tabelle 3.11: CO₂-Emission in Abhängigkeit vom Treibstoff der Schiffe

Quelle: <https://www.gl-group.com/fleetonline/app//emissionInfo.do> (09.05.2009)

Der Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom Schweröl beträgt nach [IFEU2008] 3.185g/kg. Für die weitere Betrachtung reicht dieser Mittelwert des IFEU aus, da die meisten Schiffe immer noch mit Schweröl (HFO) fahren.

Schiffstyp / Gewichtsspezifikation	Schweröl [g/tkm]	CO ₂ [g/tkm]
Tanker, Schwere Fracht	0,7 – 2,6	6,37
Schwere Frachter, mittlere Fracht	2,2 – 4,9	12,74
Allg. Frachter, Volumenfracht (leicht)	3,8 – 9,6	22,30

Tabelle 3.12: Energieverbrauch und CO₂-Emission (gemittelt) der Seeschiffe für 3 Kategorien

Quelle: IFEU Schätzung in Anlehnung an [BORKEN1999]

Binnenschiffe

Für die Binnenschifffahrt (Inlandsfahrt) ist neben der Schiffsgröße und der Ladung die Wasserflussrichtung besonders ausschlaggebend für den Energieverbrauch. Des Weiteren soll u. a. der Einfluss einer Schleuse untersucht werden. Die IFEU-Recherchen ergaben folgende Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung, das 1kg Schweröl (Diesel) 3.175g CO₂ für Binnenschiffe emittiert:

		freier Fluss		mit Schleusen	
Nutzlast	Einheit	abwärts	aufwärts	abwärts	aufwärts
Ladefaktor 0%					
800t	g/km	8.700	22.454	10.928	14.869

1.250t	g/km	11.970	30.855	15.094	20.520
1.750t	g/km	15.465	39.849	19.406	26.467
2.500t	g/km	17.917	46.022	22.454	30.556
Ladefaktor 50%					
800t	g/tkm	24,45	63,82	29,85	40,96
1.250t	g/tkm	21,59	56,52	26,04	35,56
1.750t	g/tkm	20,00	52,07	23,81	32,70
2.500t	g/tkm	16,51	41,59	19,37	26,67
Ladefaktor 100%					
800t	g/tkm	13,97	37,15	15,56	22,23
1.250t	g/tkm	12,70	32,70	13,97	19,37
1.750t	g/tkm	11,75	29,85	12,70	17,78
2.500t	g/tkm	9,53	24,45	10,48	14,92

Tabelle 3.13: CO₂-Emission für Binnenschiffe abhängig von der Schiffsgröße und der Flussrichtung

Quelle: [IFEU2008]

Für die Binnenschifffahrt werden in Anlehnung an EcoTransIT die Emissionen für ein Durchschnittsschiff in Abhängigkeit von 3 Wasserflussbewegungen (kein Fluss, flussabwärts, flussaufwärts) und 3 Frachttypen (schwer, mittel, leicht) unterschieden. Die Unterscheidung von leeren Fahrten flussauf- oder flussabwärts und volle Fahrten flussauf- oder flussabwärts ist gemittelt in der nachstehenden Tabelle der Emissionswerte mit einbezogen worden.

g/tkm	flussaufwärts	flussabwärts	kein Fluss
Schwer	30,48	22,23	22,86
Mittel	43,18	26,04	30,48
Leicht (Volumen)	72,71	40,01	50,17

Tabelle 3.14: CO₂-Emission für Binnenschiffe (Inlandsfahrten)

Quelle: [BORKEN1999] und [IFEU2008]

Der BUND für Umwelt und Naturschutz spricht von einer 20%-igen CO₂-Emissionsreduzierung bei einer Geschwindigkeitsreduzierung von 14,15 Knoten auf 12,66 Knoten, das sind ca. 10,5%. Ein Knoten ist die zurückgelegte Seemeile in einer Stunde, wobei eine Seemeile einer Entfernung von 1852,216m entspricht. Interessant sind auch die in jüngster Zeit zum Einsatz kommenden Zugdrachen-Antriebssysteme, die an Gleit- oder Fallschirme erinnern. Diese nutzen jedoch die Windenergie als Antrieb aus. Meldungen des Hamburger Herstellers SkySails zufolge führt der Einsatz eines Zugdrachen zu einer Treibstoffkostenreduzierung zwischen 10 und 35%. Liegen optimale Windbedingungen vor, so lassen sich zeitweise bis zu 50% des Treibstoffs einsparen. SkySails ist mit dem Gründer Stephan Wrage mehrfach ausgezeichnet worden.

3.3 Emissionsmodellierung

Ziel dieses Modells ist die quantitative CO₂-Emissionserfassung für beliebige Transporte zwischen Lieferanten und Kunden oder zwischen den Lägern eines Lieferanten. Letztendlich soll dieser, in Geldeinheiten bewertete Faktor, bei der Minimierung der Transportkosten im WSP³⁴ (s. Kapitel 5) konkurrierend mit anderen Faktoren einfließen.

Es ist nicht erklärtes Ziel ein detailliertes Modell mit allen Restriktionen usw. aufzustellen, sondern rudimentäre Modellansätze mit den wichtigsten Größen und einer adäquaten Klassifikation der Einflussparameter. Ein wesentliches Gewicht bei den Überlegungen war die vorhandene Datenlage. Daraus folgt, dass für alle Modelle die Angabe von Kohlenstoffdioxid in g/tkm erfolgt. Das Ergebnis der jeweiligen Funktionen in Abhängigkeit von der Entfernung, dem Transportgewicht und je nach Transportmodus weiterer Variablen, gibt den Kohlenstoffdioxidausstoß für den Transport eines Gutes von A nach B in Gramm an. Für eine Beispielrechnung können alle notwendigen Parameter in Kapitel 3.2 oder im Anhang gefunden werden. Sofern nichts angegeben, handelt es sich um gemittelte Emissionswerte.

3.3.1 Einfachstes Transport-Emissionsmodell

Die Aufgabe bei der Bildung strategischer Modellansätze besteht darin, sinnvolle Definitionen für Klassifizierungen in der Modellierung von Emissionen im Transport anzugeben. Die denkbar einfachste Möglichkeit die CO₂-Emission zu ermitteln, ist die Addition der Emission in g/tkm über alle Transportmodi. Dabei repräsentiert ein Mittelwert für jeden Modus die gesamte Fahrzeugklasse. Die einzigen notwendigen Variablen dafür sind die Entfernung und das zu transportierende Gewicht.

$$CO_2(d, t)_{Transport} = \sum_{j \in FZ} eFZ_j * d_j * t$$

FZ : Fahrzeugtyp $\{LKW, Bahn, Schiff, Flugzeug\}$

eFZ_j : Emissionsfaktor für Fahrzeugtyp j in g/tkm

d_j : Entfernung in km für Fahrzeugtyp j

t : transportiertes Gewicht in Tonnen

Für diesen Modellansatz können Mittelwerte aus ganz Europa für einen durchschnittlichen Transport genommen werden (mittleres Gut, mittlere Straße und Gradient, mittlerer Europäischer Energie-Mix).

Transportmodus	CO ₂ in g/tkm
Straßentransport (> 34 – 40 t, EURO 3)	72

³⁴ Warehouse Site Planner

Schienentransport	18 / 35
(Elektro / Diesel)	
Lufttransport	656
Wassertransport	49 / 29
(flussaufwärts / flussabwärts)	

Tabelle 3.15: Mittlere Emissionsfaktoren für den Frachttransport in Europa

Quelle: [IFEU2008]

Die Frage, die sich aber unmittelbar stellt, ist die nach der Aussagekraft dieses Modells. Wenn man bedenkt, wie stark die Unterschiede innerhalb eines Transportmodus sein können, muss man zu dem Entschluss kommen, dass dieses Modell auch aus einer strategischen Perspektive unbrauchbar ist. Allein die Differenzierung nach Fahrzeuggröße innerhalb eines Fahrzeugtyps weist schon einen enormen Unterschied auf. Werden weitere Einflussfaktoren herangezogen, so führen „ungünstige“ Konstellationen und deren Kumulation zu der oben genannten Schlussfolgerung. Aus diesem Grunde heraus gilt es eine plausible Differenzierung vorzunehmen.

Auf der anderen Seite kann man aber auch beliebig genau werden. Auch hier gilt es plausibel zu Aggregieren. Die Intention besteht darin, möglichst genau dort zu differenzieren, wo die Verkehrsleistung und die damit korrelierende Emission relativ hoch ist. Deshalb wird in dieser Arbeit für den Straßentransport auf oberster Ebene eine 6-fache Typunterscheidung (PKW, 2x LNF, 3x SNF) vorgenommen. Die Folgende Graphik veranschaulicht das Güterverkehrssystem, welches für die weitere Modellbetrachtung die Basis bildet.

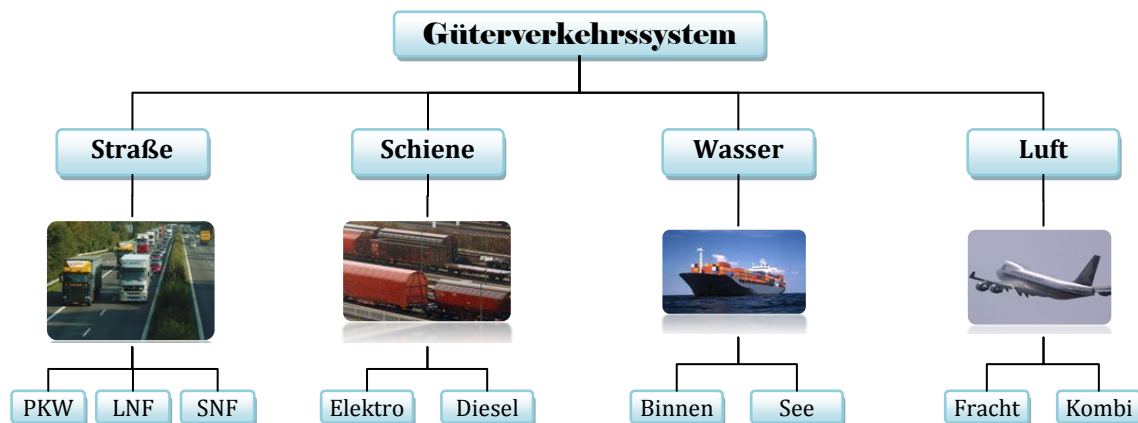


Abbildung 3.11: Güterverkehrssystem für das Emissionsmodell

3.3.2 Einfaches Emissionsmodell Straße

Die Bedeutung des Güterverkehrs auf der Straße macht es erforderlich einige markante Einflussfaktoren mit ins Modell zu übernehmen. An dieser Stelle sei lediglich auf die im Modell verwendeten Einflussgrößen hingewiesen. Weitere in dieser Arbeit vorgestellte Größen, aber aus diversen Gründen im Modell nicht aufgenommene, finden sich im Kapitel 3.2. Eine exklusive Bedeutung fällt hier auf den Fahrzeugtyp und Straßentyp. Eine mehr oder weniger justierende Bedeutung fällt auf den Ladefaktor und dem Gradienten eines Landes. Emissionsangaben eines Fahrzeugs setzen oft eine mittlere Auslastung voraus. Um diese Grobangabe etwas zu präzisieren, wird für den folgenden Ansatz ein linearer Zusammenhang zwischen Gewicht und Emission angenommen und als Ladefaktor multiplikativ berücksichtigt. Ein weiterer möglicher Schritt wäre die Differenzierung des Gradienten nach Bundesland.

$$CO_2(LF, d, t)_{\text{Straße}} = \sum_{j \in FZ} \left(t * \sum_{l \in L} \left(eG_l * \sum_{i \in S} LF_j * eFZ_j * d_{j,i,l} * eS_i \right) \right)$$

FZ : Fahrzeugtyp $\{PKW, LNF_B, LNF_D, SNF_{\text{klein}}, SNF_{\text{mittel}}, SNF_{\text{groß}}\}$

eFZ_j : Emissionsfaktor für Fahrzeugtyp j [g/tkm]

S_i : Straßentyp $\{Innerorts = 1.28, Außerorts = 0.88, Autobahn = 1.00\}$

eS_i : Emissionsfaktor für Straßentyp i

LF_j : Ladefaktor linear für Fahrzeugtyp j $\{0.85, ..., 1.15\}$

$d_{j,i,l}$: Entfernung von Fahrzeugtyp j für Straßentyp i in Land l [km]

L : EU-Länder $\{AT, BE, CH, CZ, DE, ...\}$

G : Gradient eines Landes
 $\{flach = 0.95; hügelig = 1.00; gebirgig = 1.05\}$

eG_l : Emissionsfaktor eines Gradienten für Land l

t : transportiertes Gewicht [t]

3.3.3 Einfaches Emissionsmodell Schiene

Die Dominanz einer Elektro-Traktion im Schienentransport und die damit verbundene Divergenz zwischen den Ländern für den Kohlenstoffdioxidanteil am Strom-Mix stellt ein Definitionsproblem dar. Anders formuliert bedeutet das, dass eine Zuordnung des genutzten Strom-Mixes zu den Erzeugern kaum möglich ist. Tabelle 3.4 zeigt einen Länderspezifischen CO₂-Emissionsunterschied, der weit über den Faktor 10 hinausgeht. Der Einfluss des Gradienten im Schienenverkehr ist deutlich höher, als der im Straßenverkehr. Ferner berücksichtigt das Modell den Typ eines Gutes, also ob es sich um ein voluminöses oder eher schweres Gut handelt. Die Emissionsfaktoren für die Fahrzeuge sind in Wh/tkm angegeben, damit die notwendige Umrechnung für das jeweilige Land möglich wird.

$$CO_2(d, t)_{\text{Schiene}} = \sum_{j \in FZ_E} \sum_{i \in Fr} t * \left(\sum_{l \in L} eFZ_{j,i} * d_{j,i,l} * eS_l * eG_l \right) + \sum_{j \in FZ_D} \sum_{i \in Fr} t * \left(\sum_{l \in L} eFZ_{j,i} * d_{j,i,l} * eG_l \right)$$

$$FZ : FZ_D \cup FZ_E$$

$$FZ_D : \text{Fahrzeugtyp Diesel } \{ Diesel_{kurz}, Diesel_{mittel}, Diesel_{lang} \}$$

$$FZ_E : \text{Fahrzeugtyp Elektro } \{ Elektro_{kurz}, Elektro_{mittel}, Elektro_{lang} \}$$

$$eFZ_{j,i} : \text{Stromverbrauch für Fahrzeugtyp j und Fracht i [Wh/tkm]}$$

$$d_{j,i,l} : \text{Entfernung für Fahrzeugtyp j mit Fracht i in Land l [km]}$$

$$Fr : \text{Frachttyp } \{ schwer, mittel, leicht \}$$

$$L : \text{EU-Länder } \{ AT, BE, CH, CZ, DE, \dots \}$$

$$eS_l : \text{Emissionsfaktor der Stromerzeugung eines Landes l [g/Wh]}$$

$$G : \text{Gradient eines Landes} \\ \{ flach = 0.83; hügelig = 1.00; gebirgig = 1.20 \}$$

$$eG_l : \text{Emissionsfaktor eines Gradienten für Land l [g/tkm]}$$

$$t : \text{transportiertes Gewicht [t]}$$

3.3.4 Einfaches Emissionsmodell Wasser

Relativ leicht und gleichzeitig hilfreich fällt hier die Unterscheidung in See- und Binnenschiff aus dem Blickwinkel der Emissions-Klassifizierung. Für die Binnenschifffahrt muss ferner in fünf weitere Kategorien unterschieden werden, um hohe Abweichungen zu vermeiden, denn eine Binnenschifffahrt flussaufwärts ist mit Schleusen um ca. 40% effizienter.

$$CO_2(d, t)_{\text{Wasser}} = \sum_{j \in FZ_S} eFZ_j * d_j * t + \sum_{j \in FZ_B} \left(t * \sum_{i \in F} eFZ_j * d_{j,i} * e_{j,i} \right)$$

$FZ :$ $FZ_S \cup FZ_B$

$FZ_S :$ Fahrzeugtyp Seeschiff $\{Tanker_{schwer}, Frachter_{mittel}, Frachter_{leicht}\}$

$d_j :$ Entfernung für Fahrzeugtyp j [km]

$FZ_B :$ Fahrzeugtyp Binnenschiff $\{schwer, mittel, leicht\}$

$eFZ_j :$ Emissionsfaktor für Fahrzeugtyp j [g/tkm]

$d_{j,i} :$ Entfernung für Fahrzeugtyp j und Flussbewegungsrichtung i [km]

$F_i :$ Flussbewegungsrichtung
 $\{ flussabwärts_{ohne\ Schleuse}; flussaufwärts_{ohne\ Schleuse};$
 $flussabwärts_{mit\ Schleuse}; flussaufwärts_{mit\ Schleuse}; kein\ Fluss\}$

$e_{j,i} :$ Emissionsfaktor für Fahrzeugtyp j und Flussbewegungsrichtung i
 [g/tkm]

$t :$ transportiertes Gewicht [t]

3.3.5 Einfaches Emissionsmodell Luft

In Deutschland ist der relative Lufttransportanteil an der Gesamttransportleistung sehr gering. Daher werden im folgenden Modellansatz die zwei elementaren Einflussgrößen Flugzeugtyp (Frachtflug und Kombiflug, hier Passagierflug genannt) und Zyklus (Inland und International) zur Emissions-Klassifizierung herangezogen. Ein Flug gilt dabei als „International“, wenn die zurückgelegte Entfernung 1000km übersteigt. Ab 2012 wird es nötig sein, diesen Ansatz um einen Fixkostenanteil zu erweitern, weil ab diesem Zeitpunkt der Emissionshandel auch auf den Luftverkehr ausgeweitet wird (s. Lufttransport 3.2.3).

$$CO_2(d,t)_{Luft} = \sum_{j \in FZ} \left(t * \sum_{i \in Z} e_{FZ_j} * d_{j,i} * e_{j,i} \right)$$

FZ : Flugzeugtyp $\{Frachtflugzeug, Passagierflugzeug\}$

Z_i : Zyklus $\{Inland, International\}$

e_{FZ_j} : Emissionsfaktor für Flugzeugtyp j [g/tkm]

$d_{j,i}$: Entfernung für Flugzeugtyp j und Zyklus i [km]

$e_{j,i}$: Emissionsfaktor für Flugzeugtyp j und Zyklus i [g/tkm]

t : transportiertes Gewicht [t]

4. *CO₂-Emissionsmodellierung in der Lagerhaltung*

4.1 Einführung in die Lagerhaltung

Aus der Vielfalt der verfügbaren Läger ist eine Fülle an Klassifizierungen entstanden. Je nach Kriterium entstehen differente Möglichkeiten der Merkmalsunterscheidung. Die in den folgenden Unterkapiteln vorgestellten Einteilungen sind alle vor dem Hintergrund einer sinnvollen Clusterbildung der Läger unter Berücksichtigung der Energieressourcenbeanspruchung entstanden. Bisher existiert keine Lagerklassifizierung, deren Hauptkriterium der Energieeinsatz ist. In Anbetracht dieser Tatsache werden selektiv die relevanten Typunterscheidungen herangezogen.

4.1.1 Begriffsdefinitionen

Die VDI-Richtlinie 2411 versteht unter **Lagern** jedes geplante Liegen von Arbeitsgegenständen im Materialfluss, das diesen gewollt unterbricht. Das Lagern wird auch als Lagerung bezeichnet. Ein Lager ist ein Raum oder eine Fläche zum Aufbewahren von Stück- und/oder Schüttgut, das mengen- und/oder wertmäßig erfasst wird. Der gesamte Lagervorgang ist als Transformationsprozess zu betrachten. Dabei erfahren logistische Objekte Systemzustandsänderungen hinsichtlich Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung und Qualität [tenHom2007].

Elementare Prozesse in Lägern sind das Einlagern von Lagereinheiten, das Kommissionieren, Bereitstellen und Lagern der Lagereinheiten und abschließend das Auslagern einer Lagereinheit. Ein Materialfluss ist die physische Warenbewegung von einem Ort zum anderen. Die Organisation von Materialflüssen innerhalb eines Unternehmens wird als **Intralogistik** bezeichnet³⁵. Diese steuert im Rahmen des Supply Chain Management den Materialfluss entlang der Wertschöpfungskette³⁶. Aufgrund der Bedeutung der Intralogistik in der Logistikkette, hier vor allem unter dem Gesichtspunkt der Energieressourcenbeanspruchung, soll noch ein umfassenderer Definitionsbereich für diesen Begriff angegeben werden. Die Weltleitmesse für Intralogistik CeMAT in Hannover definiert wie folgt³⁷:

- Intralogistik als Branchenname umfasst die Organisation, Durchführung und Optimierung innerbetrieblicher Materialflüsse in Unternehmen der Industrie, des Handels und in öffentlichen Einrichtungen mittels technischer Systeme und Dienstleistungen.
- Intralogistik steuert im Rahmen des "Supply Chain Managements".

