IPP-Report

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Tobias Hartmann

Beschreibung des Übergangs von konventionellen zu fortschrittlichen Verkehrstechnologien als Phasenübergang

IPP 16/20
Dezember, 2009

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **III**

Tabellenverzeichnis **V**

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis **VI**

1. Einleitung **1**

2. Das Modellierungskonzept der Soziodynamik **3**
2.1. Konfiguration der Makrovariablen 4
2.1.1. Materielle Variablen 4
2.1.2. Extensive personelle Variablen 5
2.1.3. Intensive personelle Variablen 6
2.1.4. Trend- und Kontrollparameter 7
2.2. Elementare Dynamik 8
2.2.1. Elementare Entwicklungsschritte 8
2.2.2. Übergangsraten 9
2.3. Entwicklungsgleichungen 12
2.3.1. Mastergleichung 12
2.3.2. Quasimittelwertgleichungen 14

3. Grundlagen der Verkehrsentwicklung **16**
3.1. Allgemeine Entwicklungen im Verkehrssektor 16
3.2. Einflussfaktoren der Verkehrsmittelwahl 24
3.2.1. Faktor Reisezeit 25
3.2.2. Faktor Kosten 26
3.2.3. Faktor Gewohnheit 28
3.2.4. Sonstige Faktoren 29
3.3. Etablierte Verkehrsmittel 32
3.3.1. Auto mit Verbrennungsmotor 33
3.3.2. Eisenbahn 37
3.3.3. Flugzeug 39
3.4. Neue Verkehrsmittel 41
3.4.1. Elektroauto 41
3.4.2. Hochgeschwindigkeitsschienenverkehr 45

4. Physikalische und technische Simulation eines Automobils **50**

4.1. Physikalische Grundlagen des Autos 50
4.2. Auto mit Verbrennungsmotor 58
4.3. Auto mit Elektromotor 65

5. Entwicklung eines Verkehrsmodells 71
5.1. Definition der Makrovariablen und der Kontrollparameter 71
5.2. Nutzenfunktion und Übergangsraten 74
5.3. Entwicklungsgleichungen 77

6. Exkurs: Differentialgleichungen 80
6.1. Gewöhnliche Differentialgleichungen 80
6.2. Das Runge-Kutta-Verfahren 82

7. Anwendung des Verkehrsmodells auf die Verbindung Paris - Marseille 87
7.1. Darstellung der Verkehrssituation 87
7.2. Simulation mit einem Verkehrsmodell 92

8. Simulation einer einfachen Modellwelt 98
8.1. Darstellung der Modellwelt 98
8.2. Basisszenario 103
8.3. Szenario I: Niedrigerer Grenzwert für den Marktanteil 104
8.4. Szenario II: Steigende Kraftstoffpreise 106
8.5. Szenario III: Innovationen im neuen Verkehrssystem 108

9. Zusammenfassung und Ausblick 112

Literaturverzeichnis 119

A. Anhang 120
A.1. Physikalische und technische Simulation des Automobils 120
A.2. Runge-Kutta-Verfahren 123
A.3. Verkehrsmodell Paris - Marseille 126

Abbildungsverzeichnis

3.1. Unterteilung des Verkehrssektors 17
3.2. Aufteilung des deutschen Verkehrsnetzes 2003 18
3.3. Autobahnstrecken in Europa 19
3.4. Entwicklung der Personenverkehrsleistung von 1990 bis 2006 20
3.5. Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung im Zeitvergleich 21
3.6. Modal-Split des Personenverkehrs 2003 22
3.7. Entwicklung der durchschnittlichen Kraftstoffpreise 23
3.8. Modal-Split verschiedener Verkehrsmittel über die Entfernung 33
3.9. Mittlere Wegegeschwindigkeiten nach Hauptverkehrsmittel 35
3.10. Personenverkehrsleistung des TGVs 45
3.11. Hochgeschwindigkeitsverkehrsstrecken Europas 46
3.12. Spezifischer Energiebedarf von ICE und Transrapid 48

4.1. Energieumwandlung im Auto 51
4.2. Simulation Pkw: Stammebene 55
4.3. Simulation Pkw: Subsystem Strecke 56
4.4. Simulation Pkw: Geschwindigkeit und Beschleunigung des NEFZ 57
4.5. Simulation Pkw: Subsystem Fahrwiderstände 58
4.6. Fahrwiderstände der Simulation mit Verbrennungsmotor im NEFZ 60
4.7. Simulation Pkw: Subsystem Antriebsstrang 60
4.8. Simulation Pkw: Subsystem Getriebe 61
4.9. Simulation Pkw: Subsystem Motor 62
4.10. Kraftstoffverbrauch der Simulation mit Verbrennungsmotor im NEFZ . . 64
4.11. Fahrwiderstände der Simulation mit Elektromotor im NEFZ 67
4.12. Simulation ePkw: Subsystem Antriebsstrang 68
4.13. Energiebedarf der Simulation mit Elektromotor im NEFZ 69

6.1. Hilfssteigungen des Runge-Kutta-Verfahrens 84

7.1. Schnellfahrstrecken des TGV 88
7.2. Inländischer Fluggastverkehr ausgewählter französischer Flughäfen 89
7.3. Entwicklung der Passagierzahlen der Flugverbindung Marseille - Paris . . 90
7.4. Numerische Lösung der Bewegungsgleichung 95
7.5. Vergleich der Ergebnisse des Verkehrsmodells mit der Realität 96

8.1. Schematische Darstellung der Modellwelt 98
8.2. Basisszenario: Soziokonfiguration 104

8.3. Szenario I: Soziokonfiguration 105
8.4. Szenario II: Entwicklung der Kosten des konv. Autos 107
8.5. Szenario II: Soziokonfiguration 108
8.6. Szenario III: Entwicklung der Güte von Elektroauto und Transrapid . . . 109
8.7. Szenario III: Entwicklung weiterer Eigenschaften des Transrapids 110
8.8. Szenario III: Soziokonfguration 111

A.1. Schaltdiagramm der Simulation im NEFZ 120
A.2. Muscheldiagramm 1,9 Liter TDI mit 66 kW 121
A.3. Motorenkennfeld 1,9 Liter TDI mit 66 kW 121
A.4. Spezifischer Verbrauch der Simulation im NEFZ 122
A.5. Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors der Simulation im NEFZ 122
A.6. Quellcode: Runge-Kutta-Algorithmus 1 123
A.7. Quellcode: Runge-Kutta-Algorithmus 2 124
A.8. Quellcode: Runge-Kutta-Algorithmus 3 125
A.9. Ticketkosten und Fahrtdauer von Flugzeug und TGV 1 126
A.10. Ticketkosten und Fahrtdauer von Flugzeug und TGV 2 127

Tabellenverzeichnis

2.1. Beispiel für eine Skala einer intensiven personellen Variablen 7

3.1. Kraftfahrzeugsegmente des KBA 34
3.2. Gesamtkosten ausgewählter Kraftfahrzeuge 36
3.3. Spezifische Energieverbräuche und Emissionsfaktoren der Bahn 39
3.4. Spezifische Energieverbräuche verschiedener Flugzeugtypen 40
3.5. Energiebedarf einiger Elektroautos 44

4.1. Koeffizienten des Rollwiderstandsbeiwerts 52
4.2. Rotationsmassenfaktor 53
4.3. Technische Daten des Audi A3 1.9 TDI (77kW) 59
4.4. Technische Daten ausgewählter Pkws 66
4.5. Optimierte Koeffizienten des Rollwiderstandsbeiwerts 66

7.1. Zeitbedarf der Strecke Paris - Marseille 91
7.2. Ticketkosten der Strecke Paris - Marseille 91
7.3. Parameter der Verkehrspopulation 94
7.4. Parameter der Verkehrsmittel 94
7.5. Gewichtungsfaktoren und Flexibilität des Verkehrsmodells 94

8.1. Subpopulationen der Modellwelt 99
8.2. Parameter des etablierten Verkehrssystems 101
8.3. Parameter des neuen Verkehrssystems 101

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

a^α		Arbeitszeit von $\mathcal{P}^\alpha$ pro Monat in Stunden
a	[m/s^2]	Beschleunigung
α	[°]	Steigungswinkel der Fahrbahn
A	[m^2]	Querschnittsfläche
B	[dm^3/h]	Kraftstoffverbrauch
b_e	[g/kWh]	spezifischer Kraftstoffverbrauch
ct		Cent
c_W		Luftwiderstandsbeiwert
Δu^α		Differenz der Nutzenfunktionen
DIW		Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
e^α		Nettoeinkommen von $\mathcal{P}^\alpha$ pro Monat in Euro
e_{Fi}		Rotationsmassenfaktor
$\eta_{Getriebe}$	[%]	Getriebewirkungsgrad
Eurostat		Statistisches Amt der Europäischen Gemeinschaften
$f^\alpha_{i,j}$		Fahrleistung von $\mathcal{P}^\alpha$ pro Monat mit Verkehrsmittel j in Pkm
F_B	[N]	Beschleunigungswiderstand
F_L	[N]	Luftwiderstand
F_R	[N]	Rollwiderstand
f_R		Rollwiderstandsbeiwert
f_{R0}		Koeffizient Rollwiderstandsbeiwert
f_{R1}		Koeffizient Rollwiderstandsbeiwert
f_{R4}		Koeffizient Rollwiderstandsbeiwert
F_S	[N]	Steigungswiderstand
F_W	[N]	Gesamtfahrwiderstand
$g^\alpha_{i,j}$		Güte des Verkehrsmittels j von $\mathcal{P}^\alpha$
γ^α		Gewichtungsfaktor Güte
g	[m/s^2]	Erdbeschleunigung
G^α_i		Faktor Güte

H_u	[MJ/kg]	spezifischer Heizwert
i		Übersetzungsverhältnis des Antriebsstrangs
ICE		Intercity-Express
IFEU		Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
infas		Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH
J		Joule (1J = 2,778·10^{-7} kWh)
K_i^α		Faktor Kosten
$k_{i,j}^\alpha$		Kosten des Verkehrsmittels j von $\mathcal{P}^\alpha$ in EUR/km
κ^α		Gewichtungsfaktor Kosten
$\boldsymbol{\kappa}$		Trendparameterkonfiguration
km		Kilometer
CO_2		Kohlenstoffdioxid
kWh		Kilowattstunden
l		Liter
m	[kg]	Fahrzeugmasse
m_e	[kg]	effektive Masse
$\mathbf{m}$		materielle Konfiguration
m_k		materielle Variable
MIV		motorisierter Individualverkehr
M_{Motor}	[Nm]	Drehmoment des Motors
M_k		Motivationspotential
M_{ji}^α		Motivationspotential
$M_{i\vartheta}^\alpha$		Motivationspotential
M_R	[Nm]	Drehmoment der Antriebsräder
μ_0		Skalierungsfaktor
μ_k		Übergangsflexibilität
NEFZ		Neuer Europäischer Fahrzyklus
N		Anzahl der Mitglieder der Gesamtpopulation
N_{Motor}	[1/s]	Drehzahl des Motors
n_R	[1/s]	Drehzahl der Antriebsräder
$\mathbf{n}$		Soziokonfiguration
n_i^α		Anzahl der Mitglieder von $\mathcal{P}^\alpha$ mit Einstellung i
N^α		Anzahl der Mitglieder von $\mathcal{P}^\alpha$
ν_{ji}^α		Übergangsflexibilität

ν_0		Skalierungsfaktor
ν_i^α		Nutzenfunktion
$\mathcal{P}^\alpha$		Subpopulation α
p_{ij}^α		Übergangsrate einzelner Individuen
Pkm		Personenkilometer
π		Kreiszahl
Pkw		Personenkraftwagen
p_e	[bar]	mittlerer Kolbendruck, Mitteldruck
P_{Nutz}	[W]	Nutzleistung
P_R	[W]	Leistung an den Antriebsrädern
P		Wahrscheinlichkeitsverteilung
r_{dyn}	[m]	dynamischer Reifenhalbmesser
r	[m]	statischer Reifenhalbmesser
ρ_0		Skalierungsfaktor
ϱ_{Luft}	[kg/m^3]	Luftdichte
$\rho_{i\vartheta}^\alpha$		Übergangsflexibilität
SNCF		Société nationale des chemins de fer français
SP		Subpopulation
T		Grenzwert
TGV		Train à grande vitesse, dt. Hochgeschwindigkeitszug
θ^α		Gewichtungsfaktor Gewohnheit
ϑ_i^α		intensive personelle Variable
$\boldsymbol{\vartheta}$		Konfiguration der intensiven personellen Variablen
t		Tonnen
tkm		Tonnenkilometer
u_i^α		Nutzenfunktion
u_k		Nutzenfunktion
v	[m/s]	Geschwindigkeit
$v_{i,j}^\alpha$		Geschwindigkeit des Verkehrsmittels j von $\mathcal{P}^\alpha$ in km/h
V_H	[dm^3]	Hubvolumen des Motors
$\mathrm{w}_{i\vartheta}^\alpha$		Übergangsrate der intensiven personellen Konfiguration
w_{ji}^α		Übergangsrate der Soziokonfiguration
w_k		Übergangsrate der materiellen Konfiguration
ω_R	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit der Antriebsräder

x^α	Verteilung von $\mathcal{P}^\alpha$ auf die beiden Verkehrssysteme
Z_i^α	Faktor Zeit
ζ^α	Gewichtungsfaktor Zeit

1. Einleitung

Mitte des Jahres 2008 sind die Preise für Energie überdurchschnittlich stark angestiegen. Dies könnte ein Anzeichen für einen bevorstehenden Wandel im Energiesektor sein. Aufgrund der Endlichkeit der fossilen Energieträger werden neue Technologien in den Markt eindringen und den Energiemarkt verändern. Diese Entwicklungen versucht man mithilfe von Energiemodellen zu beschreiben, um aus der Analyse der Berechnungsergebnisse Entscheidungsempfehlungen für die Zukunft ableiten zu können. Derzeit wird zur Modellierung unter anderem der prozessanalytische Energiemodellgenerator TIMES verwendet, der als Nachfolger des bis dahin etablierten Energiesystemmodells MARKAL gilt. TIMES ist hauptsächlich ein lineares Optimierungstool, dessen Ziel es ist mithilfe von linearen Gleichungssystemen Modellszenarien der zukünftigen Energiesysteme zu generieren, diese zu optimieren und zu analysieren. Allerdings können mit TIMES bedingt durch den linearen Charakter gerade sprunghafte Übergänge, wie sie in Zukunft erwartet werden, oftmals nur unzureichend beschrieben werden. Auch trifft TIMES Entscheidungen auf einer rein ökonomisch rationalen Ebene. Das bedeutet, von allen Konstituenten der Modelle wird stets der optimale Pfad ausgewählt, auch wenn dieser nur minimale Vorteile besitzt. In realen Situationen werden Entscheidungen allerdings nicht nur aufgrund von rein rationalen Faktoren getroffen. Das Ziel der Arbeit ist aus diesem Grund die Analyse eines Konzepts, mit dem man diesen Problemen zukünftig begegnen könnte.

In der Physik hat sich mit der Econophysik ein Bereich etabliert, der versucht physikalische Methoden auf ökonomische oder soziologische Fragestellungen anzuwenden. Ein besonderer Bereich versucht mit dem Kalkül der Phasenübergänge radikale politische, wirtschaftliche oder technologische Veränderungen zu beschreiben. Im Gegensatz zu physikalischen Systemen existieren in diesen Bereichen allerdings keine Bewegungsgleichungen auf der Mikroebene, der Ebene der elementaren Konstituenten des Systems. Ein Konzept, das ohne Bewegungsgleichungen auf Mirkoebene auskommt und mit dem man folglich eine Vielzahl von dynamischen Phänomenen der Sozialwissenschaften quantita-

tiv mit mathematischen Modellen beschreiben kann, ist die Soziodynamik nach Weidlich [59]. Ihre Grundzüge werden allgemein in Kapitel 2 vorgestellt.

Zur Analyse des Konzepts der Soziodynamik wurde mit dem Verkehrssektor ein Bereich ausgewählt, in dem vermutlich in naher Zukunft grundlegende Veränderungen anstehen. Im letzten Jahrhundert hat sich ein Verkehrssystem etabliert, das fast ausschließlich von fossilen Energieträgern abhängt. Aufgrund stetig steigender Nachfrage nach Rohöl gerade in aufstrebenden Staaten wie China und Indien, stellt sich weltweit die Frage, wie lange die Ölreserven noch ausreichen werden. Um Mobilität zukünftig sicherstellen zu können, wird derzeit an neuen Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge gearbeitet.

In dieser Arbeit soll nun mithilfe der Theorie der Soziodynamik ein Modell entwickelt werden, mit dem ein Übergang von konventionellen zu fortschrittlichen Verkehrstechnologien beschrieben werden kann. Dazu werden zunächst in Kapitel 3 die allgemeinen Entwicklungen im Verkehrssektor genauer betrachtet. In Kapitel 5 wird sodann das entwickelte Verkehrsmodell vorgestellt. Anschließend wird dieses an realen Verkehrsentwicklungen in Kapitel 7 auf die Probe gestellt, um damit letztendlich in Kapitel 8 anhand einer einfachen Modellwelt weitere Analysen durchführen zu können.

Darüber hinaus werden in Kapitel 4 mithilfe einer physikalischen und technischen Simulation die Einflussfaktoren des Energiebedarfs von Pkws mit verschiedenen Antriebskonzepten untersucht. Kapitel 6 ist ein Exkurs, in dem die mathematischen Grundlagen zur numerischen Berechnung der Lösung der Bewegungsgleichungen des Verkehrsmodells vorgestellt werden.

2. Das Modellierungskonzept der Soziodynamik

Die Soziodynamik basiert auf der Theorie von stochastischen Systemen und der Theorie der nichtlinearen Gleichungen, welche auch in der statistischen Physik und anderen Naturwissenschaften verwendet werden. Sie ist ein Teilgebiet der Synergetik [23], die in den 1970er Jahren von Haken zur mathematischen Beschreibung von physikalischen Systemen eingeführt wurde, insbesondere zur Beschreibung von Selbstorganisation und Phasenübergängen als kooperative Effekte des Lasers. Anschließend wurde die Theorie auf andere Naturwissenschaften wie Chemie oder Biologie ausgeweitet.

Nach Weidlich benötigt die Soziodynamik allerdings ein eigenes Konzept, da in sozialen Systemen im Gegensatz zu naturwissenschaftlichen Systemen keine Mikrogleichungen für die Individuen und damit keine Bewegungsgleichungen auf der Mikroebene existieren. Zudem müssen spezifische sozialwissenschaftliche Begriffe eingebaut werden, welche das Handlungs- und Entscheidungsverhalten der Akteure beschreiben [60]. Zur Entwicklung eines soziodynamischen Modells wird nach drei grundlegenden Schritten vorgegangen, welche im Folgenden näher erläutert werden:

1. Festlegung geeigneter Variablen, mit denen die Dynamik des sozialen Systems beschrieben werden kann.

2. Einführung von elementaren Entwicklungsschritten, die die spezielle Natur eines sozialen Systems berücksichtigen.

3. Aufstellung der Entwicklungsgleichungen für die Schlüsselvariablen.

2.1. Konfiguration der Makrovariablen

Im Gegensatz zu vielen physikalischen Systemen ist die Wahl eines geeigneten Satzes von relevanten Schlüsselvariablen bei einem sozialen System nicht unbedingt offensichtlich. In sozialen Systemen gibt es aufgrund ihrer höheren Komplexität viele Möglichkeiten das System in Subsysteme mit weiteren Subprozessen zu unterteilen. Darüber hinaus sind diese Subsysteme meist nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen sich über mehr oder weniger starke Interaktionen gegenseitig. Beispielsweise können die Sektoren Politik, Wirtschaft und Forschung einerseits als selbständige Bereiche der Gesellschaft angesehen werden, andererseits üben sie natürlich gegenseitigen Einfluss aus.

Somit impliziert die Festlegung von Variablen für ein soziales Subsystem immer, dass sich das betreffende Subsystem näherungsweise von den anderen abgrenzen lässt und höchstens schwache Interaktionen vorhanden sind, die man gegebenenfalls durch Randbedingungen berücksichtigen kann. Zudem muss für die gewählten Variablen gelten, dass sie einer in sich geschlossenen und quasi-autonomen Dynamik folgen. Auf diese Anforderungen sollte in jedem Fall in einer vorausgehenden qualitativen Analyse des zu beschreibenden Systems eingegangen werden. Grundsätzlich gibt es mehrere Arten von Variablen, welche zunächst einmal vorgestellt werden.

2.1.1. Materielle Variablen

Die materiellen Variablen sind vor allem in der Ökonomie von Bedeutung. Man kann dabei in Anlehnung an die Nomenklatur der Thermodynamik zwischen extensiven und intensiven Variablen unterscheiden. Extensive Makrovariablen sind proportional zur Systemgröße und können in diesem Zusammenhang beispielsweise für das Bruttosozialprodukt, die Gebäudeanzahl einer Stadt, für Produktionsmengen oder Investitionen stehen. Intensive Variablen sind hingegen unabhängig von der Systemgröße. Beispiele dafür sind der Preis oder die Qualität einer Ware, sowie das Monatsgehalt oder das Arbeitspensum eines Angestellten. Intensive Variablen können oft auch als eine Art „Dichte“ von extensiven Variablen aufgefasst werden.

Zusammenfassend versteht man unter der *materiellen Konfiguration* des Systems den gesamten Satz an materiellen Variablen, der zur Beschreibung des Systems verwendet wird:

$$\mathbf{m} = \{m_1, ..., m_k, ..., m_M\} \tag{2.1}$$

2.1.2. Extensive personelle Variablen

Ein Mensch besitzt in der Gesellschaft die Möglichkeit sich zwischen verschiedenen Einstellungen, Meinungen oder Handlungsweisen zu entscheiden. Dies können beispielsweise sowohl politische, religiöse, kulturelle oder moralische Einstellungen, als auch Handlungsweisen sein, die das private oder das berufliche Umfeld betreffen. Daher sind materielle Variablen für soziale Systeme wichtig aber nicht ausreichend, wenn spezifische soziale Phänomene beschrieben werden sollen. Man kann annehmen, dass jedem Individuum eine Einstellung „i“ mit $i = 1, ..., C$ zugeordnet werden kann, wobei C die Anzahl der Wahlmöglichkeiten angibt. Diese Einstellungen oder Handlungsweisen können sich mit der Zeit selbstverständlich verändern. Es gibt aber auch persönliche Eigenschaften, die von Beginn an nahezu festgelegt sind. Dazu gehört zum Beispiel der genetische oder der biographische Hintergrund. Deshalb werden Personen, die über ähnliche unveränderliche Eigenschaften verfügen, zu einer Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ mit $\alpha = 1, \ldots, P$ zusammengefasst. Die Genauigkeit der Unterteilung der Gesamtpopulation hängt entscheidend davon ab, welche Absicht man mit einem Modell verfolgt beziehungsweise worauf der Fokus der Modellierung liegt. Folglich kann jedem Individuum der zu betrachtenden Population eine Einstellung i und ein Backgroundindex α zugeordnet werden. Damit lässt sich nun eine extensive Größe definieren:

$$n_i^\alpha \equiv \text{Anzahl der Mitglieder von } \mathcal{P}^\alpha \text{ mit Einstellung } i \tag{2.2}$$

Diese ganzzahligen Variablen stellen die so genannte *Soziokonfiguration* dar, an welcher die Verteilung der unterschiedlichen Einstellungen unter den Mitgliedern der verschiedenen Subpopulationen ersichtlich wird:

$$\mathbf{n} = \left\{n_1^1, \ldots, n_C^1; \ldots; n_1^\alpha, \ldots, n_i^\alpha, \ldots, n_C^\alpha; \ldots; n_1^P, \ldots, n_C^P\right\} \tag{2.3}$$

Zudem gilt:

$$\text{Anzahl der Mitglieder von } \mathcal{P}^\alpha\text{:} \quad N^\alpha = \sum_{i=1}^{C} n_i^\alpha \tag{2.4}$$

$$\text{Anzahl der Mitglieder der Gesamtpopulation mit Einstellung } i\text{:} \quad N_i = \sum_{\alpha=1}^{P} n_i^\alpha \tag{2.5}$$

$$\text{Anzahl der Mitglieder der Gesamtpopulation:} \quad N = \sum_{\alpha=1}^{P} N^\alpha = \sum_{i=1}^{C} N_i \tag{2.6}$$

2.1.3. Intensive personelle Variablen

Bei bestimmten sozialen Systemen ist es erforderlich, dass bei der Modellentwicklung neben von außen gut messbaren Meinungen oder Einstellungen zusätzlich verborgene innere Haltungen berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn diese verborgenen Haltungen großen Einfluss auf die Dynamik des Systems haben. Offensichtlich sind die Variablen, die für diese inneren Haltungen stehen, intensiv. Sie beschreiben die Intensität der Reaktion jeder einzelnen Person auf eine bestimmte Situation. Angenommen alle Mitglieder einer Subpopulation haben dieselbe innere Haltung. Dann kann nicht die Summe dieser Ausprägungen der inneren Haltungen zur Beschreibung der Reaktionen herangezogen werden, diese würde je nach Populationsgröße einen Wert liefern, der sich jeglicher Interpretation verschließt, sondern man muss auf eine Art „Haltungsdichte“ zurückgreifen.

Nun stellt sich die Frage, wie man diese verborgenen inneren Haltungen messbar machen kann. In den meisten Fällen ist der Ausprägung einer inneren Haltung in einem bestimmten Bereich oder in einer bestimmten Situation ein gewisser Grad an Zustimmung oder Abneigung zuordenbar. Damit lässt sich eine Skala definieren, die im Normalfall symmetrisch um Null zwischen positiven und negativen Werten liegt. Weiterhin können selbstverständlich je nach Intension und Auslegung eines Modells einem Individuum innere Haltungen in mehreren Bereichen zugeordnet werden. Diese hängen zweifellos von der jeweiligen Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ und der jeweiligen Einstellung i ab.

Somit ergibt sich beispielhaft mit einer verborgenen inneren Haltung die *Konfiguration der intensiven personellen Variablen* zu:

$$\boldsymbol{\vartheta} = \left\{\vartheta_1^1, \ldots, \vartheta_C^1; \ldots; \vartheta_1^\alpha, \ldots, \vartheta_i^\alpha, \ldots, \vartheta_C^\alpha; \ldots; \vartheta_1^P, \ldots, \vartheta_C^P\right\} \tag{2.7}$$

mit

$$-\Theta \leq \vartheta_i^\alpha \leq \Theta, \tag{2.8}$$

wobei Θ den maximalen Betrag angibt. Die Variable ϑ_i^α kann beispielsweise für die Zufriedenheit eines Bürgers mit seinen momentanen Wohnverhältnissen stehen, wobei nach Tabelle 2.1 jeder Ausprägung ein Zahlenwert zugeordnet werden kann.

	sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
ϑ_i^α	2	1	0	-1	-2

Tabelle 2.1.: Beispiel für eine Skala einer intensiven personellen Variablen

2.1.4. Trend- und Kontrollparameter

Randbedingungen oder spezifische Eigenschaften von Personen, die zur selben Subpopulation gehören, können in der Dynamik des Systems über Kontroll- oder Trendparameter berücksichtigt werden. Diese tauchen in den Bewegungsgleichungen hauptsächlich als konstante Koeffizienten und nicht als Variablen auf, deshalb werden sie zu lediglich einem Parametersatz zusammengefasst. Die Anzahl dieser Parameter hängt wiederum vom Bereich und vom Fokus des Modells ab. Benötigt man für jede Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ genau einen Parameter κ^α, so ist die *Trend- und Kontrollparameterkonfiguration* folgendermaßen definiert:

$$\boldsymbol{\kappa} = \left\{\kappa^1, \ldots, \kappa^\alpha, \ldots, \kappa^P\right\} \tag{2.9}$$

Die *totale Konfiguration der Variablen und Parameter* eines sozialen Modells besteht infolgedessen aus den materiellen Variablen, den extensiven und den intensiven personellen Variablen, sowie den Trend- bzw. Kontrollparametern. Da letztere wie gesagt meistens konstant sind, werden sie im Folgenden zur Vereinfachung der Notation weggelassen:

$$\text{Totale Konfiguration} = \{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\} \tag{2.10}$$

In der Modellentwicklung ist die Festlegung der totalen Konfiguration von immenser Bedeutung, da die Dynamik eines Systems nur hinreichend gut beschrieben werden kann, wenn ein in sich geschlossener und vollständiger Satz an Makrovariablen und zugehörenden Parametern vorliegt. Über die totale Konfiguration ist nun auch der Zustandsraum des Modells definiert.

2.2. Elementare Dynamik

Im nächsten Schritt wird die Dynamik der Makrovariablen des Systems beschrieben. Wenn diese Variablen zeitlich konstant sind, befindet sich das System in einem stationären makroskopischen Gleichgewicht. Andernfalls setzt sich die Entwicklung des gesamten Systems aus elementaren Schritten zusammen. In Anlehnung an die Notation von Weidlich [59] steht die Endkonfiguration dabei immer vor der Startkonfiguration.

2.2.1. Elementare Entwicklungsschritte

Die elementaren Entwicklungsschritte bestehen aus Veränderungen einzelner Makrovariablen um eine Einheit. Dabei wird angenommen, dass ohne Beschränkung der Allgemeinheit eine Einheit angemessen gewählt werden kann. Folglich können nur Übergänge zu den direkten Nachbarkonfigurationen vollzogen werden. Das bedeutet beispielsweise für die materielle Konfiguration $\mathbf{m}$, dass sich die Komponente m_k um eine Einheit erhöhen oder erniedrigen kann. Demnach geht $\mathbf{m}$ in die Nachbarkonfiguration $\mathbf{m}_{\mathrm{k}\pm}$ über:

$$\mathbf{m} \;\Rightarrow\; \mathbf{m}_{k\pm} = \{m_1, \ldots, (m_k \pm 1), \ldots, m_M\} \tag{2.11}$$

Für die Soziokonfiguration besteht der elementare Schritt darin, dass ein Mitglied der Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ seine Einstellung bzw. Meinung von i zu j ändert. Dieser verallgemeinerte Migrationsprozess beschreibt den Übergang von $\mathbf{n}$ zu der Nachbarsoziokonfiguration $\mathbf{n}^\alpha_{\mathrm{ji}}$:

$$\mathbf{n} \;\Rightarrow\; \mathbf{n}^\alpha_{ji} = \left\{n^1_1, \ldots, \left(n^\alpha_j + 1\right), \ldots, (n^\alpha_i - 1), \ldots, n^P_C\right\} \tag{2.12}$$

Ebenso kann die Veränderung einer Komponente ϑ_i^α der intensiven Variablen um eine Einheit durch den Übergangsprozess von $\boldsymbol{\vartheta}$ nach $\boldsymbol{\vartheta}_{i\pm}^\alpha$ dargestellt werden:

$$\boldsymbol{\vartheta} \;\Rightarrow\; \boldsymbol{\vartheta}_{i\pm}^\alpha = \left\{\vartheta_1^1, \ldots, \left(\vartheta_i^\alpha \pm 1\right), \ldots, \vartheta_C^P\right\} \tag{2.13}$$

2.2.2. Übergangsraten

Nun muss durch Übergangsraten festgelegt werden, wie die elementaren Übergänge zwischen der Makrokonfiguration $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ und ihren unmittelbaren Nachbarn $\{\mathbf{m}_{k\pm}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$, $\left\{\mathbf{m}, \mathbf{n}_{ji}^\alpha, \boldsymbol{\vartheta}\right\}$ und $\left\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}_{i\pm}^\alpha\right\}$ stattfinden. An dieser Stelle des Modellierungsprozesses sollten unbedingt folgende Punkte eingehen:

1. Es können keine mikroskopischen Bewegungsgleichungen in der Modellierung verwendet werden, da sie im sozialen Bereich schlichtweg nicht vorhanden sind.