³⁵ <http://www.logistik-lexikon.de/ccIiid993.html> (09.05.2009)

³⁶ <http://www.logipedia.org/lexikon/intralogistik> (09.05.2009)

³⁷ <http://www.cemat.de/17520> (09.05.2009)

- Intralogistik beschreibt den innerbetrieblichen Materialfluss, der zwischen den unterschiedlichsten "Logistiknoten" stattfindet.
- Intralogistik ist der zukunftsweisende Begriff einer Branche, die allein in Deutschland tausende Unternehmen umfasst, vom Hebezeug- und Kranhersteller über Gabelstapler- und Lagertechnik-Produzenten sowie über Softwareentwickler bis hin zu kompletten Systemanbietern.

Als Gleichung formuliert:

$$\begin{aligned}
 & \text{Intralogistik} \\
 &= \sum \text{Logistiknoten} \\
 &+ \sum \text{interne Informationsflüsse} \\
 &- \sum \text{außerbetriebliche Transportlogistik}
 \end{aligned}$$

Ein Materialflusssystem setzt sich aus mehreren Subsystemen zusammen. Verpackungssysteme, Fördersysteme, Lagersysteme, Sortier- und Verteilsysteme, Kommissioniersysteme und Umschlagssysteme sind Subsysteme der Intralogistik.

Jedes **Lager** enthält eine Anzahl an Lagerplätzen. Jeder **Lagerplatz** kann über mehrere Stellplätze verfügen und jeder **Stellplatz** kann mehrere **Ladeeinheiten** fassen.

Die **Lagerplatzkapazität** ist die maximale Anzahl an Ladeeinheiten auf einem Lagerplatz.

$$\text{Lagerfüllgrad} = \frac{\text{Anzahl der belegten Lagerplätze}}{\text{Lagerkapazität}} \leq 1$$

$$\text{Umschlagshäufigkeit} = \frac{\text{Lagerabgänge} / \text{Zeitraum}}{\text{Ø Lagerbestand}}$$

Eine **Ladeeinheit** ist im Logistik Wörterbuch VNL³⁸ definiert als „eine physische Einheit zur Zusammenfassung von Gütern, um den Transport, den Umschlag und die Lagerung zu erleichtern. Ladeeinheiten bauen auf einem genormten Ladungsträger, meist einer Flachpalette, auf“. In der VDI Richtlinie 3968 wird dieser Begriff näher definiert.

Lagereinheit bezeichnet Güter, welche mit einem Lagerhilfsmittel in einem Lager aufbewahrt werden. Sie ist anders formuliert das im Lagerbereich eingesetzte Handhabungsgerät und umfasst damit sowohl das Lagergut als auch das Lagerhilfsmittel (vgl. [tenHom2008], S. 159).

Ladehilfsmittel (LHM) werden zur Lade- bzw. zur Lagereinheitenbildung eingesetzt (Ladeeinheit, Lagereinheit). Hierbei unterscheidet man abhängig von ihrer Funktion LHM mit tragender Funktion (z. B. Palette, Werkstückträger), tragender und umschließender Funktion (z. B. Gitter-

³⁸ Verein Netzwerk Logistik

boxpalette) sowie tragender, umschließender und abschließender Funktion (z. B. Container, Tankpalette) (vgl. [tenHom2008], S. 154f).

Die VDI-Richtlinie 3590a definiert das **Kommissionieren** als „das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen aufgrund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen“.

Die **Brutto-Lagerfläche**³⁹ ergibt sich aus der Lagerfläche unter Abzug der Flächen für Lagerbüros, Betriebsräume, Bereitstellung für Lagergut, Leergut, Auf- und Abgabestationen, Be- und Entladeplätze.

Die **Netto-Lagerfläche**³⁹ ergibt sich aus der Lager-Bruttofläche abzüglich den Verkehrs- und Manipulationsflächen für die Lagerbediengeräte. Die Lager-Nettofläche entspricht der mit Regalen belegten Flächen.

Fördersysteme lassen sich grundsätzlich in Stetigförderer und Unstetigförderer unterscheiden. Dabei kennzeichnet **Stetigförderer** die kontinuierliche Warenflussbewegung von einer Quelle bis zur Senke. Für die ortsfeste Einrichtung findet die Be- und Entladung im laufenden Betrieb statt. Dadurch können hohe Durchsatzraten erzielt werden. Paradebeispiel dafür sind Förderbänder. Der Transport für **Unstetigförderer** „erfolgt in mehreren, zeitlich hintereinander, teilweise auch gleichzeitig ablaufenden Einzelbewegungen (z. B. Anfahren, Senken, Heben der Last usw.)“ (vgl. [tenHom2008], S. 298). Typische Beispiele dafür sind Stapler, Kran und Regalbediengerät. Diese stoppen zum Be- und Entladen und weisen Leerfahren auf.

Die **Nennleistung** eines Motors ist die auf dem Typenschild des Antriebmotors angebrachte Leistung. Die Nennleistung muss immer größer gleich der Anlaufleistung sein. Diese setzt sich aus der Vollastbeharrungsleistung (Arbeitsleistung bei Vollast im stationären Betrieb) und der Beschleunigungsleistung (Leistungsanteil, um die geradlinig und drehend zu bewegend Massen aus dem Ruhezustand in den stationären Betriebszustand zu bringen) zusammen [Martin2009].

4.1.2 Lagersysteme / Lagerarten

In Anlehnung an [tenHom2007] werden hier kurz die vier Grundtypen von Lägern aufgeführt. Kriterium der Differenzierung ist die Aufgabe der Läger:

- Sammellager
- Verteillager / Distributionslager
- Pufferlager
- Vorratslager

³⁹ <http://www.lagersystem.net/lagerkennzahlen.php> (09.05.2009)

Abhängig vom Typ sind die Aufgaben eines Lagers eine Zeitdauer zu überbrücken (Pufferlager, Vorratslager) oder einen Wechsel der Zusammensetzungsstruktur einer Ware zwischen Zu- und Abgang herbeizuführen (Sammellager, Distributionslager). Ändert sich die Zusammensetzung nicht, so spricht man von einem Einheitenlager, ansonsten handelt es sich um ein Kommissionierlager. Der Ausgleich von Ein- und Ausgangsströmen ist ebenfalls Aufgabe von Lagern.

Vorratslager sollen Bedarfsschwankungen abfangen und kommen häufig für die Materialbereitstellung in der Produktion zum Einsatz. Typische Merkmale sind unregelmäßige Zu- und Abgänge und sie weisen im Vergleich zu Pufferlagern eine geringere Umschlaghäufigkeit auf. Pufferlager kennzeichnet die nahezu konstante Zahl der Ein- und Auslagerungsvorgänge je Zeiteinheit. Der häufigste Typ von Lagern bei Handelsunternehmen ist das Verteillager. Dieses bezweckt neben der Warenbereitstellung und Lagerung wesentlich die Zusammensetzungsänderung der Ladeeinheiten zwischen der Ein- und Auslagerung. Charakteristisch dafür ist die Regelmäßigkeit.

Obwohl alle Lagersysteme im konkreten sehr unterschiedlich sind, so gibt es doch Gemeinsamkeiten, die die Handhabung von Gütern betrifft. Diese sogenannten Grundfunktionen beschreiben in ihrer Sequenz gleichzeitig den Materialfluss (vgl. Abbildung 4.1). Nach Warenannahme und Prüfung anhand gegebener Bestellinformationen aus dem Lagerverwaltungssystem auf Vollständigkeit und Qualität wird je nach Notwendigkeit entweder eingelagert, kommissioniert oder die Ware verlässt das Unternehmen direkt über den Versand.

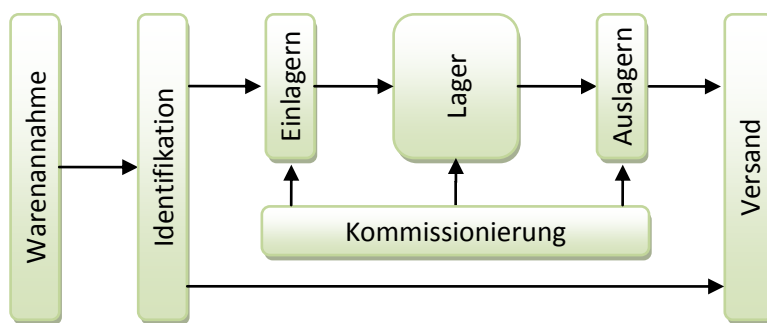


Abbildung 4.1: Verknüpfung der Grundfunktionen von Lagersystemen über einen gerichteten Materialfluss

Quelle: (vgl. [tenHom2007], S. 53)

Eine Fülle von Optionen steht dafür bereit, eingetroffene Waren nach der Identifikation zu transformieren. Je nach Lagerführung, erfolgt der Materialfluss manuell, teilmanuell, mit Staplern oder vollautomatisch mit Paletten- oder Behälterfördersystemen, fahrerlosen Transportsystemen oder Regalbediengeräten (RBG). Äquivalent kann die Ware ausgelagert werden. Der Kommissioniervorgang kann in Abhängigkeit von der Entnahme in die beiden Klassen „Ware-zum-Mann“ oder „Mann-zur-Ware“ geteilt werden. Dabei erfolgt die Entnahme der Lagereinheit entweder maschinell (Ware-zum-Mann), wird an einem Kommissionierplatz bereitgestellt und anschließend wieder eingelagert oder sie erfolgt direkt vom Lagerplatz (Mann-zur-Ware) durch einen Menschen. Die Einordnung der beiden Systeme kann so aussehen:

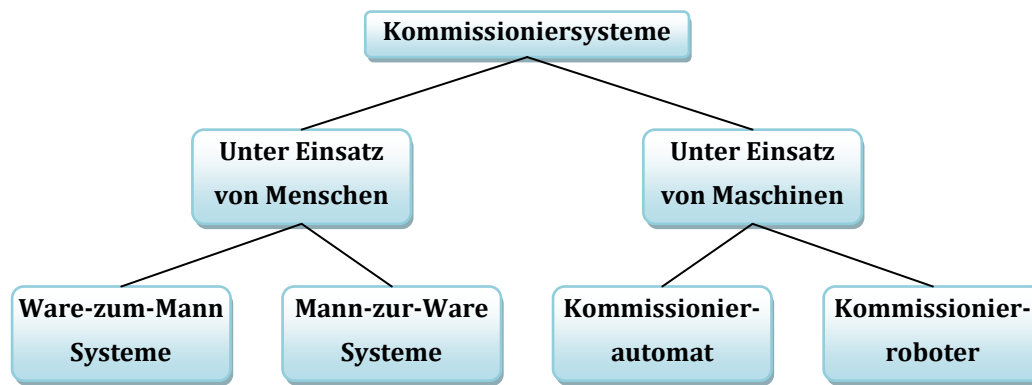


Abbildung 4.2: Arten der Kommissioniersysteme

Quelle: <http://ebz-beratungszentrum.de/logistikseiten/artikel/kommissionierung.htm> (09.05.2009)

Es lassen sich viele Unterscheidungsmerkmale zur Klassifizierung von Lagerarten heranziehen. Die folgende Tabelle enthält einige davon.

Lagerart	Unterscheidungsmerkmal
• Eigenlager • Fremdlager • Kommissions- bzw. Konsignationslager	Eigentümer
• Beschaffungslager • Absatzlager	Marktbezeichnung
• Zentrallager • dezentrales Lager	Zentralisierungsgrad
• Hauptlager • Nebenlager	Bedeutung
• Eingangslager • Zwischenlager • Abgangslager	Wertschöpfungsprozess
• Materiallager • Fertigproduktlager • Handelswarenlager • Werkzeuglager • Ersatzteillager • Büromateriallager u. a.	gelagerte Güter
• Außenlager • internes Lager	Standort
• offenes Lager • halb offenes Lager	Lagerbauweise

• festes Gebäude	
• flaches Gebäude	
• hohes Gebäude	
• statisches Lager	Position des Lagergutes während der Lagerdauer
• dynamisches Lager	
• manuell bedientes Lager	Automatisierungsgrad
• mechanisiertes Lager	
• automatisiertes Lager	
• Bodenlager	Lagertechnik
• Blocklager	
• Zeilenlager	
• Regallager	
• Regallager	Lagereinrichtungen
• Palettenlager	
• Behälterlager	
• Schranklager	
• Vitrinenlager u. ä.	
• Lager mit Stetigfördern	Lagertransportmittel
• Lager mit Unstetigfördern	

Tabelle 4.1: Lagerarten und deren Unterscheidungskriterium

Quelle: [Gie2007]

4.1.3 Lagermittel

Abgesehen vom Bestimmungszweck eines Lagers kann eine Klassifizierung unter diversen weiteren Kriterien erfolgen. Einige davon sind z. B. nach [tenHom2007]:

- Lagergut
- Lagermittel
- Ladehilfsmittel (LHM)
- Bauform
- Bauhöhe
- Funktion in der Distributionsstruktur
- Gefahrenklasse

In diesem Kapitel soll in aller Kürze das Lagermittel als Unterscheidungskriterium der Läger herangezogen werden. Die Intention dieser Wahl ist auf die damit verbundene Wegeinsparung in der Einlagerung, Kommissionierung und Auslagerung zurückzuführen (Block oder Zeile). Eine Grobeinteilung wäre die Bodenlagerung, die statische und dynamische Regallagerung und Fördermittel mit Pufferfunktionen. Im Anschluss daran wird die Besonderheit einer Tiefkühl Lagerung vorgestellt.

4.1.3.1 Bodenlagerung

Diese Form der Lagerung erlaubt es das Lagergut sehr flexibel und nach Belieben abzustellen. Häufig wird aber der Übersichtlichkeit halber in Block oder Zeile gelagert. Die Stapelhöhe hängt dabei entscheidend von der Gütereigenschaft, den verwendeten Ladehilfsmittel (z. B. Gitterbox, Karton, ...) und der Bedientechnik (z. B. Kran, Stapler, ...) ab.

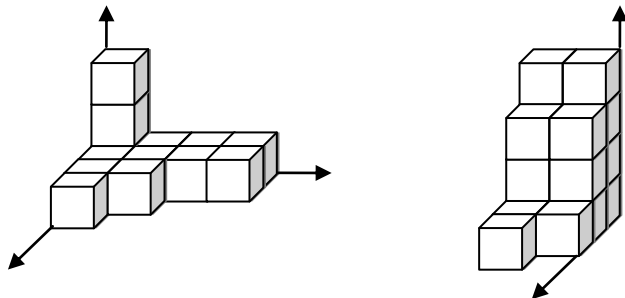


Abbildung 4.3: Blocklagerung (links) und Zeilenlagerung (rechts)

Obwohl die Bodenlagerung geringe Investitionskosten verursacht und bezüglich der Lagerfläche ist flexibel, erfolgt die Bedienung manuell. In einem Bodenblocklager werden die Lagereinheiten hinter-, über- und nebeneinander angeordnet. Diese Anordnung ermöglicht einerseits eine effektive Flächenausnutzung, erschwert aber gleichzeitig den unmittelbaren Zugriff auf ein beliebiges Gut. Sie eignet sich vor allem für eine LIFO-Strategie mit monostrukturierten Lagern (z. B. Metall, Getränke, ...). Umgekehrtes gilt für die Bodenzeilenlager. Hier steht ein geringer Raumausnutzungsgrad einer hohen direkten Zugriffsmöglichkeit gegenüber.

4.1.3.2 Statische Regallagerung

Ein Regallager bietet im Vergleich zu einem Bodenlager die Option mögliche Bauhöhen lagertechnisch auszunutzen. Die Höhe hängt im Wesentlichen von der Bedientechnik ab. Ein manuell bedientes Lager ist mit ca. 2m der menschlichen Körpergröße angepasst. Kommen aber Regalbediengeräte zum Einsatz, so sind Höhen bis zu 55m keine Seltenheit. Regallager können ähnlich wie Bodenlager in **Block- und Zeilenregallager** gegliedert werden. Es ergibt sich dieselbe Problematik für die Regallagerung: kompakte Raumausnutzung versus beliebigen Zugriff auf einzelne Lagereinheiten. Ferner erfordern die meisten Regallagertypen genormte Lagerhilfsmittel. Diese Erfordernis setzt Waren gleicher Art voraus.

Ein **Fachbodenregal** hat geschlossene Fachböden aus Holz oder Stahl. Typische Einsatzgebiete sind manuelle Handbedienungslager bis 2m (mit Leiter bis 3m) für Kleinteile, Kartonagen und Behälter. Kommen Kommissionierstapler zum Einsatz, so können diese Lager eine Höhe bis 12m erreichen.

Palettenregallager finden die weiteste Verbreitung. Gelagert wird die Ware mit dem Lagerhilfsmittel in einem Lagerplatz. Gängige LHM dafür sind Paletten, Gitterboxen und Corletten. Bedient werden die Regale mit einem Schmalgang- oder Kommissionierstapler. Das Deutsche

Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. regelt in RAL-RG 614/2 Güte- und Prüfbestimmungen für Palettenregale bis 12m Höhe. Palettenregallager die höher sind, werden als Hochregallager bezeichnet.

Für kleinere Artikel in geringerer Menge sind Paletten zu groß. In diesem Fall kommen **Behälterläger** zum Einsatz. Behälter, Kartonagen und Tablare sind hier übliche LHM. Mit einer Höhe von 7m – 18m gehören diese eher zu großen Lägern. Die Bedienung erfolgt über ein Regalbediengerät mit Behälter-LAM (Lastaufnahmemittel).

Weitere Formen der Lagermittel sind nach [tenHom2007]:

Form	Lagergut	Höhe	Regalbedienung
Einfahr- und Durchfahrregal	Paletten, Gitterboxen	bis 8m	Stapler
Läger mit Kanal- und Verteilfahrzeugen	Behälter, Paletten		
Shuttle-Systeme	Behälter		
Schubladenregal			
Wabenregal	Langgut, Stangenmaterial		Kran, Stapler, RBG mit Kettenfördersystem und Teleskop
Kragarmregal	Langgut, Tafelmaterial	bis 12m	Stapler, Stapelkran, RBG
Liftsysteme	Kleinteile, Behälter, Kartonagen, Paletten		

Tabelle 4.2: Diverse Lagermittel der statischen Regalläger

Quelle: [tenHom2007]

4.1.3.3 Dynamische Regallagerung

Mehrere Gründe geben dazu Anlass die Warenlagerung dynamisch zu gestalten. Statische Systeme werden immer mehr durch dynamische ersetzt. Die Vorteile liegen auf der Hand⁴⁰:

- bessere Raumausnutzung (Kombination der Block- und Zeilenlagertechnik)
- kürzere Wege
- weniger Bediengeräte
- geringere Kosten

Eine dynamische Regallagerhaltung kennzeichnet die Bewegung der Ware/Lagereinheit im Regal (Verschiebe- und Umlaufregale) und/oder die Bewegung eines kompletten Regals (verschiedene Formen der Durchlaufregale). Dies sind die beiden elementaren kinematischen Unterscheidungsprinzipien.

⁴⁰ <http://www.saar-lagertechnik.de/download/das-dynamische-lager.pdf> (09.05.2009)

Eine relativ simple Umsetzung der Lagereinheitenbewegung ist die Nutzung der Rollentechnik mit einer leichten Neigung in Regalen. Hier besteht die Möglichkeit ein Durchlauf- oder Einschubregal zu verwenden. Beim Durchlaufregal wird an einem Ende die Ware eingelagert und auf der anderen Seite entnommen. Einschubregale bieten dagegen den großen Vorteil die Raumausnutzung noch besser zu gestalten. Dafür reichen häufig ein einziger Durchfahrtweg und ein einziges Regalbediengerät, um Zugriff auf das gesamte Artikelsortiment zu haben. Vorausgesetzt wird aber eine artikelreine Lagerung je Lagerplatz.

Angetriebene Stetigförderer mit Rollenbahnen, Ketten- oder Bandfördern führen zu einem erhöhten geräte- und steuertechnischen Aufwand, sofern die Ladeeinheiten nicht über die Schwerkraft selber nachrücken.