2. Die Übergänge müssen durch einen wahrscheinlichkeitstheoretischen Prozess beschrieben werden, der den freien Willen eines jeden Individuums widerspiegelt. Folglich können diese Prozesse keinesfalls deterministisch sein.

3. In diesen wahrscheinlichkeitstheoretischen Prozess muss allerdings eingehen, dass im sozialen Bereich Entscheidungen und Handlungen von dahinter stehenden Motivationen bestimmt werden.

4. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass die gegenseitige bzw. kreisförmige Beeinflussung der Mikro- und der Makroebene durch die eingeführten Variablen ausgedrückt werden kann.

Diese Anforderungen werden durch die Einführung von wahrscheinlichkeitstheoretischen Übergangsraten erfüllt, welche im Wesentlichen Wahrscheinlichkeiten pro Zeiteinheit für einen Übergang in einen neuen Zustand darstellen. Diese Übergangsraten werden hauptsächlich bestimmt durch Exponentialfunktionen, die für beliebige Argumente nur positive Werte annehmen und dadurch die Forderung der Nichtnegativität von Wahrscheinlichkeiten nach Kolmogorow erfüllen.

Dementsprechend können sodann die zu den elementaren Entwicklungsschritten (2.11), (2.12) und (2.13) bzw. die zu den inversen Prozessen gehörenden Übergangsraten in allgemeiner Form aufgestellt werden. Für die materielle Konfiguration lauten sie:

$$\mathrm{w}_k(\mathbf{m}_{k\pm}, \mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) = \mu_0 \, \exp\{M_k(\mathbf{m}_{k\pm}, \mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta})\} \quad \text{für } \mathbf{m} \Rightarrow \mathbf{m}_{k\pm} \tag{2.14}$$

$$\mathrm{w}_k(\mathbf{m}, \mathbf{m}_{k\pm}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) = \mu_0 \, \exp\{M_k(\mathbf{m}, \mathbf{m}_{k\pm}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta})\} \quad \text{für } \mathbf{m}_{k\pm} \Rightarrow \mathbf{m} \tag{2.15}$$

Hierbei wurden so genannte Motivationspotentiale M_k eingeführt, die von der Anfangs- und Endkonfiguration des Übergangs abhängen und ein Maß für dessen Intensität sind. Der Faktor μ_0 dient der Skalierung und geht nachfolgend in die Beschreibung der Flexibilität der Übergänge ein. Dies wird nun analog auf die anderen Übergänge angewendet. Die Übergangsraten für die Soziokonfiguration nehmen damit folgende Form an:

$$\begin{aligned} \mathrm{w}^\alpha_{ji}(\mathbf{m}; \mathbf{n}^\alpha_{ji}, \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) &= \nu_0 \, n^\alpha_i \, p^\alpha_{ji}(\mathbf{m}; \mathbf{n}^\alpha_{ji}, \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) \\ &= \nu_0 \, n^\alpha_i \, \exp\left\{M^\alpha_{ji}(\mathbf{m}; \mathbf{n}^\alpha_{ji}, \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta})\right\} \quad \text{für } \mathbf{n} \Rightarrow \mathbf{n}^\alpha_{ji} \end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{w}^\alpha_{ij}(\mathbf{m}; \mathbf{n}, \mathbf{n}^\alpha_{ji}; \boldsymbol{\vartheta}) &= \nu_0 \, \left(n^\alpha_j + 1\right) \, p^\alpha_{ij}(\mathbf{m}; \mathbf{n}, \mathbf{n}^\alpha_{ji}; \boldsymbol{\vartheta}) \\ &= \nu_0 \, \left(n^\alpha_j + 1\right) \, \exp\left\{M^\alpha_{ij}(\mathbf{m}; \mathbf{n}, \mathbf{n}^\alpha_{ji}; \boldsymbol{\vartheta})\right\} \quad \text{für } \mathbf{n}^\alpha_{ji} \Rightarrow \mathbf{n} \end{aligned} \tag{2.17}$$

Die Faktoren p^α_{ji} und p^α_{ij} stehen für Übergangsraten einzelner Individuen. Es können dabei nur diejenigen Personen einen Übergang von Zustand i nach j bzw. umgekehrt durchführen, die sich im jeweiligen Ausgangszustand befinden. So erhält man die Gesamtrate über die Multiplikation der individuellen Übergangsraten mit der jeweiligen Anzahl n^α_i bzw. $\left(n^\alpha_j + 1\right)$.

Schließlich gilt für die Übergangsraten der Konfiguration der intensiven personellen Makrovariablen:

$$\mathrm{w}^\alpha_{i\vartheta}(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}^\alpha_{i\pm}, \boldsymbol{\vartheta}) = \rho_0 \, \exp\left\{M^\alpha_{i\vartheta}(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}^\alpha_{i\pm}, \boldsymbol{\vartheta})\right\} \quad \text{für } \boldsymbol{\vartheta} \Rightarrow \boldsymbol{\vartheta}^\alpha_{i\pm} \tag{2.18}$$

$$\mathrm{w}^\alpha_{i\vartheta}(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}, \boldsymbol{\vartheta}^\alpha_{i\pm}) = \rho_0 \, \exp\left\{M^\alpha_{i\vartheta}(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}, \boldsymbol{\vartheta}^\alpha_{i\pm})\right\} \quad \text{für } \boldsymbol{\vartheta}^\alpha_{i\pm} \Rightarrow \boldsymbol{\vartheta} \tag{2.19}$$

Offensichtlich hängen die obigen Übergangsraten nur von der Konfiguration des Systems unmittelbar vor bzw. nach dem Übergang ab. Das bedeutet, dass die Vorgeschichte des Systems bzw. der Weg in die momentane Konfiguration nicht eingehen. Damit stellen diese stochastischen Prozesse eine Markov-Kette erster Ordnung dar. Falls die Vorgeschichte bei bestimmten Modellen jedoch explizit berücksichtigt werden soll, müssen dazu bestimmte Memoryvariablen eingeführt werden.

Zudem wird durch Übergangsraten dieser Art die interdependente Verbindung zwischen Mikro- und Makrolevel sichergestellt, da die individuellen Entscheidungen der Akteure die Übergangsraten über die Motivationspotentiale bestimmen, welche dann zu Veränderungen der Makrovariablen führen. Die momentane Konfiguration selbiger beeinflusst wiederum die Entscheidungen, wodurch sich der Kreis schließt.

Um die Übergangsraten in eine Form zu bringen, die einer Interpretation besser zugänglich ist, kann man die Motivationspotentiale in einen symmetrischen und einen antisymmetrischen Teil zerlegen. Diese Umformung wird ausführlich von Weidlich [59] dargestellt. Damit können die Übergangsraten in folgende Form gebracht werden:

Übergangsraten der materiellen Konfiguration:

$$\mathrm{w}_k(\mathbf{m}_{k\pm}, \mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) = \mu_k(\mathbf{m}_{k\pm}, \mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) \, \exp\left\{u_k(\mathbf{m}_{k\pm}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) - u_k(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta})\right\} \tag{2.20}$$

$$\mathrm{w}_k(\mathbf{m}, \mathbf{m}_{k\pm}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) = \mu_k(\mathbf{m}, \mathbf{m}_{k\pm}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) \, \exp\left\{u_k(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) - u_k(\mathbf{m}_{k\pm}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta})\right\} \tag{2.21}$$

Übergangsraten der Soziokonfiguration:

$$\mathrm{w}^{\alpha}_{ji}(\mathbf{m}; \mathbf{n}^{\alpha}_{ji}, \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) = n^{\alpha}_i \, \nu^{\alpha}_{ji}(\mathbf{m}; \mathbf{n}^{\alpha}_{ji}, \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) \, \exp\left\{u^{\alpha}_j(\mathbf{m}; \mathbf{n}^{\alpha}_{ji}; \boldsymbol{\vartheta}) - u^{\alpha}_i(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta})\right\} \tag{2.22}$$

$$\mathrm{w}^{\alpha}_{ij}(\mathbf{m}; \mathbf{n}, \mathbf{n}^{\alpha}_{ji}; \boldsymbol{\vartheta}) = \left(n^{\alpha}_j + 1\right) \, \nu^{\alpha}_{ij}(\mathbf{m}; \mathbf{n}, \mathbf{n}^{\alpha}_{ji}; \boldsymbol{\vartheta}) \, \exp\left\{u^{\alpha}_i(\mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) - u^{\alpha}_j(\mathbf{m}; \mathbf{n}^{\alpha}_{ji}; \boldsymbol{\vartheta})\right\} \tag{2.23}$$

Übergangsraten der Konfiguration der intensiven personellen Variablen:

$$\mathrm{w}^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i\pm},\boldsymbol{\vartheta}) = \rho^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i\pm},\boldsymbol{\vartheta})\ \exp\left\{\nu^{\alpha}_{i}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i\pm}) - \nu^{\alpha}_{i}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta})\right\} \tag{2.24}$$

$$\mathrm{w}^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta},\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i\pm}) = \rho^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta},\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i\pm})\ \exp\left\{\nu^{\alpha}_{i}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta}) - \nu^{\alpha}_{i}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i\pm})\right\} \tag{2.25}$$

Hierbei ist der antisymmetrische Teil der Motivationspotentiale jeweils durch Differenzen der Funktion u^{α}_{i} bzw. ν^{α}_{i} ersetzt worden. Diese Funktionen hängen nur von der Konfiguration der Makrovariablen direkt vor beziehungsweise unmittelbar nach einem möglichen Übergang ab. Infolgedessen kann man sie als ein Maß für den „Nutzen“ der jeweiligen Variablenkonstellation ansehen. Die Definition dieser Nutzenfunktionen spielt bei der Entwicklung eines sozialen Modells eine große Rolle. Deshalb muss man versuchen die Einflüsse auf den Nutzen einer bestimmten Situation über eine vorausgehende qualitative Analyse genau zu analysieren.

Der symmetrische Teil der Motivationspotentiale ist in die Faktoren μ_k, ν^{α}_{ji} und $\rho^{\alpha}_{i\vartheta}$ eingegangen, welche ein Maß für die Flexibilität des Übergangs darstellen und per Definition identisch für die beiden möglichen Übergangsrichtungen sind [59].

2.3. Entwicklungsgleichungen

Nachdem die Übergangsraten für alle elementaren Schritte festgelegt wurden, können nun die Bewegungsgleichungen für die Makrovariablen $\{\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta}\}$ aufgestellt werden. Dabei gibt es allgemein zwei Beschreibungsebenen, einerseits die probabilistische und andererseits die quasi-deterministische Ebene, bei welcher man die deterministische Entwicklung der Mittelwerte beziehungsweise der Quasimittelwerte der Makrovariablen betrachtet.

2.3.1. Mastergleichung

Auf der probabilistischen Beschreibungsebene ist die zentrale Entwicklungsgleichung für soziale Systeme die Mastergleichung. Sie beschreibt die zeitliche Änderung der Wahr-

scheinlichkeitsverteilung $P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t)$. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass das System sich zum Zeitpunkt t im Zustand $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ befindet. Neben der Nicht-Negativität muss $P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t)$ damit auch die Normiertheit erfüllen, da sich das System schließlich zu jedem Zeitpunkt in einem Zustand befinden muss:

$$P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t) \geq 0 \tag{2.26}$$

$$\sum_{\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta}} P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t) = 1 \qquad \forall t \tag{2.27}$$

Mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t)$ und den vorher definierten Übergangsraten kann man jetzt die Wahrscheinlichkeitsflüsse der Konfiguration $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ in alle Nachbarkonfigurationen berechnen. Der Fluss der Wahrscheinlichkeit entspricht in diesem Fall der Wahrscheinlichkeit, die pro Zeiteinheit beispielsweise von der Ausgangskonfiguration $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ in die Zielkonfiguration $\{\mathbf{m}_{k+}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ übertragen wird. Dieser kann zum Zeitpunkt t folgendermaßen berechnet werden:

$$\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\} \Rightarrow \{\mathbf{m}_{k+}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\} : \quad \mathrm{w}_k(\mathbf{m}_{k+}, \mathbf{m}; \mathbf{n}; \boldsymbol{\vartheta}) \cdot P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t) \tag{2.28}$$

Infolgedessen ist die Mastergleichung nichts anderes als eine dynamische Balancegleichung für die Wahrscheinlichkeitsverteilung. Sie ermittelt die zeitliche Änderung von $P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t)$ indem sie die Differenz aus der Summe aller Flüsse von allen Nachbarkonfigurationen in die Konfiguration $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ und der Summe aller Flüsse von der Konfiguration $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ in alle Nachbarkonfigurationen bildet.

Das bedeutet, dass die totale zeitliche Ableitung von $P(\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}; t)$ äquivalent ist zu den gesamten Wahrscheinlichkeitsflüssen *in* die Konfiguration $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$ abzüglich den gesamten Wahrscheinlichkeitsflüssen *aus* der Konfiguration $\{\mathbf{m}, \mathbf{n}, \boldsymbol{\vartheta}\}$. Die Mastergleichung hat daher die allgemeine Form:

$$
\begin{aligned}
\frac{dP(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t)}{dt} = &+ \sum_k \Big\{ \mathrm{w}_k(\mathbf{m},\mathbf{m}_{k+};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m}_{k+},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t) + \mathrm{w}_k(\mathbf{m},\mathbf{m}_{k-};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m}_{k-},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t) \Big\} \\
&- \sum_k \Big\{ \mathrm{w}_k(\mathbf{m}_{k+},\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t) + \mathrm{w}_k(\mathbf{m}_{k-},\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t) \Big\} \\
&+ \sum_{i,j,\alpha} \Big\{ \mathrm{w}^{\alpha}_{ij}(\mathbf{m};\mathbf{n},\mathbf{n}^{\alpha}_{ji};\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m},\mathbf{n}^{\alpha}_{ji},\boldsymbol{\vartheta};t) \Big\} \\
&- \sum_{i,j,\alpha} \Big\{ \mathrm{w}^{\alpha}_{ji}(\mathbf{m};\mathbf{n}^{\alpha}_{ji},\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t) \Big\} \\
&+ \sum_{i,\alpha} \Big\{ \mathrm{w}^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta},\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i+})P(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i+};t) + \mathrm{w}^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta},\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i-})P(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i-};t) \Big\} \\
&- \sum_{i,\alpha} \Big\{ \mathrm{w}^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i+},\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t) + \mathrm{w}^{\alpha}_{i\vartheta}(\mathbf{m};\mathbf{n};\boldsymbol{\vartheta}^{\alpha}_{i-},\boldsymbol{\vartheta})P(\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta};t) \Big\}
\end{aligned}
\tag{2.29}
$$

In den Zeilen mit voranstehendem Pluszeichen werden alle hineinlaufenden Wahrscheinlichkeitsflüsse und in den Zeilen mit voranstehendem Minuszeichen alle herauslaufenden Wahrscheinlichkeitsflüsse der Konfiguration $\{\mathbf{m},\mathbf{n},\boldsymbol{\vartheta}\}$ zusammengefasst. Für spezielle Modelle vereinfacht sich die Mastergleichung, da man meist nicht den vollen Satz an Makrovariablen oder nicht alle Übergangsarten benötigt.

2.3.2. Quasimittelwertgleichungen

Die Lösung der Mastergleichung gibt auf der Makroebene detailliert Aufschluss über die Dynamik des Systems. Allerdings ist die Berechnung der Lösung sehr aufwendig und oft wenn überhaupt nur numerisch möglich. Glücklicherweise ist die Kenntnis der gesamten Verteilung für jeden Zeitpunkt bei sozialen Systemen oftmals unnötig, da die Anzahl der Systeme, die sich in unterschiedlichen Zuständen befinden und mit denen man die Lösung gegebenenfalls überprüfen könnte, relativ begrenzt ist. Häufig steht dafür sogar nur ein System zur Verfügung. Aus diesem Grund wird zur Beschreibung von soziodynamischen Systemen neben der obigen probabilistischen Ebene auch auf die deterministische Ebene zurückgegriffen.

Zur Berechnung der deterministischen Entwicklung der Mittelwerte der Makrovariablen wird allerdings die Lösung der Mastergleichung benötigt. Deshalb ist man mit dem Übergang zu den Mittelwerten einer Vereinfachung noch nicht näher gekommen. Hinzu kommt, dass der Gehalt der Informationen, welche aus den Mittelwerten gewonnen werden können, im Falle einer multimodalen Wahrscheinlichkeitsverteilung eventuell sehr gering ist. Deshalb verwendet man statt den Mittelwerten der Makrovariablen so genannte Quasimittelwerte.

Ein System, das sich in einem bestimmten Zustand im Zustandsraum befindet, hat von dort aus die Möglichkeit in die direkten Nachbarzustände zu wechseln. Dieser Prozess ist mit gewissen Wahrscheinlichkeiten belegt, welche von den jeweiligen Übergangsraten abhängen. Mittelt man nun über die Prozesse eines Bündels stochastischer Trajektorien, so erhält man daraus die bevorzugte mittlere Richtung und mittlere Geschwindigkeit dieses Bündels. Die Quasimittelwerte beschreiben infolgedessen die „mittlere Fortbewegung eines Bündels stochastischer Trajektorien“ [60] an einem bestimmten Systempunkt.

Die Quasimittelwerte der Makrovariablen $\hat{\boldsymbol{m}}(t)$, $\hat{\boldsymbol{n}}(t)$ und $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(t)$ genügen allgemein folgendem System gekoppelter, nichtlinearer Differentialgleichungen:

$$\frac{d\hat{m}_k(t)}{dt} = \mathrm{w}_k(\hat{\boldsymbol{m}}_{k+}, \hat{\boldsymbol{m}}; \hat{\boldsymbol{n}}; \hat{\boldsymbol{\vartheta}}) - \mathrm{w}_k(\hat{\boldsymbol{m}}_{k-}, \hat{\boldsymbol{m}}; \hat{\boldsymbol{n}}; \hat{\boldsymbol{\vartheta}}) \tag{2.30}$$

$$\frac{d\hat{n}_i^\alpha(t)}{dt} = \sum_j \mathrm{w}_{ij}^\alpha(\hat{\boldsymbol{m}}; \hat{\boldsymbol{n}}_{ij}^\alpha, \hat{\boldsymbol{n}}; \hat{\boldsymbol{\vartheta}}) - \sum_j \mathrm{w}_{ji}^\alpha(\hat{\boldsymbol{m}}; \hat{\boldsymbol{n}}_{ji}^\alpha, \hat{\boldsymbol{n}}; \hat{\boldsymbol{\vartheta}}) \tag{2.31}$$

$$\frac{d\hat{\vartheta}_i^\alpha(t)}{dt} = \mathrm{w}_{i\vartheta}^\alpha(\hat{\boldsymbol{m}}; \hat{\boldsymbol{n}}; \hat{\boldsymbol{\vartheta}}_{i+}^\alpha, \hat{\boldsymbol{\vartheta}}) - \mathrm{w}_{i\vartheta}^\alpha(\hat{\boldsymbol{m}}; \hat{\boldsymbol{n}}; \hat{\boldsymbol{\vartheta}}_{i-}^\alpha, \hat{\boldsymbol{\vartheta}}) \tag{2.32}$$

Im Falle einer unimodalen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Makrovariablen entsprechen die obigen Gleichungen exakt den Gleichungen für die tatsächlichen Mittelwerte. Quasimittelwertgleichungen können allerdings eher mit der Entwicklung eines bestimmten Systems in Verbindung gebracht werden als die Mittelwertgleichungen, die die Entwicklung eines ganzen Ensembles an Systemen beschreiben. Deshalb verwendet man bei der Analyse von konkreten Systemen bevorzugt die Gleichungen für die Quasimittelwerte.

3. Grundlagen der Verkehrsentwicklung

Vor der Entwicklung eines Modells steht wie gesagt die qualitative Analyse des Bereichs, der mit dem Modell beschreiben werden soll. In der Soziodynamik nach Weidlich [59] bildet dies die notwendige Grundlage für die Ermittlung der Einflussfaktoren der bereichsspezifischen Dynamik. Deshalb werden in diesem Kapitel zunächst allgemeine Entwicklungen im Verkehrssektor analysiert und anschließend allgemein Faktoren der Verkehrsmittelwahl identifiziert. Diese werden sodann für einige Verkehrsmittel genauer spezifiziert.

3.1. Allgemeine Entwicklungen im Verkehrssektor

Grundsätzlich kann der Verkehrssektor in verschiedene Teilbereiche untergliedert werden (siehe Abbildung 3.1). Neben dem Personenverkehr spielt auch der Güterverkehr auf Straßen, Schienen, Binnen- und Seewasserwegen, in der Luft oder in Pipelines eine große Rolle. 2004 wurden in Deutschland insgesamt 3,9 Mrd. t Güter transportiert [50]. Dabei hat der Transport auf der Straße den größten Anteil mit allein 3,0 Mrd. t. Im Vergleich von 1995 mit 2004 ist die Transportleistung im Straßengüterverkehr um 36% gestiegen. Unter der Transport- bzw. Beförderungsleistung versteht man allgemein das Produkt aus Gewicht der beförderten Gütermenge bzw. beförderter Personenzahl und der zurückgelegten Transportstrecke [51]. Die Beförderungsleistung wird in Tonnenkilometern (tkm) bzw. in Personenkilometern (Pkm) angegeben. Ebenfalls enorm hohe Wachstumsraten weist der Luftverkehr gerade mit Transporten hochwertiger Güter auf, der allerdings im Mengen-Modal-Split des Güterverkehrs 2004 mit 0,1% nur eine untergeordnete Rolle spielte [50]. Mit Modal-Split bezeichnet man die Aufteilung des Verkehrsaufkommens auf die verschiedenen Verkehrsmittel. Im Güterverkehr unterscheidet man beim Modal-Split zwischen Straße, Eisenbahn, Binnenschifffahrt, Seeverkehr, Rohölleitungen und Luftfahrt. Der Personenverkehr wird unterteilt in Fußgängerverkehr, Fahrradverkehr, mo-

torisierter Individualverkehr, öffentlicher Personenverkehr (Nah- und Fernverkehr) und Luftverkehr. Dem Modal-Split können folgende Größen zugrunde gelegt werden:

- Beförderungsfälle in Personen bzw. Wege (Wege-Modal-Split) oder Beförderungsmenge in Tonnen (Mengen-Modal-Split)
- Beförderungsleistung in Personen- oder Tonnenkilometer (Leistungs-Modal-Split)

Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Personenverkehr liegt, wird der Güterverkehr im Folgenden allerdings eher vernachlässigt.

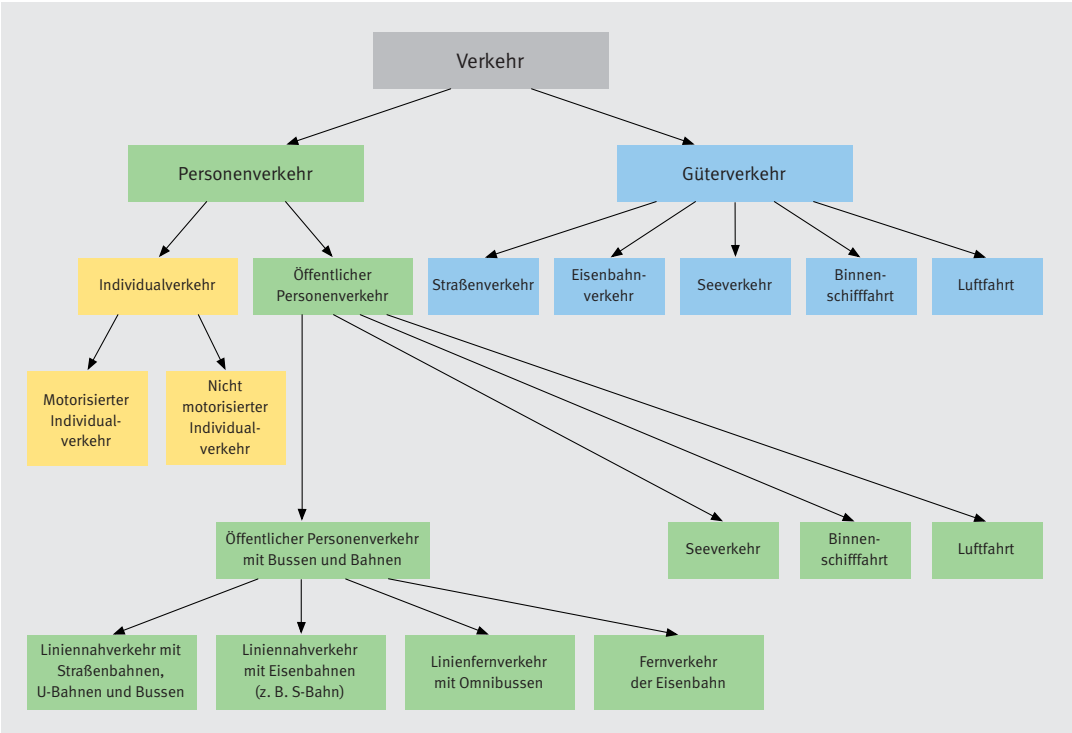


Abbildung 3.1.: Die Unterteilung des Verkehrssektors. Quelle: Statistisches Bundesamt [50]

In einer Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft wie der Bundesrepublik Deutschland hat der Verkehrssektor eine große Bedeutung [50]. Er besitzt zunächst eine wichtige Bindefunktion zwischen Wirtschaft und Gesellschaft. Ferner hatte er 2004 einen Anteil von 3,2% am Bruttoinlandsprodukt. Insgesamt haben 1,4 Mio. Menschen 2004 in diesem Bereich gearbeitet, das heißt etwa jeder 28. Erwerbstätige. Zudem ist festzustellen, dass Verkehrsentwicklung und Wirtschaftswachstum unverkennbar miteinander korrelieren.

Das bedeutet, dass die Entwicklung einer Industriegesellschaft und die Globalisierung der Weltwirtschaft undenkbar sind ohne technische Innovationen im Verkehrsbereich und massive Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur.

Zur Verkehrsinfrastruktur gehören einerseits Transportwege wie Straßen, Schienen und Wasserwege, andererseits aber auch Transporteinrichtungen wie Bahnhöfe, Flughäfen und sonstige Umschlageinrichtungen. Das deutsche Verkehrsnetz hatte 2003 eine Länge von insgesamt 742.300 km. Mit dieser Länge würde man mehr als 18 Mal um die Erde kommen.

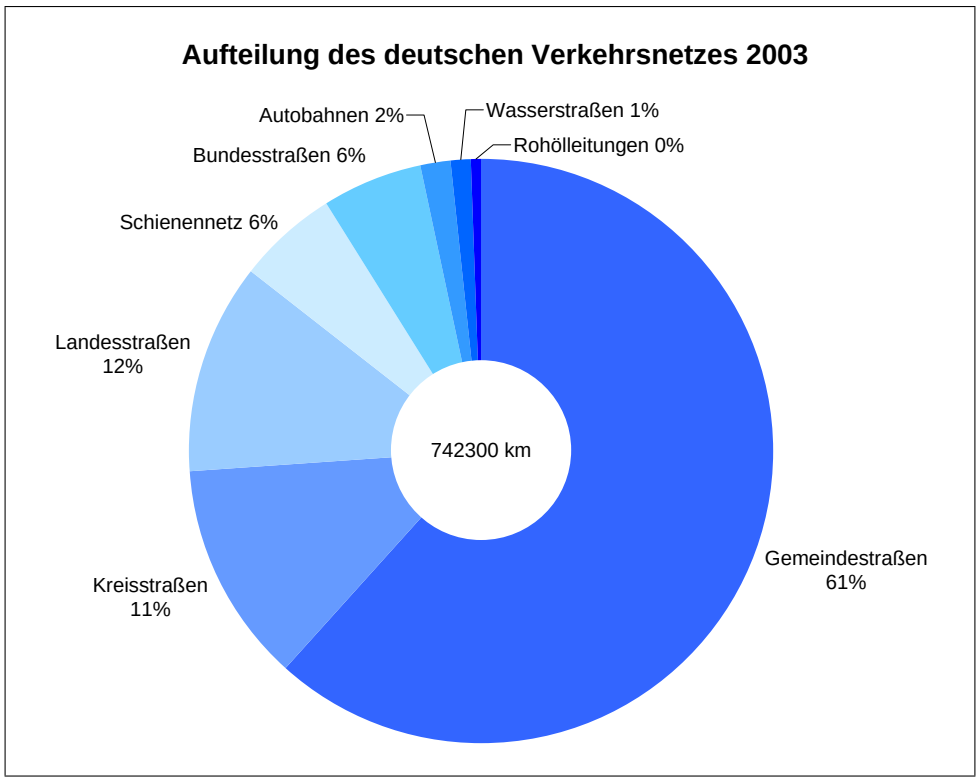


Abbildung 3.2.: Die Aufteilung des deutschen Verkehrsnetzes 2003. Quelle: Statistisches Bundesamt [50]

Nach Berechnungen des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) war die gesamte deutsche Verkehrsinfrastruktur mit Transportwegen und -einrichtungen 2004 rund 772 Mrd. Euro wert [50]. Dieser Wert entspricht dem so genannten Brutto-Anlagevermögen, also den Kosten, die durch den Neubau der gesamten Infrastruktur entstehen würden. Für den Erhalt und den Ausbau des deutschen Verkehrsnetzes wurden vom Bund 2004 insgesamt 19,5 Mrd. Euro investiert. Dies entspricht in etwa 8% der Gesamtausgaben. Im 2003 verabschiedeten Bundesverkehrswegeplan sind für den Zeitraum von 2001 bis

2015 für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße Investitionen in der Größenordnung von 150 Mrd. Euro vorgesehen. Auf EU-Ebene wird der Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes forciert, wobei der Schwerpunkt auf Straßen- und Schienenverbindungen zwischen West- und Osteuropa liegt, da dort der stärkste Verkehrszuwachs erwartet wird.

Die Länge der deutschen Autobahnen betrug 2006 laut dem Statistischen Amt der Europäischen Gemeinschaften (Eurostat) etwa 12500 km [18]. Damit machen die Autobahnen zwar nur einen kleinen Teil des gesamten deutschen Verkehrsnetzes aus, ihre Länge hat sich allerdings in den letzten 30 Jahren mehr als verdreifacht. Damit liegt Deutschland in Europa an der Spitze vor Frankreich, Spanien und Italien (siehe Abbildung 3.3) und verfügt weltweit nach den USA über eines der längsten Autobahnnetze.

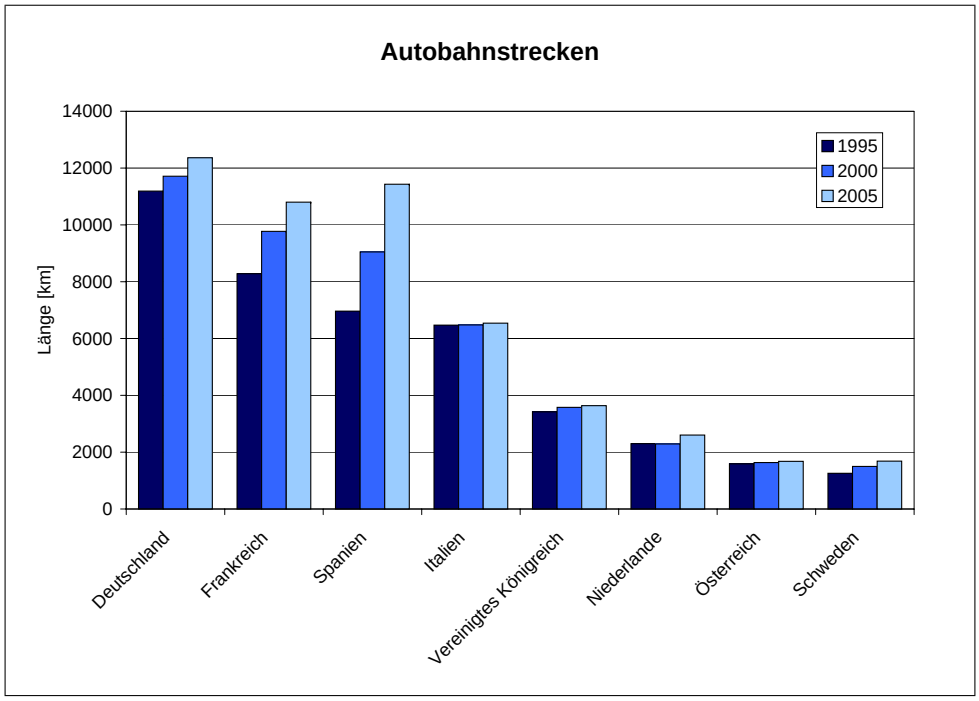


Abbildung 3.3.: Die Autobahnstrecken in Europa. Quelle: Eurostat [18]

Ein gut ausgebautes Verkehrsnetz ist die Grundlage für individuelle Mobilität. Die Möglichkeit sich bewegen bzw. fortbewegen zu können ist ein wichtiges Indiz für Lebensqualität. Sie gehört für viele Menschen zur selbstverständlichen Alltagserfahrung. Sei es der Weg zur Arbeit oder zur Schule, in der Freizeit, die Fahrt zum Supermarkt oder zu Freunden. Insgesamt spielt Verkehr im Leben jedes Einzelnen auch eine immer größere Rolle. Private Haushalte gaben 2003 im Schnitt 2.177 Euro pro Monat aus. Davon wur-

den 305 Euro und damit etwa jeder 7. Euro für Verkehr bzw. Mobilität aufgewendet. Der größte Posten darunter war die Anschaffung und der Betrieb eines eigenen Fahrzeugs mit 269 Euro monatlich, das heißt ungefähr jeder 8. Euro. Im Vergleich zu den Ausgaben in anderen Bereichen wie Freizeit, Unterhaltung und Kultur in Höhe von 261 Euro oder wie Nahrungsmittel, Getränke und Tabakwaren in Höhe von 303 Euro erscheinen die Ausgaben für Verkehr auf jeden Fall beachtenswert [50].

Neben finanziellen Mitteln wird zudem auch einiges an Lebenszeit in die eigene Mobilität investiert. Einer Studie des DIW und des Instituts für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas) zufolge sind 86% der Bundesbürger an einem durchschnittlichen Tag mobil. Jeder mobile Bürger ist im Schnitt etwa 90 Minuten am Tag unterwegs und legt dabei gut 40 Kilometer zurück [31]. Dieser durchschnittliche Zeitaufwand hat im Vergleich mit dem Zeitaufwand von vor 20 Jahren etwa um zehn Minuten zugenommen.

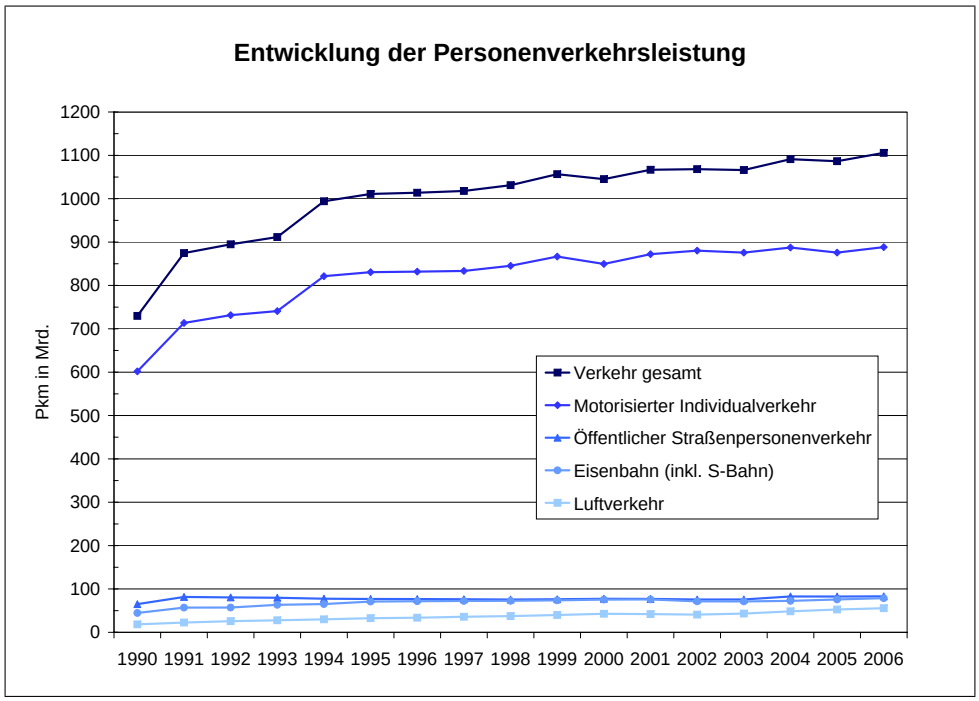


Abbildung 3.4.: Die Entwicklung der Personenverkehrsleistung. Quelle: [12]

Aber nicht nur die Zeit, die für Mobilität verwendet wird, hat zugenommen, sondern auch die Länge und die Anzahl der Wege. In Westdeutschland hat laut der Studie „Mobilität in Deutschland 2002“ [31] die Anzahl der täglichen Wege in den letzten 20 Jahren von etwa 190 Mio. auf 225 Mio. zugenommen. Die tägliche Verkehrsleistung ist in diesem Zeitraum von knapp 1,8 Mrd. Pkm auf aktuell etwa 2,5 Mrd. Pkm gestiegen. Dieser Trend hat

sich weiter fortgesetzt (siehe Abbildung 3.4), so dass die Personenverkehrsleistung 2006 insgesamt 1.106 Mrd. Pkm betragen hat. Für die Zukunft geht das Bundeskabinett laut Bundesverkehrswegeplan 2003 davon aus, dass der Personenverkehr in Zukunft weiterhin ansteigen wird [50]. Diese Wachstumserwartungen ziehen sich durch alle Zweige des Personenverkehrs, lediglich der Fußgängerverkehr soll der Verkehrsprognose zufolge bis 2015 leicht zurückgehen. Überdurchschnittliche Wachstumsraten werden dabei für den Eisenbahnverkehr und im Speziellen für den Luftverkehr erwartet.

Ein Großteil dieser Entwicklungen ist auf eine Zunahme der Anzahl und der Länge von Einkauf- und Freizeitwegen zurückzuführen (siehe Abbildung 3.5). Dies deutet auf veränderte Einkauf- und Freizeitgewohnheiten hin. Darüber hinaus wird berufliche Mobilität immer stärker gefordert und immer mehr Menschen wohnen im weiteren Umkreis von Städten. Hinzu kommt, dass durch die Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur, beispielsweise durch den Ausbau einer Autobahn, der vom Arbeitsort 100 km entfernte Wohnort beibehalten werden kann. Dieser so genannte induzierte Verkehr ist für ungefähr 10 bis 20% des Verkehrswachstums verantwortlich [50].

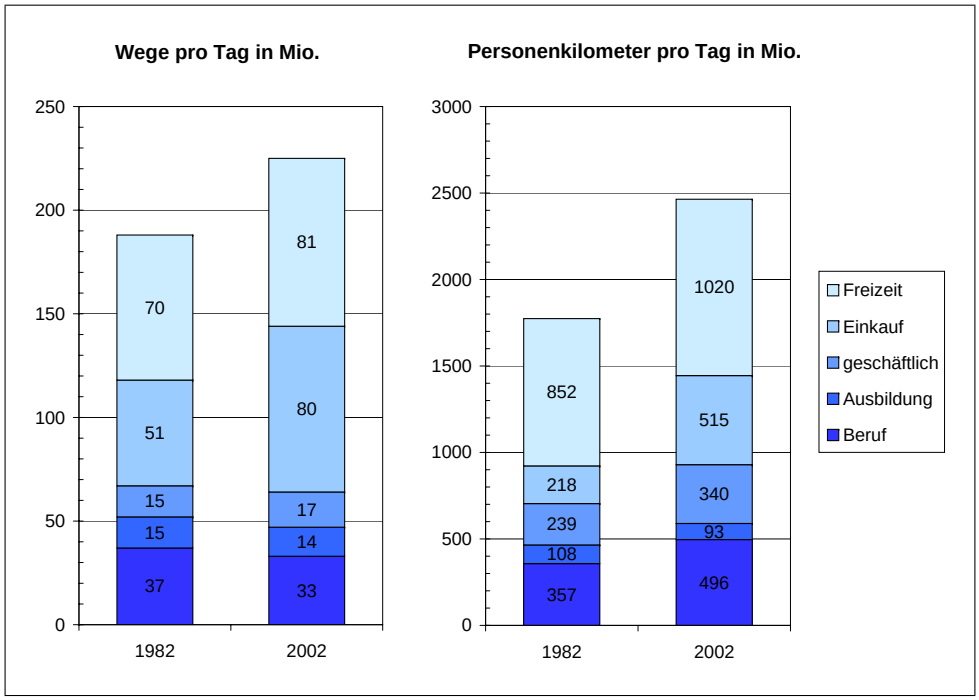


Abbildung 3.5.: Das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsleistung in Westdeutschland im Zeitvergleich. Quelle: Mobilität in Deutschland 2002 [31]

Ungefähr 58% der gesamt zurückgelegten Wege wurden 2003 mit dem Auto zurückgelegt (siehe Abbildung 3.6). Dieser Anteil hatte sich demnach von 52% im Jahr 1994 um 6 Prozentpunkte erhöht. Die Verkehrsmenge allein des motorisierten Individualverkehrs (MIV) ist innerhalb der letzten zehn Jahre um 8% gestiegen und erreichte 2004 mit 58,3 Mrd. Fahrten einen neuen Höchstwert. Das bedeutet, dass jeder Bürger im Schnitt zwei Mal pro Tag mit einem Fahrzeug unterwegs ist. Dabei ist eine durchschnittliche Fahrt 16 km lang. Berücksichtigt man zudem diese zurückgelegten Strecken liegt der Anteil des motorisierten Individualverkehrs an der gesamten Verkehrsleistung bei 77%. Zusammenfassend lassen sich somit folgende zentralen Trends im Personenverkehr ausmachen:

- Höhere Zeitbudgets für die tägliche Mobilität bei wachsenden Wegelängen
- Hohe Wachstumsraten im Erledigungs-, Einkaufs- und Freizeitverkehr
- Zunehmende Anteile des motorisierten Individualverkehrs am Verkehrsaufkommen

Nach der Studie „Mobilität in Deutschland 2002“ [31] ist überdies eine Zunahme der Motorisierung der privaten Haushalte und ein stagnierendes absolutes Aufkommen im öffentlichen Verkehr festzustellen.

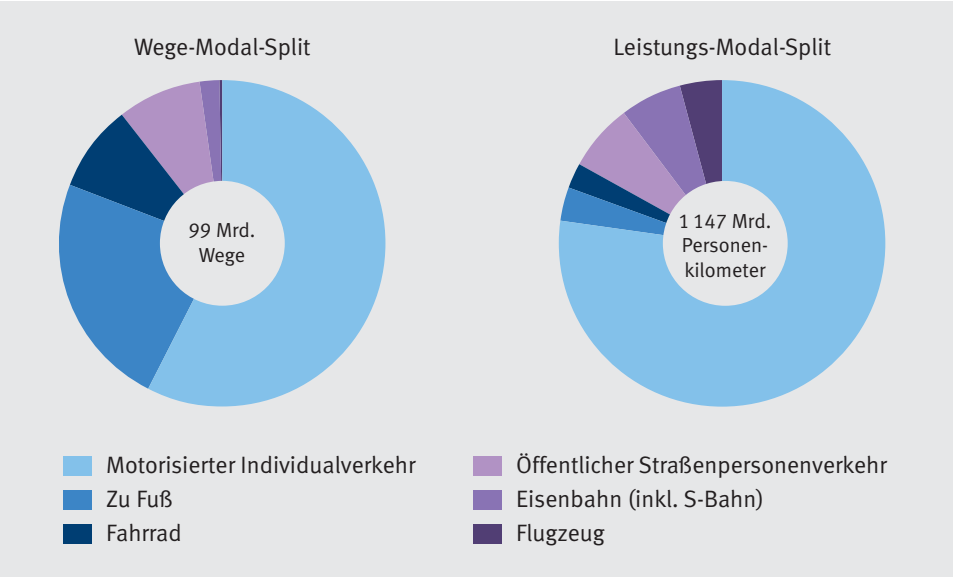
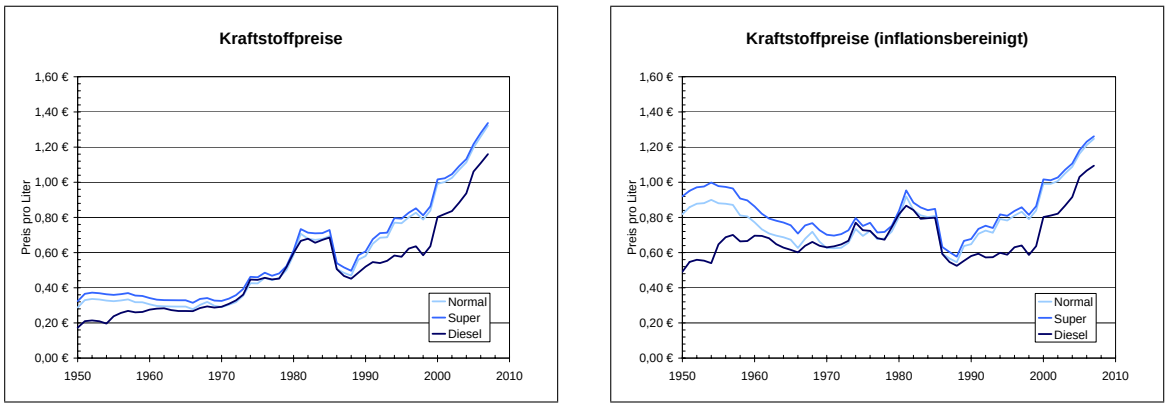


Abbildung 3.6.: Der Modal-Split des Personenverkehrs 2003. Quelle: Mobilität in Deutschland 2002 [31]

Bisher hatte die Entwicklung der Kraftstoffpreise nur einen geringen Einfluss auf diese Trends. Nach der zweiten Ölkrise 1979/80, deren Auslöser hauptsächlich Förderungsausfälle, die Verunsicherung nach der Revolution im Iran und der folgende Erste Golfkrieg waren, hatten sich die Preise für Kraftstoffe kurzfristig wieder erholt, sind dann aber selbst unter Abzug der Inflationsrate kontinuierlich angestiegen (siehe Abbildung 3.7).



(a) (b)

Abbildung 3.7.: Die Entwicklung der durchschnittlichen Kraftstoffpreise: (a) nicht inflationsbereinigt; (b) inflationsbereinigt. Quelle Kraftstoffpreise: [3]; Quelle Inflationsraten: Statistisches Bundesamt [47]

Um die Hintergründe dieser Entwicklung analysieren zu können, stellt sich zunächst die Frage, wie sich die Kraftstoffpreise insgesamt zusammensetzen. Den größten Anteil mit etwa zwei Drittel des gesamten Preises machen Steuern aus. Die Energiesteuer (früher Mineralölsteuer) orientiert sich an der Umweltverträglichkeit und ist demnach für jede Treibstoffart unterschiedlich. Für Benzin und Super beträgt sie 65,45 Cent/Liter, für Diesel 47,04 Cent/Liter und für Erdgas 18 Cent/Kilogramm [9]. Seit 1999 ist darin auch die Ökosteuer enthalten. Nicht zu vergessen die Mehrwert- bzw. Umsatzsteuer in Höhe von 19% des Nettopreises. Weiterhin beinhaltet der Preis an der Zapfsäule den Produkteinstandpreis für Rohöl, da Deutschland nahezu vollständig von Importen abhängig ist. Dieser richtet sich nach der Entwicklung auf den internationalen Ölmärkten. Für Europa ist dabei der Rotterdamer Spotmarkt der preisbestimmende Markt. Dort werden wie an allen Börsen die Preise oft weniger von fundamentalen Marktdaten, sondern vielmehr von psychologischen Faktoren wie Erwartungen, Spekulationen oder Einschätzungen bestimmt. Darüber hinaus werden die Ölpreise vom Wechselkurs des Euro zum Dollar beeinflusst, da Öl an den internationalen Märkten generell in Dollar gehandelt wird.

Ein weiterer Posten ist der so genannte Deckungsbeitrag. Er beinhaltet die Kosten der Mineralölkonzerne für die gesetzliche Bevorratung, für Forschung und Kraftstoffentwicklung, für Transport, Bau und Erhaltung von Tankstellen, für Lagerhaltung, Verwaltung und Vertrieb sowie Personalkosten und Gewinn. Der Deckungsbeitrag betrug 2006 für Super durchschnittlich 8,6 Cent/Liter [36]. Dabei spielt der harte Wettbewerb in Deutschland unter den Tankstellen und den Mineralölkonzernen eine große Rolle. Ohne Steuern gehört Deutschland dadurch zu den preiswertesten Ländern in der EU. Der Beitrag für den gesetzlichen Bevorratungsverband liegt bei etwa 0,5 Cent/Liter. Damit sichert der Verband im Falle einer Krise einen Ölvorrat, der 90 Tage reichen soll.

Dem Bundesministerium der Finanzen zufolge sind demnach vor allem die steigenden Kosten für Rohöl für die steigenden Kraftstoffpreise verantwortlich [35]. Die Hauptgründe für diesen Anstieg sind die generelle Angst vor Ölknappheit und die Tatsache, dass die Nachfrage sich insbesondere durch aufstrebende Staaten wie China und Indien zunehmend erhöht. Die Einschätzung der Reichweite der Ölreserven hängt von einer Vielzahl an technischen und ökonomischen Faktoren ab. Mineralölkonzerne und der Mineralölverband tendieren eher zu dem Standpunkt, dass die Ölvorräte auch in 50 bis 100 Jahren noch nicht erschöpft sein werden, da sie davon ausgehen, dass durch technische Innovationen und höhere Ölpreise weitere Vorkommen wirtschaftlich erschlossen werden können [16],[8],[36]. Geologen sehen dies hingegen etwas pessimistischer [53]. Inzwischen räumt auch die Internationale Energieagentur (IEA), die lange Zeit eine Knappheit der Ölvorräte bestritt, eine Korrektur ihrer Prognosen ein [66].

3.2. Einflussfaktoren der Verkehrsmittelwahl

Im Personenverkehr ist eindeutig ein zunehmendes Bedürfnisses nach Mobilität festzustellen (vergleiche Kapitel 3.1). Größtenteils wird dieses Bedürfnis gegenwärtig durch motorisierten Individualverkehr über Pkws befriedigt, die mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden. Vor dem Hintergrund endlicher Ölreserven könnten somit weiterhin steigende Kraftstoffpreise und ein zunehmendes Ökologiebewusstsein durch die permanente Medienpräsens des Klimawandels der Motor eines Wandels im Verkehrssektor sein. Unter Aufrechterhaltung des Mobilitätsbedürfnisses ist es vorstellbar, dass als Folge ein Wechsel zu anderen Verkehrssystemen mit neuen Verkehrsmitteln vollzogen wird. Da

das Verkehrsverhalten nie monokausal ist [19], werden in diesem Kapitel Faktoren vorgestellt, die bei der Verkehrsmittelwahl eine Rolle spielen und deren Zusammenspiel entscheidenden Einfluss auf einen Verkehrssystemwechsel haben könnte.

Grundsätzlich beschreibt der Begriff Verkehrsmittelwahl, welches Verkehrsmittel für einen bestimmten Weg genutzt wird. Ist die Auswahl dabei auf lediglich ein Verkehrsmittel begrenzt, ist die Entscheidung trivial. Interessant wird es deshalb erst dann, wenn mehrere Alternativen zur Wahl stehen. In diesem Zusammenhang ist mit eingeschlossen, dass der Weg mit einem anderen Verkehrsmittel zu einer anderen Zeit oder an einen anderen Zielort stattfinden kann, falls der Zweck des Weges nicht an eine bestimmte Zeit oder einen bestimmten Ort gebunden ist.

3.2.1. Faktor Reisezeit

Nach Frewein und Seebauer [19] hat die Reisezeit den stärksten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl und damit auf den Modal-Split. Reisezeit ist definiert als der Zeitbedarf einer Reise vom Startpunkt bis zum Zielpunkt. Generell kann eine Reise in mehrere Phasen unterteilt werden [20]:

1. **Zugangsphase:** Der Zugang beschreibt den Weg vom Startpunkt bis zum Übergangsbereich, an den sich der Hauptlauf anschließt, und ist gekennzeichnet durch geringe Geschwindigkeiten und kurze Wege.

2. **Übergangsphase:** Hier wird die Verbindung zwischen Zugang und Hauptlauf hergestellt. Diese Phase ist für die verschiedenen Verkehrsmittel sehr unterschiedlich. Im Gegensatz zum Straßenverkehr erbringen Flug- und Schienenverkehr durch den Aufenthalt an Flughäfen oder Bahnhöfen an dieser Stelle keine Transportleistung.

3. **Hauptlauf:** Die Merkmale dieser Phase sind hohe Geschwindigkeiten und große Strecken, die durch Pausen, Aufenthalte oder Umstiege unterbrochen sind.

4. **Übergangsphase:** Diese Phase entspricht der ersten Übergangsphase.

5. **Abgangsphase:** Der Abgang weist dieselben Eigenschaften wie der Zugang auf und beschreibt den Weg zwischen Übergangsbereich und Zielpunkt.

Die Gesamtreisezeit besteht infolgedessen nicht nur aus der Fahrzeit, also der Zeit, die ein Verkehrsteilnehmer im Rahmen seiner Ortsveränderung in einem Fahrzeug verbringt, sondern auch aus Zeiten für zu Fuß zurückgelegte Strecken, verkehrsmittelbedingten Halte- oder Verlustzeiten sowie Umsteigezeiten. In den meisten Fällen hat allerdings die Fahrzeit den größten Anteil an der Reisezeit. Über den Quotienten aus der insgesamt zurückgelegten Strecke und der dafür benötigten Zeit kann schließlich eine Durchschnittsgeschwindigkeit für den gesamten Weg ermittelt werden.

Vergleicht man nun mehrere Verkehrsmittel, kommt es entscheidend darauf an, ob die Durchschnittsgeschwindigkeit der Verkehrsmittel auf der Fahrzeit oder auf der gesamten Reisezeit basiert oder ob dem Vergleich sogar die Maximalgeschwindigkeiten zu Grunde liegen. So erreichen zum Beispiel Pkw-Nutzer im Stadtverkehr aufgrund des zähen Verkehrsflusses, zahlreichen Ampeln, Stausituationen, der Parkplatzsuche usw. häufig nicht die Reisezeit von Radfahrern, obwohl die Maximalwerte der Fahrgeschwindigkeit weitaus höher sind. Berücksichtigt man beispielsweise die langen Wartezeiten in Flughäfen bei der Entscheidung zwischen Flugzeug, Bahn oder Pkw für eine nationale Reise, schneidet das Flugzeug trotz der hohen Fahrgeschwindigkeiten oftmals nicht mehr ganz so gut ab. Allgemein kommt es häufig zu Unterschätzungen der tatsächlichen Reisezeit.

Ein weiterer Aspekt der Analyse der Reisezeit ist die Tatsache, dass zwischen der objektiven und der subjektiven Bedeutung des Zeitaufwands nicht selten gravierenden Diskrepanzen aufgrund einer verzerrten Wahrnehmung existieren. Beispielsweise werden Wartezeiten an Haltestellen, Bahnhöfen oder Flughäfen subjektiv länger als ihre tatsächliche Dauer wahrgenommen, die persönliche Aktivität des Fahrzeuglenkens führt hingegen selbst in Staus zu einer verkürzten Zeitwahrnehmung.

3.2.2. Faktor Kosten

Die Gesamtkosten für Verkehr, die durch die Befriedigung des individuellen Mobilitätsbedürfnisses anfallen, werden entscheidend durch die Wahl der Verkehrsmittel beeinflusst, da verschiedene Verkehrsmittel höchst unterschiedliche spezifische Kosten haben. Um diese untereinander vergleichen zu können, ist die Festlegung einer allgemeinen Basis unumgänglich. Hierbei bietet es sich an, die Kosten pro Person auf eine gängige Längeneinheit wie beispielsweise Kilometer zu beziehen. Alternativ dazu ist es in speziellen

Fällen auch möglich die Kosten pro Person und Weg anzugeben, da die Wahl eines alternativen Verkehrsmittels gegebenenfalls eine Veränderung der Entfernung mit sich bringt.

Generell können die spezifischen Kosten eines Verkehrsmittels in zwei unterschiedliche Kostenarten unterteilt werden. Einerseits die variablen Kosten, die nur anfallen, wenn ein Verkehrsmittel auch wirklich genutzt wird. Ein Beispiel dafür ist der Einzelfahrschein im Zug oder die Kraftstoffkosten für eine Fahrt mit dem Auto. Andererseits fixe Kosten wie beispielsweise die Beiträge für Autoversicherungen, die Garagenmiete oder die Kosten für eine Bahncard, die hingegen immer anfallen auch wenn das Verkehrsmittel nicht genutzt wird. Fixkosten leisten oftmals einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zu den privaten Verkehrskosten. Sie bleiben allerdings bei der Verkehrsmittelwahl gedanklich nicht selten unberücksichtigt, da sie fast immer in zeitlichem Abstand zur direkten Verkehrsmittelnutzung auftreten und sich meist hinter regelmäßigen Haushaltsausgaben verstecken. Die Umlegung der fixen Kosten auf die Verkehrsleistung und damit die Höhe der spezifischen Kosten variiert entsprechend der Art und der Häufigkeit der Nutzung des Verkehrsmittels.

Für objektive Kostenvergleiche der Verkehrsmittel müssten genau genommen auch externe Kosten berücksichtigt werden. Dies sind Kosten, für die nicht der Nutznießer beziehungsweise der Verursacher, sondern unbeteiligte Dritte aufkommen müssen [43]. Im Verkehr entstehen externe Kosten beispielsweise durch Luftverschmutzung, Klima-, Lärm-, und Unfallschäden sowie durch sonstige Schäden an Natur und Landschaft [54]. Konkret bedeutet dies, dass der Autofahrer nicht für die Beeinträchtigung der Lebensqualität der Anwohner einer Autobahn bezahlen muss, obwohl er deren Nutznießer ist. Die Berechnung von externen Kosten, die durch Effekte wie der Verringerung der Erholungsfunktion eines Waldgebietes durch den Bau einer Autobahn entstehen, ist oft schwierig und meist sind nur Abschätzungen möglich. Versucht wird dies zum Beispiel über den Zahlungsbereitschaftsansatz [54], wobei Anwohner beispielsweise befragt werden, welche Beträge sie für eine Reduktion der Lärmbelästigung in ihrem Wohnumfeld bereit wären zu bezahlen. Weitere Verfahren sind die Berechnung von Vermeidungskosten und Ansätze zur Schadensbewertung. Die Umrechnung dieser so genannten externen Effekte in Geldeinheiten wird Monetarisierung genannt. Da der Verkehrsteilnehmer die externen Kosten nicht tragen muss und sie damit zumindest den Faktor Kosten nicht direkt beeinflussen, werden sie im Folgenden vernachlässigt. In Zukunft wäre es allerdings wünschenswert, dass externe Kosten zunehmend internalisiert werden, um so für die Allgemeinheit einen

möglichst großen Nutzen zu erzielen und die unterschiedlichen Verkehrsmittel allgemein vergleichbarer zu machen. Dann würde vermutlich gerade der motorisierte Individualverkehr oder der Luftverkehr zunehmend anders bewertet werden.