Für Ware-zum-Mann-Systeme eignen sich Umlaufregale, die es in der Horizontal- (Regalzeile) und Vertikalführung (Regalspalte) gibt.

4.1.3.4 Fördermittel mit Pufferfunktion

Abzuwägen gilt es, ab welcher Verweildauer eines Artikels im Unternehmen sich die Einlagerung lohnt. Bei Artikeln in geringer Menge und kurzer Lagerzeit kann ein Lager entbehrlich sein, wenn entsprechende Fördermittel mit Pufferfunktion verfügbar sind. Fördermittel können prinzipiell in Stetig- und Unstetigfördern unterschieden werden. Wichtig für die Energiebetrachtung ist es deshalb, weil Stetigförderer eher elektrisch betrieben werden müssen, als Unstetigförderer.

4.1.3.5 Tiefkühlager

Besondere Anforderungen an Tiefkühlager machen es bisher unmöglich standardisierte Lager- und Fördertechniken zu verwenden. Es sind immer Modifikationen an Bediengeräten, vor allem an Lagerhilfsmittel usw. vorzunehmen. Der jedoch stärker wachsende Lebensmittel- und Pharmamarkt fordert zunehmend Fördermittelstandards für Kühl- und Tiefkühlager. Lebensmittel erfordern z. B. eine Lagertemperatur von -28°C und eine Luftfeuchtigkeit von 30 – 40%. Diese Anforderung ist intuitiv mit einem hohen Energieeinsatz in Verbindung zu bringen. Die notwendigen Temperaturen müssen konstant über die gesamte Transportkette eingehalten werden. Je nach Außentemperatur, herrschen Temperaturunterschiede von bis zu 55°C zur Lagertemperatur. Diese enorme Differenz muss an allen Öffnungen sichergestellt werden. Ermöglicht wird dies z. B. durch Kaltluftvorhänge, Thermoschleusen oder Luftschleier. Tiefkühlager haben ferner nicht ohne weiteres die Möglichkeit blockweise zu lagern, da dies zu Wärmenestern führen kann. Damit ergibt sich die Notwendigkeit in Zeile zu lagern und aus Energieeffizienzgründen ist eine möglichst hohe Raumausnutzung anzustreben, um den Kühlaufwand zu minimieren.

Der Leitfaden [VdS2008] für den Brandschutz im Kühl- und Tiefkühlager geht auf die Planung, Ausführung und den Betrieb der Lager ein. Auffallend ist der wesentlich höhere Energiebedarf allein unter Berücksichtigung des Brandschutzes beim Bau und der Nutzung des Lagers.

4.1.4 Lagerorganisation

In diesem Punkt werden wichtige Kennzahlen und die Lagerplatzvergabe betrachtet.

statische Größen	dynamische Größen
Artikelanzahl	Wareneingänge/Tag
ABC-Artikelverteilung	Warenausgänge/Tag
Gesamtdurchschnittsbestand	Umlagerungen/Tag
Anzahl Paletten / Artikel / Packstücke	Umschlag/Jahr
Lagerkapazität	Lagerreichweite
Lagerplatzkapazität	Auftragszahl/Tag
Kosten/Artikel	Positionen/Auftrag
ABC-Kostenverteilung	Positionen/Tag
Ø Gesamtbestandskosten	Zugriffe/Positionen
Ø Bestandskosten/Artikel	Gewicht/Zugriff
	Gesamtumschlagskosten

Tabelle 4.3: Wichtige Kenngrößen der Lagerorganisation

Quelle: [tenHom2007]

Strategie	Lagerplatzvergabestrategien			
	feste Lagerplatzvergabe	freie Lagerplatzvergabe innerhalb fester Bereiche	freie Lagerplatzvergabe	
	Festplatzlagerung	Zonung	Querverteilung	chaotische Lagerung
Kurzbeschreibung	fester Lagerplatz für jeden Artikel	Lagerung der Ladeeinheiten nach Umschlagshäufigkeit	Lagerung der Ladeeinheiten eines Artikels über mehrere Gänge	Lagerung der Ladeeinheiten auf beliebigen freien Lagerplätzen
Vorteile	Artikel können in einer Reihenfolge sortiert angeordnet werden (schwer nach leicht; Schrauben zu Muttern)	Erhöhte Umschlagsleistung	Zugriffssicherheit bei Ausfall eines Fördermittels; höhere Leistung durch parallele Auslagerung	erhöhte Ausnutzung der Lagerkapazität; platzgenaue ABC-Zonung

Strategie	Ein- und Auslagerungsstrategien				
	FIFO	Mengenanpassung	wegoptimierte Ein- und Auslagerung	LIFO	Restmengenbevorzugung
Kurzbeschreibung	Auslagerung der zuerst eingelagerten Ladeeinheit	Auslagerung voller und angebrochener Ladeeinheiten	Auslagerung der Ladeeinheiten des Artikels mit	Auslagerung der zuletzt eingelagerten Ladeeinheit	Anbruch immer zuerst auslagern

	eines Artikels	je nach Auf- tragsmenge	dem kürzesten Bedienweg	eines Artikels	
Vorteile	Vermeidung von Alterung	Erhöhte Raum- ausnutzung, weniger Rück- lagerung	Fahrwegmini- mierung	Vermeidung von Umlage- rungen bei bestimmten Lagertechniken	nur ein ange- rochenes La- dehilfsmittel; bessere Raum- ausnutzung

Tabelle 4.4: Lagerbewirtschaftungsstrategien**Quelle:** [tenHom2007]

4.1.5 Fördersysteme

Gerade für Fördersysteme ist die Klassifizierung enorm schwierig. Letztendlich sind alle Lager Unikate und ähnlich verhält es sich mit den dafür notwendigen Fördersystemen. Nach Angaben von Vanderlande Industries, einem Hersteller für automatische Materialflusssysteme, sind von ihnen keine zwei gleiche Förderanlagen installiert worden.

Ähnlich wie bei der Regallagerung wird hier auch in stetige und unstetige Fördermittel unterschieden. Diese Unterscheidung ist deshalb sinnvoll, weil Stetigförderer einen konstanten Energiebedarf aufweisen und abhängig von der Auslastung i. d. R. Energieeffizienter sind. Nach [Martin2009] beträgt die relative Einschaltdauer (ED) der Unstetigförderer zwischen 20 und 60%. Stetigförderer kommen dagegen i. d. R. auf 100%. Ermittelt wird dieser Quotient wie folgt:

$$ED = \frac{\sum \text{Einschaltzeiten}}{\sum \text{Einschaltzeiten} + \text{Pausen}} * 100 \text{ [\%]}$$

Stetigfördern kommt zusätzlich das bessere Verhältnis von Eigengewicht der Förderanlage zu der transportierten Ware zugute. Der geringe Bedienungsaufwand und der einfache modulare Aufbau führten zu einer starken Verbreitung von Stetigfördern bei Systemen mit bekanntem Layout, hoher Leistung und standardisierten Ladehilfsmitteln. Liegt die Präferenz jedoch darin, flexibel auf bauliche Änderungsmaßnahmen oder Produktionsverfahrensänderungen reagieren zu können, werden Unstetigförderer bevorzugt [tenHom2007]. Im nächsten Schritt können dann Förderer in Abhängigkeit vom Warentyp in diskrete (Stück- und Schüttgut), diskret-kontinuierliche (Stückgut) und kontinuierliche (Schüttgut) Fördersysteme unterteilt werden (siehe Abbildung 4.4).

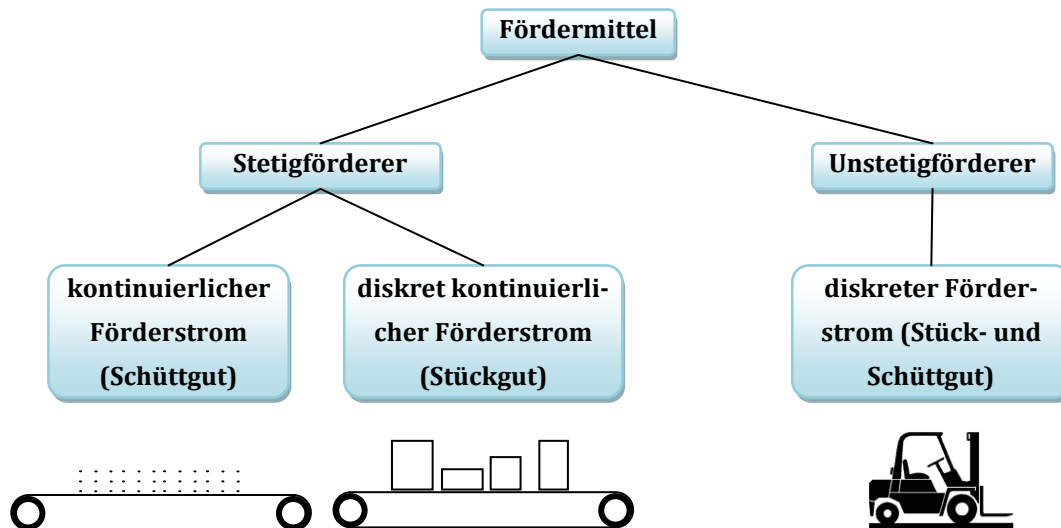


Abbildung 4.4: Fördermittelklassifizierung in Abhängigkeit der Förderkontinuität und Fördergut

Hilfreich wäre es die Antriebsart als primäres Unterscheidungskriterium heranzuziehen. Es ist aber einfach unmöglich eine vollständige Zuweisung der Fördermittel in die jeweiligen Antriebe vorzunehmen. Folgende Antriebsarten lassen sich ausmachen [Martin2009]:

- Manueller Antrieb
- Schwerkraftantrieb
- Motorischer Antrieb
 - Verbrennungsmotorischer Antrieb (Benzin, Diesel, Treibgas)
 - Elektromotorischer Antrieb
 - Drehstrommotor (Synchron- oder Asynchronmotor)
 - Gleichstrommotor (Reihen-, Neben- oder Doppelschlussmotor)
 - Hybrid Antrieb (Benzin/Treibgas, Diesel/Gleichstrom, Drehstrom/Gleichstrom)

Der vermutlich beste Ansatz diesem Problem trotzdem gerecht zu werden ist im Bereich der Stetigförderer die Differenzierung nach Mechanische Förderer, Schwerkraftförderer und Strömungsförderer⁴¹ (pneumatisch, hydraulisch) vorzunehmen. Für Unstetigförderer gilt diese Einteilung nicht.

Für die Leistungsberechnung eines Motors in kW sind gleichförmige (geradlinige) und drehende Bewegungen zu unterscheiden. Gekennzeichnet ist die geradlinige Bewegung durch eine konstante Geschwindigkeit, also einer Beschleunigung gleich Null. Umgesetzt wird diese Arbeitsbewegung durch Arbeitszylinder (Schubmotoren). Für drehende Bewegungen kommen z. B. Getriebemotoren mit rotierenden Wellen (Drehmotor) zum Einsatz. Hinsichtlich der Berechnung unterscheiden diese sich wie folgt:

⁴¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Stetigförderer> (09.05.2009)

geradlinige Bewegung:

$$P = \frac{Fv}{1000} = \frac{mv^2}{1000t} \quad [kW]$$

P in kW Leistung

F in N Kraft $[F = ma = m(v/t)]$

v in m/s Geschwindigkeit

m in kg Masse

t in s Zeit

drehende Bewegung:

$$P = \frac{M\omega}{1000} \quad [kW] \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi n$$

P in kW Leistung

M in Nm Moment $[M = J\alpha]$

ω in rad/s Winkelgeschwindigkeit $[\omega = \alpha t]$

n in 1/min Nenndrehzahl

J in kgm² Massenträgheitsmoment

α in s⁻² Winkelbeschleunigung

Beispiel für den Zusammenhang von Drehmoment und Leistung⁴²

Ein Verbrennungsmotor, der bei $n = 2000$ Umdrehungen pro Minute ein Drehmoment von 350 Nm erreicht, gibt somit bei dieser Drehzahl auch eine Leistung von

$$P = \frac{M\omega}{1000} = \frac{350Nm \cdot 2\pi \cdot 2000}{1000 \cdot 60s} \approx 73,3kW \quad \text{ab.}$$

4.1.5.1 Stetigförderer

In [Martin2009] ist annähernd die gewünschte Stetigförderer-Einteilung zu finden. Bis auf einige wenige, sind alle Stetigförderer-Antriebe elektrisch betrieben. Laut Intralogistik-Anlagenherstellern ist der Anteil der nicht elektrisch betriebenen Stetigförderer marginal. Interessant sind in diesem Zusammenhang (in Abbildung 4.5 rot markiert) Förderer ohne Energiezufuhr. Abhängig vom Durchsatz, dem Einsatzgebiet, der Transportlänge und dem Warentyp bietet sich eine Schwerkraftfördertechnik geradezu kostenschonend und umwelteffizient zum Dauereinsatz an. Häufig finden schwerkraftbetriebene Systeme ohne horizontale Neigung in

⁴² <http://de.wikipedia.org/wiki/Drehmoment>

manuellen Person-zur-Ware Kommissioniersystemen Verwendung. Weitere Anwendung der Rollen- und Kugelbahnen sind im Bereich der Montage, der Verpackung, dem Wareneingang und Warenausgang anzutreffen. Weniger stark automatisierte Läger können u. U. einen Großteil an Stetigförderern einsetzen, die völlig ohne Energiezufuhr arbeiten.



Abbildung 4.5: Einteilung der Stetigförderer nach konstruktiven und funktionalen Gesichtspunkten

Quelle: (vgl. [Martin2009], S. 132)

Im Folgenden einige Beispiele für Stetigförderer und deren Spezifikationen:

	Motorleistung je 100m	Förder- geschwindigkeit	Fördergut	Förderlast
Unterflur-Schleppkettenförderer	0,3 – 0,5kW	0,2 – 0,8m/s	Gabelhubwagen, Werkstückträger	bis 1.500kg
angetriebene Rollenbahn	0,12 – 0,75kw	0,3 – 0,5m/s	Paletten, Behälter, Kartonagen	25 – 2.000kg/m
Tragkettenförderer	0,4 – 1,5kW	0,2 – 0,5m/s	Paletten, Skids	bis 3.000 kg
Kettenfördersysteme	0,09 – 0,75kW	1 – 100m/min		bis 200kg

Tabelle 4.5: Beispiele für Stetigförderer und deren Motorleistung

Quelle: (vgl. [tenHom2007], S. 130ff)

4.1.5.2 Unstetigförderer

Wo es im Bereich der Stetigförderer noch einige Anhaltspunkte für Homogenität im Leistungssektor zu erkennen gab, scheint dies für Unstetigförderer gänzlich zu entfallen. Obwohl es hier, bedingt durch die Automatisierung, zu einer stetigen Konzentration auf bestimmte Fördermitteltypen kommt, ist die Vielfalt der Ausprägungen und Variationen noch enorm.



Abbildung 4.6: Systematik der Unstetigförderer

Quelle: (vgl. [Martin2009], S. 213)

Die hohe Flexibilität ist häufig an eine manuelle Handhabung der Förderer gekoppelt und damit an höhere Investitions- und Betriebskosten. Ferner lässt sich eine Automatisierung gegenüber Stetigfördern schwieriger umsetzen. Im Falle eines Fördererausfalls sind Unstetigförderer aber wesentlich leichter auszutauschen und führen im Worst Case zu einer Durchsatzminderung. Fällt ein Stetigförderer aus, könnte das im schlimmsten Fall einen kompletten Materialflussstop zur Folge haben.

Flurfördermittel gem. VDI 3586 und VDI 2198 sind die am häufigsten eingesetzten innerbetrieblichen Förderer. Vorzugsweise werden in geschlossenen Hallen Elektro-Flurförderer eingesetzt, für den kombinierten Transport innerhalb und außerhalb der Halle sind eher gasbetriebene Flurförderer zu finden und für den Außenbereich Diesel-Förderer. Im Folgenden einige flurgebundene Unstetigförderer.

	Antriebsleistung [kW]	Geschwindigkeit		Hubhöhe [m]	Tragfähigkeit [t]
		heben [m/s]	fahren [km/h]		
Hochhubwagen	2 – 6	0,03 – 0,07	6	5,5	3,20
Gegengewichtsstapler	4 – 120	0,23 – 0,65	9 – 35	9,0	16,00
Schubmaststapler	5 – 20	0,15 – 0,50	7 – 14	12,0	2,50

Hochregal- stapler	15 – 17	0,30 – 0,40	9	13	1,25
Kommissio- nierstapler	15 – 27	0,35 – 0,40	9 – 11	14,5	1,25
RBG		2,00 – 3,00	1,1 – 1,7	50	40,00

Tabelle 4.6: Antriebsleistung flurgebundener Unstetigförderer

Quelle: (vgl. [tenHom2007], S. 169ff)

4.2 Komplexität der Energieverbrauchsbewertung im Lager

Im Wohnhaussektor ist es üblich die thermische Qualität eines Hauses mit Hilfe der Energiekennzahl zu beschreiben. Diese Kennzahl sagt aus, wie viel Energie für die Beheizung von einem Quadratmeter Fläche im Jahr benötigt wird in kWh/(m²*a). Sie ist vergleichbar mit dem durchschnittlichen Spritverbrauch eines Autos in Liter/100km. Für beide gelten gewisse Annahmen, sonst ist keine Aussagekraft gewährleistet. Für das Auto wird eine bestimmte mittlere Geschwindigkeit, ein konstantes Transportgewicht und Fahrverhalten angenommen. Äquivalent verhält es sich bei der Normierung der Energiekennzahl eines Gebäudes. Eine konstante Innentemperatur, ein durchschnittliches Klimajahr und eine gewöhnliche Nutzung garantieren die Qualität solcher Kennzahlen. Errechnet wird diese über die Relation von Jahresenergieverbrauch zu einer Bezugsgröße (bei Gebäuden i. d. R. m²):

$$\text{Energiekennzahl} = \frac{\text{Energieverbrauch} / \text{Jahr}}{\text{Bezugsgröße}} = \frac{\text{kWh} / a}{\text{m}^2}$$

Als Bezugsgröße wird für Gebäude gemäß der DIN 277 die Bruttogeschossfläche genommen. Das ist die Gesamtfläche in m² eines Objektes gemessen an den Außenkanten und mit der Anzahl der Ebenen multipliziert. Für den Energieverbrauch können die kombinierten Werte von Heizung, Strom und Warmwasser angesetzt werden.

Die von der Bundesregierung im Februar 2002 verabschiedete Energieeinsparverordnung (EnEV) zum Integrierten Energie- und Klimaprogramm (IEKP) ermöglicht es anhand einiger weniger Daten, Aussagen über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zu erhalten. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung hält dafür Energieausweisvorlagen bereit. Die EnEV gilt für Wohngebäude, Bürogebäude und gewisse Betriebsgebäude. Eine Grobeinteilung⁴³ der Gebäude kann wie folgt aussehen:

- Wohnungsbestand: 100-275 kWh/(m²*a)
- Neubau nach WsVO 1995: 54-100 kWh/(m²*a)
- Niedrigenergiehaus: 35-75 kWh/(m²*a)

⁴³ http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Nachhaltig-Bauen-Energiekennzahl_725508.html
(09.05.2009)

- Passivhaus: $< 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

Die folgende Grafik ist ein Teilausschnitt vom Energieausweis für Nichtwohngebäude.