3.2.3. Faktor Gewohnheit

Neben rationalen Faktoren wie dem Zeit- und dem Geldaufwand wird das menschliche Verhalten im Verkehr zudem stark von Gewohnheiten beeinflusst. Unter dem Begriff Gewohnheit versteht man allgemein eine meist nahezu automatisch vollzogene Reaktionsweise, Handlung oder Haltung, die durch häufige Wiederholung unter gleichartigen Bedingungen zur Selbstverständlichkeit geworden ist. Der Sozialisationsprozess, in dem Gewohnheiten angenommen werden, wird Habitualisierung genannt. Es gibt Gewohnheiten des Fühlens, des Denkens und des Verhaltens. Sie ermöglichen dem Menschen im Alltag bei ähnlichen Entscheidungssituationen auf Erfahrungen oder Verhaltensweisen zurückgreifen zu können, die in Situationen unter ähnlichen Umständen als zielführend oder zweckdienend erlebt wurden, ohne jedes Mal erneut die Alternativen abwägen zu müssen. Beispielsweise ist der Weg zur Arbeit stark von Gewohnheiten geprägt. Viele Menschen nehmen Tag für Tag denselben Weg und dasselbe Verkehrsmittel, da sie die Tage zuvor die positive Erfahrung gemacht haben damit in der gewünschten Zeit ihr Ziel, also den Arbeitsplatz, zur erreichen. Erst wenn es durch Störungen wie Baustellen oder Fahrplanänderungen zu negativen Erfahrungen kommt, wird nach Alternativen gesucht, die dann eventuell nach dem Wegfall der Störung sogar beibehalten werden. Schon der römischer Dichter Ovid (43 v.Chr. - 18 n.Chr.) wusste um die Macht der Gewohnheit: „Nil consuetudine maius“ (dt. Nichts ist mächtiger als die Gewohnheit).

Bei Verkehrsmodellen kann die Einflussgröße Gewohnheit grundlegend unterschiedlichen Status besitzen [19]. In infrastrukturellen Modellen entspricht die Gewohnheit dem aktuellen Verhalten, welches durch das Modell beschrieben und prognostiziert werden soll. In psychologischen Modellen wird im Gegensatz dazu deutlich zwischen Gewohnheit und aktuellem Verhalten unterschieden. Der Faktor Gewohnheit ist dabei einer von mehreren Faktoren, die die Verkehrsmittelwahl und damit das aktuelle Verhalten beeinflussen. In letzterem Sinne soll der Faktor Gewohnheit auch im Verkehrsmodell dieser Arbeit berücksichtigt werden.

3.2.4. Sonstige Faktoren

Darüber hinaus gibt es weitere Faktoren, die bei der Verkehrsmittelwahl eine Rolle spielen. Diese werden im Folgenden zu dem Faktor „Güte“ eines Verkehrsmittels zusammengefasst. Dazu gehören zunächst ökologische Faktoren wie der Energiebedarf oder die Schadstoffemission. Gleichbedeutend mit dem Energiebedarf ist der Begriff Energieverbrauch, allerdings wird physikalisch gesehen in einem geschlossenen System aufgrund des Energieerhaltungssatzes Energie nicht verbraucht, sondern umgewandelt. Somit wird im Verkehrsbereich Energie, die entweder chemisch in Kraftstoffen gespeichert ist oder in Form von elektrischem Strom vorliegt, in Bewegungsenergie umgewandelt. Dabei entsteht in der Regel auch Abwärme, die sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirkt. Für Vergleichszwecke kann als Einheit pro Person und Weg beziehungsweise pro Person und Längeneinheit nun entweder eine Kraftstoffmenge in Litern oder ein Energiebetrag in Joule (J) oder Kilowattstunden (kWh) gewählt werden. Je nach Kraftstoffart ergeben sich folgende Umrechnungsfaktoren [52]:

Benzin[1]: 1 l = 30,6 MJ = 8,5 kWh

Diesel[2]: 1 l = 35,6 MJ = 9,9 kWh

Für Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor wird der Energiebedarf in der Regel in l/100km pro genormtem Fahrzyklus angegeben. In der Europäischen Union ist dies der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) nach der Richtlinie 93/116/EWG. Dabei wird auf einem Rollenprüfstand ein Fahrzyklus mit klar abgegrenzten Beschleunigungs-, Konstantfahr- und Bremsphasen abgefahren. Sogar die Gangstufen sind bei Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe vorgeschrieben. Dieser Fahrzyklus stellt allerdings lediglich ein Durchschnittsprofil zum besseren Vergleich der Fahrzeuge dar, der in den seltensten Fällen mit dem Nutzungsprofil des Kunden übereinstimmt. So kommt es insbesondere bei ungewöhnlicher Nutzung wie beispielsweise oftmaligen Autobahnfahrten mit hohen Geschwindigkeiten zu erheblichen Abweichungen von den Angaben der Hersteller. Zudem werden Fahrzeuge mit besonders großvolumigen Motoren in Verbindung mit Handschaltgetrieben im NEFZ oft zu ungünstigen Motorbetriebspunkten gezwungen. Darüber hinaus können die Hersteller die Messungen durch die Auswahl herausragender Fahrzeuge aus der Produktion oder die Verwendung spezieller Schmiermittel beeinflussen.

[1] Benzin: Heizwert = 42,5 MJ/kg, Dichte = 0,72 kg/l
[2] Diesel: Heizwert = 42,1 MJ/kg, Dichte = 0,85 kg/l

Um Verkehrsmittel mit unterschiedlichen Antriebstechnologien und unterschiedlichen Energiequellen exakt hinsichtlich des Energiebedarfs vergleichen zu können, muss über den Bedarf für die Energiebereitstellung, der durch Verluste bei der Primärenergieförderung, Energieumwandlung und -verteilung entsteht, auf den Primärenergieverbrauch zurückgerechnet werden. Prinzipiell können Verkehrsmittel erst dann objektiv verglichen werden. Laut IFEU lagen 2004 die Wirkungsgrade der Energiebereitstellungskette in Deutschland für Benzin bei 84%, für Diesel/Kerosin bei 87% und für den Bahnstrommix bei 32% [29].

Über den Energie- oder Kraftstoffbedarf kann darüber hinaus die Kohlenstoffdioxid-Emission (CO_2) eines Verkehrsmittels berechnet werden. Bei Verkehrsmitteln mit Verbrennungsmotor gestaltet sich dies recht einfach, da Kraftstoffe überwiegend aus Kohlenwasserstoffen bestehen und man somit den Kraftstoffbedarf nur mit dem jeweiligen Faktor multiplizieren muss, der angibt, welche Menge an CO_2 bei der Verbrennung von einem Liter Kraftstoff ausgestoßen wird. Für Benzin sind dies etwa 2,32 kg CO_2/l und für Diesel etwa 2,65 kg CO_2/l [30]. Bei der Verbrennung von einem Kilogramm Kerosin werden etwa 3,15 kg CO_2/l freigesetzt [28].

Bei Verkehrsmitteln, die mit Elektromotoren angetrieben werden und die Energie aus dem Stromnetz beziehen, wird die CO_2-Emission davon bestimmt, welche Menge an CO_2 bei der Stromerzeugung ausgestoßen wurde. Jedes Energieversorgungsunternehmen in Deutschland ist seit 2005 nach §42 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) dazu verpflichtet die Umweltauswirkungen pro Kilowattstunde auszuweisen. Die Durchschnittswerte für Deutschland liegen etwa bei 520 g CO_2 pro kWh [22]. Die Deutsche Bahn AG nutzt zum Betrieb ihrer Elektrozüge einen Mix aus öffentlichem Strom (etwa 27%) und eigenen Kraftwerken (etwa 73%). Dadurch ergibt sich ein CO_2-Emissionsfaktor von 657 g/kWh im elektrischen Schienenverkehr [29]. Beim quantitativen Vergleich der CO_2-Emissionen der unterschiedlichen Verkehrsmittel muss insbesondere die Abhängigkeit der Relevanz und Wirkung des Gases vom Emissionsort berücksichtigt werden. Diese Tatsache spielt auch bei der Emission von anderen Schadstoffen eine Rolle.

Neben den CO_2-Emissionen kann weiterhin der Ausstoß von Methan (CH_4) und Distickstoffoxid (N_2O), welche neben CO_2 auch zum Treibhauseffekt beitragen, sowie der Ausstoß von Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffoxiden (NO_x) oder von Feinstaub in den ökologischen Faktor eingehen. Dabei stellt sich allerdings die Frage, ob der „gewöhnliche“ Verkehrsteilnehmer über detaillierte Informationen zu diesen Emissionen und vor

allem auch zu deren Umweltschädlichkeit verfügt, um sie in seine Verkehrsmittelwahl einzubeziehen. Über gesetzliche Maßnahmen wie beispielsweise der Umwelt- bzw. Feinstaubplakette kann dies den Verkehrsteilnehmern näher gebracht werden.

Generell sollten in der Emissionsberechnung auch diejenigen Emissionen berücksichtigt werden, die bei der Bereitstellung von Treibstoffen und deren Verteilung freigesetzt werden. Mittlerweile gibt es eine ganze Reihe von CO_2-Rechnern, mit deren Hilfe man sich die eigene CO_2-Bilanz berechnen lassen kann. Ein Bereich ist hierbei unter anderem die Mobilität. Einige Rechner beschränken sich auch nur auf den Verkehrsbereich. Beispiele für CO_2-Rechner sind der Rechner des Bayerischen Landesamts für Umwelt[3] oder der UmweltMobilCheck der Deutschen Bahn[4].

Die Sicherheit eines Verkehrsmittels ist für viele Menschen ebenfalls ein wichtiger Faktor bei der Verkehrsmittelwahl. Wird diese subjektiv nicht als ausreichend empfunden, entstehen Ängste. Diese beeinflussen wiederum das Verhalten im Verkehr dahingehend, dass die Nutzung dieses Verkehrsmittels ungeachtet der anderen Faktoren nicht weiter zur Diskussion steht oder dass sogar das Ziel oder der Weg, den man zurücklegen wollte, überdacht wird, falls diesbezüglich keine weitere Alternative zur Wahl steht. Beispielsweise werden Menschen, die Zweifel an der Sicherheit eines Flugzeugs haben, die Notwendigkeit einer interkontinentalen Reise zumindest genauer hinterfragen. In den letzten Jahren wurden insbesondere im Straßenverkehr zur Verbesserung der Sicherheit zahlreiche Maßnahmen ergriffen. Dazu gehören einerseits Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen (aktive Sicherheit) wie beispielsweise die Integration von Antiblockiersystemen (ABS) oder Schulungen der Fahrzeugführer, um in Gefahrensituationen angemessen handeln zu können. Andererseits wird versucht über Crashtests den Fahrzeugbau beispielsweise über Knautschzonen oder Airbags dahingehend zu optimieren, dass damit die Folgen von Unfällen verringert werden können (passive Sicherheit).

Ein weiteres Kriterium der Güte von Verkehrsmitteln ist der jeweilige Komfort, der von den Verkehrsteilnehmern individuell und oftmals situationsbezogen empfunden wird. Dabei kann es ebenfalls zu sehr dominantem Einfluss kommen, wenn beispielsweise bei Regenwetter für den Weg zur nahe gelegenen Bank Auto oder Fahrrad zur Verfügung stehen. Generell wird der Komfort eines Verkehrsmittels zunächst von der entsprechenden Verfügbarkeit beeinflusst. Also zum Beispiel von der Regelmäßigkeit und Frequenz

[3] LFU: http://lfu.klima-aktiv.de
[4] UmweltMobilCheck: http://www.bahn.de/umweltmobilcheck

des Busfahrplans oder der familiären Anrechte auf das gemeinsame Auto. Weiterhin geht in den Komfort auch ein, wie die Nutzung des Verkehrsmittels wahrgenommen und bewertet wird. Dabei kann es insbesondere bei längeren Fahrten eine Rolle spielen, ob man selber das Verkehrsmittel bedienen muss oder ob man während der Fahrt anderen Tätigkeiten nachgehen kann. Ersteres bedingt den Komfort zudem über die Bewertung der jeweiligen Verkehrssituation. Überdies sind die Auslastung des Verkehrsmittels, die Beurteilung der Charakteristiken der Übergangsphase sowie die Anzahl der Umstiege und Wartezeiten beziehungsweise die jeweils nötigen Verkehrsmittelwechsel bestimmende Eigenschaften.

Gerade in nicht unbedingt rein rationalen Faktoren wie der Einschätzung des Komforts oder der Sicherheit zeigt sich schließlich die Vielfalt und Subjektivität menschlichen Handelns bei der Verkehrsmittelwahl. Da Verkehrsmittel darüber hinaus nicht nur für den Transport geeignet sind, sondern auch Orte der Kommunikation, der Präsentation, der Entspannung oder des Sporttreibens sein können, müssen weitere Einflüsse bei der Verkehrsmittelwahl berücksichtigt werden. Dazu gehört beispielsweise auch, dass über den Besitz oder die Nutzung von bestimmten Verkehrsmitteln ein gewisser Status repräsentiert werden kann. Zudem zeigen Forschungsergebnisse, dass in die Verkehrsmittelwahl auch Wertvorstellungen und Verhalten wichtiger Bezugspersonen eingeht [43].

3.3. Etablierte Verkehrsmittel

Um das eigene Bedürfnis nach Mobilität zu befriedigen, greifen die Menschen in Deutschland heute in vielen Fällen auf das Auto zurück (siehe Abbildung 3.6). Unter anderem zählen aber auch Flugzeug und Eisenbahn zu den etablierten Verkehrsmitteln. Das Flugzeug dominiert eindeutig den Mittel- und Langstreckenbereich ab etwa 800km. Zwischen 200km und 800km, also im Kurz- und Mittelstreckenbereich, konkurrieren die drei Verkehrsmittel mit ungefähr ausgeglichenen Marktanteilen. Der Orts-, Nah- und Kurzstreckenbereich bis 200km wird hingegen wieder nahezu konkurrenzlos vom Auto bestimmt (siehe Abbildung 3.8). Für diese Verkehrsmittel werden nun die oben genannten Faktoren der Verkehrsmittelwahl genauer spezifiziert. Dabei müssen die jeweiligen Werte immer auf alle Mitfahrer/-reisenden umgelegt werden.

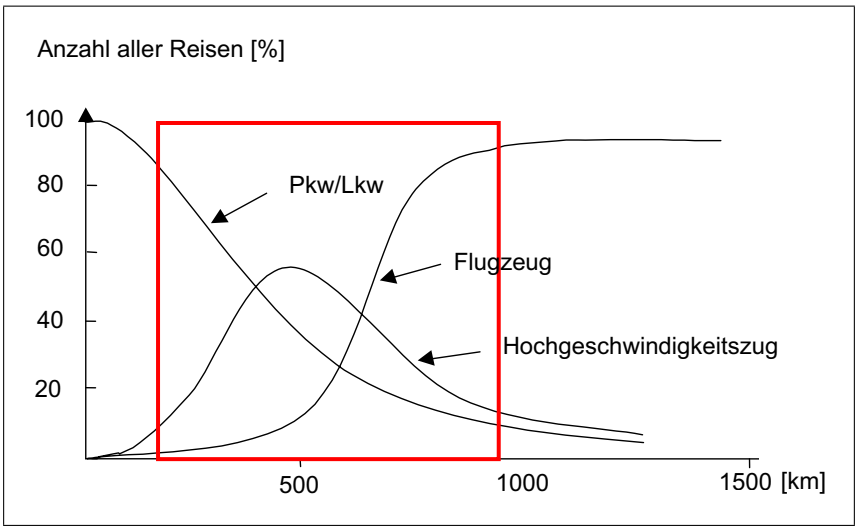


Abbildung 3.8.: Modal-Split verschiedener Verkehrsmittel über die Entfernung. Quelle: [20]

3.3.1. Auto mit Verbrennungsmotor

Für einen Großteil der Deutschen ist wie gesagt das eigene Auto das wichtigste Fortbewegungsmittel. Dieses wird bis auf wenige Ausnahmen heutzutage mit Verbrennungsmotoren angetrieben, die die Energie aus raffineriertem Erdöl beziehen. Das Kraftfahrtbundesamt teilt die unterschiedlichen Modelle anhand von optischen, technischen und marktorientierten Merkmalen in verschiedene Segmente ein (siehe Tabelle 3.1). Die Kraftfahrzeuge dieser Segmente unterscheiden sich zudem in Größe, Gewicht, Motorleistung und Preis. Diese Differenzen sind bei der Spezifikation der Faktoren der Verkehrsmittelwahl zu berücksichtigen.

Die fünf Phasen, in die eine Fahrt nach Gollnick [20] unterteilt werden kann, grenzen sich bei einer einfachen Autofahrt lediglich durch unterschiedliche Geschwindigkeiten oder Abschnittslängen ab. Innerörtliche Abschnitte zählen größtenteils zur Zu- bzw. Abgangsphase, außerörtliche auf Landes- oder Bundesstraßen zur Übergangsphase und Autobahnabschnitte zum Hauptlauf. Insgesamt ergeben sich hinsichtlich der Reisezeit eines Weges, der mit dem Auto zurückgelegt wird, beziehungsweise der dazu gehörenden durchschnittlichen Geschwindigkeit je nach Eigenart des Weges große Unterschiede. Die Studie „Mobilität in Deutschland 2002“ [31] gibt eine Durchschnittsgeschwindigkeit für Autofahrten von etwas über 30 km/h an. Dieser Wert liegt deutlich unter der vielfach empfundenen oder geschätzten Geschwindigkeit. Die Verteilung der mittleren

Segment	Beispiele
Minis	Fiat Panda, Renault Twingo, Smart ForTwo
Kleinwagen	BMW Mini, Opel Corsa, VW Polo
Kompaktklasse	Audi A3, Opel Astra, VW Golf
Mittelklasse	Audi A4, BMW 3er, VW Passat
Obere Mittelklasse	Audi A6, BMW 5er, Mercedes E-Klasse
Oberklasse	Audi A8, BMW 7er, Mercedes S-Klasse
Geländewagen	Audi Q7, BMW X3, Ford Maverick
Sportwagen	Audi TT, Mercedes SLK, Porsche 911
Mini-Vans	Mercedes B-Klasse, Opel Meriva, Renault Modus
Großraum-Vans	Ford Galaxy, Opel Zafira, VW Touran
Utilities (Nutzfahrzeuge)	Iveco Daily, Mercedes Vito, VW Transporter
Wohnmobile	Fiat Ducato, Ford Transit, VW Caravelle

Tabelle 3.1.: Kraftfahrzeugsegmente des KBA

Wegegeschwindigkeiten (siehe Abbildung 3.9) zeigt zudem, dass sich sogar einer von zwei Autofahrern in der Bilanz mit einer Geschwindigkeit von unter 30 km/h zufrieden geben muss.

Spricht man Autofahrer darauf an, warum sie sich für ihr Auto und beispielsweise gegen eine Fahrt mit der Bahn entschieden haben, rechnen sie unter anderem vor, dass die Bahn hinsichtlich der Kosten trotz des hohen Benzinpreises keinesfalls mithalten kann. In dieser Rechnung werden allerdings häufig nur die variablen Kosten berücksichtigt, insbesondere oftmals nur die Kraftstoffkosten. Dazu wird einfach die zu fahrende Strecke durch 100 dividiert und mit dem Verbrauch pro 100 km multipliziert, dem entweder eine eigene Abschätzung oder die Herstellerangaben[5] zu Grunde liegen. Dieser Wert wird anschließend noch mit dem aktuellen Benzinpreis multipliziert. Ganz vergessen sind in dieser Rechnung einerseits weitere variable Kosten wie Parkplatzgebühren und andererseits Fixkosten, die regelmäßig und unabhängig von der Nutzung anfallen, wie Garagengebühren oder der Wertverlust des Autos.

Der ADAC berechnet für verschiedene Neuwagenmodelle die durchschnittlichen Gesamtkosten pro Kilometer und bietet die Ergebnisse für seine Mitglieder auf seiner Website zum Vergleich an [1]. Bei diesen Berechnungen wird pauschal davon ausgegangen, dass das neue Auto vier Jahre lang gefahren wird und in dieser Zeit 60.000 Kilometer zu-

[5] Die Herstellerangaben beruhen auf der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs mit Hilfe des NEFZ (vergleiche Kapitel 3.2.4).

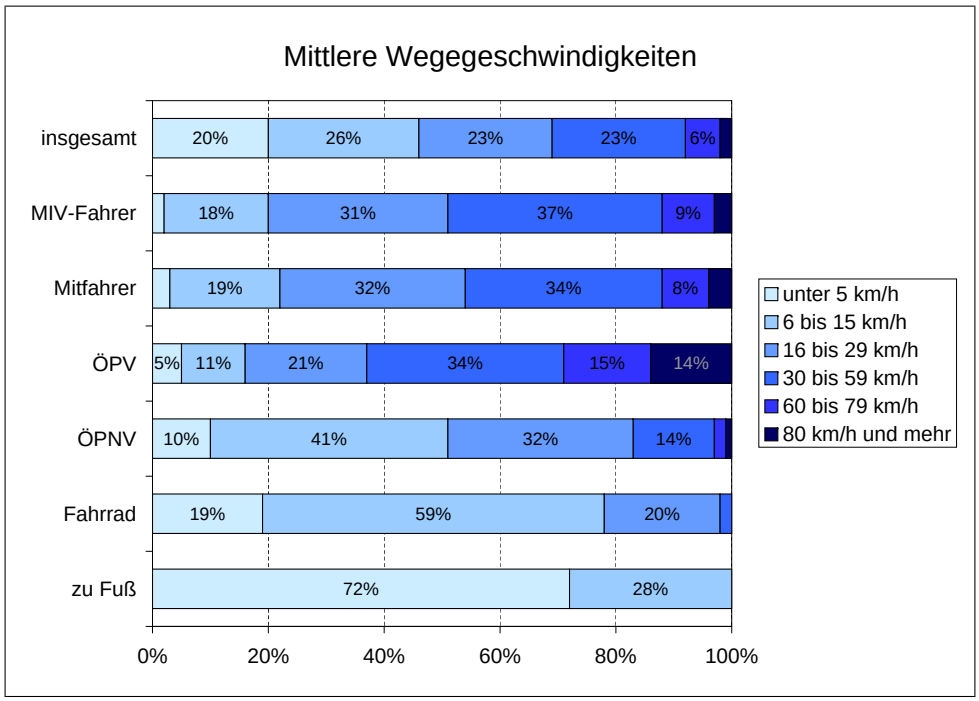


Abbildung 3.9.: Die mittleren Wegegeschwindigkeiten nach Hauptverkehrsmittel. Quelle: Mobilität in Deutschland 2002 [31]

rückgelegt werden. Dies entspricht einer jährlichen Laufleistung von 15.000 Kilometern. Folgende Kosten werden dabei berücksichtigt:

- **Wertverlust:** Dies ist der größte Posten der Autokosten. Er wird mit Hilfe der Gebrauchtwagenwertnotierungen der Deutschen Automobil Treuhand (DAT) ermittelt.

- **Betriebskosten:** Neben den Kraftstoffkosten zählen hierzu auch Kosten für Motoröl sowie Wagenwäsche und Pflege.

- **Fixkosten:** Dazu gehören die Ausgaben für Haftpflicht- und Vollkaskoversicherung, die Kfz-Steuer und eine Pauschale für Parkgebühren, Landkarten, Haupt- und Abgasuntersuchung etc.

- **Werkstatt- / Reifenkosten:** Zur Berechnung dieser Kosten werden die Daten jedes Grundmodells beim Hersteller erfragt. Berücksichtigt werden hierbei Ölwechsel und Inspektionen sowie typische Verschleißreparaturen beispielsweise an Auspuff oder Bremsen.

In einem interaktiven Tool können zudem durch die Eingabe eigener Daten die Berechnungen auf die individuellen Bedürfnisse zugeschnitten werden. In Tabelle 3.2 sind für ein paar ausgewählte Modelle beispielhaft die Kosten aufgelistet, die mit der Standartkalkulation berechnet wurden.

Fahrzeug / Modell	**Gesamtkosten**
Smart ForTwo Coupé 1.0 pure (45kW)	24,5 ct/km
Opel Corsa 1.4 Twinport (66kW)	32,6 ct/km
Audi A3 2.0 TDI Attraction (103kW)	39,8 ct/km
VW Passat 2.0 FSI Trendline (110kW)	47,8 ct/km
BMW 530i (200kW)	71,2 ct/km
Mercedes S 500 7G-Tronic (285kW)	132,2 ct/km
Audi Q7 4.2 FSI quattro tiptr. (257kW)	91,6 ct/km
Porsche 911 Carrera Cabriolet (239kW)	100,0 ct/km
Renault Modus 1.5 dCi ESP Dyn (78kW)	36,3 ct/km
Opel Zafira 1.9 CDTI (88kW)	41,1 ct/km

Tabelle 3.2.: Gesamtkosten ausgewählter Kraftfahrzeuge. Quelle: ADAC [1]

Zur Bestimmung eines ökologischen Faktors für Autos sind die Herstellerangaben trotz der oftmals großen Abweichungen vom eigenen Kraftstoffverbrauch geeignet, da sie durch den genormten Fahrzyklus speziell für Vergleichszwecke ausgelegt sind. Über die Multiplikation dieser Werte mit dem jeweiligen kraftstoffspezifischen Emissionsfaktor[6] kann darüber hinaus auf die CO_2-Emissionen rückgeschlossen werden. Basierend auf dieser Berechnungsmethode entspricht der von der Europäischen Kommission vorgeschlagene CO_2-Richtwert von 130 g/km ungefähr einem Kraftstoffverbrauch von 5,6 l/100km Benzin beziehungsweise 5,0 l/100km Diesel. Als Alternative dazu können auch Emissionsrechner herangezogen werden, die eventuell sogar die Emissionen bei Vertrieb und Bereitstellung des Kraftstoffs berücksichtigen. Eine weitere Möglichkeit bietet der ADAC mit dem EcoTest an, wobei die Autos klassenabhängig mit bis zu fünf Umwelt-Sternen bewertet werden [2].

Im Jahr 2006 wurden auf der Straße 5.091 Menschen getötet und 422.300 verletzt [12]. Aufgrund vieler technischer Innovationen im Bereich der Verkehrssicherheit wie beispielsweise den elektronischen Stabilitätsprogrammen (ESP) sowie verbesserter Soforthilfe nimmt die Zahl der Toten im Straßenverkehr glücklicherweise immer weiter ab. Dadurch wird das Auto als immer sicherer eingestuft. Zudem bietet sich im Straßenverkehr die

[6] Benzin: 2,32 kg CO_2 pro Liter und Diesel: 2,65 kg CO_2 pro Liter

Möglichkeit selber aktiv das eigene Risiko zu beeinflussen. Durch eine Halbierung der Geschwindigkeit muss bei einem Aufprall nur noch ein Viertel so viel kinetische Energie in Verformungsarbeit umgewandelt werden. Dementsprechend milder sind damit die Folgen des Aufpralls.

Der Besitz eines Autos eröffnet dem Besitzer weiterhin die Möglichkeit jederzeit an jeden beliebigen Ort fahren zu können. Zwar können während der Fahrt wenig andere Dinge gemacht werden, man muss sich aber auch nicht an vorgegebene Fahrpläne halten. Dieses Gefühl von Unabhängigkeit ist für viele Menschen sehr wichtig. Ferner ermöglichen Autos Emotionen wie Stolz, Größe und Individualität, die der Alltag oftmals verwehrt. Als Statusobjekte verkörpern sie obendrein die Identität ihres Besitzers. Diese Tatsachen sind unter anderem dafür verantwortlich, dass das Auto in unserer Gesellschaft einen bisher unangefochtenen Status besitzt.

3.3.2. Eisenbahn

Im Schienenverkehr kann man mit Hilfe von Fahrplänen relativ einfach die Zeit ermitteln, die man benötigt, um vom Startbahnhof zum Zielbahnhof zu kommen. Prinzipiell muss man hierbei immer einen gewissen Puffer einrechnen, da es zu Verspätungen kommen kann. Bei der Wahl eines Verkehrsmittels sollte man sich allerdings nicht nur auf die Analyse des Hauptlaufs beschränken. In eine ganzheitliche Betrachtung müssen wie gesagt sowohl Zugangs- und Abgangszeiten als auch der Zeitbedarf der Übergangsphasen eingehen. Dabei spielt es zunächst eine entscheidende Rolle, welche Verkehrsmittel für Zu- und Abgang genutzt werden. Diese werden ebenfalls nach Kriterien wie der Zugangszeit, den Zugangskosten, der Entfernung zwischen Ausgangsort der Reise und Ausgangsbahnhof, der Dauer der Gesamtreise oder der Erreichbarkeit des Bahnhofs mit öffentlichen Verkehrsmitteln ausgewählt [20]. Untersuchungen für den Schienenverkehr in Stuttgart und Karlsruhe ergaben, dass die Bahnreisenden am häufigsten mit dem Zug, Straßen- oder U-Bahnen zum Bahnhof gelangten. Sehr grob können die Zugangszeiten allgemein für Bahnhöfe zwischen 10 und 60 Minuten abgeschätzt werden [20]. Dabei ist die Entfernung zwischen Startpunkt und Bahnhof natürlich ausschlaggebend. Am Bahnhof angelangt beginnt die Übergangsphase der Bahnreise. Dazu gehört das Aufsuchen eines Fahrkartenautomaten, das Lösen einer Fahrkarte, der Weg zum Bahnsteig, sowie die Wartezeiten dazwischen. Insgesamt kann dabei mit einem Zeitbedarf von et-

wa 25 Minuten gerechnet werden. Weitere 10 Minuten vergehen ungefähr zwischen der Ankunft des Zuges und dem Verlassen des Bahnhofs [20]. Die in der Übergangsphase zurückgelegte Strecke kann in den meisten Fällen vernachlässigt werden.

Über den Internetauftritt der Deutschen Bahn AG[7] können die Reisekosten für den Hauptlauf berechnet werden. Prinzipiell ist der Tarif in Produktklasse B (IC/EC) und C (Nahverkehr) direkt von der Entfernung abhängig, unterliegt allerdings einer gewissen Entfernungsdegression. Zum Beispiel kostet eine Fahrt von Augsburg nach München mit dem Regionalexpress ohne Bahncard im Moment 10,90 Euro [15]. Umgelegt auf die Entfernung ergibt sich etwa ein Preis von 16 Cent pro Kilometer. Dazu müssen die Kosten für Zu- und Abgang addiert werden, um den Gesamtpreis der Fahrt zu berechnen.

Zudem bietet die Deutsche Bahn AG nach Auswahl einer Verbindung über den MobilCheck und den UmweltMobilCheck die Möglichkeit an, Bahn und alternative Verkehrsmittel hinsichtlich verschiedener Kriterien zu vergleichen. Dem MobilCheck, der einen Vergleich der Reisezeit, der Entfernung und der Kosten ermöglicht, stehen speziell für die Kostenberechnung die durchschnittlichen Vollkostensätze pro Pkw-Kilometer des ADAC zur Verfügung [1]. Der UmweltMobilCheck zum Vergleich der Umweltdaten wie Energiebedarf und Luftschadstoffemission basiert auf Untersuchungen des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU) [29]. Unter Berücksichtigung der Emissionsfaktoren des Bahnstrommixes und der Emissionsfaktoren für die Dieseltraktion werden im UmweltMobilCheck die in Tabelle 3.3 dargestellten spezifische Energieverbräuche und Emissionsfaktoren verwendet. Über die durchschnittliche Auslastung, die beispielsweise für den ICE etwa bei 47,6% und für Regionalexpress/-bahn etwa bei 19,8% liegt, kann man dann die Werte pro Kilometer und pro Person berechnen.

Trotz der katastrophalen Zugunglücke, die unter anderem aufgrund der Tatsache, dass die Bahn ein Massentransportmittel ist, oftmals ein beträchtliches Schadensausmaß haben, ist die Bahn im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln für ihre Mitfahrer dennoch recht sicher. Während einer Zugfahrt können die Reisenden zudem ihre Zeit nach Belieben für Tätigkeiten wie beispielsweise Arbeiten, Lesen, Unterhalten, Telefonieren oder Schlafen nutzen und sind dabei im Gegensatz zum Auto lediglich an gewisse Randbedingungen gebunden. Dieser Komfortvorteil muss allerdings in Relation zu der Tatsache gesetzt werden, dass eine Bahnreise über den Fahrplan an gewisse Zeitvorgaben und über die Standorte der Bahnhöfe an gewisse Routen gebunden ist.

[7] DB AG: http://www.bahn.de

Betriebsart	Zuggattung	Energieverbrauch	CO_2-Emission
Elektro	ICE < 200 km/h	28,3 Wh	18,5 g
	ICE > 200 km/h	37,0 Wh	24,2 g
	EC/IC	22,9 Wh	15,0 g
	RE/RB/IRE	32,3 Wh	21,1 g
	S-Bahn	31,6 Wh	20,7 g
Diesel	EC/IC	8,2 g	25,3 g
	RE/RB/IRE	5,0 g	15,5 g
	S-Bahn	4,1 g	12,7 g

Tabelle 3.3.: Spezifische Energie- / Kraftstoffverbräuche und Emissionsfaktoren der Bahn pro Kilometer und Platz. Quelle: [29]

3.3.3. Flugzeug

Wie im Schienenverkehr gestaltet sich die Ermittlung der Reisezeiten für den Hauptlauf im Flugverkehr mit Hilfe der Flugpläne ebenfalls relativ einfach. Zudem besitzen die Zu- und Abgangsphasen des Flugverkehrs ähnliche Eigenschaften wie die des Schienenverkehrs. Allerdings geht aus Modal-Split-Analysen hervor, die in Deutschland für die großen internationalen Flughäfen gemacht wurden, dass in der Zu-/Abgangsphase aus Bequemlichkeitsgründen hingegen oftmals auf das Auto zurückgegriffen wird. Generell liegen die Zugangszeiten zum Flughafen ungefähr im Bereich von 30 bis 51 Minuten [20]. Nach der Ankunft am Flughafen schließen sich in der Übergangsphase die folgenden Prozesse inklusive Wartezeiten an. Zunächst muss der Schalter für den Check-In aufgesucht werden. Nach erfolgreichem Check-In muss man sich zum Sicherheitscheck begeben. Daran schließt sich oftmals ein längerer Aufenthalt am Gate an, bevor man ins Flugzeug einsteigen kann. Zusammengefasst ergibt sich im Mittel eine Übergangszeit von ungefähr 63 Minuten. Nach Ankunft am Zielflughafen muss darüber hinaus mit etwa 34 Minuten für den Ausstieg, den Zugang zum Terminal, die Gepäckausgabe und das Verlassen des Flughafens gerechnet werden [20]. Die Wartezeiten machen dabei jeweils einen großen Anteil aus. Durch eine Verkürzung dieser Wartezeiten kann unterschiedlichen Untersuchungen zufolge der Anteil des Flugverkehrs im Modal-Split spürbar vergrößert werden [19].

Über die Großkreisentfernung von Start- und Zielflughafen kann mit Hilfe der Reisezeit eine durchschnittliche Reisegeschwindigkeit berechnet werden. Dabei sollten Verlängerungen der Flugdistanz durch Umwege in der Größenordnung von etwa 50 km pro Flug berücksichtigt werden [7].

Der Preis für ein Flugticket hängt neben anderen Faktoren auch vom Zeitraum zwischen der Buchung und dem tatsächlichen Reisetermin ab. Gerade in den letzten Jahren erfreuten sich so genannte Billig-Flieger einer großen Beliebtheit. So ist heute etwa jeder vierte Flug in Deutschland ein Billigflug [65]. In Zukunft werden die Fluggesellschaften aufgrund des rapiden Anstiegs der Rohölpreise die billigen Preise vermutlich nicht halten können. Abgesehen davon müssen zur Ermittlung der gesamten Kosten für eine Flugreise zum Preis für das Flugticket ebenfalls die Kosten für den Zu- und Abgang zum Flughafen addiert werden. Dies wird bei Vergleichsrechnungen gerne vergessen.

Im Flugverkehr werden heutzutage größtenteils Flugzeugturbinen für den Antrieb verwendet, die Kerosin als Kraftstoff benutzen. Der Bedarf an Kerosin und somit an Energie hängt neben der Entfernung auch von der Höhe und damit vom entsprechenden Flugzyklus ab. Zudem muss der Typ des jeweiligen Flugzeugs berücksichtigt werden. Für Umwege und Warteschleifen kann ein Mehrverbrauch von ungefähr 2 kg Kerosin pro Flug und Passagier angenommen werden [29]. Damit ergeben sich im Mittel die in Tabelle 3.4 aufgelisteten spezifischen Energieverbräuche ausgewählter Flugzeugtypen[8]. Zur Umlegung des Energiebedarfs auf die einzelnen Passagiere wird im Grundlagenbericht des IFEU für den UmweltMobilCheck 2004 einheitlich eine mittlere Auslastung von 67% unterstellt [29]. Pro Kilogramm verbranntem Kerosin werden ungefähr 3,15 kg CO_2 freigesetzt. Damit kann weiterhin aus dem jeweiligen Energiebedarf der Reise durch eine Multiplikation mit diesem Faktor die entsprechende CO_2-Emission ermittelt werden.

Entfernungsstufe	**A320**	**B737-300**	**B737-500**
250 km	29 g	35 g	43 g
500 km	25 g	30 g	37 g
750 km	22 g	27 g	33 g
Anzahl Sitze	150	128	103

Tabelle 3.4.: Durchschnittliche spezifische Energie- bzw. Kerosinverbräuche pro Kilometer und Platz verschiedener Flugzeugtypen. Quelle: [29]

Ungeachtet der mindestens doppelten Absicherung aller wichtigen Steuer- und Navigationssysteme im Flugzeug und der regelmäßigen Kontrollen und Wartungsarbeiten leiden viele Menschen unter Flugangst (Aviophobie). Das Institut für Demoskopie Allensbach hat in einer Studie 2003 herausgefunden, dass 20% der Frauen und 12% der Männer

[8] Die Flugzeugtypen A320, B737-300 und B737-500 werden von der Lufthansa im Inlangsflugverkehr am häufigsten eingesetzt.

Angst vor dem Fliegen haben. Abgesehen davon gaben noch einmal 24% der Frauen und 20% der Männer an, beim Fliegen zwar nicht direkt Angst, aber doch ein deutliches Unbehagen zu verspüren [27]. Dies beeinflusst natürlich die individuelle Verkehrsmittelwahl in hohem Maße. Allerdings kann gerade im Mittel- und Langstreckenbereich kaum ein anderes Verkehrsmittel hinsichtlich der anderen Faktoren mit dem Flugzeug konkurrieren.

Im Flugzeug sind im Vergleich zur Bahn die Sitzplätze etwas enger, einen Teil der Flugstrecke muss man angeschnallt auf seinem Platz verbringen und es herrscht ein hoher Lärmpegel. Diese Punkte beeinträchtigen den Komfort an Bord. Positiv zu werten ist hingegen die Umsorgung durch das Flugpersonal. Unterschiedlich wird vermutlich die Tatsache eingestuft, dass mit dem Flugzeug lediglich Punktverbindungen möglich sind. Einerseits verlängert sich die Reisezeit nicht durch Zwischenhalte, andererseits wird die Reiseplanung von den Standorten der Flughäfen eingeschränkt. Abgesehen vom Hauptlauf müssen auch die langen Wartezeiten in den Übergangsphasen in die Bewertung der Güte des Verkehrsmittels eingehen. Ferner liegen die Flughäfen größtenteils außerhalb der jeweiligen Stadtzentren, wodurch in der Zu- und Abgangsphase aufgrund der längeren Wege weitere Unannehmlichkeiten in Kauf genommen werden müssen.

3.4. Neue Verkehrsmittel

In diesem Abschnitt werden mit dem Elektroauto und den Konzepten des Hochgeschwindigkeitsschienenverkehrs, wozu neben ICE und TGV auch spurgeführte Magnetschwebebahnen wie der Transrapid zählen, zwei zukunftsträchtige Technologien vorgestellt, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften die Verkehrsmittelwahl derart beeinflussen könnten, dass es mit dem Erreichen bestimmter äußerer Randbedingungen regelrecht zu einem Wandel im Verkehrssektor kommt.

3.4.1. Elektroauto

Das Elektroauto spielt im Moment auf dem deutschen Markt mit einem Anteil von etwa 0,003% am Gesamtbestand von 41 Mio. zugelassenen Kraftfahrzeugen eine untergeordne-

te Rolle [33]. Das Center of Automotive Research (CAR) an der Fachhochschule Gelsenkirchen geht aber laut einer noch unveröffentlichten Studie davon aus, dass im Bereich der Personenkraftwagen ab 2015 der Elektromotor zu einem ernsthaften Konkurrenten des Verbrennungsmotors wird. Ab 2025 sollen Autos, die ausschließlich auf Verbrennungsmotoren setzten, sogar von Elektro- und Hybridautos vom Markt verdrängt werden [25]. Ähnlich sehen dies die deutschen Automobilhersteller [46],[64]. Der Hybridantrieb kombiniert entweder seriell oder parallel einen Verbrennungsmotor mit dem Elektromotor. Dadurch wird eine größere Reichweite erreicht und der uneffektive Teillastbetrieb des Verbrennungsmotors kann vermieden werden. Allerdings wird der Hybridantrieb häufig nur als Übergangslösung hin zum reinen Elektromotor gesehen.

Die Geschichte des Elektroautos beginnt noch deutlich vor der Geschichte der Pkws, die mit Verbrennungsmotoren angetrieben werden [56]. Ende des 18. Jahrhunderts wurden die ersten Geschwindigkeitsrekorde von Autos mit elektrischem Antrieb aufgestellt. Erst nach 1900 begann der Siegeszug des Verbrennungsmotors. Der elektrische Antrieb konnte mit Geschwindigkeit, Leistung, Preis und Reichweite des Verbrennungsmotors nicht mehr mithalten. Einer der Hauptgründe war darüber hinaus das Problem der Speicherung der elektrischen Energie, das bis heute noch nicht optimal gelöst ist. Zudem wurden flächendeckend Benzin-Tankstellen eröffnet, an denen relativ günstig Kraftstoff erworben werden konnte. Die elektrische Infrastruktur ließ hingegen aufgrund fehlender Standardisierung zu wünschen übrig. Auch die Erfindung des Anlassers 1911 trug ihren Teil bei. So gerieten die Vorteile des Elektromotors wie der hohe Wirkungsgrad, der einfachere Aufbau des Antriebsstranges, ein nahezu lautloser und abgasfreier Betrieb, sowie ein über weite Drehzahlbereiche gleichmäßiges Drehmoment in Vergessenheit. Erst durch zunehmendes ökologisches Bewusstsein und vor allem durch stark gestiegene Kraftstoffpreise scheint man sich ihrer zu erinnern. Mittlerweile werden gerade von kleineren, unabhängigeren Firmen Autos mit elektrischem Antrieb entwickelt. Aber auch große Firmen scheinen den Zug nicht verpassen zu wollen. So sind im Moment beispielsweise schon folgende Modelle auf dem Markt: CityEL, Twike, Think City, Tesla Roadster. In der Entwicklungsphase befinden sich unter anderem noch: Chevrolet Volt, Lightning GT, Loremo EV, sowie Elektroversionen von Mercedes-Benz A-Klasse, Mini, Smart.

Hinsichtlich der Reisezeit wird angenommen, dass sich im Vergleich zu den Autos mit Verbrennungsmotor keine signifikanten Unterschiede ergeben. Sportwagen wie der Tesla Roadster erreichen heute schon ähnliche Beschleunigungen und ähnliche Höchstgeschwindigkeiten wie vergleichbare Modelle mit Verbrennungsmotor. Durch die Tatsache,

dass ein gleichmäßiges Drehmoment über weite Drehzahlbereiche verfügbar ist, werden die Elektroautos gerade im Stadtverkehr wohl sogar noch effektiver gefahren werden können. Lediglich beim Laden der Akkus müssen längere Wartezeiten einkalkuliert werden, obwohl es in Zukunft möglich scheint, die Ladezeit der Akkumulatoren für Reichweiten bis 400 km auf weniger als 10 Minuten zu reduzieren. Zudem kann ein Großteil der Wege, die 2002 im motorisierten Individualverkehr durchschnittlich 14 km lang waren [31], ohne Ladestop zurückgelegt werden. Anschließend kann der Akkumulator dann in der heimischen Garage, auf öffentlichen Parkplätzen während des Einkaufs oder an firmeneigenen Stationen während der Arbeit aufgeladen werden.

Zurzeit sind die Herstellungs- und damit die Anschaffungskosten eines Elektroautos aufgrund der teuren Kleinserienfertigung noch vergleichsweise hoch. Bei einer entsprechenden Nachfrage werden sich diese allerdings zunehmend reduzieren, da dann auch die teuren Akkumulatortechnologien in großen Stückzahlen produziert werden können. Die Betriebskosten sind dagegen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren deutlich geringer. Diese bestehen im Wesentlichen aus den Kosten für den Ladestrom, der wiederum bei bekannter Entfernung aus dem Energiebedarf pro Kilometer berechnet werden kann. In Tabelle 3.5 ist der Energiebedarf einiger ausgewählter Modelle aufgelistet. Folglich liegen die Energiekosten bei einem derzeitigen Strompreis von etwa 20 ct/kWh in der Größenordnung von ungefähr 2 ct/km. Dazu muss allerdings ein Posten für die Erneuerung der kostspieligen Akkus addiert werden, da die Akkus bisher noch eine begrenzte Lebensdauer haben und schon nach einigen Jahren ersetzt werden müssen. Für Inspektions- und Reparaturkosten liegen nur begrenzt Erfahrungswerte vor, deshalb kann im Moment davon ausgegangen werden, dass sich diese im Bereich der Werkstattkosten der Autos mit Verbrennungsmotor bewegen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass es aufgrund des einfacheren Antriebsstrangs bei einem Elektroauto weniger bewegliche Teile gibt, deren Verschleiß Kosten verursacht.

Elektroautos haben bedingt durch den hohen Wirkungsgrad des Antriebsstrangs, der ungefähr zwischen 80% und 90% liegt [42], einen vergleichsweise niedrigen Energiebedarf (siehe Tabelle 3.5). Bei der Konstruktion von Elektroautos wird oftmals auch darauf geachtet, dass das fertige Auto so wenig Masse wie möglich hat. Beispielsweise wird beim Loremo EV ein Gesamtgewicht von unter 600kg angestrebt [34]. Dies wirkt sich ebenfalls positiv auf dem Energiebedarf aus, da insgesamt weniger Masse beschleunigt und bewegt werden muss. Ferner besitzen Elektroautos meistens Rekuperationsbremsen, um beim Bremsen die Bewegungsenergie wieder in elektrische Energie umzuwandeln. Bei Verglei-

chen müssen allerdings wie gesagt die Verluste beim Ladevorgang, sowie die Verluste der Erzeugung, Verteilung und Bereitstellung der elektrischen Energie berücksichtigt werden.

Modell	**Energiebedarf**
Tesla Roadster	11 kWh/100km
Twike	4 - 8 kWh/100km
Loremo EV	6 kWh/100km

Tabelle 3.5.: Energiebedarf einiger Elektroautos. Quellen: http://www.teslamotors.com, http://evolution.loremo.com, http://www.twike.de

Ein Auto mit elektrischem Antrieb verursacht während der Fahrt keine klimaschädlichen CO_2-Emissionen. Allerdings muss zur Ermittlung des ökologischen Faktors der jeweilige Energiebedarf mit dem Emissionsfaktor der Stromerzeugung multipliziert werden. Unterstellt man einen durchschnittlichen Bedarf von 10 kWh/100km und eine durchschnittliche Emission von 520 g CO_2 pro kWh der deutschen Stromerzeugung [22], ergibt sich im Mittel eine CO_2-Emission von 52 g/km.

Bedingt durch die Leichtbauweise einiger Elektroautos wird oft fälschlicherweise angenommen, dass darunter auch die Sicherheit auf der Straße leidet. Allerdings steht zunächst fest, je leichter ein Fahrzeug ist, umso weniger Bewegungsenergie muss im Fall eines Aufpralls in Verformungsenergie umgewandelt werden. Beispielsweise wiegen die Boliden der Formel 1 nur etwa 500 kg und bieten den Fahrern trotzdem ein erstaunliches Sicherheits-Potential. Dazu sitzen die Fahrer gut geschützt in einer hochfesten Sicherheits-Fahrgastzelle, dem so genannten Monocock. Die Konstrukteure des Loremo versuchen nun mit dem so genannten Quattrocock diese Technologie in ihr Konzept eines umweltfreundlichen Autos zu integrieren, um dadurch die passive Sicherheit zu erhöhen.

Der Komfort ist aufgrund der geringen Reichweiten der Elektroautos im Vergleich zu den Pkws mit Verbrennungsmotor etwas eingeschränkt. Die Reichweiten könnten sich allerdings durch technologische Innovationen hinsichtlich der Energiedichte der Akkumulatoren bald annähern. Zudem werden lange Reise doch eher selten unternommen und für diese Fälle stehen auch alternative Verkehrsmittel bereit [31]. Dies setzt allerdings eine Veränderung des Nutzerverhaltens voraus. Ein weiterer Nachteil ist, dass Ladestationen noch nicht flächendeckend zur Verfügung stehen. Dabei sei aber auf Projekte wie

beispielsweise Better Place[9] verwiesen, die sich unter anderem genau diesem Problem annehmen. Darüber hinaus wird bedingt durch den Wunsch der Gewichtsminimierung versucht manche Modelle auf das Wesentliche zu reduzieren. Das kann für einige Verkehrsteilnehmer ebenfalls eine Einschränkung des Komforts bedeuten.

3.4.2. Hochgeschwindigkeitsschienenverkehr

Durch eine Steigerung der Fahrgeschwindigkeit kann der Anteil des Schienenverkehrs im Modal-Split besonders im Mittelstreckenbereich deutlich erhöht werden. So haben beispielsweise in Frankreich die Fahrgastzahlen seit 1981 nach der Inbetriebnahme des TGV durch die staatliche französische Eisenbahngesellschaft SNCF stetig zugenommen (siehe Abbildung 3.10). Laut SNCF erweist sich der TGV auch durchweg als kommerzieller Erfolg und so konnten schon zehn Jahre nach dem Bau der ersten TGV-Strecke in Frankreich alle Kredite dafür zurückgezahlt werden [32].

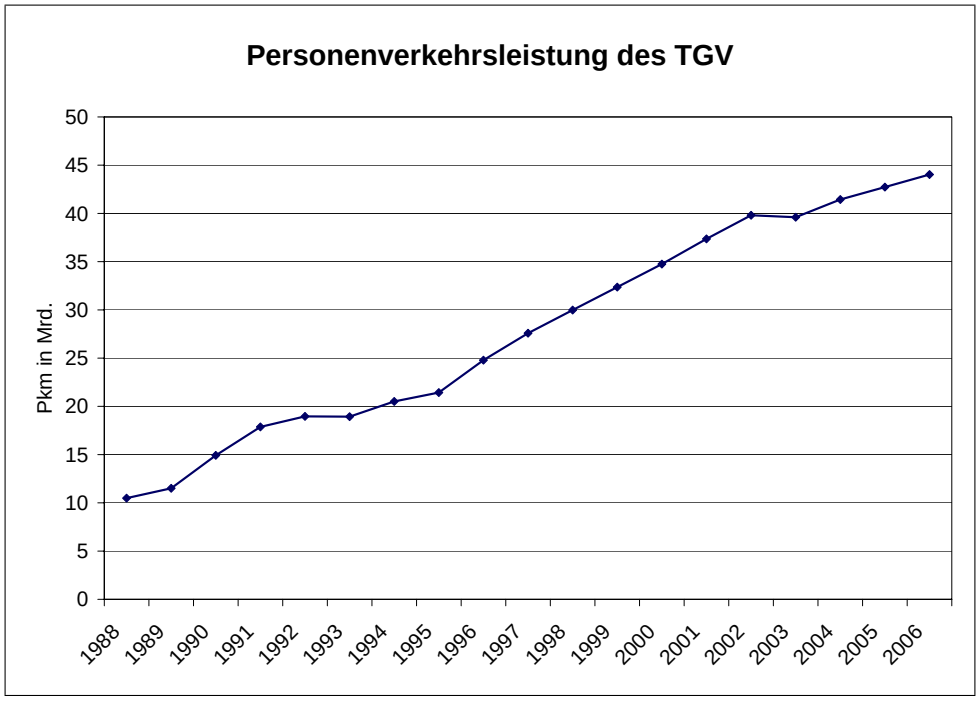


Abbildung 3.10.: Die Personenverkehrsleistung des TGVs in Frankreich. Quelle: SNCF

[9]Project Better Place: http://www.projectbetterplace.com

Zu den Hochgeschwindigkeitsverkehrssystemen zählen Verkehrsmittel, die im fahrplanmäßigen Verkehr Geschwindigkeiten über 200 km/h erreichen. Dazu gehören neben schienengeführten Zügen wie TGV, ICE, Eurostar oder dem japanischen Shinkansen auch Magnetschwebebahnen wie der Transrapid, die zwar nicht auf Schienen fahren, trotzdem aber spurgeführt sind. Der Antrieb dieser Züge ist überwiegend elektrisch. Um die hohen Geschwindigkeiten erreichen zu können, verfügen sie über eine große Antriebsleistung, die ungefähr in der Größenordnung von 10.000 kW liegt. Darüber hinaus wird versucht die Züge so leicht wie möglich zu konstruieren. Zudem können hohe Geschwindigkeiten nur auf speziell dafür ausgelegten Strecken erreicht werden. In Europa verfügen derzeit Frankreich und Spanien über die meisten Schnellfahrstrecken (siehe Abbildung 3.11). Im Gegensatz zu diesen Ländern verkehren in Deutschland auf den Schnellfahrstrecken größtenteils auch Güterzüge oder Regionalbahnen [61]. Darüber hinaus werden die Hochgeschwindigkeitszüge im föderalistisch organisierten Deutschland anderes als in den beiden zentralistisch auf Paris bzw. Madrid ausgelegten Ländern häufiger zu Zwischenhalten gezwungen [45]. Deshalb sind in Deutschland die Durchschnittsgeschwindigkeiten etwas geringer als beispielsweise in Frankreich oder Spanien.

Abbildung 3.11.: Die Hochgeschwindigkeitsverkehrsstrecken in Europa. Quelle: [63]

Der Zeitbedarf in der Zu- bzw. Abgangsphase und in den Übergangsphasen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie der des herkömmlichen Schienenverkehrs. Bedingt durch die wesentlich höheren Maximalgeschwindigkeiten ergibt sich allerdings im Hauptlauf im Mittel ein signifikant geringerer Zeitbedarf. Der TGV erreicht beispielsweise im Regelbetrieb je nach Strecke eine Höchstgeschwindigkeit von ungefähr 320 km/h. Der Transrapid soll in Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzfall wirtschaftliche Betriebsgeschwindigkeiten im Bereich von 300 km/h bis 500 km/h erreichen [55]. Zudem werden diese Züge beispielsweise im Vergleich zu Regionalbahnen deutlich seltener zu zeitintensiven Zwischenhalten gezwungen, wodurch obendrein die Anzahl der Brems- und Beschleunigungsphasen reduziert wird und hohe Geschwindigkeiten über längere Strecken aufrecht erhalten werden können. Der insgesamte Zeitbedarf kann wiederum aus den fahrplanmäßigen Reisezeiten des Hauptlaufes und dem Zeitbedarf für die Zu-/Abgangs- und Übergangsphasen berechnet werden. Bei Kenntnis der insgesamt zurückgelegten Strecke kann anschließend abermals eine durchschnittliche Reisegeschwindigkeit ermittelt werden.

Die Kosten einer Reise mit einem Hochgeschwindigkeitszug werden analog zu der Berechnungsmethode der Kosten einer Reise mit konventionellen Zügen oder einem Flugzeug bestimmt. Demnach müssen zu den Kosten für das Zugticket die Kosten für Zu- und Abgang addiert werden. In Deutschland gelten für Fahrten mit dem ICE Relationspreise (Produktklasse A). Das bedeutet, dass für jede Verbindung zwischen zwei Tarifpunkten ein Preis festgelegt wurde. Dieser hängt einerseits von der Entfernung ab, andererseits wird er aber auch vom Komfort der Relation hinsichtlich Streckengeschwindigkeit und damit Reisezeit beeinflusst. Beispielsweise liegen die Kosten für den Hauptlauf mit dem ICE auf der Strecke von München nach Berlin bei ungefähr 19 ct/km [15].

Bedingt durch die Tatsache, dass der Luftwiderstand quadratisch mit der Geschwindigkeit wächst, ist der Energiebedarf dieser Züge gerade bei hohen Geschwindigkeiten relativ groß. Deshalb wird bei den Hochgeschwindigkeitszügen versucht die Aerodynamik durch spezielle Formen, eine möglichst glatte Außenhaut und fugenlose Wagenübergänge zu optimieren. Darüber hinaus sind diese Züge oftmals in Leichtbauweise konstruiert und mit Rekuperationsbremsen ausgestattet, womit sich die Bewegungsenergie beim Bremsen zumindest teilweise zurückgewinnen lässt. Insbesondere bieten neue Technologien wie der Transrapid durch effizientere Antriebe, weniger Gewicht und eine berührungsfreie Technik weiteres Reduktionspotential hinsichtlich des Energiebedarfs (siehe Abbildung 3.12).

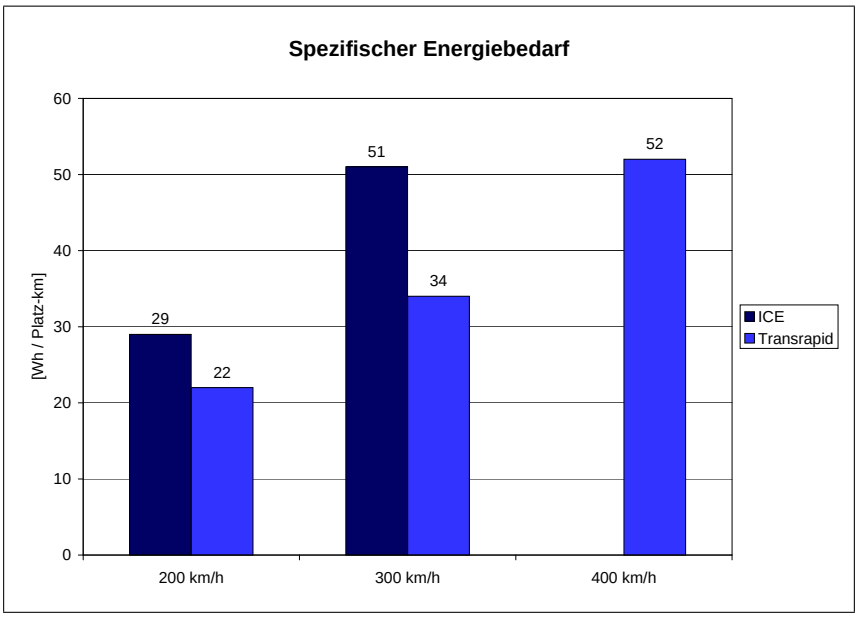


Abbildung 3.12.: Der spezifische Energiebedarf von ICE und Transrapid in Wattstunden pro Sitzplatzkilometer. Quelle: [55]

Die radgeführten Schienenfahrzeuge wie der TGV oder der ICE erhalten die elektrische Energie, die sie für den Vortrieb benötigen, über spezielle Schnellfahr-Oberleitungen. Die Energieversorgung des Transrapids erfolgt kontaktlos über Lineargeneratoren, die während der Fahrt zudem die zur Pufferung benötigten Bordbatterien aufladen. Da der Antrieb des Transrapids im Fahrweg installiert ist, muss damit auch weniger Energie an Bord des Fahrzeugs gebracht werden. Die Lineargeneratoren sind ähnlich wie die Elektromotoren des Antriebs „aufgeschnittene und in die Länge gestreckte“ Varianten eines gewöhnlichen rotierenden Generators. Durch die Entwicklung des Inductiv-Power-Supply-Systems ist mittlerweile auch eine Hochfrequenzeinspeisung der benötigten Energie ins Fahrzeug mit Hilfe eines transformatorischen Effekts möglich. Zur Bestimmung der CO_2-Emission muss wiederum lediglich der elektrische Energiebedarf mit dem CO_2-Emissionsfaktor des Bahnstrommixes (in Deutschland: 657 g/kWh [29]) multipliziert werden. Pro Sitzplatzkilometer ergibt sich damit beim ICE bei einer Geschwindigkeit von 300 km/h eine CO_2-Emission von ungefähr 34 g, der Transrapid liegt in diesem Fall bei etwa 22 g.

Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten besitzen etwaige Unfälle von Hochgeschwindigkeitszügen oftmals ein größeres Ausmaß und erhalten dadurch eine erhöhte Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit, wie dies beispielsweise 1998 beim ICE-Unglück in Enschede

der Fall war. Generell wird in Hochgeschwindigkeitszügen aber auf hohe Sicherheitsstandards geachtet, wodurch sie als ausgesprochen sichere Verkehrsmittel gelten. Dies gilt ebenfalls für neue Technologien wie den Transrapid, der auf noch höhere Geschwindigkeiten ausgelegt ist. Bedingt dadurch, dass der Transrapid den Fahrweg umgreift, ist ein Entgleisen unmöglich. Zudem ist eine Kollision zweier Transrapid-Fahrzeuge ausgeschlossen, da sich das Fahrzeug und das magnetische Wanderfeld des im Fahrweg integrierten Langstator-Linearmotors immer synchron bewegen, also in gleicher Richtung und mit gleicher Geschwindigkeit. Ferner bieten die Bordbatterien eine Notversorgung der Trag- und Führmagnete, wodurch der Transrapid bei einem Ausfall der Stromversorgung problemlos bis zum nächsten Haltepunkt schweben kann [55].