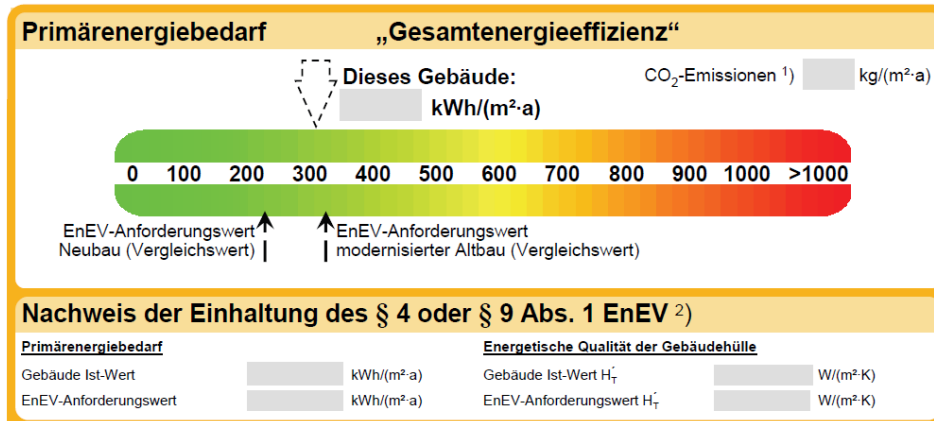


Abbildung 4.7: Ausschnitt aus dem Energieausweis für Nichtwohngebäude

Quelle: **BMVBS**

Mit einer einfachen Energiebilanzierung, wie es die EnEV ermöglicht, kann der Energiebedarf eines Gebäudes hinreichend genau ermittelt werden. Solche Bilanzierungs- oder Simulationsverfahren berücksichtigen jedoch nicht den Energieaufwand für Planung, Herstellung, Transport und Montage der verwendeten Materialien eines Objektes. Es stellt sich also nicht die Frage, ob der Einsatz eines gewissen Dämmstoffes klimaneutraler ist, als der Nichteinsatz oder ob der Einsatz von Material A gegenüber Material B energieschonender ist bei Berücksichtigung der gesamten Prozesskette. Letztendlich tangieren diese Fragen die Amortisationszeit. Lohnt sich der Einsatz? Im Falle einer Dämmung kann man i. d. R. davon ausgehen, dass sich der Energieeinsatz für die Dämmung, je nach Region, in kurzer Zeit amortisiert. Im zweiten Fall hängt die Antwort wesentlich vom Dämmfaktor und einigen weiteren Parametern der Materialien ab. Aus diesen Überlegungen heraus kristallisiert sich für eine Energiebilanz die Notwendigkeit einer Unterteilung in Gebäudebau und Gebäudenutzung.

4.2.1 Energieeinsatz für den Lagerbau

Prioritäten der Emissionserfassung in der Logistik sind nach Prof. Dr. Niklaus Kohler vom Institut für industrielle Bauproduktion der Uni Karlsruhe in fallender Reihenfolge: Transport – Lagernutzung – Lagerbau. Desweiteren folgert er, dass Gebäude sich im Sinne der klassischen Optimierungsverfahren nicht auf einfache Zielfunktionen reduzieren lassen. Anstelle eines einzelnen, absoluten, Zielwertes tritt ein Lösungsraum der durch mehrere relative Kriterien gebildet wird (vgl. [Koh1998], S. 2). Obwohl der Nachhaltigkeitsunterschied zwischen Transport und Lagernutzung groß ist, kann diese Aussage nicht immer auf den Unterschied zwischen Lagernutzung und Lagerbau zutreffen. Hier wird die bedeutende Differenz eines Lagers zu einem Wohngebäude sichtbar. Häufig führt der erste äußere Blick auf Läger zu der Vermutung, dass diese eine größere Homogenität aufweisen als Wohnhäuser. Dieser Eindruck entsteht wohl da-

durch, dass der Bau eines Lagers aus Kostengesichtspunkten motiviert ist und daher dem Grundprinzip nach, aus einer Beton-Bodenplatte besteht, auf der die Stahlkonstruktion angebracht ist und die mit Sandwichpaneelen verkleidete Wände oder Decken. Unter diesem Gesichtspunkt sind eine Materialbedarfserfassung und der damit zusammenhängende Energieeinsatz für den Lagerbau relativ leicht zu ermitteln. Die HALTEC Hallensysteme GmbH benötigt ca. 8900kg Stahlgerüst für eine Fläche von 320m². Nach weiteren Herstellerangaben sind häufig vorher nicht abzusehende Randbedingungen wesentliche Einflussfaktoren auf die benötigte Menge an Materialien. Für zwei identische Läger, jedoch an verschiedenen Standorten, kann sich der Materialeinsatz allein für Stahl um bis zu 50% unterscheiden. Ein im Norden Deutschlands in See-Nähe errichtetes Lager muss wegen den Windverhältnissen eine bessere Stabilität aufweisen. Genauso gut ist die zu erwartende Schneelast im Winter auf dem Dach des Lagers ein Stabilitätseinflussfaktor. Je nach Bodenverhältnissen (Grundwasser, Erde, usw.) werden ortsspezifische Mengen an Beton und Stahl benötigt deren Mehrwert eklatant sein kann.

Der Lagertyp ist ein markantes Kriterium für die benötigte Menge an Materialien, kann aber nicht praxistauglich als Solokriterium herangezogen werden. Typischerweise ist häufig ein fließender Übergang diverser Lagertypen in einem Gebäude auszumachen. Stark verbreitet sind konventionelle Distributionszentren mit einem integrierten Hochregallager. Um die Transportwege innerhalb eines Unternehmens zu minimieren werden Läger teilweise in Produktionshallen integriert. Jedes Lager ist letztendlich ein Unikat und muss auf strategischer Ebene separat erfasst werden. Nach eigenen Berechnungen verursacht der Bau eines Lagers annähernd so viel Emission wie die Lagernutzung über einen Zeitraum von bis zu 20 Jahren. Im Schnitt ist das Gleichgewicht nach 10 Jahren erreicht.

4.2.2 Energieeinsatz für die Lagernutzung

Der Versuch die Energiekennzahl ähnlich wie bei einem Wohnhaus zu ermitteln, wird aufgrund der Heterogenität der Lagernutzung äußerst schwierig. Fakt ist, dass es bis dato keine Benchmarks gibt. Die meisten Unternehmen haben sogar keine separate Energieverbrauchserfassung für das Lager, was bisher dazu geführt hat, dass Quantitätsangaben nicht möglich sind.

In der 6. Ausgabe 2008 berichtet Logistik Inside davon, dass das Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik (IML) ein Forschungsprojekt plant, „bei dem erstmals Kennzahlen für den Energieverbrauch von Logistikzentren ermittelt werden sollen. Je nach Funktion und Bauzustand sollen Benchmarks je Quadratmeter Lagerfläche ermittelt werden. Ergebnisse wird es aber wohl erst in ein bis zwei Jahren geben.“ [LI2008a].

Andre Kranke als stellvertretender Chefredakteur der Logistik Inside ruft dazu auf, gemeinsam Kennzahlen zu entwickeln: „Welchen CO₂-Fußabdruck dürfen moderne Läger hinterlassen? Hier besteht großer Informationsbedarf. Verbände und Forschungsinstitute sowie die Anbieter von Logistikdienstleistungen und Intralogistikanlagen sind deshalb aufgerufen, unverzüglich

gemeinsam Kennzahlen zu entwickeln und gleichzeitig Benchmarks zu setzen, die dem Anspruch des Vorreiters in Sachen Logistik und Umwelt gerecht werden.“ [LI2008a]

Zum aktuellen Zeitpunkt ist die Datenlage sehr mager. Die Kohlenstoffdioxid-Emission spielte bisher in der Unternehmenspolitik so gut wie keine Rolle. Diese Tatsache erschwert eine systematische Analyse massiv. Die derzeit ersten Forschungsprojekte für die Energieverbrauchsbewertung in der Lagerhaltung sind gewichtige Meilensteine auf dem Weg zu einer soliden Auseinandersetzung mit der Umweltproblematik auf Unternehmensebene. Die Begriffe „Green Logistics“ oder „Green Supply Chain“ ziehen immer größere Runden und werden von der Wissenschaft sukzessive aufgegriffen und dann als strategischer Wettbewerbsvorteil propagiert. Eine Optimierung der Lagerstandorte und die damit einhergehende Minimierung der Warenbewegungsentfernung senken sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Transportkosten, so Dr. Martin Wilk Logistikberater bei IBM GBS⁴⁴. Angaben eines führenden Intralogistik-Herstellers zufolge, der in diesem Zusammenhang nicht genannt werden will, beträgt der Energiekostenanteil ca. 25% in Relation zur gesamten Supply Chain. Aus dieser Beobachtung heraus ist es verständlich, dass der Unternehmensfokus primär auf Einsparpotenziale im Transportbereich gerichtet ist. Und doch sind nicht unwesentliche Kostensenkungen durch eine effiziente Lagerhaltung zu erreichen. Berechnungen dieses Herstellers ergeben für 10.000 Distributionszentren mittlerer Größe, einem Preis von 0,10€/kWh, einer Energiekostensteigerung von 10% pro Jahr und einer Energieverbrauchssenkung um 25% nur für die Intralogistik eine Kostenersparnis von 414 Mio. € für den Zeitraum von 7 Jahren. Die im Folgenden gewählte Aufteilung der Energiekosten führender Logistik-Dienstleister in der Supply Chain wird als Ansatz für weitere Berechnungen verwendet.

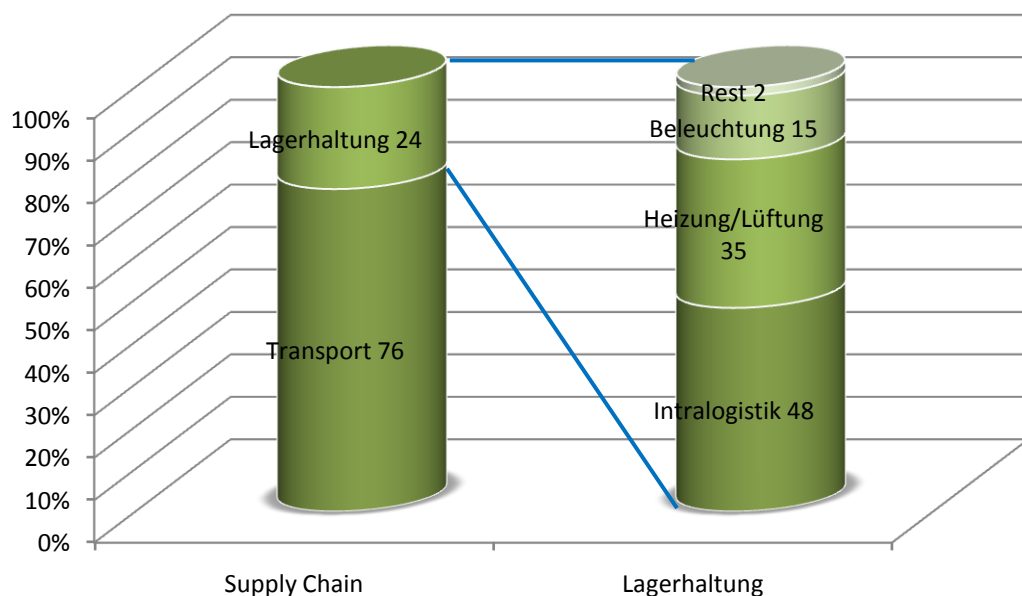


Abbildung 4.8: Energiekosten führender Logistik Dienstleister in der Supply Chain

⁴⁴ Global Business Services

Was sind aber effiziente Lösungen für die Lagerhaltung? Sind 100kWh/m² Lagerfläche in einem Hochregallager viel? Oder ist ein Vergleich für den Verbrauch je m³ sinnvoller? Bisher fehlen Benchmarks jeglicher Art. Für eine effiziente Lösungspräsentation müssen Verbrauchskennzahlen einzelner Module im Lager bekannt, aggregiert und analysiert werden. Der sichere Weg zu einer aussagekräftigen Bewertung erfolgt über die Betrachtung eines Lagers auf Modulebene. Ein Modul kann dabei die kleinste relevante Energieverbrauchseinheit sein. In der Intralogistik ist es z. B. für ein Förderband eine einzelne Fördereinheit mit Motor. Aber genau hier greift die aktuelle Schwierigkeit. Für einzelne Motoren können zwar Nennleistungsangaben für die Bewertung herangezogen werden, diese sind aber i. d. R. stark überdimensioniert. Gravierende Wirkungsgradunterschiede einzelner Motoren und der daran angeschlossenen Fördereinheiten entziehen der Bewertungsaussage völlig den Boden. Das Fraunhofer IML führt allein auf energieeffiziente Antriebstechniken Einsparpotenziale von 15% des gesamten Stromverbrauchs zu Felde. Erfolgt die Mengenregelung einer frequenzgeregelten Pumpanlage über die Drehzahl anstatt über die Drossel werden über die Verlustreduzierung Energieeinsparungen bis zu 44% erreicht [IML2007].

Gurtförderer weisen beispielhaft beachtlich niedrige Wirkungsgrade an einer 90°-Kurve aus und erfordern somit eine wesentlich höhere Einspeiseleistung als Rollenförderer. Pauschal bewegt sich der Wirkungsgrad hier im Bereich zwischen 50% und 60%. Über Messverfahren können theoretisch alle anfallenden Reibungsverluste sehr genau ermittelt werden.

Der Einflussradius auf den tatsächlichen Energiebedarf ist jedoch weitaus umfangreicher. Dieselbe Anlage oder dasselbe Fördermittel hat in Abhängigkeit von der Außentemperatur unterschiedliche Verbräuche. Für den bereits erwähnten Gurtförderer sinkt oder steigt der Reibwiderstand mit fallender oder steigender Temperatur. Sogar die benötigte Kabellänge und dabei vor allem der verwendete Kabeltyp weisen nicht zu vernachlässigende Einflüsse auf. Grundsätzlich sind Stetigförderer im Dauerbetrieb. Der Einsatz intelligenter Warehouse-Management-Systeme wird für Lager A deutliche Energieverbrauchsvorteile schaffen, als das gleiche Lager B ohne diese Software. Auch wenn für die beiden technischen Systeme „Mann-zu-Ware“ und „Ware-zu-Mann“ Kennzahlen – was den Leistungseinsatz betrifft – vorliegen würden, so würden hybride Formen die Bewertung erschweren.

Im Winter und in kalten Gegenden muss ein Lager mit steigender Umschlagshäufigkeit mehr beheizt werden, weil die Tore für LKW und ggf. dem Schienenverkehr häufiger und länger offen stehen. Dies gilt insbesondere für Läger mit Personeneinsatz. Abhilfe bieten hier Schnellauftore. In einem vollautomatischen Lager ist temperaturmäßig darauf zu achten, dass Schmiermittel usw. nicht gefrieren. Grundsätzlich staut sich die Wärme oben. In Hochregalläger mit Personeneinsatz kommen sogenannte Weitwurfdüsen zum Einsatz. Diese sorgen für eine gleichmäßige Verteilung der Luft im Raum und vermeiden damit Wärmepolster unter der Decke. Bei konventioneller Hallenheizung ohne Einsatz der Weitwurfdüsen ist nach Biddle GmbH die doppelte Heizleistung nötig, um die an der Decke nach außen entweichende Wärme zu

kompensieren. Die beiden gängigsten Varianten eine Halle zu beheizen ist der Einsatz von Warmluftheizungen oder Strahlungsheizungen. Letztgenannte sind eine sparsame und preiswerte Alternative. Energieverbrauchersparnisse über 40% sind möglich.

Eine Kumulation diverser Parameter für zwei Läger mit identischen Durchsätzen, dem gleichen Lagertyp und identischen Förderern kann nach Vanderlande Industries Leistungsunterschiede bis zu 300% aufweisen.

FKI Logistex stellte auf der ProMat⁴⁵ 2009 in Chicago den LS-4000 Sorter vor, der aufgrund seines Linear Synchron Motors (LSM) 75% weniger Energie verbraucht, als alternative Linear Induktions Motoren (LIM). Auffällig an diesem Beispiel ist die Tatsache, dass zwei völlig identisch geführte Läger enorme Verbrauchsunterschiede aufweisen können. Tabelle 4.7 zeigt den Energieverbrauchsunterschied zweier Sorter im Betrieb.

	Tilt-Try Sorter		Cross-Belt Sorter	
	Vergleichbares System (LIM)	LS-400E (LSM)	Vergleichbares System (LIM)	LS-400CB (LSM)
Leistung [kWh]	10,3	2,4	11	2,7
Arbeitszeit [h/d]	10	10	10	10
Arbeitstage [d/a]	250	250	250	250
Energieverbrauch [MWh/a]	25,8	6	27,5	6,8

Tabelle 4.7: Energieverbrauchsvergleich basierend auf 200m Länge, 2m/s, 700mm Behälter mit Ø 3kg Ladung

Quelle: FKI Logistex⁴⁶

Ähnlich wie im Schienenverkehr können Regalbediengeräte die freiwerdende Wärmeenergie beim Bremsen und Absenken direkt nutzen oder zurückspeisen. Viastore systems GmbH zufolge werden damit bis zu 20% der Energiekosten eingespart.

Es sollte bei den o. g. Stichpunkten zum Ausdruck kommen, wie komplex es ist, den Verbrauch auf detailliertem Wege zu erfassen. Bisher existieren dazu keine geeigneten Verfahren. Um diese relativ intuitive Vorgehensweise der Energieverbrauchsbewertung empirisch zu ermöglichen, bedarf es noch einige Jahre der Forschung. Der Appell an Hersteller, Wissenschaft und Regierung eine umweltbewusste „Green Logistics“ voranzutreiben, um die notwendige Datenbasis zu erhalten, gilt mehr denn je.

Die beiden folgenden Modellansätze gehen an die Energieverbrauchsbewertung aus zwei unterschiedlichen Richtungen heran. Zunächst wird der intuitive Weg der Bewertung vorgestellt, indem „vom Detail auf das Ganze“ geschlossen wird. Über die Summation einzelner Ver-

⁴⁵ wichtigsten Materialhandhabungs- und Logistikmesse Nordamerikas

⁴⁶ <http://www.fkilogistex.com/FKI-Logistex-LS4000-Tilt-Tray-Sorter/news.aspx> (09.05.2009)

brauchsquellen – zu Kategorien zusammengefasst – lässt sich der Gesamtverbrauch eines Lagers relativ genau bestimmen. Der zweite Ansatz geht den Weg über dynamische Lagerkenngrößen und ermöglicht darüber eine Schlussfolgerung auf den Gesamtenergieverbrauch. Der Vorteil des ersten Ansatzes ist ein Nachteil des zweiten Ansatzes und umgekehrt. Beispielsweise ist die Berechnungsmethodik des detaillierten Vorgehens wesentlich komplexer und gleichzeitig viel transparenter, wobei der aggregierte Modellansatz schnell Ergebnisse liefert, diese aber stark vom gewählten statistischen Verfahren zur Mittelwertbildung abhängen.

4.3 Detaillierter Modellansatz

Es ist bereits angekungen, dass eine exakte Quantifizierung des Energieverbrauchs in der Lagerhaltung zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht umsetzbar ist. Über eine differenzierte Betrachtung der Lagerhaltung soll jedoch das bisher verfügbare Potenzial aufgezeigt werden. Im gleichen Atemzug wird das Kernproblem diskutiert und mit notwendigen Handlungsempfehlungen versehen. Die Idee für den detaillierten Modellansatz ist in Abbildung 4.9 klassifiziert. Dabei soll primär zwischen Lagerbau und Lagernutzung unterschieden werden. Interessant ist diese Trennung aus der Perspektive der Optimierung eines bestehenden Distributionsnetzwerkes. Wird für den theoretisch optimalen Fall eine komplett neue Standortwahl vorgeschlagen, kann diese unter Berücksichtigung der entstehenden Emission beim Lagerbau die Fortführung bestehender Läger bedeuten.

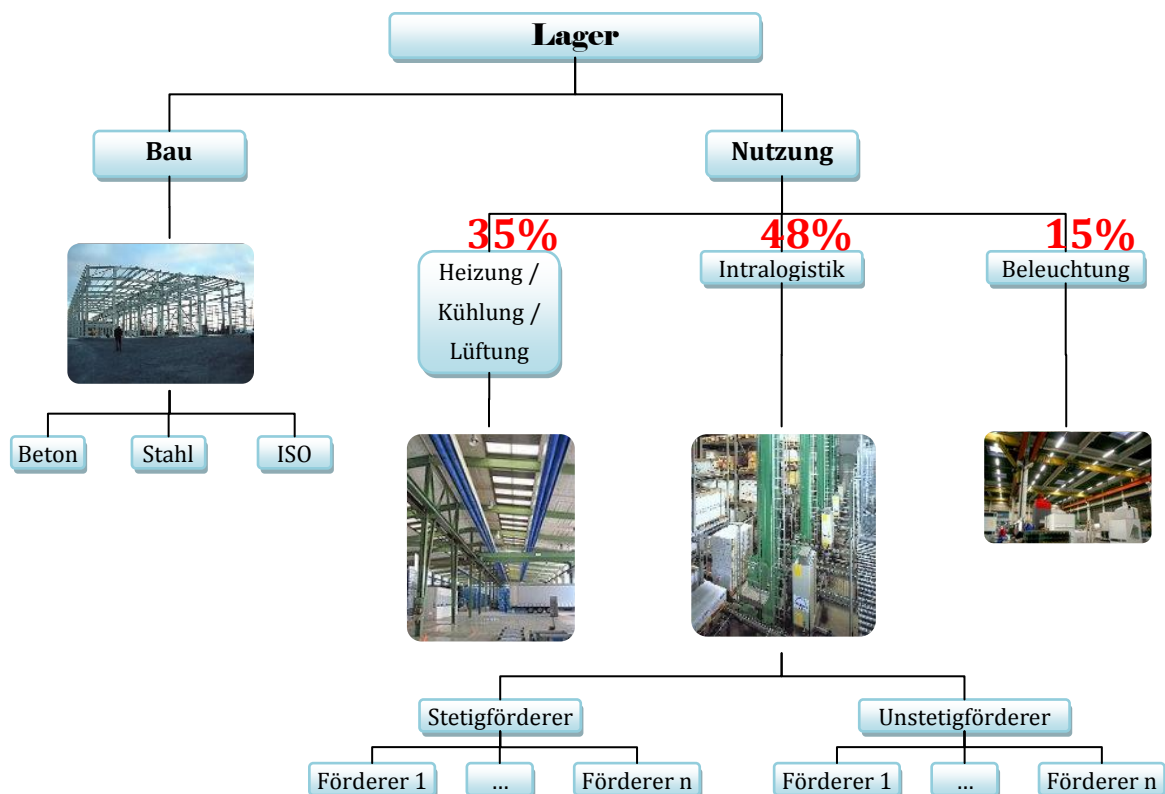


Abbildung 4.9: Hauptenergieverbraucher im Lager, kategorisiert

Quelle: Eigene Darstellung

Auf zweiter Ebene sind die für den Bau verwendeten Baustoffe elementare Gliederungspunkte. Selbstverständlich ist aufgrund der Relation und der strategischen Dimension eine vollständige Liste aller verwendeten Materialien für den Bau unnötig. Die Lagernutzung ist nach funktionalen Aspekten gegliedert. Diese Bereiche sind klar voneinander abgegrenzt und werden von Unternehmen teilweise auch getrennt erfasst. In rot sind die aus Abbildung 4.8 angegebenen Verhältniszahlen angegeben.

4.3.1 Lagerbau

Berechtigerweise stellt sich die Frage, wie relevant die Berücksichtigung des Lagerbaus ist. In einem Distributionsnetzwerk sind die Lebensdauer eines Lagers und die mit der Standortwahl verknüpften Distributionskilometer entscheidend für die Antwort auf diese Frage. Die in Kapitel 4.2.1 genannte „Amortisationszeit“ von 10 Jahren ist eine grobe Berechnung der entstehenden CO₂-Emission für den Rohbau und eine Schätzung der anfallenden CO₂-Emission für den Aufbau der Intralogistik. Pauschal kann man für die Lebensdauer eines Lagers ca. 30 Jahre ansetzen, so Andreas Hardt, Geschäftsführer der Chemion Logistik. Fördersysteme und Fahrzeuge sind spätestens nach 15 Jahren zu erneuern. Noch schnelllebiger ist die gesamte Informationstechnologie. Für die gegebene Aufgabenstellung spielt die IT keine nennenswerte Rolle und die Intralogistik eine untergeordnete und wird daher ebenfalls nicht näher betrachtet.

Für die Fertigstellung eines Lager-Rohbaus wird eine Bodenplatte aus Beton, eine Stahlkonstruktion als Gebäudegerüst und eine Fassadenverkleidung benötigt. Üblicherweise kommen Bodenplatten in einer Stärke von 20 – 25cm zum Einsatz. Wenn die bebaute Lagerfläche bekannt ist, kann nun mit Hilfe der in Tabelle 4.8 angegebenen Emissionswerte die Umwelteinwirkung berechnet werden. Die HALTEC Hallensysteme GmbH benötigt im Mittel pro m² Wand- oder Dachfläche 27,81 Tonnen Stahl. Dieser Wert variiert leicht in Abhängigkeit der statischen Gebäudeanforderungen. Vorrangig geht es Unternehmen bei dem Bau eines Lagers um eine schnelle, einfache und preis-leistungsmäßig günstige Montage. Sehr weit verbreitet für die Fassaden- und auch häufiger Deckenverkleidungen sind die sogenannten Sandwichpaneele (ISO-Elemente). Sie bestehen aus zwei Stahldeckschalen mit dazwischen liegendem PUR-Hartschaum. Der Vorteil dieser Paneele ist ein geringes Eigengewicht mit gleichzeitig hohem Dämmwert. Gleichmaßen kann über die Lagergrößenangaben die benötigte Menge an Hartschaum und Stahl berechnet werden. Je nach Dämmvorgabe werden dazu unterschiedlich breite Paneele verwendet.

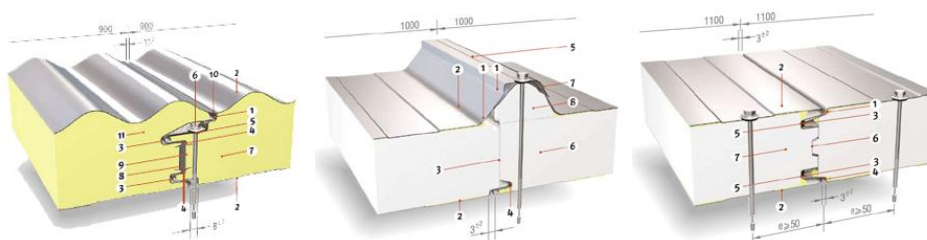


Abbildung 4.10: Beispiele für Dach- und Fassadensysteme (Sandwichpaneele)

Quelle: WIKON Bau & Systeme GmbH

Baustoff	CO ₂ in kg / kg	Quelle
Beton	0,17	Öko-Institut
PUR-Hartschaum	4,78	Öko-Institut
Stahl	1,50	Thyssen-Krupp
Glas	0,97	UBA
Styropor	5,48	

Tabelle 4.8: Emissionswerte wichtige Baustoffe für das Lager

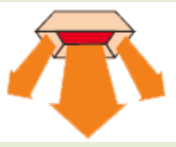
4.3.2 Lagernutzung

4.3.2.1 Heizung / Kühlung / Lüftung

Liegen keine klassifizierenden Informationen für die verwendete Heiztechnik vor, so kann nach ETAPART AG von einem Energiebedarf von ca. 50kWh/m² Lagerfläche für gut isolierte Hallen ausgegangen werden und von ca. 150kWh/m² Lagerfläche für schlecht isolierten Hallen.

Bei einem temperaturgeführten Lager ist der Energiebedarf in Europa grundsätzlich höher, als der Bedarf für ein frostfrei geführtes Lager. Für Lager in Gegenden mit extremen Temperaturverhältnissen ist die Berücksichtigung der durchschnittlichen Jahrestemperatur unumgänglich. Noch besser wäre es im konkreten Fall die Betrachtung auf die vier Jahreszeiten herunterzubrechen. Viele kleine Lager werden manuell geführt und deren größter Energiekostenanteil ist die Heizung, Kühlung und/oder Lüftung.

Warmfluterzeuger und Strahlungsheizung sind die beiden überwiegend zum Einsatz kommenden Heizsysteme in Logistikzentren. Manchmal findet man auch die relativ energieineffizienten thermischen Bauteilaktivierungssysteme (Betonkernaktivierung, Bodenheizung) vor. Die vielen Nachteile einer Bodenheizung haben diese konkurrenzunfähig gemacht. ETAPART AG zufolge benötigt eine Warmflutheizung ca. 40% mehr Energie als eine Strahlungsheizung. Im Folgenden ein kurzer Vergleich der beiden Heizsysteme.

Systeme	Warmfluterzeuger		Strahlungsheizung	
	Direkt	Indirekt	Hellstrahler	Dunkelstrahler
Eigenschaften				
Anlagenwirkungsgrad	gut	gering	sehr gut	sehr gut
Hilfsenergiebedarf	erheblich	erheblich	sehr gering	gering
Geräusche	vorhanden	vorhanden	keine	vorhanden
Luftbewegung	ja	ja	nein	nein
Lufterneuerung	möglich	möglich	nicht möglich	nicht möglich
Aufheizzeit	kurz	lang	sehr kurz	kurz

Teilbereichsheizung	bedingt möglich	bedingt möglich	möglich	möglich
Beheizung von Räumen mit leicht entzündbaren Stoffen	bedingt möglich	möglich	bedingt möglich	bedingt möglich

Tabelle 4.9: Systemvergleiche von Erdgas für das Beheizen von Hallen

Quelle: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, 2003

Der große Vorteil einer Strahlungsheizung liegt darin, dass die Wärmestrahlung – nach dem Prinzip der Sonne – erst bei Auftreffen auf einen Körper wirkt. „Unter Ausnutzung dieser physiologischen und physikalischen Grundlage, wonach die empfundene Raumtemperatur sich aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur zusammensetzt, arbeiten Strahlungsbeheizungen besonders energiesparend“ [Schwank2009].

$$t_E = \frac{t_L + t_S}{2} \quad \text{mit } t_L < t_S$$

t_E : Empfindungstemperatur (Raumtemperatur)

t_L : Lufttemperatur

t_S : Strahlungstemperatur

Niedrige Lufttemperaturen in der Halle haben keine Wärmepolster unter der Decke und vermeiden somit Wärmeverluste durch die Außenhülle des Lagers. Die Schwank GmbH gibt in diesem Zusammenhang an, dass die Verringerung der Lufttemperatur um 1°C eine Energieverbrauchsreduzierung von 7% zur Folge haben kann.

Eine gute Bezugsgröße für Warmluftheizungen ist die Kubatur eines Lagers, denn diese Systeme erhitzen die Luft in einem Raum. Für Strahlungsheizungen ist dagegen eine solide Bemessungsgrundlage die Fläche eines Lagers. Es folgt eine Beispielrechnung⁴⁷ mit Vergleich der Strahlungsheizung und Warmluftheizung für ein konkretes Gebäude (Tabellenblatt dazu s. Anhang: Abbildung 8.2).

- Innentemperatur: 12°C
- Außentemperatur: -12°C
- Nutzzeiten: 24h/d
- Heiztage: 150d
- Gaspreis: 0,05€/kWh
- Strompreis: 0,15€/kWh

⁴⁷ Daten sind freundlicherweise von der Firma Schwank GmbH zur Verfügung gestellt worden

- Größe (LxBxH): 240,6m x 168,6m x 12m
- Jahresmitteltemperatur: 8,4°C
- Luftwechsel: 0,15h

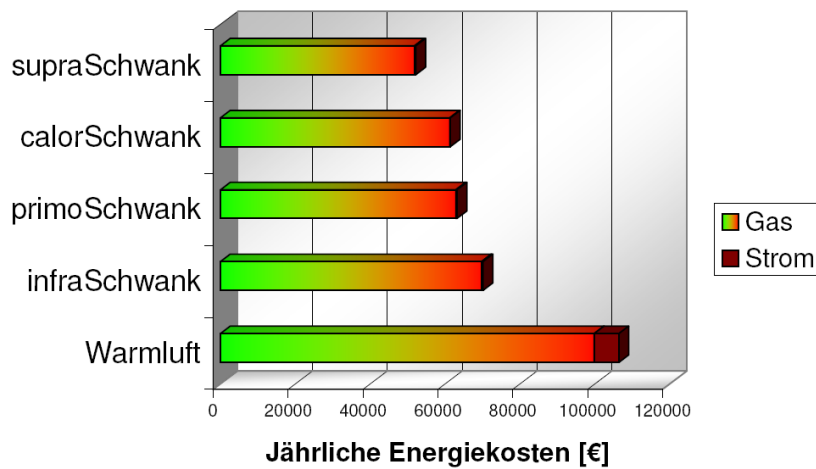


Abbildung 4.11: Energiekostenvergleich verschiedener Heizsysteme

	Installierte Leistung [kW]	Gas- Verbrauch [kWh/a]	Strom- Verbrauch [kWh/a]	Energie- kosten Gas [€]	Energie- kosten Strom [€]	CO ₂ [t]
supraSchwank	913,2	1.036.452	1.124	51.823	169	221
calorSchwank	1.022,2	1.224.680	2.204	61.234	331	261
primoSchwank	1.107,7	1.257.226	1.086	62.861	163	268
infraSchwank	1.164,1	1.394.696	1.917	69.735	288	297
Warmluft	1.261,4	1.996.022	43.912	99.801	6.587	425

Tabelle 4.10: Energiekostenvergleich verschiedener Heizsysteme

4.3.2.2 Intralogistik

Das Kernproblem eines Modells für den Energieverbrauch im Lager ist die Intralogistik. Der zunehmende Automatisierungsgrad in der Distribution und eine extreme Nachfragesituation treiben den Energieverbrauch in die Höhe. In großen und stark automatisierten Distributionszentren ist die Intralogistik ein bedeutender Energiekostentreiber. Der Wunsch, diesen Bereich der Supply Chain zu quantifizieren erweist sich als äußerst schwierig. Zwei Gründe tragen wohl u. a. dazu bei, dass es nach wie vor keine Übersicht für die Effizienz von Intralogistik-Systemen gibt. Der erste Grund ist eine mangelnde Partizipation und die fehlende Bereitschaft verfügbare Informationen zu kommunizieren. Bei der Recherche stößt man häufig auf eine „Mauer des Schweigens“ („...dazu möchten wir uns nicht äußern...“). Der einfache Versuch vom Verlag moderne industrie GmbH & Hüthig GmbH eine Marktübersicht energieeffizienter Elektromotoren zu erstellen ist gescheitert (vgl. [Magazin2008], S. 2). Der zweite Grund ist zweifelsohne die relativ kurze Zeitperiode, in der viele wissenschaftliche Fachgebiete ihr Know-how nun

auch auf die Nachhaltigkeit zu konzentrieren beginnen. Bisher sind große Fortschritte auf Einzelkomponentenebene gemacht worden, um den Leistungsbedarf korrekt angeben zu können. Interdependenzen und sonstige Fördersystemgegebenheiten erschweren jedoch bis dato eine stabile Bewertungsgrundlage der benötigten Leistung einer Förderanlage im Betrieb. Auf die Komplexität der Leistungsbewertung ist bereits in Kapitel 4.2.2 eingegangen worden.

Eine Option zur Lösung dieses Problems ist das Anbringen von Leistungsmessgeräten an den Fördersystemen. Diese protokollieren den Leistungsinput über die gesamte Dauer. Eine Auswertung der Aufzeichnungen einschließlich aller möglichen Einflussfaktoren könnte den gewünschten Durchbruch für die Bewertung der Intralogistik mit sich bringen. Da solche Ergebnisse noch nicht vorliegen, wird in diesem Ansatz vorwiegend mit Nennleistungen gearbeitet.

	Ausführung [kg]	Ladungsträger	Antriebsleistung	Geschwindigkeit
RBG für Tablarlager	150	802 x 1.202mm (Kleinbehälter und Europaletten)	horizontal: 4kW vertikal: 11kW	100 Einzelspiele/h
	300			
RBG für Kettbaum	1000	800 x 2.650mm bis 1.000 x 2.650mm	horizontal: 4kW vertikal: 15kW	45 Einzelspiele/h
Verfahr- wagen	500	800 x 1.200mm bis 2.000 x 2.500mm	0,37 – 1,5 kW	0,15m/s – 1,5m/s
	2.000			
	5.000			
Rollen- förderer	300	800 x 1.200mm bis 2.000 x 2.500mm	0,09 – 1,5 kW	0,10m/s – 1,0m/s
	2.000			
	9.000			
Ketten- förderer	300	800 x 1.200mm bis 2.000 x 2.500mm	0,25 – 1,5 kW	0,10m/s – 0,5m/s
	2.000			
	12.000			
Vertikal- förderer	300	800 x 1.200mm bis 2.000 x 2.500mm	1,5 – 18,5 kW	0,15m/s – 1,0m/s
	2.000			
	3.000			
Drehtische	300	800 x 1.200mm bis 2.000 x 2.500mm	0,12 – 0,75 kW	5m/s 90°
	2.000			
	6.000			
Eck- umsetzer	300	800 x 1.200mm bis 2.000 x 2.500mm	1,1 – 1,5 kW	2m/s – 4m/s Hub
	2.000			

	3.000			
Flächenförderer	24.000	800 x 1.200mm bis 2.000 x 2.400mm	5,5 kW	0,066m/s

Tabelle 4.11: Leistungswerte einiger Fördersysteme in kW

Quelle: Fördertechnik und Anlagenbau FAB GmbH

Für diesen Modellansatz ist es nötig alle verwendeten Fördersysteme und einige Parameter dieser Systeme zu kennen. Für Stetigförderer mit rollender Abtragung kann vereinfachend die folgende Gleichung verwendet werden (in Anlehnung an [Martin2008], S. 187ff).

$$P = \frac{\mu * d}{l} * (f + m) * g * v * t$$

P : Leistung [kWh]

d : Transportstrecke [m]

f : Bewegte Masse des Fördersystems [kg]

m : Einzelgewicht des Förderguts [kg]

l : Transportabstand [m]

v : Fördergeschwindigkeit [m/s]

η : Antriebs-Wirkungsgrad [%]

t : Betriebszeit [h/a]

g : Erdbeschleunigung [9,81m/s²]

μ : Fahrwiderstandsbeiwert

Im Folgenden ein Rechenbeispiel⁴⁸ für einen Stetigförderer mit rollender Abtragung. So oder ähnlich können Verbrauchswerte annähernd realitätsnah ermittelt werden.

- Transportstrecke: 100m
- Bewegte Masse des Fördersystems: 20kg
- Fördergut: Karton
- Kartoneinzelgewicht: 30kg
- Transportabstand: 1m
- Fördergeschwindigkeit: 1m/s
- Antriebs-Wirkungsgrad: 80%
- Betriebszeit: 5.000h/a

⁴⁸ Anhaltswerte stammen von der BEUMER Maschinenfabrik GmbH & Co. KG

- Fahrwiderstandsbeiwert: 0,02
- ➡ Bewegungswiderstand: $0,02 * 100\text{m} / 1\text{m} * (20\text{kg} + 30\text{kg}) * g = 981\text{N}$
- ➡ mechanische Leistung: $981\text{N} * 1\text{m/s} \approx 1\text{kW}$
- ➡ Jahres-Energiebedarf: $(1\text{kW} / 0,8) * 5.000\text{h} = 6.250\text{kWh}$

4.3.2.3 Beleuchtung

Die beiden Maßeinheiten für zentrale lichttechnische Größen sind Lux und Lumen. Lux ist dabei die Beleuchtungsstärke und nach [DIN18599-4] ein „Quotient des Lichtstroms, der auf ein Flächenelement auftrifft, und der Fläche dieses Elements“. Lumen (Lichtstrom) ist nach derselben Vornorm eine „Größe, abgeleitet aus dem Strahlungsfluss (Strahlungsleistung) durch Bewertung der Strahlung entsprechend der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges ... Er ist die von einer Lichtquelle ausgestrahlte oder von einer Fläche empfangene Lichtleistung“. Das Verhältnis des abgestrahlten Lichtstroms zur aufgenommenen elektrischen Leistung ist der Wirkungsgrad, auch Lichtausbeute einer Lampe genannt.

Je nach Lagereigenschaft sind Vorgaben bezüglich der Beleuchtungsstärke einzuhalten. Der relevante Auszug für das Lager, aus der DIN 12464 Teil 1, ist in Tabelle 4.12 zusammengefasst.

Lagereigenschaften	Ø Beleuchtungsstärke in Lux
Vorrats- und Lagerräume	100
Vorrats- und Lagerräume, dauernd besetzt	200
Versand- und Verpackungsräume	300
(Hoch-) Regallager, Fahrwege ohne Personenverkehr	20
(Hoch-) Regallager, Fahrwege mit Personenverkehr	150
(Hoch-) Regallager, Leitstand	150

Tabelle 4.12: Beleuchtungsstärken in Abhängigkeit von der Lagereigenschaft

Quelle: [DIN12464-1]

Immer mehr Unternehmer und Hersteller setzen bei Hallen Tageslichtröhren ein. Vorteil dieser Systeme ist aus energetischer Perspektive die Nullemission. Wenn man bedenkt, dass 70% der gesamten Beleuchtung Energiekosten sind⁴⁹, lassen sich bereits im Vorfeld kosten- und umweltschonende Maßnahmen ergreifen. Konventionelle Beleuchtungssysteme sind dagegen Gasentladungslampen und Leuchtstoffröhren. Ausprägungen der erstgenannten sind typischerweise Quecksilberdampflampen, Natriumdampflampen und Metaldampflampen. Leuchtstoffröhren eignen sich für Lagerhallen bis zu einer Höhe von 6m. In größere Läger kommen dann die Gasentladungslampen zum Einsatz. Übersteigt die Höhe jedoch die Marke von 15m, werden

⁴⁹ <http://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/beleuchtungskosten/> (09.05.2009)

vornehmlich Hallenspiegelleuchten verwendet. Spezielle Reflektoren lenken dabei das Licht in die üblicherweise schmalen Gängen zwischen den Regalen.