In den Hochgeschwindigkeitszügen wird wegen der zumeist längeren Strecken und der damit längeren Reisezeiten auf zusätzlichen Komfort für die Reisenden geachtet. Dazu zählen unter anderem eine angenehme, moderne Einrichtung, Bordbistro/Restaurant-Waggons, spezielle Ruhezonen und erhöhte Beinfreiheit sowie oftmals ein erweitertes Serviceangebot. Zudem können in den meisten Fällen bestehende Infrastrukturbestandteile wie zentrumsnahe Bahnhöfe genutzt werden. Dies ermöglicht im Vergleich zum Flugzeug oftmals einen einfacheren und damit einen zeit- und kostengünstigeren Zu- bzw. Abgang. Ebenfalls entfallen in der Übergangsphase zeitaufwendige Sicherheitskontrollen und es ist in der Regel auch möglich, Tickets erst unmittelbar vor Reiseantritt zu kaufen, was eine unabhängigere Reiseplanung erlaubt.

4. Physikalische und technische Simulation eines Automobils

Zur Zeit besitzen Elektroautos noch einen geringen Marktanteil (vergleiche Kapitel 3.4.1) und das Angebot ist zudem größtenteils auf eher spezielle Modelle begrenzt, das heißt beispielsweise Sportwägen wie der Tesla Roadster oder Leichtelektromobile wie das City-EL. Aus diesem Grund liegen hinsichtlich des Energiebedarfs der elektrisch betriebenen Autos nur wenig Erfahrungswerte vor. Deshalb wird in diesem Kapitel zunächst allgemein die Physik des Autos beschrieben. Anschließend wird mit Hilfe einer Simulink - Simulation der Energiebedarf von Autos mit Verbrennungsmotor bestimmt, um aus diesen Erkenntnissen ebenfalls anhand einer Simulation mit Simulink Rückschlüsse über den Energiebedarf von Elektroautos ziehen zu können. Die Software Simulink[1] wird von The MathWorks hergestellt und ist ein Zusatzprodukt zu MATLAB. Sie dient der Modellierung von technischen, physikalischen oder finanzmathematischen Systemen und besitzt dazu eine interaktive, grafische Entwicklungsumgebung.

4.1. Physikalische Grundlagen des Autos

Die folgenden Ausführungen zu den physikalischen und technischen Grundlagen des Autos orientieren sich an Bosch [42], Braess/Seiffert [11], Gollnick [20] und Mitschke/Wallentowitz [39]. Generell wird in einem Auto die Energie, die entweder im Kraftstoff enthalten ist oder in Form von elektrischer Energie in Akkus gespeichert ist, vom Motor über das Getriebe in Nutzenergie umgewandelt. Diese wird wiederum zur Fortbewegung und zum Betrieb von Nebenaggregaten wie Klimaanlage oder Audio-System verwendet (siehe Abbildung 4.1).

[1] Simulink: http://www.mathworks.de/products/simulink

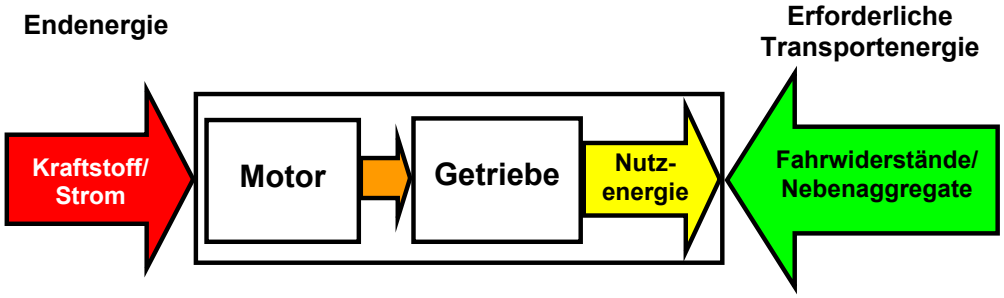


Abbildung 4.1.: Die Energieumwandlung im Auto. Quelle: [20]

Zur Bewältigung einer Transportaufgabe gilt es den Gesamtfahrwiderstand F_W zu überwinden. Dieser bestimmt das notwendige Drehmoment an den Antriebsrädern und damit die erforderliche Nutzleistung sowie über den Wirkungsgrad des Antriebsstranges letztendlich auch den Energiebedarf. Der Gesamtfahrwiderstand setzt sich zusammen aus dem Luftwiderstand F_L, dem Rollwiderstand F_R, dem Steigungswiderstand F_S und dem Beschleunigungswiderstand F_B:

$$F_W = F_L + F_R + F_S + F_B \tag{4.1}$$

Der Luftwiderstand F_L entsteht durch die Um- und Durchströmung des Fahrzeugs. Damit wird er im Wesentlichen bestimmt von der Umströmungsgeschwindigkeit, der Fahrzeuggröße sowie der Form- und Oberflächengüte:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \varrho_{Luft} \cdot v^2 \tag{4.2}$$

mit

$$\begin{aligned} c_W &= \text{Luftwiderstandsbeiwert} \\ A &= \text{Querschnittsfläche } [\text{m}^2] \\ \varrho_{Luft} &= \text{Luftdichte } [\text{kg/m}^3] \\ v &= \text{Anströmgeschwindigkeit } [\text{m/s}] \end{aligned}$$

Der Luftwiderstandsbeiwert c_W von Pkws liegt bei etwa 0,25 bis 0,40 und die Querschnittsfläche A bei etwa 1,5 bis 2,5 m^2. Die Dichte von Luft ϱ_{Luft} beträgt bei Normalbedingungen 1,293 kg/m^3 [52]. Die Anström- bzw. Umströmungsgeschwindigkeit des

Fahrzeugs setzt sich aus der Fahrgeschwindigkeit über Grund und der Windgeschwindigkeit zusammen. Letztere wird im Folgenden allerdings vernachlässigt. Bedingt durch die Tatsache, dass der Luftwiderstand proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist, bestimmt er bei höheren Geschwindigkeiten den Gesamtfahrwiderstand und ist damit die dominierende Größe für den Energiebedarf.

Der Rollwiderstand F_R resultiert aus der elastischen Verformung der Reifen beim Abrollen und damit aus der Formänderungs- bzw. Walkarbeitarbeit an Rad und Fahrbahn:

$$F_R = f_R \cdot m \cdot g \tag{4.3}$$

mit

$$\begin{aligned} f_R &= \text{ Rollwiderstandsbeiwert} \\ m &= \text{ Fahrzeugmasse [kg]} \\ g &= \text{ Erdbeschleunigung } (\approx 9{,}81 \text{ m/s}^2) \end{aligned}$$

Der Rollwiderstandsbeiwert f_R liegt im Fall von Pkw-Luftreifen auf Asphalt oder Beton bei etwa 0,011. Er ist umso größer, je größer die Formveränderung und damit die Walkverlustarbeit ist. Das bedeutet, er steigt mit zunehmender Belastung, zunehmender Geschwindigkeit und abnehmendem Reifendruck. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit von f_R kann über folgende Formel berücksichtigt werden:

$$f_R = f_{R0} + f_{R1}\left(\frac{v}{100 \text{ km/h}}\right) + f_{R4}\left(\frac{v}{100 \text{ km/h}}\right)^4 \tag{4.4}$$

Die Größe der Koeffizienten f_{R0}, f_{R1} und f_{R4} hängt dabei von der Belastung und vom Reifendruck ab. Im Mittel können für Pkws die Werte aus Tabelle 4.1 angenommen werden.

Koeffizient	**Wert**
f_{R0}	0,009
f_{R1}	0,002
f_{R4}	0,0008

Tabelle 4.1.: Koeffizienten des Rollwiderstandsbeiwerts. Quelle: [20]

Der Steigungswiderstand F_S resultiert aus der Fahrbahnneigung und der entsprechenden Hangabtriebskraft:

$$F_S = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \tag{4.5}$$

mit

$$\alpha = \text{ Steigungswinkel } [°]$$

Bei kleinen Winkeln α kann bei der Berechnung des Steigungswiderstands die Kleinwinkelnäherung $\sin(\alpha) \approx \alpha$ angewendet werden.

Der Beschleunigungswiderstand F_B berechnet sich allgemein über das zweite newtonsche Axiom:

$$F_B = m_e \cdot a = m \cdot (1 + e_{Fi}) \cdot a \tag{4.6}$$

mit

$$a = \text{ Beschleunigung } [\mathrm{m/s^2}]$$
$$e_{Fi} = \text{ Rotationsmassenfaktor}$$

Dabei liefert neben der translatorischen Beschleunigung der Fahrzeugmasse auch die rotatorische Beschleunigung der sich drehenden Teile einen Beitrag. Dieser zusätzliche Beschleunigungswiderstand hängt wesentlich vom Übersetzungsverhältnis und damit vom gewählten Gang ab (siehe Tabelle 4.2).

Gang	$\boldsymbol{e_{Fi}}$
1. Gang	0,250
2. Gang	0,150
3. Gang	0,100
4. Gang	0,075
5. Gang	0,060

Tabelle 4.2.: Rotationsmassenfaktor. Quelle: [20]

Infolgedessen ist festzustellen, dass der Gesamtfahrwiderstand einerseits von der Fahrzeuggesamtmasse, der Fahrgeschwindigkeit, der Beschleunigung und der Fahrbahnneigung abhängt. Dies sind Variablen, die grundsätzlich von außen durch die Transportaufgabe vorgegeben werden. Andererseits bestimmen technische Eigenschaften des Fahrzeugs wie die Eigenmasse, die aerodynamische Güte, der Rotationsmassenfaktor und

der Rollwiderstandsbeiwert den gesamten Fahrwiderstand. Durch eine Optimierung der Fahrzeugkonstruktion kann somit der Fahrwiderstand und folglich auch der Energiebedarf entscheidend beeinflusst werden.

Bei Kenntnis der Fahrwiderstände lässt sich nun das entsprechende Drehmoment M_R an den Antriebsrädern berechnen, das für den Vortrieb notwendig ist:

$$\vec{M}_{Rad} = \vec{r} \times \vec{F}_W \tag{4.7}$$

Beziehungsweise für den hierbei gegebenen Fall, dass der statische Reifenhalbmesser $\vec{r}$ und $\vec{F}_W$ senkrecht aufeinander stehen:

$$M_{Rad} = r \cdot F_W \tag{4.8}$$

Bei Vernachlässigung der Lagerreibung gilt für die Drehmomente an nicht angetriebenen Achsen: $M = 0$. Somit kann mit Hilfe der Winkelgeschwindigkeit der Antriebsräder, die sich durch das Produkt aus dem Winkel eines Umlaufs und der Raddrehzahl bestimmt:

$$\omega_{Rad} = 2\pi \cdot n_{Rad}, \tag{4.9}$$

die an allen Antriebsrädern aufzubringende Nutzleistung $P_{Nutz} = P_{Rad}$ berechnet werden:

$$P_{Nutz} = \omega_{Rad} \cdot M_{Rad} = 2\pi \cdot n_{Rad} \cdot M_{Rad} \tag{4.10}$$

Die Raddrehzahl n_R kann bestimmt werden, indem in Gleichung (4.9) die Winkelgeschwindigkeit durch das Verhältnis von translatorischer Geschwindigkeit v zu dynamischem Reifenhalbmesser r_{dyn} ersetzt wird:

$$n_{Rad} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{v}{r_{dyn}} \tag{4.11}$$

Unter Vernachlässigung des Antriebsschlupfs kann dabei angenommen werden, dass dynamischer und statischer Reifenhalbmesser nahezu identisch sind, d.h. $r_{dyn} \approx r$.

Die bisherigen Grundlagen gelten sowohl für Pkws mit Verbrennungsmotor also auch für Pkws mit Elektromotor. Deshalb wird nachfolgend beschrieben, wie dies in beiden Simulink-Simulationen umgesetzt wurde. Die Simulation ist jeweils in mehrere Ebenen

bzw. Subsysteme untergliedert. In Abbildung 4.2 ist die oberste Ebene der Simulation zu sehen. Sie besteht aus drei Subsystem-Blöcken (gelb). Das Subsystem „Strecke“ stellt die Daten zum momentanen Standpunkt auf der Strecke bereit. Dazu gehören Geschwindigkeit v, Beschleunigung a, Steigungswinkel α und die bisher zurückgelegte Strecke s. Daraus wird im Subsystem „Fahrwiderstände“ der momentane Gesamtfahrwiderstand bestimmt. In den so genannten Embedded MATLAB Function - Blöcken (orange) wird den Formeln (4.8), (4.10) und (4.11) entsprechend aus dem Gesamtfahrwiderstand, der Momentangeschwindigkeit und dem Radradius bzw. dem statischen Reifenhalbmesser, der von einem Constant - Block (violett) ausgegeben wird, das Drehmoment und die Drehzahl der Antriebsräder sowie die Nutzleistung ermittelt. Diese Berechnungen können mittels Scope - Blöcken „Display ...“ (blau) während oder nach der Simulation überwacht werden. Mithilfe der Scope - Blöcke können Signale aber auch auf dem MATLAB - Workspace abgespeichert werden, um sie nach einem Simulationsdurchlauf genauer zu analysieren. Die Ergebnisse werden sodann dem Subsystem „Antriebsstrang“ zur Verfügung gestellt, welches je nach Antriebskonzept unterschiedlich aufgebaut ist und jeweils einen entsprechenden Rotationsmassenfaktor zurück gibt.

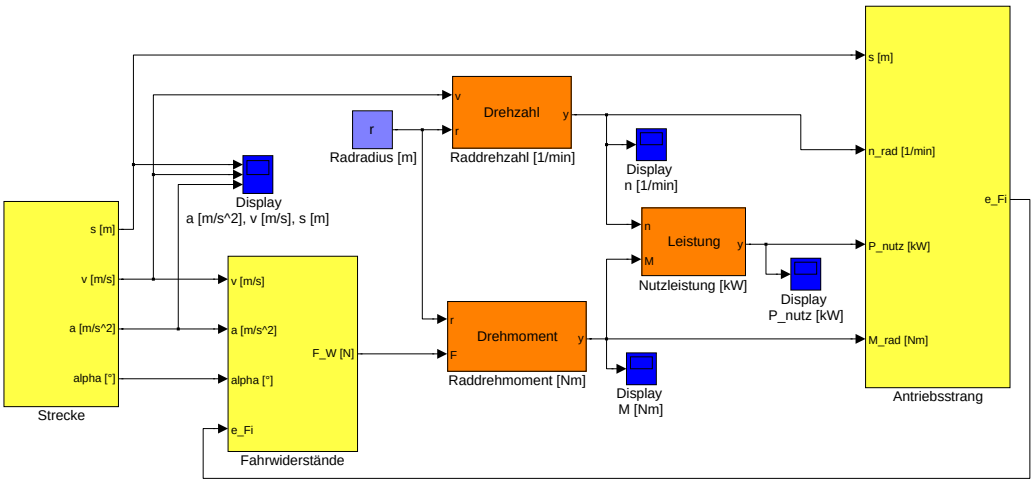


Abbildung 4.2.: Simulation Pkw: Stammebene

Um neben der Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse der beiden Antriebskonzepte untereinander auch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit den jeweiligen Herstellerangaben zu gewährleisten, wird das genormte Streckenprofil des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) gewählt. Dazu wird im Subsystem „Strecke“ (siehe Abbildung 4.3) durch den Digital Clock - Block „Zeit“ während der Simulation ein fortlaufender Zeitpa-

rameter generiert, der seinen Wert bei jedem Integrationsschritt um 0,1 s erhöht. Dieser ist wie alle Bausteine, die Daten in die Simulation einbringen, violett eingefärbt. Dazu gehören unter anderem auch Constant oder LookUp Table - Blöcke. Der eindimensionale LookUp Table - Block „v [km/h]“ ordnet anschließend jedem Zeitwert (Eingang) einen Geschwindigkeitswert (Ausgang) zu. Die erforderlichen Daten sind dazu in Form eines Zeilenvektors in einem M-File hinterlegt. Sind zu einem bestimmten Zeitwert keine Geschwindigkeitsdaten angegeben, interpoliert der LookUp Table - Block zwischen den benachbarten Werten.

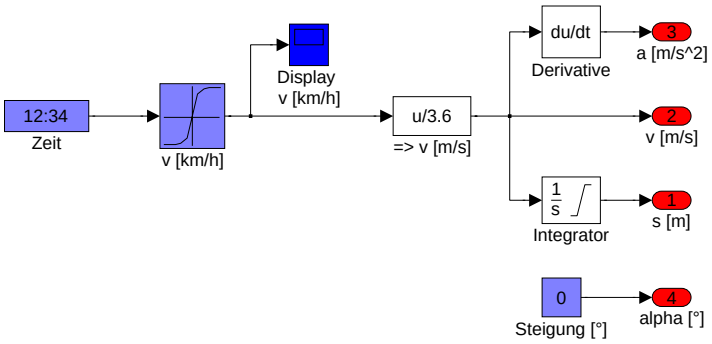


Abbildung 4.3.: Simulation Pkw: Subsystem Strecke

Anschließend wird daraus nach der Umrechnung auf die Einheit [m/s] über eine Ableitung die momentane Beschleunigung und über eine Integration die bisher zurückgelegte Strecke berechnet. Die Steigung der Fahrbahn des NEFZ ist konstant Null. Dies wird in der Simulation über einen Constant - Block realisiert. Letztendlich werden diese Signale über Output Port - Blöcke (rot) an die Ausgänge des Subsystems weitergeleitet.

Abbildung 4.4 zeigt Geschwindigkeit und Beschleunigung des NEFZ jeweils gegen die Zeit aufgetragen. Insgesamt dauert der genormte Fahrzyklus 1180 Sekunden. Dies sind knapp 20 Minuten. Er besteht aus einem 780 Sekunden dauernden Stadtzyklus und einem 400 Sekunden dauernden Überlandzyklus. Der Stadtzyklus des NEFZ (ECE15) besteht aus vier Konstantfahrten mit einer Geschwindigkeit von 15, 32, 40 und 50 km/h sowie aus Ampelphasen mit Start- und Stoppanteilen. Im Überland-Zyklus (EUDC) sollen verschiedene konstante Geschwindigkeitsbereiche Fahrten auf Landstraßen und auf Autobahnen abbilden. Die maximale Geschwindigkeit im NEFZ ist 120 km/h. Diese wird bei schwachmotorisierten Fahrzeugen allerdings auf 90 km/h reduziert. Ein Nachteil des NEFZ ist daher, dass bei der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs Geschwindigkeiten

über 120 km/h nicht berücksichtigt werden, wovon gerade aerodynamisch ungünstigere Fahrzeuge profitieren.

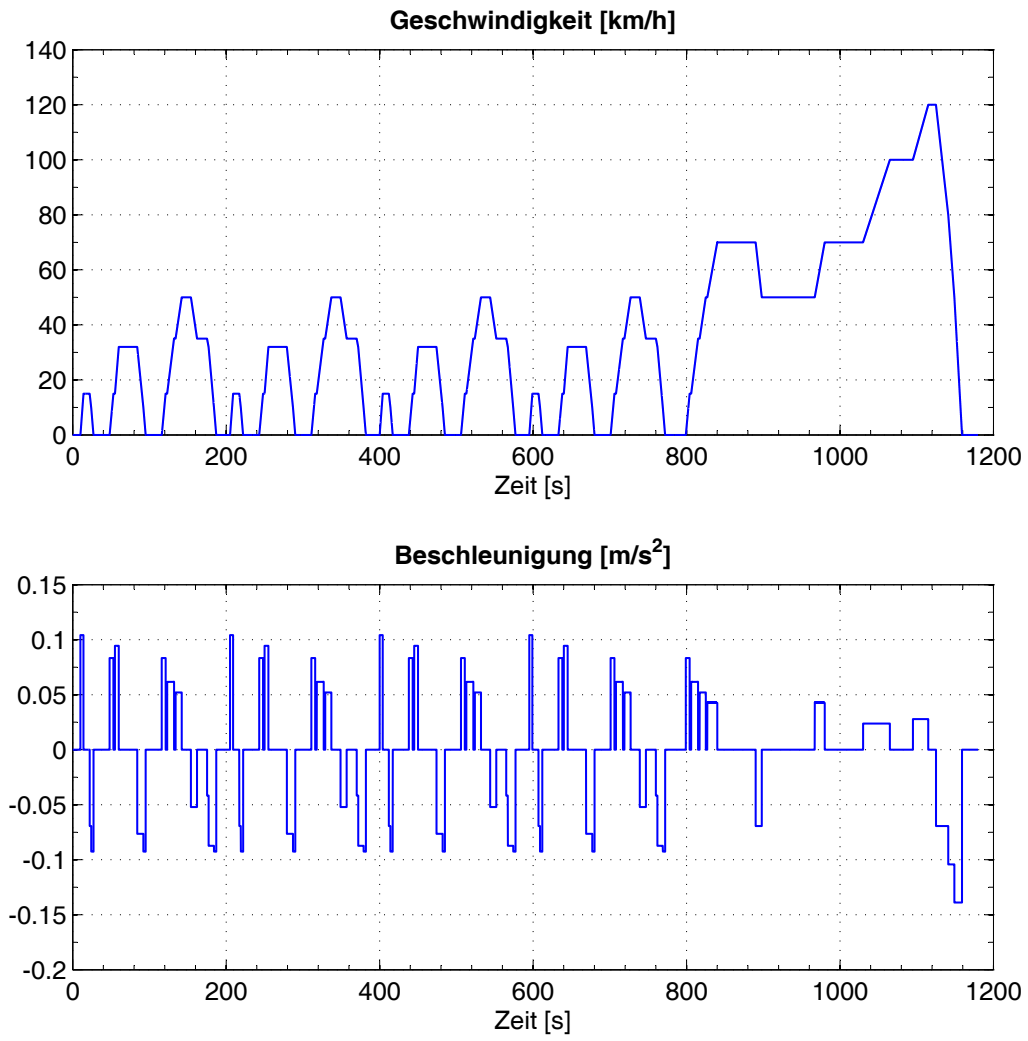


Abbildung 4.4.: Simulation Pkw: Geschwindigkeit und Beschleunigung des NEFZ

Im Subsystem „Fahrwiderstände“ werden die Ausgabedaten des Subsystems „Strecke“ zur Berechnung des momentanen Gesamtfahrwiderstands verwendet (siehe Abbildung 4.5). Dazu werden mithilfe von Embedded MATLAB Function - Blöcken der momentane Luft-, Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand gemäß den Formeln (4.2), (4.3), (4.5) und (4.6) berechnet. Diese werden anschließend von einem Add - Block zum Gesamtfahrwiderstand aufsummiert. Die technischen Daten des Autos werden dabei wiederum über Constant - Blöcke zur Verfügung gestellt.

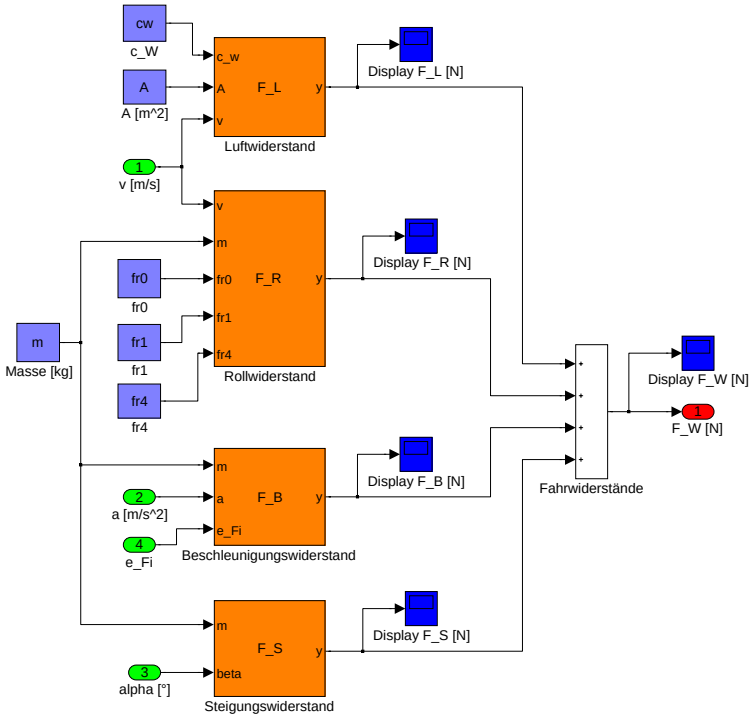


Abbildung 4.5.: Simulation Pkw: Subsystem Fahrwiderstände

4.2. Auto mit Verbrennungsmotor

Für die Simulation wurde der Audi A3 1.9 TDI (77kW) als Auto mit Verbrennungsmotor ausgewählt. In Tabelle 4.3 sind die technischen Daten des Modells aufgelistet. Geht man davon aus, dass der Fahrer etwa 75 kg wiegt, so beträgt das Gesamtgewicht des Fahrzeugs inklusive Tank- und Kühlsysteminhalt sowie Motoröl im Schnitt ungefähr 1420 kg. Die Reifen des Testmodells sind 205 mm breit, ihr Verhältnis von Höhe zu Breite ist 0,55 und der Felgendurchmesser beträgt 16 Zoll. Folglich kann der statische Reifenhalbmesser über die Addition von Reifenhöhe und halbem Felgendurchmesser zu 0,316 m berechnet werden. Dabei sei angemerkt, dass es sich bei der Reifenbreite um ein Rastermaß handelt und folglich die Genauigkeit begrenzt ist. Die Koeffizienten des Rollwiderstandsbeiwerts und die Werte des Rotationsmassenfaktors sind leider nicht angegeben. Aus diesem Grund werden dafür entsprechend die Werte aus Tabelle 4.1 und 4.2 angenommen.

Motor	
Motorbauart	Reihen-Vierzylinder-Diesel
Hubraum	1896 ccm
max. Leistung	77 kW / 105 PS bei 4000 1/min
max. Drehmoment	250 Nm bei 1900 1/min
Kraftübertragung / Reifen	
Getriebebauart	5-Gang-Schaltgetriebe
Getriebeübersetzung im 1./2./3.-Gang	3,778 / 2,063 / 1,348
Getriebeübersetzung im 4./5./R.-Gang	0,967 / 0,744 / 3,600
Achsübersetzung	3,389
Reifen	205/55 R 16
Karosserie	
Leergewicht	1295 kg
Luftwiderstandsbeiwert c_W	0,33
Stirnfläche A	2,13 m^2
Füllmengen	
Kühlsysteminhalt (inkl. Heizung)	8,1 l
Motorölinhalt (inkl. Filter)	2,8 l
Tankinhalt	55 l
Verbrauch	
städtisch	6,3 l/100km
außerstädtisch	4,1 l/100km
insgesamt	4,9 l/100km

Tabelle 4.3.: Technische Daten des Audi A3 1.9 TDI (77kW). Quelle: Audi

In Abbildung 4.6 sind die Fahrwiderstände des ausgewählten Fahrzeugs im NEFZ aufgetragen. Deutlich ist zu erkennen, dass der Rollwiderstand während der Fahrt nahezu konstant ist und somit die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Rollwiderstandsbeiwerts eher eine untergeordnete Rolle spielt. Aus diesem Grund wird der Beiwert in Berechnungen oftmals auch als konstant angenommen. Gerade im Überlandzyklus mit den insgesamt höheren Geschwindigkeiten dominiert der Luftwiderstand unverkennbar. Der Summe dieser Fahrwiderstände gilt es nun ein entsprechendes Drehmoment an den Antriebsrädern entgegen zu setzen. Dabei kommt es wie gesagt auf den entsprechenden Antriebsstrang an. Dieser ist in der Simulation jeweils über das Subsystem „Antriebsstrang“ realisiert, welches in diesem Fall in die Subsysteme „Getriebe“ und „Motor“ untergliedert ist (siehe Abbildung 4.7).

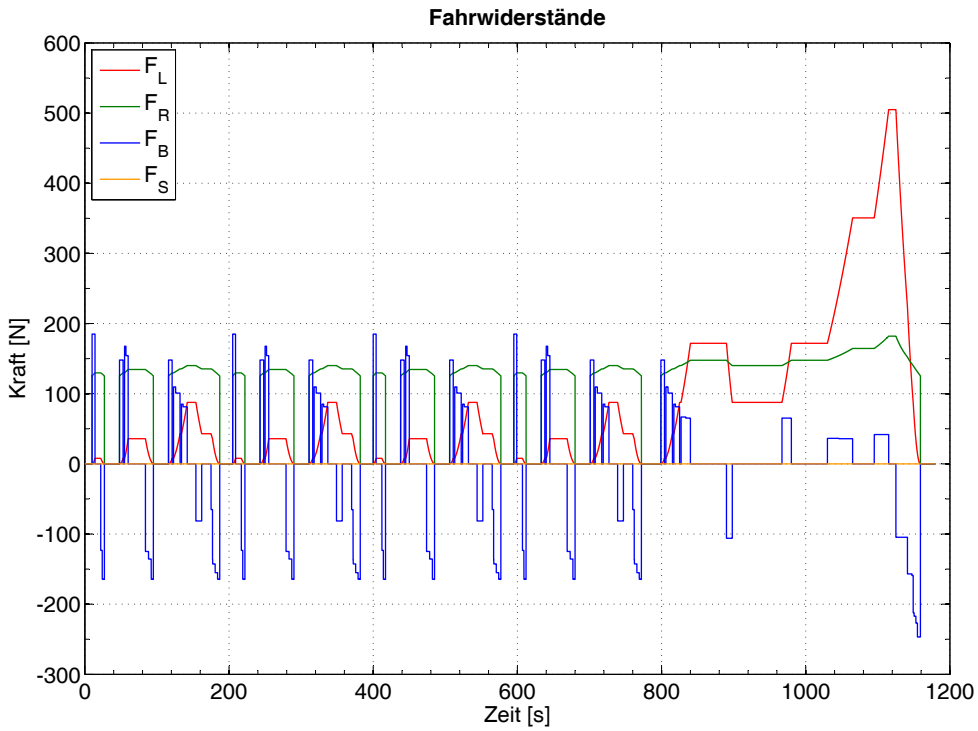


Abbildung 4.6.: Fahrwiderstände der Simulation mit Verbrennungsmotor im NEFZ

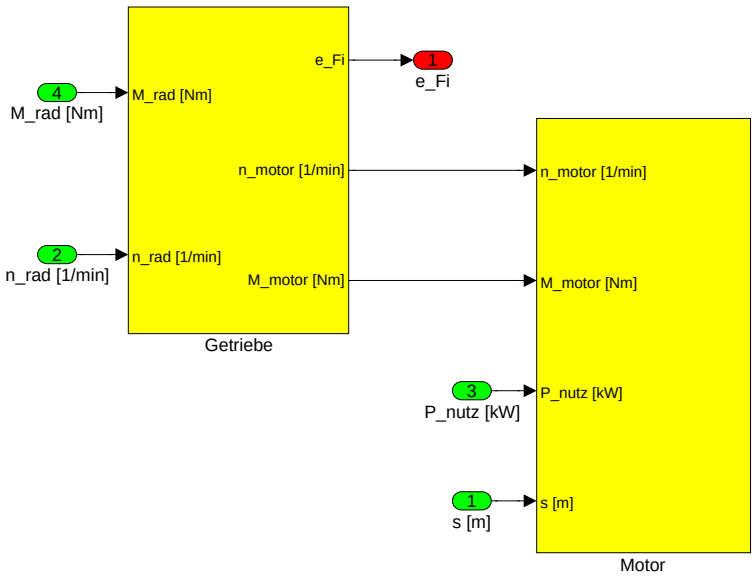


Abbildung 4.7.: Simulation Pkw: Subsystem Antriebsstrang

Im Subsystem „Getriebe“ wird auf der linken Seite vergleichbar mit einer Handschaltung im Fahrzeug ein Gang ausgewählt (siehe Abbildung 4.8). Dazu überprüft der Block „Schaltung“ permanent, ob die momentane Motordrehzahl noch innerhalb eines bestimmtes Bereiches liegt. Wenn nicht, gibt er das Signal den Gang falls möglich entsprechend anzupassen (siehe Abbildung A.1). Der Drehzahlbereich wird zwischen 1200 und 2300 Umdrehungen pro Minute festgelegt. Um Oszillationen zu vermeiden, wurde eine Kontrollfunktion über ein „Delay“ von 10 Berechnungsschritten integriert.

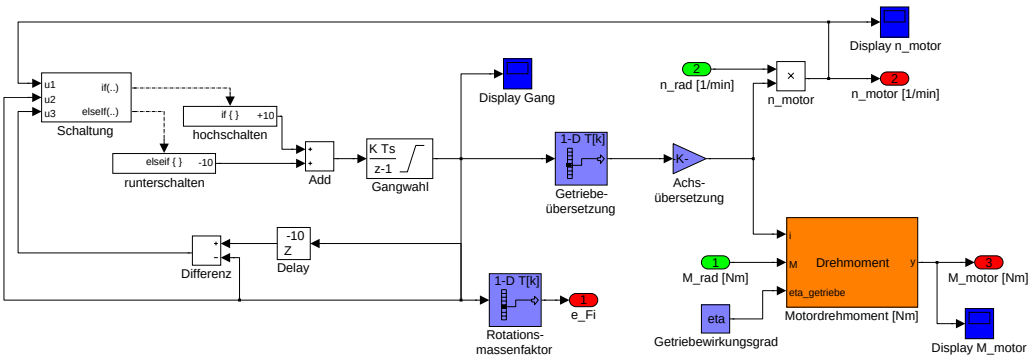


Abbildung 4.8.: Simulation Pkw: Subsystem Getriebe

Je nach gewähltem Gang gibt der Direct LookUp Table (1-D) - Block „Rotationsmassenfaktor“ einen entsprechenden Wert aus (vergleiche Tabelle 4.2). Auf dieselbe Weise wird die Getriebeübersetzung ausgewählt, welche anschließend mit der konstanten Achsübersetzung multipliziert wird, um das Gesamtübersetzungsverhältnis i des Antriebsstrangs zu berechnen. Mithilfe folgender Formeln wird anschließend aus dem Drehmoment und der Drehzahl der Antriebsräder in Embedded MATLAB Function - Blöcken das entsprechende Drehmoment M_{Motor} bzw. die entsprechende Drehzahl n_{Motor} des Motors berechnet:

$$M_{Motor} = \frac{M_{Rad}}{i \cdot \eta_{Getriebe}} \tag{4.12}$$

$$n_{Motor} = n_{Rad} \cdot i \tag{4.13}$$

In der Simulation wird der durchschnittliche Getriebewirkungsgrad $\eta_{Getriebe}$ eines Stufengetriebes in Höhe von etwa 92% angenommen, da für das Modellauto dazu keine Daten vorlagen. Zudem wurden negative Drehmomente vernachlässigt, da in erster Linie dafür nicht der Motor sondern das Bremssystem zuständig ist.

Im Mittelpunkt des Subsystems „Motor“ steht der LookUp Table (2-D) - Block „Motorkennfeld“ (siehe Abbildung 4.9). Dieser gibt je nach Drehzahl des Motors und effektivem Mitteldruck in den Kolben einen spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e aus, der angibt, welche Menge an Kraftstoff benötigt wird, um eine Kilowattstunde zu leisten. Dabei stellt der Mitteldruck beziehungsweise der mittlere effektive Kolbendruck p_e physikalisch denjenigen Druck dar, der die gleiche Arbeit abgibt wie der zeitlich veränderliche Verbrennungsdruck, wenn er während des Expansionstaktes konstant im Brennraum herrschen würde. Diese an den Kolben geleistete Nutzarbeit abzüglich der Reibungsverluste entspricht dem auf das Hubvolumen V_H bezogenen Drehmoment des Motors, das an der Motorkupplung verfügbar ist. Den Mitteldruck für einen 4-Takt-Motor kann man somit folgendermaßen berechnen:

$$p_e = \frac{4 \cdot \pi \cdot M_{Motor}}{V_H} \tag{4.14}$$

Damit ist ein direkter Vergleich von Motoren unterschiedlicher Größe möglich. Im Fahrzeug kann vereinfacht dargestellt das Gaspedal als Mitteldruckregler betrachtet werden.

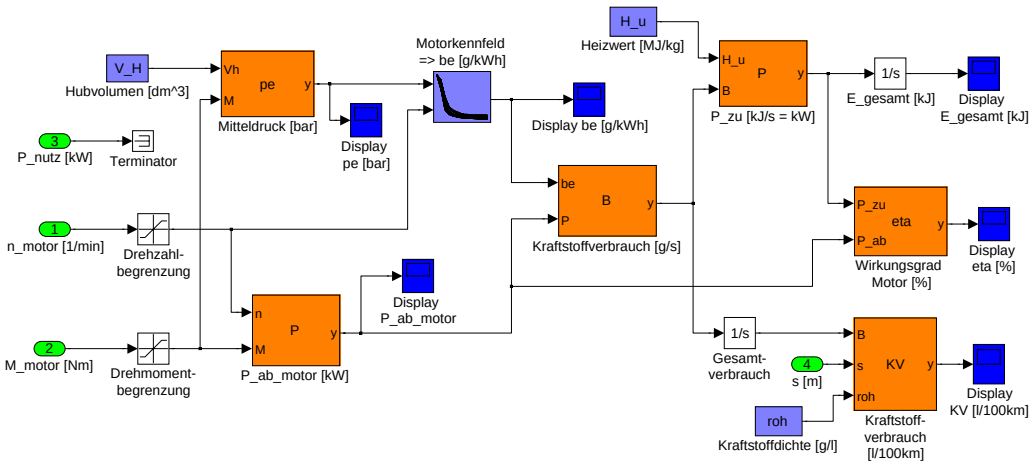


Abbildung 4.9.: Simulation Pkw: Subsystem Motor

Die Daten für den LookUp Table (2-D) - Block „Motorkennfeld“ sind in einer Matrix hinterlegt (siehe Visualisierung in Abbildung A.3). Diese sollten idealerweise dem Muscheldiagramm des entsprechenden Motors entnommen sein. Leider stellte Audi für diesen Motortyp keine Daten zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde in der Simulation auf das Muscheldiagramm eines ähnlichen Motors zurückgegriffen (siehe Abbildung A.2). Dieses

beinhaltet nur für den Drehzahlbereich von 1000 bis 4500 Umdrehungen pro Minute und den Mitteldruckbereich von 0 bis maximal etwa 14 bar entsprechende Werte. Aus diesem Grund wurden Motordrehzahl und Mitteldruck beziehungsweise das zur Berechnung des Mitteldrucks benötigte Motordrehmoment entsprechend begrenzt. Dies ist auch unabhängig davon sinnvoll, da der Motor zur Aufrechterhaltung des periodischen Prozesses eine gewisse Drehzahl (Leerlaufdrehzahl) und eine gewisse Kraftstoffzufuhr (Standgas) benötigt. Die Leerlaufdrehzahl liegt derzeit bei 550 bis 750 Umdrehungen pro Minute für Ottomotoren und bei 800 bis 900 Umdrehungen pro Minute für Dieselmotoren [40]. Zwischen den in der Matrix des Motorkennfeldes angegebenen Werten interpoliert die Simulation entsprechend. Im Zuge dessen ergab sich im NEFZ mit der Simulation ein über weite Strecken hoher spezifischer Kraftstoffverbrauch (siehe Abbildung A.4). Damit kann anschließend mithilfe von:

$$B = b_e \cdot P_{Motor} \tag{4.15}$$

der Kraftstoffverbrauch B pro Zeiteinheit ermittelt werden. Zunächst kann daraus dann über eine Multiplikation mit dem unteren Heizwert H_u die dem Motor zugeführte Leistung berechnet werden. Integriert man diese über die Zykluszeit, erhält man die insgesamt umgewandelte chemische Energie, die im Kraftstoff gespeichert war. Darüber hinaus kann aus der dem Motor zugeführten Leistung und der vom Motor abgegebenen Leistung der momentane Wirkungsgrad des Motors ermittelt werden (siehe Abbildung A.5).

In der Simulation ist der Wirkungsgrad des Motors während des Stadtzyklus aufgrund des dort relativ hohen spezifischen Verbrauchs in einem sehr niedrigen Bereich. Erst beim Überlandzyklus mit zwischen 25% und 35% befindet er sich annähernd in einem Bereich, der für Verbrennungsmotoren derzeit üblich ist. Aktuelle Fahrzeugmotoren erreichen effektive Wirkungsgrade von 36% für Ottomotoren bis 43% für Dieselmotoren [11]. Diese Bestwerte werden, wie in Muscheldiagrammen zu erkennen ist, etwa in der Mitte des Drehzahlbandes und etwas unterhalb der Volllastkurve erreicht, da sich dort das Minimum des spezifischen Verbrauchs befindet. In der Simulation wird der Motor allerdings oftmals zu ungünstigen Betriebspunkten mit hohem spezifischen Verbrauch gezwungen (siehe Abbildung A.4). Durch eine Optimierung des Fahr- und Schaltverhaltens ließe sich damit der spezifische Verbrauch und folglich auch der Wirkungsgrad des Motors erheblich steigern. Überdies kann beispielsweise in Autos mit seriellem oder parallelem Hybridantrieb der Verbrennungsmotor über weite Strecken unter wesentlich

verbrauchsgünstigeren Bedingungen betrieben werden, da ein Elektromotor die für den Verbrennungsmotor ungünstigen Betriebsbereiche abfedern kann.

Weiterhin kann nach einer Integration des momentanen Kraftstoffverbrauchs über die Zeit durch einen Bezug auf die zurückgelegte Strecke der Kraftstoffverbrauch in Litern pro 100 km bestimmt werden. Dies wird in der Simulation wiederum mithilfe eines Embedded MATLAB Function - Blocks realisiert. Abbildung 4.10 zeigt das Ergebnis der Berechnung.

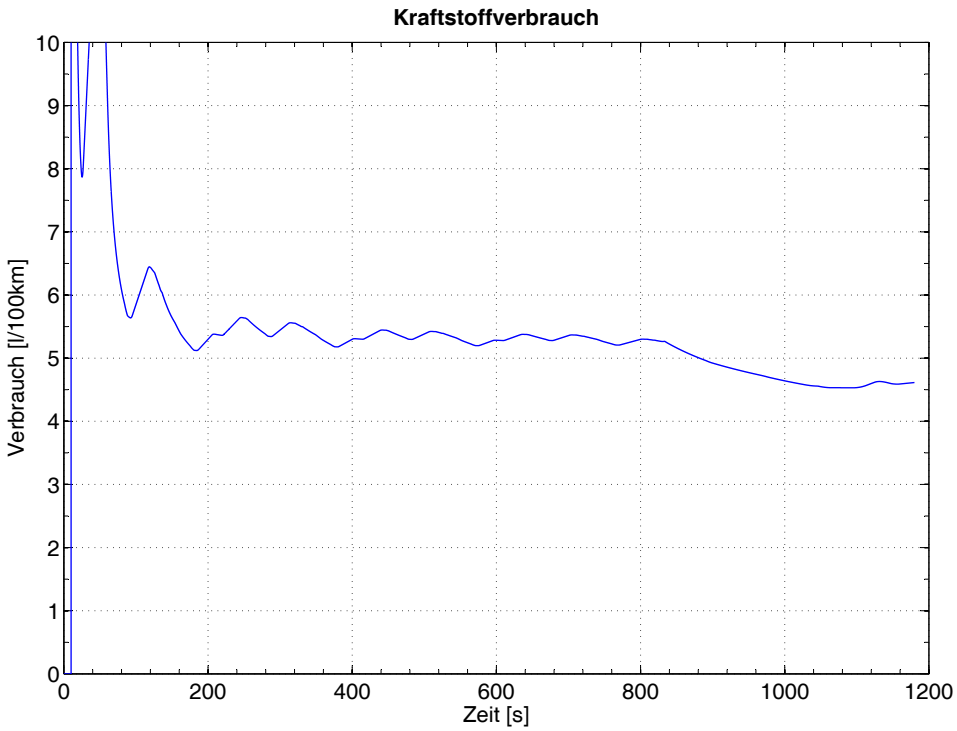


Abbildung 4.10.: Kraftstoffverbrauch der Simulation mit Verbrennungsmotor im NEFZ

Im ersten Zeitabschnitt bis etwa 200 Sekunden treten unter anderem sehr hohe Werte für den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch auf. Dies liegt hauptsächlich daran, dass der Berechnung, die in diesem Fall einen Durchschnittswert bestimmt, noch wenige Werte zur Verfügung stehen, die dazu aufgrund der ungünstigen Motorbetriebspunkte überdurchschnittlich hoch sind. Im weiteren Verlauf wird der Mittelungsprozess allerdings immer besser und damit weniger störungsanfällig. Im Stadtzyklus bis 780 Sekunden stellt sich infolgedessen ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von etwa 5,3 l/100km ein. In Kombination mit dem Überlandzyklus sinkt dieser auf ungefähr 4,7 l/100km. Vergleicht man diese Werte mit den Angaben des Herstellers aus Tabelle 4.3, so stellt man fest, dass

der kombinierte Kraftstoffbedarf der Simulation relativ gut mit den Herstellerangaben übereinstimmt. Die Simulationsergebnisse zum städtischen Kraftstoffverbrauch sind allerdings um etwa einen Liter zu niedrig. Ein Grund dafür könnte sein, dass wie gesagt nur das Muscheldiagramm eines ähnlichen Motors zur Verfügung stand. Vermutlich unterscheidet sich dieses vom Original gerade bei ungünstigen Motorbetriebspunkten, wie sie häufig im Stadtzyklus auftreten. Zudem müssten eventuell Getriebewirkungsgrad, Rotationsmassenfaktor und die Koeffizienten des Rollwiderstandsbeiwerts überdacht werden. Bei Kenntnis der gesamten technischen Daten des ausgewählten Automodells wäre eine Überprüfung und anschließende Optimierung der Berechnungen der Simulation besser möglich gewesen.

4.3. Auto mit Elektromotor

Die Erkenntnisse zu den Einflussfaktoren des Kraftstoffverbrauchs eines Pkws mit Verbrennungsmotor, die im vorherigen Abschnitt gewonnen wurden, können nun heran gezogen werden, um einen besseren Einblick in den physikalischen Ursprung des Energiebedarfs von Elektroautos zu bekommen. Dazu wird obige Simulation bis auf den Antriebsstrang übernommen. Dieser wird entsprechend der spezifischen Eigenschaften des Elektromotors angepasst.

Zunächst werden jedoch die technischen Daten des Testmodells festgelegt. Dazu sind zur Orientierung in Tabelle 4.4 die Daten einer Auswahl an bestehenden und an nur als Konzept vorliegenden Modellen mit Elektromotor sowie die Daten einer Auswahl an Pkws mit Verbrennungsmotor aus dem Niedrigenergiesektor aufgelistet.

Im Zuge dessen wird das Leergewicht des Simulationsmodells zu 800 kg gewählt. Zu diesem muss das Gewicht einer Testperson in Höhe von durchschnittlich 75 kg addiert werden. Die aerodynamische Qualität von Pkws hat sich in den letzten 20 Jahren erheblich verbessert. Das VW 1-Liter-Auto oder der Loremo haben allerdings vermutlich den Gipfel des Machbaren bereits erreicht. Da zudem verbrauchsoptimierte Autos zwar wünschenswert sind, sie aber dennoch von der breiten Masse angenommen werden müssen, werden für den Luftwiderstandsbeiwert und die Querschnittsfläche keine extremen sondern eher moderate Werte gewählt, sodass die Größe der Karosserie den Fahrkomfort nicht zu sehr einschränkt. Ferner wird davon ausgegangen, dass durch eine Optimierung

Modell	m [kg]	r [m]	c_W	A [m^2]	Bedarf [kWh/100km]
CityEL	280	0,26		$<$ 1,34	3 - 5
Lightning GT	$<$1400	0,35		$<$ 2,33	10
Loremo EV	$<$ 600	0,25	0,20	1,10	6
Tesla Roadster	1220	0,31	0,36	$<$ 2,09	11
Think City	1397	0,29		$<$ 2,48	15
Twike	280	0,20	0,33	$<$ 1,44	4 - 8
Chevrolet Volt	1588	0,37	0,26	$<$ 2,39	25 - 40
Smart Fortwo	805	0,29	0,38	1,95	34 - 50
Twingo Smile	650	0,26	0,25	1,95	28 - 32
VW 1-Liter-Auto	290	0,28	0,16	1,00	10
VW Lupo 1.0	971	0,27	0,29	$<$ 2,39	49
SIMULATION	800	0,25	0,25	1,80	

Tabelle 4.4.: Technische Daten ausgewählter Pkws. Bei fehlender Angabe der Querschnittsfläche kann diese über eine Multiplikation von Höhe und Breite nach oben abgeschätzt werden. Der Bedarf von Pkws mit Verbrennungsmotor wurde zu Vergleichszwecken entsprechend umgerechnet.

der Reifen beispielsweise über eine Modifikation des Laufflächenbereichs der Rollwiderstandsbeiwert beziehungsweise seine Koeffizienten um etwa 10% reduziert werden können (siehe Tabelle 4.5).

Koeffizient	Wert
f_{R0}	0,0081
f_{R1}	0,0018
f_{R4}	0,00072

Tabelle 4.5.: Optimierte Koeffizienten des Rollwiderstandsbeiwerts

Mithilfe dieser technischen Daten kann man nun in der Simulation wiederum die einzelnen Fahrwiderstände des Testmodells berechnen, die es an jedem Punkt des NEFZ zu überwinden gilt (siehe Abbildung 4.11). Beim Vergleich mit dem Verlauf der Fahrwiderstände des Modellautos mit Verbrennungsmotor (siehe Abbildung 4.6) ist festzustellen, dass am Elektroauto durchwegs generell niedrigere Fahrwiderstandskräfte angreifen. Dies basiert auf der Optimierung der wesentlichen Eigenschaften wie Leermasse, aerodynamische Güte und Rollwiderstandsbeiwert. Damit kann durch die Reduktion der jeweils benötigten Nutzleistung Energie unabhängig vom Antriebskonzept und vom Wirkungsgrad des Antriebsstranges gespart werden.

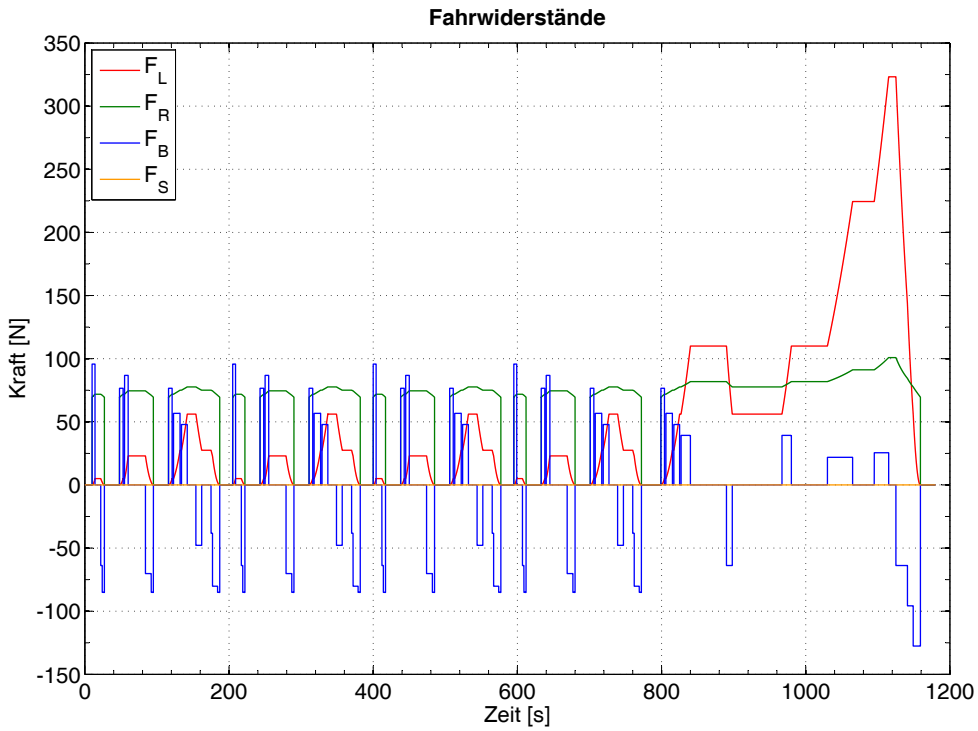


Abbildung 4.11.: Fahrwiderstände der Simulation mit Elektromotor im NEFZ

Der statische Reifenhalbmesser wird ungeachtet weiterer Bewertungskriterien wie Laufruhe oder Kurvenstabilität eher am unteren Rand der Werte der Vergleichsmodelle festgelegt. Prinzipiell spielt der Reifenhalbmesser in diesem Fall sowieso eine untergeordnete Rolle, da wie man später sehen wird einzig die Nutzleistung den Energiebedarf beeinflusst. Durch eine entsprechende Umformung von Gleichung (4.10) kürzt sich allerdings der Reifenhalbmesser in der Berechnung:

$$P_{nutz} = 2\pi \cdot n_{Rad} \cdot M_{Rad} = 2\pi \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{v}{r} \cdot r \cdot F_W = v \cdot F_W \tag{4.16}$$

Für den Antriebsstrang eines Elektroautos gibt es unterschiedliche Ansätze. Beispielsweise können die Räder einzeln von so genannten Radnabenmotoren angetrieben werden. Dadurch entfällt der klassische Antriebsstrang mit Getriebe, Differential und Antriebswellen und es kommt zu einer Steigerung der Effizienz durch den Wegfall der verschiedenen Übersetzungen und damit der Reibungsverluste. Dieses Konzept ist allerdings durch den Anstieg der ungefederten Massen weniger komfortabel.

Das Simulationsmodell soll deshalb lediglich mit einem Elektromotor angetrieben werden, der über einen klassischen Antriebsstrang mit den Rädern verbunden ist. Einzig beim Getriebe wird aus genannten Gründen auf mehrere Schaltstufen verzichtet.

Da ein Elektromotor über weite Drehzahl- und Leistungsbereiche einen konstant hohen Wirkungsgrad besitzt, wird in der Simulation ein Wirkungsgrad von 80% angenommen. Darin sind die Verluste im Motor, im Getriebe und beim Ladevorgang der Akkus beinhaltet. Ferner wird zur Vereinfachung angenommen, dass derselbe Wirkungsgrad vorliegt, wenn der Elektromotor beim Bremsen als Generator verwendet wird. Diese Annahme scheint gerechtfertigt, da im NEFZ der Energiebeitrag sehr gering ist, der unabhängig vom Wirkungsgrad durch die Rekuperationsbremsen zurück gewonnen werden kann.

In der Simulation ist dies durch den Block „E-Motor“ realisiert (siehe Abbildung 4.12). Dieser berechnet mithilfe des Wirkungsgrads neben der Motorleistung separat auch die Rekuperationsleistung. Beide werden anschließend über die Zeit integriert und stehen dem Auswertungsblock „Energiebedarf“ als Input zur Verfügung. Dieser berechnet daraus die insgesamt benötigte Energie und die gesamte Rekuperationsenergie, beide in der Einheit Kilowattstunden. Aus ersterer kann darüber hinaus der Energiebedarf pro 100 km sowie für Vergleichszwecke das Benzinäquivalent dessen bestimmt werden.

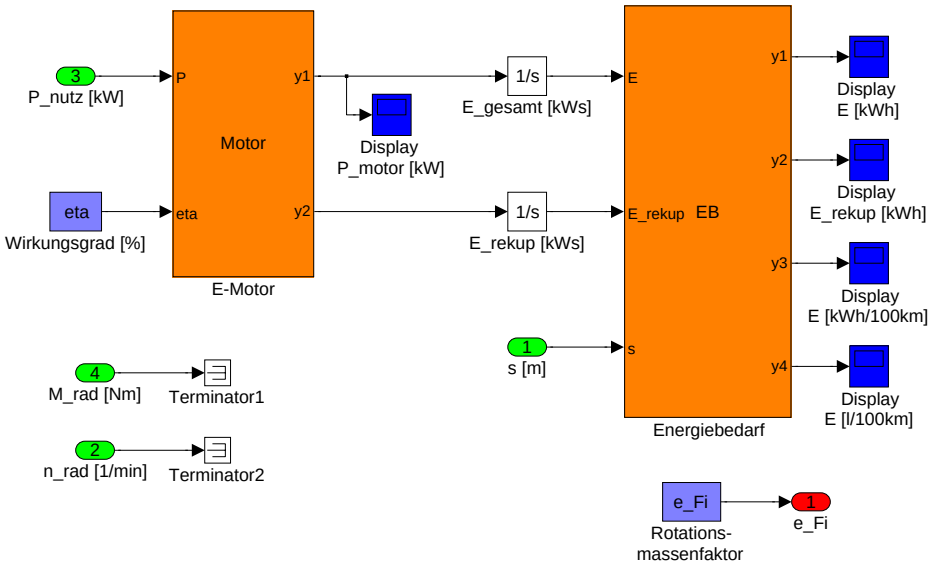


Abbildung 4.12.: Simulation ePkw: Subsystem Antriebsstrang

In Abbildung 4.13 ist der Energiebedarf des Testmodells im NEFZ in Kilowattstunden pro 100 km über die Zeit aufgetragen. Für den Stadtzyklus ergibt somit sich ein durchschnittlicher Energiebedarf in Höhe von ungefähr 3,6 kWh/100km. Kombiniert mit dem Überlandzyklus steigt dieser bedingt durch die höheren Geschwindigkeiten, die eine größere Nutzleistung voraussetzen, auf etwa 6,5 kWh/100km. Damit liegt das Testmodell im unteren Mittelfeld der in Tabelle 4.4 aufgelisteten Elektroautos. Einen geringeren Energiebedarf weisen nur Modelle wie CityEL oder Twike auf, die auf dem Markt bedingt durch deren eigenwillige Konstruktion wohl kaum mit Elektroautos konkurrieren können, die sich wie das Simulationsmodell an der Konstruktion der etablierten Modelle mit Verbrennungsmotor orientieren. Das Konzeptauto Loremo EV besitzt in etwa denselben Energiebedarf wie das Simulationsmodell. Da der Loremo allerdings eindeutig über günstige Karosserieparameter verfügt, kann man daraus schließen, dass der Energiebedarf des Simulationsmodells tendenziell eher zu gering ist.

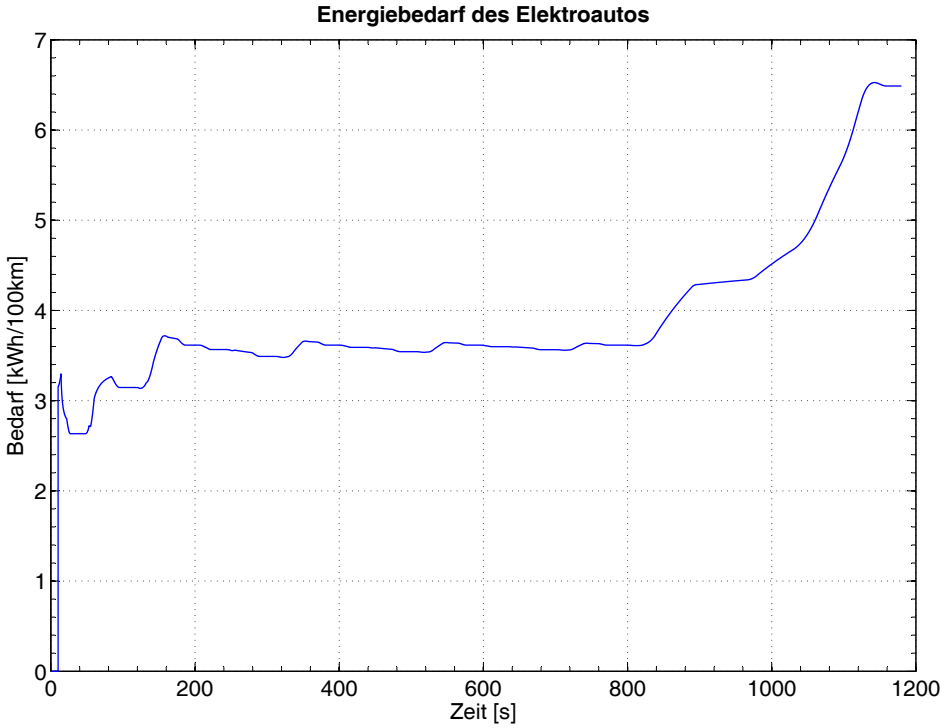


Abbildung 4.13.: Energiebedarf der Simulation mit Elektromotor im NEFZ

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Simulationen und damit der beiden Antriebskonzepte, so stellt man zunächst fest, dass der Kraftstoff- bzw. Energiebedarf bei den Elektroautos wesentlich geringer ist. Der Hintergrund dessen ist hauptsächlich die ver-

brauchsoptimierte Konstruktion und der höhere Wirkungsgrad des Antriebsstrangs der Elektroautos. Für einen objektiven Vergleich müssen zu den Ergebnissen allerdings jeweils die Verluste für Energieerzeugung/-förderung, -umwandlung und -verteilung addiert werden. Für Benzin / Diesel liegt der Wirkungsgrad der Energiebereitstellungskette in Deutschland bei etwa 84% / 87%. Für elektrische Energie kann ein Wirkungsgrad von insgesamt ungefähr 32% angenommen werden. Hierbei spielen allerdings die Wirkungsgrade der Kraftwerke eine entscheidende Rolle [29]. Das bedeutet, ein Auto mit Verbrennungsmotor besitzt bei einem Druchschnittsverbrauch von 6,0 l/100km einen Primärenergiebedarf in Höhe von 7,1 l/100km bzw. 71 kWh/100km. Bei Elektroautos hingegen liegt bei einem Durchschnittsbedarf von 10 kWh/100km der Primärenergiebedarf bei etwa 31 kWh/100km. Folglich steht das Elektroauto trotz der Berücksichtigung der Energiebereitstellung energetisch günstiger da.