In Kühlräumen mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt kann der Lichtstrom bis zu 40% zurückgehen. Dies ist mit einem entsprechenden Korrekturfaktor zu berücksichtigen.

Einige wenige Informationen über das Beleuchtungssystem im Lager reichen aus, um mit einer Formel⁵⁰ die Energieverbrauchsangabe der gesamten Halle zu ermitteln. Schwerpunkt dieser Betrachtungsweise ist der Wirkungsgrad. Errechnet wird die erforderliche Anzahl von Leuchten unter Beachtung wesentlicher Einflussgrößen. Anschließend kann der Bedarf über die Multiplikation der Leuchtenanzahl mit der Leistung einer Leuchte bestimmt werden.

$$n = \frac{E * A}{z * \Phi * \eta_B * WF} \quad (4.1)$$

n : Leuchtenanzahl

E : gewünschte Beleuchtungsstärke [Lux]

A : Fläche oder Teilfläche des Raumes [m²]

z : Anzahl der Lampen je Leuchte

Φ : Lichtstrom einer Lampe [Lumen]

η_{LB} : Leuchten-Betriebswirkungsgrad

η_R : Raumwirkungsgrad

η_B : Beleuchtungswirkungsgrad ($\eta_{LB} + \eta_R$), bei Leuchtenherstellern verfügbar

WF : Wartungsfaktor

Die energetische Bewertung einer Leuchte kann hauptsächlich über den Leuchten-Betriebswirkungsgrad vorgenommen werden. Dieser wird auch stark vom Reflexionsgrad der Leuchten-Beschichtung beeinträchtigt. Die Farbgestaltung eines Raumes wirkt sich ebenfalls massiv über die Reflexion auf den Beleuchtungswirkungsgrad aus. Beispielsweise hat eine Weißgipswand einen Reflexionsgrad von ca. 0,6 und eine rote Ziegelsteinwand von ca. 0,25. Genauso stark wirkt die Lichtstärkenverteilung einer Leuchte auf den Beleuchtungswirkungsgrad ein. Je direkter das Licht auf die Nutzfläche gelangen kann, ohne eine Multireflexion über Decke, Wände und sonstige Einrichtungen, umso höher ist der Beleuchtungswirkungsgrad.

⁵⁰ <http://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/planung-in-der-praxis/wirkungsgradverfahren/>
(09.05.2009)

Wenn direkt strahlende Leuchtsysteme 100% Energie benötigen, so brauchen indirekt strahlende Leuchtsysteme 170% Energie⁵¹.

Die Relux Informatik AG aus Basel stellt das Berechnungs- und Lichtdesignprogramm Relux Professional 2007 kostenfrei zur Verfügung. Genauso kann das kostenfreie und umfangreiche Softwarepaket DiaLux von DiaLux Edith Adler e. K. aus Eppstein zur Energiebedarfsrechnung verwendet werden.

Beispielrechnung mit DIALux Light Assistent

Für alle Berechnungen gelten dieselben Ausgangswerte:

- Wartungsfaktor: 0,8
- Reflexionsgrade
 - Decke (Perlweiß): 85%
 - Wände (Betongrau): 23%
 - Boden (Zement): 27%
- Nutzebene: 0,85m
- Randzone: 0,00m

Hallen-Reflektorleuchte, 1 x SON 400 W mit Hochdruck-Natriumdampf-Lampe, KVG			
Lux	Lumen	Raumgeometrie L x B x H [m]	Leistung [W/m²]
100	55.500	10 x 10 x 5	4,2
		10 x 10 x 10	4,2
		100 x 100 x 5	1,26
		100 x 100 x 10	1,47
		100 x 100 x 50	2,02
		300 x 500 x 30	1,35
Lux	Lumen	Raumgeometrie L x B x H [m]	Leistung [W/m²]
200	55.500	10 x 10 x 5	4,2
		10 x 10 x 10	8,4
		100 x 100 x 5	2,65
		100 x 100 x 10	2,69
		100 x 100 x 50	4,16
		300 x 500 x 30	2,69
Indirekt-/Direkt Waveguideleuchte 2 x 54W, für T16, EVG			
Lux	Lumen	Raumgeometrie L x B x H [m]	Leistung [W/m²]
100	9.300	10 x 10 x 5	4,72
		10 x 10 x 10	9,44

⁵¹ Energieagentur hessenENERGIE GmbH

		100 x 100 x 5	2,64
		100 x 100 x 10	2,83
		100 x 100 x 50	4,96
		300 x 500 x 30	2,69
Lux	Lumen	Raumgeometrie L x B x H [m]	Leistung [W/m ²]
200	9.300	10 x 10 x 5	9,44
		10 x 10 x 10	17,7
		100 x 100 x 5	5,19
		100 x 100 x 10	5,45
		100 x 100 x 50	9,91
		300 x 500 x 30	5,35

Tabelle 4.13: Zwei Leuchtsysteme exemplarisch mit DiaLux gegenübergestellt

Quelle: Eigene Berechnungen

Setzt man als Bezugsgröße die Leistung je Quadratmeter an, so zeigt schon dieses kleine Rechenbeispiel, wie stark das Ergebnis von den jeweils gewählten Parametern bestimmt wird. Variiert wurden in dem obigen Beispiel nur die Raumgeometrie und die Beleuchtungsstärke (Lux). Die Beachtung weiterer „Stellschrauben“, die in diesem Exempel als gemittelt und konstant angenommen wurden, kann im Worst Case zu nicht Aussagekräftigen Ergebnissen führen. Explizit betrifft dies den Reflexionsgrad der Räumlichkeit. Aus gegebenen Überlegungen heraus ist für eine strategische Bewertung der benötigten Beleuchtungsenergie die Gleichung (4.1) eine Mindestanforderung.

4.4 Aggregierter Modellansatz

Bestrebungen, den relativ aufwendigen detaillierten Modellansatz für eine strategische Betrachtung zu umgehen, erweisen sich als rudimentär. Das Building Research Establishment Ltd (BRE)⁵² publizierte 2005 folgende Energieverbräuche für die Lagerhaltung (für Depot vgl. [CT2004], S. 13):

- Elektrizität (good practice / typical)
 - Depot: 37 / 39 kWh/m²/a
 - Distributionszentrum: 53 / 67 kWh/m²/a
- Fossile Brennstoffe (good practice / typical)
 - Depot: 283 / 311 kWh/m²/a
 - Distributionszentrum: 103 / 169 kWh/m²/a

Die in Kapitel 4.2 aufgeführte Komplexität für pauschale Benchmark-Angaben zeigt, dass es unmöglich ist, sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, ohne eine Differenzierung vorzunehmen. Es

⁵² <http://www.nottinghamcity.gov.uk/CHttpHandler.ashx?id=6566&p=0> (09.05.2009)

stellt sich also die Frage: Was ist eine geeignete Bezugsgröße und wovon wird diese wesentlich beeinflusst. Bei der Suche nach einer Antwort auf diese Frage ist es unerlässlich, potenziellen Einflussfaktoren auf den Grund zu gehen, um deren Größe zu quantifizieren.

Empirische Untersuchungen und statistische Analyseverfahren (s. Kapitel 2) sind geeignete Werkzeuge, um Zusammenhänge zwischen dynamischen Kenngrößen und dem Verbrauch zu ermitteln. Es ist eine Fülle an statistischen Verfahren vorhanden, um Daten auszuwerten. Problem Punkt in diesem Kontext ist die fehlende Empirie. Aufgrund dieser Ausgangsbasis können nur Ideen formuliert werden, die für eine Modellbildung wesentlich sind.

Ein simpler Ansatz ist die Abstraktion des Gesamtenergieverbrauchs in einem Modell auf die Lagerfläche in m^2 . Grundsätzlich gilt für jede Transformation der Realität in ein Modell: Abstraktionsgrad versus Genauigkeit. Es ist einleuchtend, dass eine volle Abstraktion auf die Lagerfläche ohne Differenzierung unerwünschte Ergebnisse liefert. Eine erste Präzisierung kann über die Raumgeometrie vorgenommen werden. Ein Hochregallager hat einen höheren Energiebedarf aufgrund der Erdanziehungskraft, die die Vertikalförderer zu überbrücken haben. Für eine genaue Mehrverbrauchsangabe liegen keine Zahlen vor. Einem Praktiker aus der Lagerlogistik zufolge können rund 15% für ein HRL aufgeschlagen werden⁵³. Eine Auffahrt, z. B. mit einem RBG, verursacht zwar höhere Verbräuche, eine Abfahrt hat aber dagegen einen Nullverbrauch oder könnte sogar die Wärmeenergie beim Bremsen zur Energieerzeugung und Rückgewinnung nutzen.

Hält man sich ein Lager mit all seinen Eigenschaften und Funktionen vor Augen, ist die Bewertung der Heizung, Lüftung, Kühlung und Beleuchtung auf Quadratmeter-Ebene ein durchaus standhafter Ansatz. Die zweite Größe hängt essentiell, nahezu linear vom Durchfluss bzw. der Umschlagshäufigkeit ab und kann daher als Gütervolumen je Zeiteinheit in die Berechnung einfließen. Aus diesen Überlegungen heraus, ergibt sich die Möglichkeit über den Automatisierungsgrad eines Lagers, zwischen einem manuell und einem vollautomatisch geführten Lager zu unterscheiden. In einem manuell geführten Lager entfallen 70% - 90% der gesamten Energiekosten auf die Heizung⁵³. Folglich muss bei einem höheren Automatisierungsgrad der Intralogistik mehr Gewicht verliehen werden, um die Aussagekraft zu wahren.

Ein vollautomatisches Lager geht i. d. R. mit einer hohen Umschlagshäufigkeit einher. Daraus kann man ableiten, dass der größte Teil der Energiekosten auf die Warenbewegung zurückzuführen ist. Desweiteren kann von einem marginalen Energiekostenanteil für die Beleuchtung ausgegangen werden. Es ist damit deutlich erkennbar, dass hier eine erhebliche Verlagerung der Energieverbrauchsursache vorliegt und die gewählte Klassifizierung gerechtfertigt ist.

In [CT2004] ist für die Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs pro m^2 in einem Depot eine Temperatur von $15,5^\circ\text{C}$ berücksichtigt worden, ab der das Heizen eines Gebäudes in dem

⁵³ Chemion Logistik GmbH

United Kingdom überfällig wird. Diese Basistemperatur ist aber historisch bedingt und sollte für jedes Lager bekannt sein. In einem temperaturgeführten Lager ist dies die Mindesttemperatur. Jetzt können über einen Wetterkorrekturfaktor einerseits die Mindest- oder Höchsttemperaturvorgaben eines Lagers zur Geltung kommen und andererseits nationale und/oder regionale Wetterverhältnisse in die Berechnung mit einfließen. Für Deutschland werden beispielsweise beim Deutschen Wetterdienst eine Fülle an Temperaturmittelwerten über viele Jahre und Klimafaktoren (KF) für Energieverbrauchsausweise bereitgestellt.

Beispielrechnung für den Wetterkorrekturfaktor:

- T_{base} , Basistemperatur [°C]: 15
- Detaillierungsgrad [month]: Monat
- $T_{base} * m$, Bezugsgröße: $15 * 12 = 180$
- T_{month} , Ø Monatswerte [°C]⁵⁴ für 2008:
3,6 / 3,7 / 4,2 / 7,6 / 14,5 / 16,9 / 18 / 17,4 / 12,4 / 9,1 / 5,1 / 1,1

$$\text{Wetterkorrekturfaktor} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \max \{ T_{base} - T_{month,i}; 0 \} + T_{base} * month}{T_{base} * m} = \frac{73,7 + 180}{180} \approx 1,41$$

Äquivalentes Vorgehen gilt für (Tief-) Kühlläger.

Für alle weiteren Berechnungen liegen die genauen Daten einiger Unternehmen vor. Unternehmen wollen aber meistens derartige Informationen nicht veröffentlichen. Aus diesem Grunde wird auf eine Quellenangabe verzichtet. Wenn nicht konkrete Eckdaten signifikant vieler Läger vorliegen, ist es nahezu unmöglich sinnvolle Aggregationsebenen anzugeben und eventuelle Interdependenzen großemäßig festzuhalten. Für diese Arbeit ist es gelungen eine spärliche Anzahl an Lagerinformationen zu erhalten. Das Ergebnis einer Auswertung des Gesamtenergieverbrauchs von 6 Lägern, teilweise über einen Zeitraum von einigen Jahren (in rot markiert), bezogen auf die Fläche sieht folgendermaßen aus:

⁵⁴ http://de.wikipedia.org/wiki/Zeitreihe_der_Lufttemperatur_in_Deutschland (09.05.2009)

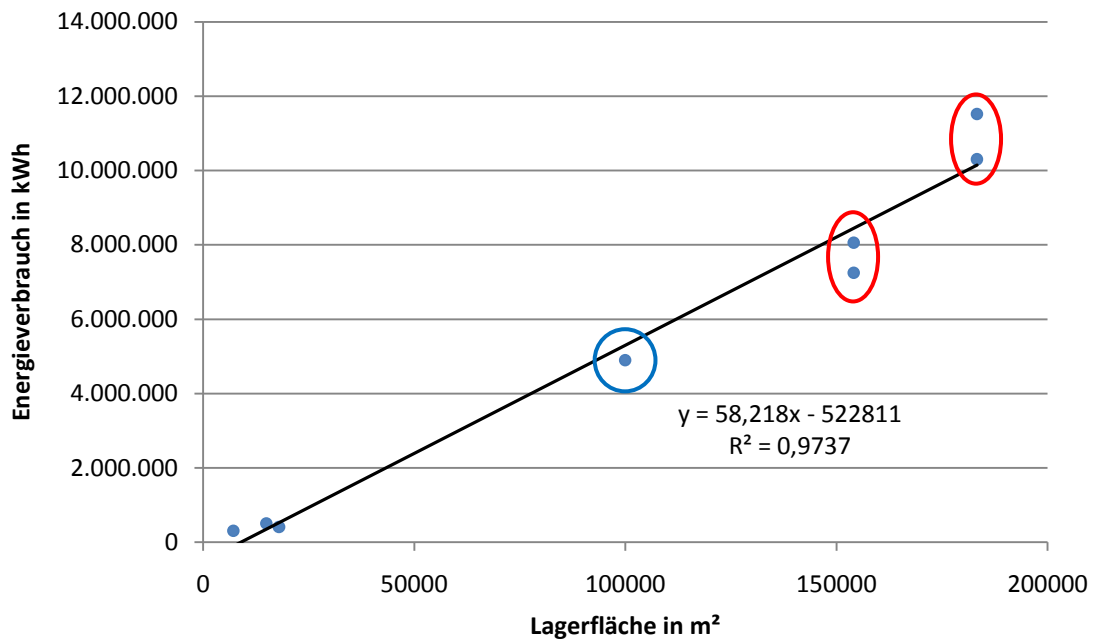


Abbildung 4.12: Energieverbrauchswerte in kWh/m² von 6 Lägern

Quelle: Eigene Darstellung

Es ist interessant, dass diese Ergebnisse sehr nahe an den Angaben vom BRE liegen. Ist die Lagerfläche wie hier, die einzige Einflussgröße, sind natürlich große Differenzen bzw. Abweichungen von dem ermittelten „Mittelwert“ (aufgrund der geringen Anzahl nicht signifikant) zu erwarten. Es fällt auf, dass das Bestimmtheitsmaß hier sehr hoch ist und nahe an eins liegt. Das bedeutet eine hohe Abbildungskraft der tatsächlichen Messwerte.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit lagen Informationen von insgesamt 13 Datenpunkten vor. Es konnten nicht alle Punkte berücksichtigt werden, weil es sich bei einigen entweder um Sonderfälle handelte oder die Informationsqualität fraglich war und daher nicht in die Berechnung mit Einfließen konnte. Das Bestimmtheitsmaß läge dabei unter 0,5. Sogar dann wäre ein Trend erkennbar, aber dieser würde die tatsächlichen Messwerte nur zu ungenau Beschreiben. In der obigen Berechnung sind ein Blocklager (BL), zwei Regalläger (RL) und zwei Hochregalläger (HRL) enthalten. Einige Läger enthalten ein Automatisches Kleinteilelager (AKL). Der blaue Punkt repräsentiert eine Lagerfläche von ca. 1,3 Mio m² und ist ein Mittelwert aller Läger eines großen Konzerns für den Strom- und Wärmeverbrauch. Die anderen machen insgesamt ca. 800.000m² Lagerfläche aus.

5. *Warehouse Site Planner der IBM*

Der Warehouse Site Planner (WSP) ist ein IBM-Tool für die strategische Netzwerkplanung und -optimierung. Er ist im IBM Forschungszentrum in Heidelberg entwickelt worden. Vier voneinander unabhängige Bibliotheken sind die Kernbestandteile von WSP; die Optimierung, eine vektorbasierte digitale Straßenkarte, die grafische Benutzeroberfläche und die Geschäftslogik (vgl. [Wilk2009], S. 43). Für die Optimierung kommen 14 verschiedene heuristische Algorithmen zum Einsatz. Dazu zählen z. B. der Threshold Accepting Algorithmus (TAA), Simulated annealing, Great deluge, Greedy, usw. Die digitale Straßenkarte von AND Data Solutions aus den Niederlanden enthält Straßendaten wie Straßentyp und Geschwindigkeit, wichtige Orte (points of interest) wie Seen, Flughäfen, usw. und Landesgrenzen der ganzen Welt⁵⁵. Die GUI verwendet den OpenGL-Standard und ermöglicht eine direkte Interaktion. Die Geschäftsbibliothek enthält Daten und Beziehungen über Zulieferer, Kunden, Aufträge, Transport- und Lagerhauskosten, Servicelevel, CO₂-Emission, usw.

Die digitale Straßenkarte von AND, u. a. auch von Google Maps, Microsoft, Nokia, usw. verwendet, unterscheidet für jedes Land zwölf verschiedene Straßentypen und erlaubt eine individuelle Anpassung der mittleren Geschwindigkeit je Straßentyp und Fahrzeugtyp. In Abhängigkeit vom Level wird ein großes Straßennetz abgedeckt. Eine digitale Straßenkarte berücksichtigt die reale Infrastruktur und sorgt für ein realistisches optimales Netzwerk bei der Lagerstandortbestimmung zwischen gegebenen Produktionsstätten und Debitoren. Ein Algorithmus für den kürzesten und schnellsten Weg ist in WSP integriert. WSP kann daher eine Kundenanbindung oder eine Anbindung der Lieferanten an Distributionszentren automatisch vornehmen. Die Hauptfunktionalität von WSP besteht darin, unter der Vorgabe von geschäftsrelevanten Randbedingungen einen optimalen Standortplan zu ermitteln. Wünscht der Kunde den Standort einiger Läger beizubehalten oder an konkreten Orten neue Läger zu errichten, so können diese im Netzwerk fixiert werden. Die weiteren Läger werden unter der Vorgabe der fixierten Läger und der weiteren Randbedingungen optimal ermittelt. Durch die heuristischen Optimierungsalgorithmen kann letztendlich mit jedem Optimierungslauf immer ein optimales Netzwerk bestimmt werden, bei dem alle Geschäftsanforderungen erfüllt sind oder mit dem die bestmögliche Annäherung erreicht wird. Dabei eignet sich WSP für bis zu drei-stufige Netzwerke.

⁵⁵ http://www.and.com/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=23 (09.05.2009)

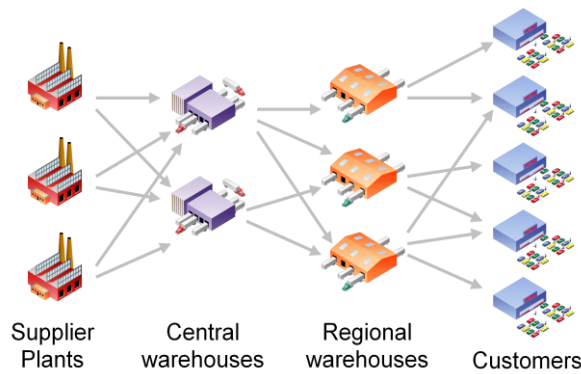


Abbildung 5.1: 3-stufiges Distributionsnetzwerk

Quelle: [Wilk2009]

Kunden, deren Lagerstandorte optimiert werden sollen, erhalten in Kundenprojekten mit WSP eine umfassende Beratung über potenzielle Maßnahmen zur Kostensenkung in der gesamten Lieferkette. Ein typischer Projektablauf sieht dabei wie folgt aus [Wilk2009]:

- Abstimmung der Anforderungen und Projektziele
- Datenbereitstellung und -aufbereitung
- Kostenanalyse und Kostenmodellierung
- WSP Modellgenerierung, Validierung und Feinabstimmung des Modells
- Durchführung der Optimierungen von Geschäftsszenarien, Simulation und Sensitivitätsanalyse

Anforderungen der Kunden können in der Software individuell modelliert werden. Neue Kostenmodelle werden automatisch in WSP übernommen und erweitern die Funktionalitäten von WSP ständig. Die langjährige Anwendung und Positionierung im Rahmen der Standortplanung entfaltete WSP zu einem Werkzeug, welches bei der Optimierung die unterschiedlichsten Ziele gleichzeitig verfolgt. Im Kontext dieser Arbeit ist die CO₂-Emission als ein Faktor, der mit anderen konkurrierend optimiert wird, betrachtet worden.

Drei zentrale Funktionen des WSP beantworten eine Vielzahl strategischer Fragen. Diese sind Visualisierung, Optimierung und Simulation. [Wilk2009] ist Grundlage folgender Beschreibung.

5.1 Visualisierung

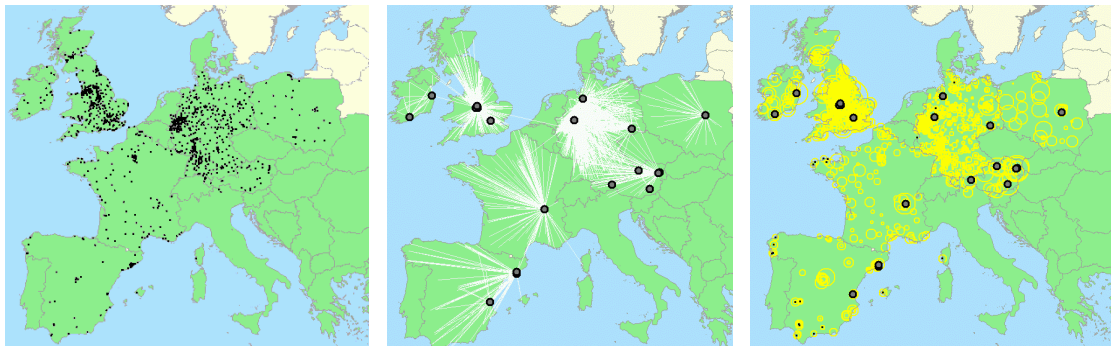


Abbildung 5.2: (a) Wo sind Debitoren, (b) wie angebunden und (c) mit welchem Volumenfluss?

5.2 Optimierung

Die Kernkompetenz von WSP ist die Optimierung eines Netzwerkes um die Rentabilität zu erhöhen. Zentrale Fragen, die dabei beantwortet werden sind vorwiegend die folgenden:

- Was ist die optimale Lageranzahl?
- Was sind optimale Lagerstandorte?
- Was ist die beste Kunde-Lager-Anbindung?
- Wie hoch sind mögliche Einsparungen?
- Wie stark können CO₂-Emissionen reduziert werden?
- Was bringt Konsolidierung und Aggregation im Transport?

Problemgrößen für ein Netzwerk mit ca. 300.000 Kundenstandorte, ca. 5.000 mögliche Lagerstandorte, ca. 100 Liefergruppen (Gruppe mit den gleichen Kostenfunktionen) und ca. 10.000.000 Datensätze für Lieferungen wurden auf einem Rechner mit einem Arbeitsspeicher von 2 GB RAM realisiert mit einer Laufzeit für einen Optimierungsauflauf von ca. 20 Minuten.

Die Zielfunktion besteht einerseits aus Kostenfunktionen (linear, nicht-linear, exponentiell, ...) für Transport und Lagerung und andererseits aus Strafkosten für CO₂-Emissionen und für Überschreitung der Lagerkapazität und der Lieferzeit. Der Gewichtungsfaktor fungiert als Regulator für jede Variable. Legt der Kunde wert darauf, eine besonders umweltfreundliche Lagerung zu realisieren, so kann diese in WSP über den Gewichtungsfaktor als Stellschraube manipuliert werden. Im Einzelnen sieht die Minimierungsfunktion wie folgt aus:

$$\begin{aligned} \text{MIN}(G_{\text{INB}} * C_{\text{INB}} + G_{\text{OUTB}} * C_{\text{OUTB}} + G_{\text{NET}} * C_{\text{NET}} + G_{\text{WH}} * C_{\text{WH}} + G_{\text{CD}} * C_{\text{CD}} + \\ P_{\text{LT}} * C_{\text{LT}} + P_{\text{CP}} * C_{\text{CP}} + P_{\text{CF}} * C_{\text{CF}}) \end{aligned}$$

mit G_x = Gewichtungsfaktor und P_x = Bestrafungsfaktor

- C_{INB} : Inbound Transportation (Plant to Warehouse / Central depot)
- C_{OUTB} : Outbound Transportation (Warehouse to Customer)

- C_{NET} : Network Transportation (Central depot to Warehouse)
- C_{WH} : Warehousing Costs
- C_{CD} : Central Depot Warehousing Costs
- C_{LT} : Lead Time Requirements
- C_{CP} : Warehouse Capacities
- C_{CF} : Carboon Footprint

5.3 Simulation

Die graphische Benutzeroberfläche (GUI) als visuelles Hilfsmittel ermöglicht über eine interaktive Echtzeitsimulation die Untersuchung der Auswirkungen von Veränderungen. Visuell und quantitativ können Auswirkungen einer Verschiebung, Schließung oder Neuöffnung eines Lagers oder Veränderungen der Servicezeiten auf der GUI abgelesen werden. Fragen in diesem Zusammenhang sind:

- Welcher Servicelevel kann erreicht werden?
- Welche Auswirkungen haben Hinzufügen, Schließen oder Verschieben eines Lagers?
- Welche Auswirkungen haben Nachfrageänderungen?
- Welche Auswirkungen haben Kostenänderungen?
- Wie kann das bestehende Netzwerk sukzessiv verbessert werden?

Beispiel einer Analyse, Optimierung und realistischen Umsetzung der Standorte mit WSP.

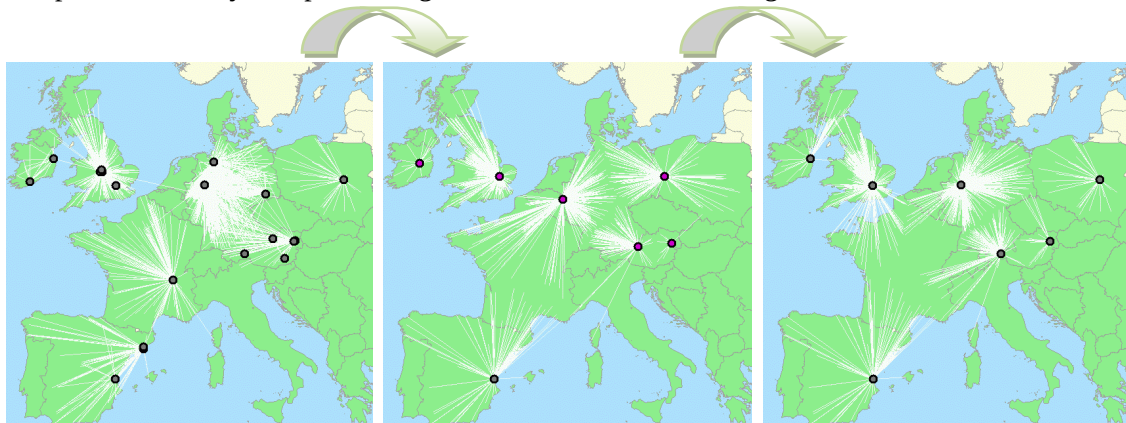
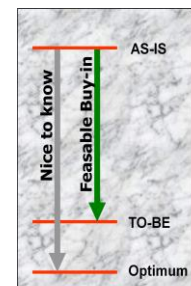


Abbildung 5.3: (a) Ist-Situation, (b) Optimum, (c) Soll-Situation

	Ist-Situation	Optimum	Soll-Situation
Gesamtkosten in Mrd. €	14,439	12,462	13,182
Anzahl Lagerhäuser	19	7	7
Servicelevel in %	99,3	99,4	99,4

Tabelle 5.1: Ergebnis eines Optimierungsprozesses



6. *Fazit und Ausblick*

Die Quintessenz ist eindeutig. Einer breiten fragenden Masse steht eine spärliche Menge an Informationen gegenüber. Der Energieverbrauch im Lager fand zu wenig Beachtung. Unbewusst spielte der Energieverbrauch häufig eine Nebenrolle und die Erfassung „blieb auf der Strecke“. Selbst in großen Konzernen ist der Verbrauch einzelner Läger unbekannt. Trotz großen Wettbewerbsschwierigkeiten und steigenden Kosten kann gerade die strategische Standortbestimmung und Netzwerkoptimierung bedeutende Wettbewerbsvorteile schaffen und eine langfristige Energiekostenreduktion mit sich bringen. Vorreiter in punkto Energieeffizienz profitieren recht bald und geben gleichzeitig Impulse für eine nachhaltige Logistik. In der Supply Chain muss noch mehr Verantwortungsbewusstsein der Umwelt gegenüber geschaffen werden. Der Appell kann daher nur lauten: Mehr Transparenz und Motivation für Energieeffizienz in der Distribution. Unternehmen tun sich schwer, selbst die Initiative zu ergreifen. Aufgrund der globalen Bedeutung werden wohl politisch progressive Reglementierungen für die gesamte Logistik nötig sein, um Regulierend in die Gesamtemission eines Landes eingreifen zu können, wie es der Weltklimarat in seinem Bericht für Großanlagen schon jetzt tut.

Bis dato fehlen umfangreiche Energieverbrauchserhebungen im Lager, die eine differenzierte Betrachtung ermöglichen. Differenziert deswegen, weil es mehr wesentliche Einflussgrößen auf den Energieverbrauch gibt, als die in dieser Arbeit vorgestellte Analyse auf Basis der Lagerfläche für den aggregierten Modellansatz. Ist eine signifikant fundierte Datenbasis geschaffen, gilt es nach dem Abschluss der Einflussgrößenbestimmung eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Mit einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von kleinen Änderungen der Parameter auf die Variablen untersucht. Dadurch erhält man Aufschluss über die Sensitivität einer Variable bezüglich eines Parameters.

Der Sachverhalt ist klar. Modelle für die Emissionsberechnung in der Distribution im Rahmen eines strategischen Netzwerkes können ausreichend verifiziert werden, Modelle für die Lagerhaltung dagegen nicht.

Abschließend ein Zitat von Christoph Hahn-Woernle, dem Sprecher des Forum Intralogistik im Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau und Geschäftsführender Gesellschafter des Intralogistik-Anbieters Viastore Systems, welches zusammenfassend die aktuelle Situation beschreibt: „Um als Intralogistikanbieter einem Kunden den Energieverbrauch eines neuen Lagers für bestimmte Auslastungsgrade nennen und vertraglich zusichern zu können, müsste man sehr aufwändige Simulationen durchführen [...]. Das würde auch den Rahmen von zehn Diplomarbeiten noch sprengen und auch wir können nur das machen, wofür wir bezahlt werden.“

7. *Literaturverzeichnis*

- [Arnold2006] Arnold, Dieter: Intralogistik – Potenziale, Perspektiven, Prognosen, Springer, 2006
- [Auer2007] von Auer, Ludwig: Ökonometrie – Eine Einführung, Springer, 2007
- [Becker2006] Becker, Hans-Joachim: Schreiber Marcel, Schaefer Martin, Berechnung von verkehrsbedingten Schadstoffemissionen – Anwendung der Software CO-PERT III, Eigener Verlag, TU Berlin, Fachgebiet Integrierte Verkehrsplanung, Juli 2006
- [BORKEN1999] Borken, J., Patyk, A.: Reinhardt, Guido A., IFEU: Basisdaten für ökologische Bilanzierungen – Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau; Verlag Vieweg, ISBN 3-528-03118-2; Braunschweig/Wiesbaden 1999
- [CT2004] Carbon Trust, Energy Consumption Guide – Energy use in Local Authority Buildings, ECG087, September 2004
- [DB2006] Kettner, Joachim: Bahn-Umwelt-Zentrum, Umweltkennzahlen 2006 – Daten und Fakten, Deutsche Bahn AG
- [DEFRA2008a] DEFRA, Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2008 Guidelines to Defra's GHG Conversion Factors: Methodology Paper for Transport Emission Factors, July 2008
- [DEFRA2008b] DEFRA, Department for Environment, Food and Rural Affairs, Guidelines to Defra's GHG Conversion Factors, Annexes updated April 2008
- [DEHST] Umweltbundesamt Deutsche Emissionshandelsstelle, <http://www.dehst.de/>, Rubrik Publikationen
- [DIN12464-1] Deutsches Institut für Normung e. V., Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2002, Verlag Beuth, Berlin, 2003
- [DIN18599-4] Deutsches Institut für Normung e. V., Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung, Verlag Beuth, Berlin, 2007

- [EEA2007] EEA, Methodology for the calculation of exhaust emissions – SNAPs 070100-070500, NFRs 1A3bi-iv, Version 6.0, 23. August 2007
- [EIA1999] Energy Information Administration, <http://www.eia.doe.gov/>, 1999
- [EURO2005] Watt, Andrew und Mancini, Stefano: EUROCONTROL Compendium, EPCC II, Brussels, November 2005, S. 6
- [GEMIS2008] Fritsche, Uwe R. und Klaus Schmidt: Handbuch zu: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Institut für angewandte Ökologie, Darmstadt, August 2008
- [Gie2007] Gienke, Helmuth und Kämpf, Rainer: Handbuch Produktion: Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling, Hanser Fachbuchverlag, Auflage: 1, Januar 2007
- [HBEFA2004] Keller, M. et al: INFRAS, Handbuch Emissionsfaktoren im Straßenverkehr, Ver. 2.1, Bern 2004
- [HeuTou2008] Heumann, Christian und Toutenburg, Helge: Deskriptive Statistik - Eine Einführung in Methoden und Anwendungen mit R und SPSS, Springer, 6 Auflage, S. 192f, 2008
- [HudNeu] Markus, Hudec und Neumann, Christian: Regression - Eine anwendungsorientierte Einführung, Institut für Statistik der Universität Wien, S. 13
- [IFEU] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Tremod, http://www.ifeu.org/index.php?bereich=ver&seite=projekt_tremod, 2009
- [IFEU2000] IFEU, Wissenschaftlicher Grundlagenbericht zur „Mobilitäts-Bilanz“ und zum Softwaretool „Reisen und Umwelt in Deutschland“, Nov. 2000, S. 6
- [IFEU2005] Knörr, Wolfram et al.: IFEU, Fortschreibung „Daten und Rechenmodell“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960 – 2030, Endbericht, Im Auftrag des UBA 2005, Heidelberg
- [IFEU2008] IFEU, EcoTransIT – Environmental Methodology and Data, Heidelberg Juli 2008
- [IML2007] Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, Bedeutung der Intralogistik, Dortmund, Juni 2007
- [IPCC2007] Weltklimarat, Sachstandsbericht 4 des Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007

- [IPCC2007a] Report of Working Group I of Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, 2007
- [IPCC2007c] Report of Working Group I of Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 5, Transport and its infrastructure, 2007
- [Koh1998] Kohler, Niklaus: Stand der Ökobilanzierung von Gebäuden und Gebäudebeständen, Institut für industrielle Bauproduktion (ifib), Universität Karlsruhe (TH), S. 2
- [Korevaar2002] Korevaar, Peter: Distribution Logistics: A 2-stage Optimization Model, Präsentation für die 32. Sitzung der Arbeitsgruppen Logistik / Optimierung Sachs Handel GmbH Schweinfurt, 31.01.02- 01.02.02
- [LH2007] Lufthansa, Verantwortung – Umweltkennzahlen 2007
- [LH2008] Lufthansa, Balance - Das Wichtigste zum Thema Nachhaltigkeit bei Lufthansa, Ausgabe 2008
- [LI2008a] LOGISTIK inside, Zeitschrift: Logistik & Supply Chain Management, 06/2008, S. 18
- [Magazin2008] Energie-Effizienz Magazin, Ausgabe 1, Verlag moderne Industrie, 1/2008
- [Martin2008] Martin Heinrich, Römisch Peter und Weidlich Andreas: Materialflusstechnik – Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik, 9 Auflage, Vieweg Verlag, 2008
- [Martin2009] Martin, Heinrich: Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik, 7 Auflage, Vieweg + Teubner, 2009
- [Sch2001] Schwarze, Jochen: Grundlagen der Statistik I, Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, 2001, S. 147f
- [Schwank2009] Schwank GmbH, Das Dunkelstrahler-Prinzip, S. 2
<http://www.schwank.de/pdf/Dunkelstrahler-Prinzip.pdf> (09.05.2009)
- [tenHom2006] ten Hompel, Michael und Jodin Dirk: Sortier- und Verteilsysteme, Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung, Springer, 2006
- [tenHom2007] ten Hompel Michael, Schmidt Thorsten und Nagel Lars: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik, 3. Auflage, Springer-Verlag, 2007

- [tenHom2008] ten Hompel, Michael und Heidenblut Volker: Taschenlexikon Logistik - Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik, 2. Auflage, Springer-Verlag 2008
- [The2006] Thessel, Friederike: Methoden II - Grundlegende multivariate Modelle der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse, Vorlesung SS 2006, 4 Sitzung, 2006
- [UBA1999] Rentz O., Nunge S., Karl U., Holtmann T., Zundel T.: Projekt, Machbarkeitsstudie zur Entwicklung eines Emissionsprojektionsmodells auf der Grundlage des CORINAIR-Ansatzes, Juli 1999
- [UIC2008] UIC, Rail Transport and Environment – Facts and Figures, June 2008
- [UN2003] United Nations, Glossary for Transport Statistics, 3rd Edition, S. 85
- [UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change
- [VdS2008] Vertrauen durch Sicherheit (VdS), Brandschutz für Kühl- und Tiefkühlager, Leitfaden für die Planung, Ausführung und den Betrieb, Verlag
- [Wilk2008] Wilk, Martin: GREEN Logistiknetzwerke aktiv planen, 2008
<http://www.boerse-go.de/nachricht/Gruene-Logistikplanung-senkt-CO2-Emissionen,a859341.html> (09.05.2009)
- [Wilk2009] Wilk, Martin: Warehouse Site Planner (WSP), For Establishing Optimal Distribution Structures, S. 40, 13.02.2009

8. Anhang

8.1 Emissionsfaktoren von TREMOD

Höchstmögliche Differenzierung im Straßenverkehr

Straßenart: AB=Autobahn, AO= Außerorts ohne AB, IO= Innerorts

Größenklasse: RT = Solo-Lkw, TT/AT = Sattelzug, Lastzug

EURO-Stufe: conv, EURO-1 – EURO-5

Year	Component	Layer Group	Vehicle Size	Road Group	g/tkm
2007	CO2	conv	RT <= 7,5t	AB	392,04
2007	CO2	conv	RT <= 7,5t	AO	336,37
2007	CO2	conv	RT <= 7,5t	IO	411,93
2007	CO2	conv	RT > 7,5-12t	AB	307,04
2007	CO2	conv	RT > 7,5-12t	AO	274,22
2007	CO2	conv	RT > 7,5-12t	IO	373,05
2007	CO2	conv	RT >12-14 t	AB	239,40
2007	CO2	conv	RT >12-14 t	AO	215,75
2007	CO2	conv	RT >12-14 t	IO	308,62
2007	CO2	conv	RT >14-20t	AB	214,96
2007	CO2	conv	RT >14-20t	AO	194,93
2007	CO2	conv	RT >14-20t	IO	319,30
2007	CO2	conv	RT >20-26t	AB	194,40
2007	CO2	conv	RT >20-26t	AO	189,19
2007	CO2	conv	RT >20-26t	IO	308,52
2007	CO2	conv	RT >26-28t	AB	169,53
2007	CO2	conv	RT >26-28t	AO	163,67
2007	CO2	conv	RT >26-28t	IO	257,50
2007	CO2	conv	RT >28-32t	AB	179,07
2007	CO2	conv	RT >28-32t	AO	172,94
2007	CO2	conv	RT >28-32t	IO	257,71
2007	CO2	conv	RT >32t	AB	161,07
2007	CO2	conv	RT >32t	AO	158,69
2007	CO2	conv	RT >32t	IO	254,29
2007	CO2	conv	TT/AT <=28t	AB	161,35
2007	CO2	conv	TT/AT <=28t	AO	150,76
2007	CO2	conv	TT/AT <=28t	IO	233,53
2007	CO2	conv	TT/AT >28-34t	AB	98,28
2007	CO2	conv	TT/AT >28-34t	AO	97,38
2007	CO2	conv	TT/AT >28-34t	IO	155,43
2007	CO2	conv	TT/AT >34-40t	AB	78,26
2007	CO2	conv	TT/AT >34-40t	AO	78,68
2007	CO2	conv	TT/AT >34-40t	IO	129,16

2007	CO2	Euro-1	RT <= 7,5t	AB	327,94
2007	CO2	Euro-1	RT <= 7,5t	AO	279,76
2007	CO2	Euro-1	RT <= 7,5t	IO	313,77
2007	CO2	Euro-1	RT > 7,5-12t	AB	265,76
2007	CO2	Euro-1	RT > 7,5-12t	AO	236,87
2007	CO2	Euro-1	RT > 7,5-12t	IO	303,92
2007	CO2	Euro-1	RT >12-14 t	AB	207,55
2007	CO2	Euro-1	RT >12-14 t	AO	187,85
2007	CO2	Euro-1	RT >12-14 t	IO	257,66
2007	CO2	Euro-1	RT >14-20t	AB	179,69
2007	CO2	Euro-1	RT >14-20t	AO	165,68
2007	CO2	Euro-1	RT >14-20t	IO	258,68
2007	CO2	Euro-1	RT >20-26t	AB	170,75
2007	CO2	Euro-1	RT >20-26t	AO	165,50
2007	CO2	Euro-1	RT >20-26t	IO	263,07
2007	CO2	Euro-1	RT >26-28t	AB	149,38
2007	CO2	Euro-1	RT >26-28t	AO	145,61
2007	CO2	Euro-1	RT >26-28t	IO	223,19
2007	CO2	Euro-1	RT >28-32t	AB	160,32
2007	CO2	Euro-1	RT >28-32t	AO	156,31
2007	CO2	Euro-1	RT >28-32t	IO	229,57
2007	CO2	Euro-1	RT >32t	AB	145,04
2007	CO2	Euro-1	RT >32t	AO	143,97
2007	CO2	Euro-1	RT >32t	IO	227,30
2007	CO2	Euro-1	TT/AT <=28t	AB	137,12
2007	CO2	Euro-1	TT/AT <=28t	AO	129,21
2007	CO2	Euro-1	TT/AT <=28t	IO	193,16
2007	CO2	Euro-1	TT/AT >28-34t	AB	88,61
2007	CO2	Euro-1	TT/AT >28-34t	AO	88,48
2007	CO2	Euro-1	TT/AT >28-34t	IO	139,86
2007	CO2	Euro-1	TT/AT >34-40t	AB	70,59
2007	CO2	Euro-1	TT/AT >34-40t	AO	71,15
2007	CO2	Euro-1	TT/AT >34-40t	IO	115,21
2007	CO2	Euro-2	RT <= 7,5t	AB	315,50
2007	CO2	Euro-2	RT <= 7,5t	AO	270,57
2007	CO2	Euro-2	RT <= 7,5t	IO	294,09
2007	CO2	Euro-2	RT > 7,5-12t	AB	256,81
2007	CO2	Euro-2	RT > 7,5-12t	AO	229,00
2007	CO2	Euro-2	RT > 7,5-12t	IO	284,65
2007	CO2	Euro-2	RT >12-14 t	AB	198,84
2007	CO2	Euro-2	RT >12-14 t	AO	180,98
2007	CO2	Euro-2	RT >12-14 t	IO	241,22
2007	CO2	Euro-2	RT >14-20t	AB	170,39
2007	CO2	Euro-2	RT >14-20t	AO	158,75
2007	CO2	Euro-2	RT >14-20t	IO	240,37
2007	CO2	Euro-2	RT >20-26t	AB	163,26
2007	CO2	Euro-2	RT >20-26t	AO	159,22
2007	CO2	Euro-2	RT >20-26t	IO	245,60
2007	CO2	Euro-2	RT >26-28t	AB	142,86

2007	CO2	Euro-2	RT >26-28t	AO	140,51
2007	CO2	Euro-2	RT >26-28t	IO	209,30
2007	CO2	Euro-2	RT >28-32t	AB	153,89
2007	CO2	Euro-2	RT >28-32t	AO	151,46
2007	CO2	Euro-2	RT >28-32t	IO	216,35
2007	CO2	Euro-2	RT >32t	AB	139,19
2007	CO2	Euro-2	RT >32t	AO	139,07
2007	CO2	Euro-2	RT >32t	IO	213,23
2007	CO2	Euro-2	TT/AT <=28t	AB	130,97
2007	CO2	Euro-2	TT/AT <=28t	AO	124,37
2007	CO2	Euro-2	TT/AT <=28t	IO	181,37
2007	CO2	Euro-2	TT/AT >28-34t	AB	84,81
2007	CO2	Euro-2	TT/AT >28-34t	AO	84,96
2007	CO2	Euro-2	TT/AT >28-34t	IO	130,08
2007	CO2	Euro-2	TT/AT >34-40t	AB	67,83
2007	CO2	Euro-2	TT/AT >34-40t	AO	68,75
2007	CO2	Euro-2	TT/AT >34-40t	IO	107,74
2007	CO2	Euro-3	RT <= 7,5t	AB	325,57
2007	CO2	Euro-3	RT <= 7,5t	AO	278,57
2007	CO2	Euro-3	RT <= 7,5t	IO	306,82
2007	CO2	Euro-3	RT > 7,5-12t	AB	267,07
2007	CO2	Euro-3	RT > 7,5-12t	AO	237,06
2007	CO2	Euro-3	RT > 7,5-12t	IO	297,95
2007	CO2	Euro-3	RT >12-14 t	AB	206,50
2007	CO2	Euro-3	RT >12-14 t	AO	187,08
2007	CO2	Euro-3	RT >12-14 t	IO	252,31
2007	CO2	Euro-3	RT >14-20t	AB	177,97
2007	CO2	Euro-3	RT >14-20t	AO	165,30
2007	CO2	Euro-3	RT >14-20t	IO	252,88
2007	CO2	Euro-3	RT >20-26t	AB	170,18
2007	CO2	Euro-3	RT >20-26t	AO	165,22
2007	CO2	Euro-3	RT >20-26t	IO	257,61
2007	CO2	Euro-3	RT >26-28t	AB	149,13
2007	CO2	Euro-3	RT >26-28t	AO	145,81
2007	CO2	Euro-3	RT >26-28t	IO	219,50
2007	CO2	Euro-3	RT >28-32t	AB	160,39
2007	CO2	Euro-3	RT >28-32t	AO	157,20
2007	CO2	Euro-3	RT >28-32t	IO	226,05
2007	CO2	Euro-3	RT >32t	AB	144,67
2007	CO2	Euro-3	RT >32t	AO	143,82
2007	CO2	Euro-3	RT >32t	IO	222,95
2007	CO2	Euro-3	TT/AT <=28t	AB	136,79
2007	CO2	Euro-3	TT/AT <=28t	AO	129,31
2007	CO2	Euro-3	TT/AT <=28t	IO	190,07
2007	CO2	Euro-3	TT/AT >28-34t	AB	90,48
2007	CO2	Euro-3	TT/AT >28-34t	AO	89,62
2007	CO2	Euro-3	TT/AT >28-34t	IO	137,23
2007	CO2	Euro-3	TT/AT >34-40t	AB	70,30
2007	CO2	Euro-3	TT/AT >34-40t	AO	70,79

2007	CO2	Euro-3	TT/AT >34-40t	IO	112,68
2007	CO2	Euro-4	RT <= 7,5t	AB	325,57
2007	CO2	Euro-4	RT <= 7,5t	AO	278,57
2007	CO2	Euro-4	RT <= 7,5t	IO	306,82
2007	CO2	Euro-4	RT > 7,5-12t	AB	267,07
2007	CO2	Euro-4	RT > 7,5-12t	AO	237,06
2007	CO2	Euro-4	RT > 7,5-12t	IO	297,95
2007	CO2	Euro-4	RT >12-14 t	AB	206,50
2007	CO2	Euro-4	RT >12-14 t	AO	187,08
2007	CO2	Euro-4	RT >12-14 t	IO	252,31
2007	CO2	Euro-4	RT >14-20t	AB	177,97
2007	CO2	Euro-4	RT >14-20t	AO	165,30
2007	CO2	Euro-4	RT >14-20t	IO	252,88
2007	CO2	Euro-4	RT >20-26t	AB	170,18
2007	CO2	Euro-4	RT >20-26t	AO	165,22
2007	CO2	Euro-4	RT >20-26t	IO	257,61
2007	CO2	Euro-4	RT >26-28t	AB	149,13
2007	CO2	Euro-4	RT >26-28t	AO	145,81
2007	CO2	Euro-4	RT >26-28t	IO	219,50
2007	CO2	Euro-4	RT >28-32t	AB	160,39
2007	CO2	Euro-4	RT >28-32t	AO	157,20
2007	CO2	Euro-4	RT >28-32t	IO	226,05
2007	CO2	Euro-4	RT >32t	AB	144,67
2007	CO2	Euro-4	RT >32t	AO	143,82
2007	CO2	Euro-4	RT >32t	IO	222,95
2007	CO2	Euro-4	TT/AT <=28t	AB	136,79
2007	CO2	Euro-4	TT/AT <=28t	AO	129,31
2007	CO2	Euro-4	TT/AT <=28t	IO	190,07
2007	CO2	Euro-4	TT/AT >28-34t	AB	92,88
2007	CO2	Euro-4	TT/AT >28-34t	AO	92,00
2007	CO2	Euro-4	TT/AT >28-34t	IO	138,79
2007	CO2	Euro-4	TT/AT >34-40t	AB	70,30
2007	CO2	Euro-4	TT/AT >34-40t	AO	70,82
2007	CO2	Euro-4	TT/AT >34-40t	IO	112,73
2007	CO2	Euro-5	RT <= 7,5t	AB	315,81
2007	CO2	Euro-5	RT <= 7,5t	AO	270,21
2007	CO2	Euro-5	RT <= 7,5t	IO	297,62
2007	CO2	Euro-5	RT > 7,5-12t	AB	259,06
2007	CO2	Euro-5	RT > 7,5-12t	AO	229,95
2007	CO2	Euro-5	RT > 7,5-12t	IO	289,02
2007	CO2	Euro-5	RT >12-14 t	AB	200,30
2007	CO2	Euro-5	RT >12-14 t	AO	181,47
2007	CO2	Euro-5	RT >12-14 t	IO	244,74
2007	CO2	Euro-5	RT >14-20t	AB	172,63
2007	CO2	Euro-5	RT >14-20t	AO	160,34
2007	CO2	Euro-5	RT >14-20t	IO	245,29
2007	CO2	Euro-5	RT >20-26t	AB	165,07
2007	CO2	Euro-5	RT >20-26t	AO	160,26
2007	CO2	Euro-5	RT >20-26t	IO	249,88

2007	CO2	Euro-5	RT >26-28t	AB	144,66
2007	CO2	Euro-5	RT >26-28t	AO	141,44
2007	CO2	Euro-5	RT >26-28t	IO	212,91
2007	CO2	Euro-5	RT >28-32t	AB	155,57
2007	CO2	Euro-5	RT >28-32t	AO	152,49
2007	CO2	Euro-5	RT >28-32t	IO	219,27
2007	CO2	Euro-5	RT >32t	AB	140,33
2007	CO2	Euro-5	RT >32t	AO	139,50
2007	CO2	Euro-5	RT >32t	IO	216,26
2007	CO2	Euro-5	TT/AT <=28t	AB	132,68
2007	CO2	Euro-5	TT/AT <=28t	AO	125,43
2007	CO2	Euro-5	TT/AT <=28t	IO	184,37
2007	CO2	Euro-5	TT/AT >28-34t	AB	90,09
2007	CO2	Euro-5	TT/AT >28-34t	AO	89,24
2007	CO2	Euro-5	TT/AT >28-34t	IO	134,62
2007	CO2	Euro-5	TT/AT >34-40t	AB	68,18
2007	CO2	Euro-5	TT/AT >34-40t	AO	68,58
2007	CO2	Euro-5	TT/AT >34-40t	IO	109,11

Tabelle 8.1: Höchstmögliche Differenzierung von TREMOD im Straßenverkehr

Component	Company	Train Group	Traction	g/tkm
CO2	Eisenbahn	Güterverkehr	Diesel	28,13
CO2	Eisenbahn	Güterverkehr	Strom	22,81

Tabelle 8.2: Höchstmögliche Differenzierung von TREMOD im Schienenverkehr

Year	Component	Transport Sector	Distance Group	Specific Value
2007	CO2	Güterverkehr	Ausland	784,36
2007	CO2	Güterverkehr	Inland	1.414,12

Tabelle 8.3: Höchstmögliche Differenzierung von TREMOD im Flugverkehr

Year	Component	Transport Sector	g/tkm
2007	CO2	Güterverkehr	34,15

Tabelle 8.4: Höchstmögliche Differenzierung von TREMOD im Binnenschiffverkehr

8.2 Einflussfaktoren auf den Dieserverbrauch eines LKW

Auswirkung verschiedener Einflüsse auf den Dieserverbrauch eines LKW

Einflussfaktor	Beschreibung	Wirkung
Fahrerhaus	Höhe 3,0 statt 4,0 Meter	-3,3
	Fahrgestellverkleidung	-0,4
	Dachscheinwerfer zusätzlich	+0,8
	Drucklufthörner zusätzlich	+0,2
	Anhänger / Auflieger mit Seitenverkleidung	-1,0
	Abstand zwischen Fahrerhaus und Auflieger zu groß	+1,4
Reifen und Räder	Energiesparreifen statt normales Profil	-0,2
	volle Profiltiefe (Neureifen)	+2,2
	Niederquerschnittreifen	-0,3
	Runderneuerte Reifen statt neuer Reifen	+1,8
	Nachgeschnittenes Profil statt neuer Reifen	-1,3
	Super-Breitreifen statt Zwillingsbereifung	-0,7
Hinterachstyp	Hypoid- statt Außenplanetenachse	-0,7
Antriebsachsen	eine statt zwei Antriebsachsen	-3,3
Hinterradübersetzung	Bei zu kurzer Übersetzung ist die Drehzahl bei Auslegungsgeschwindigkeit zu hoch	+1,7
Nebenverbraucher	LED-Tagfahrlicht statt Halogenlampen	-0,1
Fahrgeschwindigkeit	90 statt 85 Kilometer pro Stunde	+2,6
Fahrweise	Gleichmäßige Fahrweise, kein unnötiges Bremsen / Beschleunigen und ähnliches	-5,0
Nebenverbraucher	Beheizen des Fahrzeuges im Stand: Motor statt Standheizung	+2,2
	Kühlen des Fahrzeuges mit Klimaanlage	+3,0
	Motor im Stand warmlaufen lassen	+1,3
	Stromverbrauch (Zusatzgeräte: 1 kW = 0,6 l auf 100 km/h)	+0,2
Topographie	Stadtfahrt statt Autobahn	+33,0
	„Schwere“ statt „leichte“ Autobahn	+6,6
Niederschlag	Fahrbahnbelag feucht statt trocken	+0,7
	Fahrbahnbelag nass statt trocken	+1,7
Wind	Starker Gegenwind	+3,3
Außentemperatur	30 statt 10 Grad Celsius	-1,7
Nebenabtriebe	Arbeiten im Nebenabtrieb (zum Beispiel: Silozug, Betonmischer)	+0,0
Druckluftanlage	Undicht: ständiges Aufpumpen (Luftfederung)	+0,6
Reifenluftdruck	zwei Bar zu niedrig (pro Reifen)	+0,2
Dachspoiler	Falsch eingestellt	+1,2
Plane oder Aufbau	Nicht richtig verzurrt oder offen	+5,0
Achsgometrie	Schräglauflauft weicht eins vom Sollwert ab (je Achse)	+1,7
	Nicht parallel abgestimmte Spur	+5,9

Ein verkleidetes Fahrgestell am Fahrerhaus senkt den Verbrauch im Durchschnitt um 0,4 Liter auf 100 Kilometern. Zusätzlich montierte Dachscheinwerfer erhöht den Verbrauch auf der gleichen Strecke im Schnitt um 0,8 Liter.

Die Angaben sind Näherungswerte, die einen Eindruck der Wirkungsweise verschiedener Einflüsse, Fahrweisen, Ausstattungsmerkmale oder Technologien auf den Dieserverbrauch eines LKW im Fernverkehr vermitteln sollen.

Legende:

■ Minderverbrauch in Litern pro 100 Kilometer / ■ Mehrverbrauch in Litern pro 100 Kilometer

Abbildung 8.1: Einflussfaktoren für den Dieserverbrauch von LKW

Quelle: http://www.logistik-inside.de/fm/3576/LOGISTIK_inside_LKW_Dieserverbrauch.pdf
(09.05.2009)

8.3 Heizkostenberechnung

Halle	Schönberg	Heizlast nach DIN EN 12831									
Temperaturen	Außentemp θ_e	-12	°C	Innentemperatur $\theta_{int,i}$	12	°C					
	Jahresmittel $\theta_{m,e}$	8,4	°C	Luftwechsel n	0,15	h ⁻¹					
Geometrie	Länge l_{Geb}	240,6	m	Abzügliche Bodenfläche			m ²				
	Breite b_{Geb}	168,6	m	Abzüglich Volumen			m ³				
	Mittlere Höhe h_{Geb}	12	m								
Erdreich	Fußboden	U = 1 W/m ² K									
	Grundwassertiefe	3	m	Erdreich berührter Umfang P	818,4	m					
Bauweise Wärmebrücker mit bauseitiger Ausführung der Bauteilanschlüsse nach DIN 4108, Beiblatt 2											

	Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite	Länge/ Höhe	Abzugsfläche	Nettofläche	Korrekturfaktoren	U-Wert	Korrekturwert t	Wärmebrück	korrigierter U-Wert	Wärmeverlust t -koeffizient	Transmissio n_s	Wärmeverlust t
			n	l	b/h	A _{Abzug}	A _{Netto}	e/b_u	U	ΔU_{WB}	U _{c/equiv}		H _T		Φ_T
					m		m ²	f_{g2}/f_{ij}		W/m ² K			W/K		kW
Verluste an das Erdreich															
1		FB	1	240,6	168,6		40565,2	0,15				0,10	853		20,5
2		DE													
Verluste nach außen															
3		DA	1	252,6	168,6		42593,4	1,00	0,33	0,0	0,33		14055,83		337,3
4		DA													
5		D-Vergl													
6		D-Vergl													
7		AW	2	240,6	12		5774,4	1,00	0,56	0,0	0,56		3233,66		77,6
8		AW	2	168,6	12	1062,4	2984,0	1,00	0,56	0,0	0,56		1671,04		40,1
9		AW													
10		AW													
11		AW													
12		AF													
13		AF													
14		AF													
15		Tor	40	4	4		640,0	1,00	1,66	0,0	1,66		1062,40		25,5
16		Tor													
17		Tor													
Verluste durch unbeheizte Nachbarräume															
18		IW													
19		IW													
Wärmefluss zwischen beheizten Räumen unterschiedlicher Temperatur															
20		IW													
21		IW													
Transmissionswärmeverlust						H_T / Φ_T						20.876	501,0		
Lüftungswärmeverlust						H_V / Φ_V						24.826	595,8		
Norm-Gebäudeheizlast						H_{HL} / Φ_{HL}		Höhenkorrigiert nach Anhang B				45.702	1.261,4		
Grundfläche A: 40565 m² Hallenvolumen V: 486782 m³ Luftvol.-strom, LW: 73017 m³/h flächenbez. Normwärmebedarf: 31 W/m² volumenbez. Normwärmebedarf: 3 W/m³ Gesamtumhüllungsfläche: 92557 m² Kritischer-Wert, D: 0,23 W/(m²K)															

Abbildung 8.2: Beispielrechnung für Heizkosten

Quelle: Schwank GmbH