Insgesamt benötigt das Simulationsmodell im NEFZ etwa 7,1 kWh elektrische Energie. Der Energiebetrag, der über Rekuperationsbremsen zurück gewonnen werden kann, ist im NEFZ mit 0,0013 kWh relativ klein. Da der NEFZ wie gesagt nur ein genormtes Durchschnittsprofil darstellt, das für Vergleichszwecken festgelegt wurde, kann bei anderem Fahrtverlauf unter Umständen wesentlich mehr Energie zurück gewonnen werden.

5. Entwicklung eines Verkehrsmodells

Nachdem nun in den vorherigen Kapiteln der Verkehrssektor aus unterschiedlichen Blickwinkeln beleuchtet wurde, wird nun in diesem Kapitel entsprechend den Schritten des Modellierungskonzepts der Soziodynamik (siehe Kapitel 2) ein Modell entwickelt, mit dem das Verhalten von Verkehrsteilnehmern und damit ein Übergang von etablierten zu neuen Verkehrstechnologien beschrieben werden kann.

5.1. Definition der Makrovariablen und der Kontrollparameter

Zunächst wird angenommen, dass es unter den Verkehrsteilnehmern verschiedene Subpopulationen $\mathcal{P}^\alpha$ mit $\alpha = 1, \ldots, P$ gibt. Die Mitglieder einer bestimmten Subpopulation zeichnen sich durch Ähnlichkeiten hinsichtlich der Wohnsituation, des Mobilitätsbedürfnisses, der Fortbewegungsmittel, der Arbeitsverhältnisse, das heißt insbesondere der Arbeitszeit und des Nettoeinkommens aus. Jedes Mitglied einer Subpopulation besitzt zur Befriedigung seines Mobilitätsbedürfnisses die Möglichkeit sich zwischen einem etablierten und einem neuen Verkehrssystem zu entscheiden. Beide Verkehrssysteme bestehen dabei aus unterschiedlichen Verkehrsmitteln. Somit wird festgelegt:

$$n_0^\alpha \equiv \text{Anzahl der Personen der Subpopulation } \mathcal{P}^\alpha \text{, die das } \textit{etablierte} \text{ Verkehrssystem nutzen} \tag{5.1}$$

$$n_1^\alpha \equiv \text{Anzahl der Personen der Subpopulation } \mathcal{P}^\alpha \text{, die das } \textit{neue} \text{ Verkehrssystem nutzen} \tag{5.2}$$

Die Soziokonfiguration des Verkehrsmodells stellt sich demnach folgendermaßen dar:

$$\mathbf{n} = \left\{n_0^1, n_1^1; \ldots; n_0^\alpha, n_1^\alpha; \ldots; n_0^P, n_1^P\right\} \tag{5.3}$$

Für die Anzahl der Personen N^α in Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ beziehungsweise für die Gesamtzahl N aller Verkehrsteilnehmer gilt damit:

$$N^\alpha = n_0^\alpha + n_1^\alpha \tag{5.4}$$

$$N = \sum_{\alpha=1}^{P} N^\alpha \tag{5.5}$$

Wenn nicht ausgeschlossen wird, dass sich die Zugehörigkeit von Verkehrsteilnehmern zu einer Subpopulation ändern kann oder Verkehrsteilnehmer in das System ein- oder austreten können, sind N^α und N zeitlich nicht konstant. Nachfolgend sollen diese Prozesse allerdings vernachlässigt werden. Folglich gilt:

$$\frac{dN^\alpha}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad N^\alpha = \text{konstant} \quad \forall \alpha = 1, \ldots, p \tag{5.6}$$

$$\frac{dN}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad N = \text{konstant} \tag{5.7}$$

Zu den spezifischen Eigenschaften der Verkehrsteilnehmer wie beispielsweise das Nettoeinkommen und die Wochen- bzw. Monatsarbeitszeit wird angenommen, dass sie notwendig zur Beschreibung des Verkehrssystems sind, sich aber vernachlässigbar gering ändern und damit nur als Konstanten in die Bewegungsgleichungen eingehen. Deshalb werden zur Soziokonfiguration folgende Trend- bzw. Kontrollparameter definiert:

$$e^\alpha \equiv \text{Nettoeinkommen von } \mathcal{P}^\alpha \text{ pro Monat in Euro} \tag{5.8}$$

$$a^\alpha \equiv \text{Arbeitszeit von } \mathcal{P}^\alpha \text{ pro Monat in Stunden} \tag{5.9}$$

Oftmals ist die Arbeitszeit vertraglich lediglich für eine Arbeitswoche festgelegt. Aus dieser kann zunächst die durchschnittliche Arbeitszeit pro Arbeitstag und anschließend

über eine Multiplikation mit der Anzahl der Arbeitstage pro Monat die Monatsarbeitszeit berechnet werden. Dazu werden von den 365 Tagen pro Jahr 52 Samstage und 52 Sonntage, ungefähr 10 Feiertage sowie die Anzahl der Urlaubstage abgezogen. Dieses Ergebnis stellt die insgesamte Anzahl der Arbeitstage pro Jahr dar, welche man nun noch auf die 12 Monate umlegen muss. Somit ergibt sich folgende Umrechnung:

$$a^{\alpha} = \frac{Wochenarbeitszeit}{5} \cdot \frac{365 - 52 - 52 - 10 - Urlaubstage}{12} \tag{5.10}$$

Bei der Entscheidung für eines der beiden Verkehrssysteme geht man davon aus, dass die Verkehrsteilnehmer diese auf der Basis einer Nutzenoptimierung treffen. In diesem Zusammenhang definiert sich der Nutzen eines Verkehrssystems in erster Linie über den Nutzen der einzelnen Verkehrsmittel, die zu dem jeweiligen System gehören. Dieser wiederum wird über die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Verkehrsmittels bestimmt. Unter anderem spielen hierbei der spezifische Zeitbedarf und die spezifischen Kosten eine Rolle. Weitere Eigenschaften werden zu einer spezifischen Güte zusammengefasst. Um diese mathematisch greifbar zu machen, muss dazu eine geeignete Skala definiert werden. Darüber hinaus spiegelt sich die Bedeutung eines bestimmten Verkehrsmittels für die jeweiligen Subpopulationsmitglieder in der Fahrleistung wider, die durch eine mögliche Nutzung des entsprechenden Verkehrsmittels entsteht. Deshalb werden im Modell ferner folgende Parameter definiert:

$$f_{i,j}^{\alpha} \equiv \text{Fahrleistung von } \mathcal{P}^{\alpha} \text{ pro Monat mit Verkehrsmittel } j \text{ in Pkm} \tag{5.11}$$

$$v_{i,j}^{\alpha} \equiv \text{Geschwindigkeit des Verkehrsmittels } j \text{ von } \mathcal{P}^{\alpha} \text{ in km/h} \tag{5.12}$$

$$k_{i,j}^{\alpha} \equiv \text{Kosten des Verkehrsmittels } j \text{ von } \mathcal{P}^{\alpha} \text{ in EUR/km} \tag{5.13}$$

$$g_{i,j}^{\alpha} \equiv \text{Güte des Verkehrsmittels } j \text{ von } \mathcal{P}^{\alpha} \tag{5.14}$$

Der Index i repräsentiert die Zugehörigkeit des jeweiligen Verkehrsmittels j mit $j = 1, \ldots, l_i^{\alpha}$ zum Verkehrssystem i. Eine Entwicklung der Infrastruktur kann nun mit Hilfe der zeitlichen Entwicklung obiger Parameter beschrieben werden. Beispielsweise erhöht sich die durchschnittliche Geschwindigkeit des Autos durch den Ausbau einer oft genutz-

ten Autobahn. Aus diesem Grund ist es in manchen Fällen sinnvoll zumindest bestimmte Parameter als variabel zu definieren, um damit die Dynamik des Modells besser beschreiben zu können. Insgesamt ergibt sich somit die Konfiguration des gesamten Systems durch folgenden Satz an Variablen und Parametern:

$$\begin{aligned}\{\boldsymbol{s}\} &= \{\boldsymbol{n}, \boldsymbol{e}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{f}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{k}, \boldsymbol{g}\} \\ &= \left\{(n_i^\alpha, e^\alpha, a^\alpha, f_{i,j}^\alpha, v_{i,j}^\alpha, k_{i,j}^\alpha, g_{i,j}^\alpha) \mid \quad i = 0,1;\ j = 1,\ldots,l_i^\alpha;\ \alpha = 1,\ldots,P\right\}\end{aligned} \tag{5.15}$$

5.2. Nutzenfunktion und Übergangsraten

Für die elementaren Entwicklungsschritte

$$\mathbf{n} \;\Rightarrow\; \mathbf{n}_{01}^\alpha = \left\{n_1^1, \ldots, (n_0^\alpha + 1), (n_1^\alpha - 1), \ldots, n_C^P\right\} \tag{5.16}$$

$$\mathbf{n} \;\Rightarrow\; \mathbf{n}_{10}^\alpha = \left\{n_1^1, \ldots, (n_0^\alpha - 1), (n_1^\alpha + 1), \ldots, n_C^P\right\} \tag{5.17}$$

müssen nun Übergangsraten mit entsprechenden Nutzenfunktionen definiert werden. Hierbei sei angemerkt, dass in der Notation wiederum die Endkonfiguration vor der Startkonfiguration steht. Der Übergang (5.17) repräsentiert demnach den Wechsel eines Mitglieds von $\mathcal{P}^\alpha$ vom etablierten Verkehrssystem zum neuen Verkehrssystem. Der inverse Übergang wird von (5.16) beschrieben.

In diesem Zusammenhang basiert nun ein elementarer Entwicklungsschritt auf der individuellen Entscheidung der Akteure, wie bzw. mit welchen Verkehrsmitteln sie ihr Bedürfnis an Mobilität in Zukunft befriedigen möchten, und ist damit im Grunde nichts anderes als eine Verkehrsmittelwahl. Diese hängt zunächst davon ab, wie viel Zeit für die eigene Mobilität in jedem Verkehrssystem benötigt wird. Dazu muss über den Zeitbedarf und damit über den Quotienten aus Fahrleistung und Durchschnittsgeschwindigkeit aller Verkehrsmittel summiert werden, die zum jeweiligen Verkehrssystem gehören. Um diesen gesamten Zeitbedarf in Relation zu den anderen Faktoren der Verkehrsmittelwahl setzen zu können, bietet sich eine Umrechnung in Geldeinheiten an. Dabei stellt sich die Frage, was eine eingesparte Stunde durch schnellere Verkehrstechnologien oder ausgebaute Infrastruktur wert ist. Die Monetarisierung einer Stunde Freizeit fällt schwer, da jeder Mensch individuelle Maßstäbe anlegt. Die Arbeitszeit hingegen wird vom Arbeitgeber über den Lohn bewertet und ermöglicht dadurch einen einfacheren Zugang. So

wird ein erhöhter Zeitbedarf als Verdienstentgang angesehen. Aus diesem Grund wird der Zeitbedarf im Folgenden mit dem Nettostundenlohn gewichtet, also dem Quotienten aus Arbeitszeit und Nettoeinkommen. Diese Zeitkosten müssen zu Vergleichszwecken darüber hinaus auf eine festgelegte Basis bezogen werden. Dabei bietet sich das Nettoeinkommen als finanzieller Spielraum an, der einem Verkehrsteilnehmer pro Monat zur Verfügung steht. Der Zeitbedarf für Mobilität wird demnach zur Berechnung des Nutzens eines Verkehrssystems in Relation zur Arbeitszeit gesetzt:

$$\begin{aligned} Z_i^\alpha(\boldsymbol{s}) &= \sum_{j=1}^{l_i^\alpha} \frac{f_{i,j}^\alpha}{v_{i,j}^\alpha} \cdot \frac{e^\alpha}{a^\alpha} \cdot \frac{1}{e^\alpha} \\ &= \sum_{j=1}^{l_i^\alpha} \frac{f_{i,j}^\alpha}{v_{i,j}^\alpha \cdot a^\alpha} \end{aligned} \tag{5.18}$$

Die gesamten Kosten, die von einem Mitglied der Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ für die Nutzung von Verkehrssystem i zur Befriedigung des jeweiligen Mobilitätsbedürfnisses aufgewendet werden müssen, beeinflussen ebenfalls die Entscheidung zwischen den beiden Verkehrssystemen. Wiederum können die Gesamtkosten über die Summe der Kosten der zu i gehörenden Verkehrsmittel berechnet werden. Zu Vergleichszwecken werden diese Kosten abermals auf das durchschnittliche Nettoeinkommen der Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ bezogen:

$$K_i^\alpha(\boldsymbol{s}) = \sum_{j=1}^{l_i^\alpha} \frac{f_{i,j}^\alpha \cdot k_{i,j}^\alpha}{e^\alpha} \tag{5.19}$$

Über die spezifische Güte eines jeden Verkehrsmittels, unter der weitere Eigenschaften wie beispielsweise Sicherheit, Komfort oder CO_2-Emission subsumiert werden, kann eine Güte für das entsprechende Verkehrssystem definiert werden. Dabei muss allerdings die Häufigkeit der Nutzung der einzelnen Verkehrsmittel berücksichtigt werden. Dies ist durch eine Multiplikation der entsprechenden Güte mit dem jeweiligen Anteil an der gesamten Fahrleistung sichergestellt. Darüber hinaus muss durch die Festlegung einer geeigneten Güteskala der Vergleich mit den anderen Faktoren gewährleistet sein. Folglich gilt:

$$G_i^\alpha(\boldsymbol{s}) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{l_i^\alpha} f_{i,j}^\alpha} \cdot \sum_{j=1}^{l_i^\alpha} g_j^\alpha \cdot f_{i,j}^\alpha \tag{5.20}$$

Neben obigen Termen soll zudem der Einfluss der Gewohnheit in die Systementscheidung eingehen. Mittelt man die individuelle Gewohnheit über die Mitglieder einer Subpopulation, kann man annehmen, dass der Nutzen eines Verkehrssystems zusätzlich von einem Term abhängt, der angibt, wie viele Personen der jeweiligen Subpopulation dieses Verkehrssystem nutzen. Somit lässt sich nun eine Nutzenfunktion u_i^α für das Verkehrssystem i der Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ aufstellen:

$$u_i^\alpha(\boldsymbol{s}) = -\zeta^\alpha Z_i^\alpha(\boldsymbol{s}) - \kappa^\alpha K_i^\alpha(\boldsymbol{s}) + \gamma^\alpha G_i^\alpha(\boldsymbol{s}) + \theta^\alpha \frac{n_i^\alpha}{N^\alpha} \tag{5.21}$$

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad \zeta^\alpha &= \text{Gewichtungsfaktor Zeit} \\ \kappa^\alpha &= \text{Gewichtungsfaktor Kosten} \\ \gamma^\alpha &= \text{Gewichtungsfaktor Güte} \\ \theta^\alpha &= \text{Gewichtungsfaktor Gewohnheit} \end{aligned}$$

Aus den partiellen Ableitungen geht wie gewünscht hervor, dass der Nutzen zunimmt, wenn der Zeitbedarf oder die Kosten sinken, aber auch wenn die Güte zunimmt oder die Nutzerzahl steigt, vorausgesetzt die Gewichtungsfaktoren $\zeta^\alpha, \kappa^\alpha, \gamma^\alpha$ und θ^α sind jeweils positiv:

$$\frac{\partial u_i^\alpha(\boldsymbol{s})}{\partial Z_i^\alpha(\boldsymbol{s})} = -\zeta^\alpha, \quad \frac{\partial u_i^\alpha(\boldsymbol{s})}{\partial K_i^\alpha(\boldsymbol{s})} = -\kappa^\alpha, \quad \frac{\partial u_i^\alpha(\boldsymbol{s})}{\partial G_i^\alpha(\boldsymbol{s})} = \gamma^\alpha \quad \text{und} \quad \frac{\partial u_i^\alpha(\boldsymbol{s})}{\partial n_i^\alpha(\boldsymbol{s})} = \theta^\alpha \tag{5.22}$$

Damit lassen sich für die elementaren Entwicklungsschritte (5.16) und (5.17) folgende Übergangsraten angeben:

$$\mathrm{w}_{01}^\alpha(\boldsymbol{n}_{01}^\alpha, \boldsymbol{n}; \ldots) = \nu^\alpha n_1^\alpha \exp\left\{u_0^\alpha(\boldsymbol{n}_{01}^\alpha, \ldots) - u_1^\alpha(\boldsymbol{n}, \ldots)\right\} \tag{5.23}$$

$$\mathrm{w}_{10}^\alpha(\boldsymbol{n}_{10}^\alpha, \boldsymbol{n}; \ldots) = \nu^\alpha n_0^\alpha \exp\left\{u_1^\alpha(\boldsymbol{n}_{10}^\alpha, \ldots) - u_0^\alpha(\boldsymbol{n}, \ldots)\right\} \tag{5.24}$$

Der konstante Faktor ν^α stellt eine Art Wechselbereitschaft dar und beinhaltet die Annahme, dass der Verkehrssystemwechsel für jede Subpopulation eventuell unterschiedlich aber zumindest in beide Richtungen mit derselben Flexibilität verläuft.

In der Differenz der Nutzenfunktionen der beiden Verkehrssysteme kann der Term $\frac{\theta^\alpha}{N^\alpha}$ bei hinreichend großen N^α vernachlässigt werden:

$$\begin{aligned} &u_0^\alpha(\boldsymbol{n}_{01}^\alpha, \ldots) - u_1^\alpha(\boldsymbol{n}, \ldots) = \\ &-\zeta^\alpha \left[Z_0^\alpha - Z_1^\alpha \right] - \kappa^\alpha \left[K_0^\alpha - K_1^\alpha \right] + \gamma^\alpha \left[G_0^\alpha - G_1^\alpha \right] + \theta^\alpha \left[\frac{n_0^\alpha + 1}{N^\alpha} - \frac{n_1^\alpha}{N^\alpha} \right] \end{aligned} \tag{5.25}$$

Dies ermöglicht eine einfachere Schreibweise für die Nutzendifferenz und folglich für die Übergangsraten (5.23) und (5.24):

$$\mathrm{w}_{01}^\alpha(\boldsymbol{s}) = \nu^\alpha n_1^\alpha \; e^{\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} \tag{5.26}$$

$$\mathrm{w}_{10}^\alpha(\boldsymbol{s}) = \nu^\alpha n_0^\alpha \; e^{-\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} \tag{5.27}$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta u^\alpha(\boldsymbol{s}) &= u_0^\alpha(\boldsymbol{s}) - u_1^\alpha(\boldsymbol{s}) = u_0^\alpha(\boldsymbol{n}_{01}^\alpha, \ldots) - u_1^\alpha(\boldsymbol{n}, \ldots) \\ -\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s}) &= u_1^\alpha(\boldsymbol{s}) - u_0^\alpha(\boldsymbol{s}) = u_1^\alpha(\boldsymbol{n}_{10}^\alpha, \ldots) - u_0^\alpha(\boldsymbol{n}, \ldots) \end{aligned} \tag{5.28}$$

5.3. Entwicklungsgleichungen

Die Mastergleichung lässt sich nun mit Hilfe der Übergangsraten (5.26) und (5.27) wie folgt aufstellen:

$$\begin{aligned} \frac{dP(\boldsymbol{n}, \ldots; t)}{dt} = &+ \sum_\alpha \Big\{ \mathrm{w}_{01}^\alpha(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}_{10}^\alpha; \ldots) P(\boldsymbol{n}_{10}^\alpha, \ldots; t) + \mathrm{w}_{10}^\alpha(\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}_{01}^\alpha; \ldots) P(\boldsymbol{n}_{01}^\alpha, \ldots; t) \Big\} \\ &- \sum_\alpha \Big\{ \mathrm{w}_{10}^\alpha(\boldsymbol{n}_{10}^\alpha, \boldsymbol{n}; \ldots) P(\boldsymbol{n}, \ldots; t) + \mathrm{w}_{01}^\alpha(\boldsymbol{n}_{01}^\alpha, \boldsymbol{n}; \ldots) P(\boldsymbol{n}, \ldots; t) \Big\} \end{aligned} \tag{5.29}$$

Diese Mastergleichung besitzt im Vergleich zur allgemeinen Mastergleichung (2.29) der Soziodynamik eine deutlich einfachere Struktur. Ihre Lösung gestaltet sich aber gleichsam schwierig.

Der Argumentation aus Kapitel 2.3.2 folgend, wird zur Analyse der Dynamik eines sozialen Systems in den meisten Fällen allerdings nicht auf die Mastergleichung sondern eher auf Quasimittelwertgleichungen zurückgegriffen. Diese stellen sich hierbei folgendermaßen dar:

$$\frac{d\hat{n}_0^\alpha(t)}{dt} = \mathrm{w}_{01}^\alpha(\hat{\boldsymbol{n}}_{01}^\alpha, \hat{\boldsymbol{n}}; \ldots) - \mathrm{w}_{10}^\alpha(\hat{\boldsymbol{n}}_{10}^\alpha, \hat{\boldsymbol{n}}; \ldots) = \mathrm{w}_{01}^\alpha(\hat{\boldsymbol{s}}) - \mathrm{w}_{10}^\alpha(\hat{\boldsymbol{s}}) \tag{5.30}$$

$$\frac{d\hat{n}_1^\alpha(t)}{dt} = \mathrm{w}_{10}^\alpha(\hat{\boldsymbol{n}}_{10}^\alpha, \hat{\boldsymbol{n}}; \ldots) - \mathrm{w}_{01}^\alpha(\hat{\boldsymbol{n}}_{01}^\alpha, \hat{\boldsymbol{n}}; \ldots) = \mathrm{w}_{10}^\alpha(\hat{\boldsymbol{s}}) - \mathrm{w}_{01}^\alpha(\hat{\boldsymbol{s}}) \tag{5.31}$$

Zur Vereinfachung der Notation wird im Folgenden auf die Hütchen auf den Variablen verzichtet. Da die Variablen n_0^α und n_1^α über Gleichung (5.4) nicht unabhängig voneinander sind, müssen sie folgende Kontinuitätsgleichung erfüllen:

$$0 = \frac{dN^\alpha}{dt} = \frac{dn_0^\alpha}{dt} + \frac{dn_1^\alpha}{dt} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{dn_0^\alpha}{dt} = -\frac{dn_1^\alpha}{dt} \tag{5.32}$$

Aus diesem Grund ist es ausreichend nur eine Bewegungsgleichung zu untersuchen, da die Lösung der Zweiten keine weiteren Informationen offenbart. Deshalb wird die Variable x^α eingeführt, die die Verteilung der Mitglieder der verschiedenen Subpopulationen auf die beiden Verkehrssysteme angibt:

$$x^\alpha := \frac{n_0^\alpha - n_1^\alpha}{N^\alpha} \quad \Rightarrow \quad -1 \leq x^\alpha \leq +1 \tag{5.33}$$

Das bedeutet:

$x^\alpha = +1$: Alle Mitglieder von $\mathcal{P}^\alpha$ nutzen das *etablierte* Verkehrssystem

$x^\alpha = -1$: Alle Mitglieder von $\mathcal{P}^\alpha$ nutzen das *neue* Verkehrssystem

Im Zuge dessen können die Variablen n_0^α und n_1^α folgendermaßen ersetzt werden:

$$n_0^\alpha = \frac{N^\alpha}{2}\,(1 + x^\alpha) \tag{5.34}$$

$$n_1^\alpha = \frac{N^\alpha}{2}\,(1 - x^\alpha) \tag{5.35}$$

Nach diesen Vorüberlegungen kann man nun die Quasimittelwertgleichungen (5.30) und (5.31) für jede Subpopulation $\mathcal{P}^\alpha$ weiter vereinfachen. Im Folgenden wird dies nur für Gleichung (5.31) gezeigt, da die Umformung von Gleichung (5.31) dasselbe Ergebnis liefert:

$$\frac{dn_0^\alpha}{dt} = \mathrm{w}_{01}^\alpha(\boldsymbol{s}) - \mathrm{w}_{10}^\alpha(\boldsymbol{s})$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{dn_0^\alpha}{dt} = \nu^\alpha n_1^\alpha \; e^{\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} - \nu^\alpha n_0^\alpha \; e^{-\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})}$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{d}{dt}\left[\frac{N^\alpha}{2}\,(1+x^\alpha)\right] = \nu^\alpha \left[\frac{N^\alpha}{2}\,(1-x^\alpha)\;\; e^{\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} - \frac{N^\alpha}{2}\,(1+x^\alpha)\;\; e^{-\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})}\right] \tag{5.36}$$

Damit besitzen die Quasimittelwertgleichungen dieses Verkehrsmodells letztendlich folgende Form:

$$\frac{dx^\alpha}{dt} = \nu^\alpha \Big[(1-x^\alpha)\;\; e^{\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} - (1+x^\alpha)\;\; e^{-\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})}\Big] \tag{5.37}$$

mit

$$\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s}) = -\zeta^\alpha\big[Z_0^\alpha(\boldsymbol{s}) - Z_1^\alpha(\boldsymbol{s})\big] - \kappa^\alpha\big[K_0^\alpha(\boldsymbol{s}) - K_1^\alpha(\boldsymbol{s})\big] + \gamma^\alpha\big[G_0^\alpha(\boldsymbol{s}) - G_1^\alpha(\boldsymbol{s})\big] + \theta^\alpha\big[x^\alpha\big] \tag{5.38}$$

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass über Gleichung (5.37) lediglich die Dynamik der Soziokonfiguration beschreiben wird. Oftmals sind die Kontroll- bzw. Trendparameter $\boldsymbol{e}$, $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{f}$, $\boldsymbol{v}$, $\boldsymbol{k}$ und $\boldsymbol{g}$ jedoch nicht konstant und besitzen damit eine eigene Dynamik. Diese ist entweder exogen oder hängt selber wiederum von der Systementwicklung ab. In den meisten Fällen kann die Dynamik der Parameter allerdings ebenfalls durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben werden, wodurch dann ein System von gekoppelten Differentialgleichungen entsteht, das es zu lösen gilt.

6. Exkurs: Differentialgleichungen

Die in den Kapiteln 2 und 5 auftretenden Differentialgleichungssysteme der Quasimittelwertgleichungen lassen sich oftmals nicht analytisch lösen. Aus diesem Grund wird in diesem Exkurs mit dem klassischen Runge-Kutta-Verfahren ein anerkanntes numerisches Lösungsverfahren vorgestellt, das später auch in den Computersimulationen verwendet wird. Zunächst werden zur Einführung ein paar allgemeine Grundlagen zu Differentialgleichungen beschrieben.

6.1. Gewöhnliche Differentialgleichungen

Unter einer Differentialgleichung (DGL) versteht man eine Gleichung, in welcher unabhängige Variablen, Funktionen und Ableitungen von Funktionen auftreten [58]. Differentialgleichungen für Funktionen einer *einzigen* Variablen werden *gewöhnliche Differentialgleichungen* genannt. Hängt die gesuchte Funktion hingegen von *mehreren* Veränderlichen ab und kommen somit partielle Ableitungen ins Spiel, liegt eine *partielle Differentialgleichung* vor. Im Folgenden sind die Ausführungen allerdings auf gewöhnliche Differentialgleichungen beschränkt, da in Kapitel 2 lediglich totale Ableitungen nach der Zeit vorkommen.

Viele physikalische Gesetze können mittels Differentialgleichungen formuliert werden. Ein einfaches Beispiel hierfür ist die Beschreibung des radioaktiven Zerfalls. Dieser genügt folgendem Gesetz: „Die Zerfallsgeschwindigkeit ist proportional zu $N(t)$, der Anzahl der radioaktiven Atome zur Zeit t.“ Das bedeutet:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -kN(t) \qquad \text{mit } k > 0 : \text{Proportionalitätskonstante} \tag{6.1}$$

Man kann leicht nachprüfen, dass die Lösung von Gleichung (6.1) folgende Gestalt hat:

$$N(t) = N(s)\ \mathrm{e}^{-k(t-s)} \qquad \text{mit } N(s) > 0 : \text{Anfangswert zur Zeit } s \in \mathbb{R} \tag{6.2}$$

Gleichung (6.1) ist eine *Differentialgleichung erster Ordnung*, da nur erste und keine höheren Ableitungen auftreten. Generell ist die Ordnung einer Differentialgleichung über die Ordnung der höchsten Ableitung definiert [24]. Somit besitzt ein *System von m gewöhnlichen Differentialgleichungen der Ordnung n* folgende allgemeine Form:

$$F(x, y, y', \ldots, y^{(n)}) = 0 \tag{6.3}$$

mit $F : U \to \mathbb{R}^m$, $y : I \to \mathbb{R}^m$, $U \subseteq I \times (\mathbb{R}^m)^{n+1}$, $I \subseteq \mathbb{R}$ offen, m und $n \in \mathbb{N}$.

Ist $m = 1$, reduziert sich dieses System auf eine Differentialgleichung n-ter Ordnung. Diese nennt man *explizit*, wenn man sie nach der höchsten Ableitung auflösen kann, also

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \ldots, y^{(n-1)}), \tag{6.4}$$

sonst *implizit* [58]. In den meisten Fällen sind explizite Differentialgleichungen einfacher zu behandeln als implizite. Eine explizite gewöhnliche Differentialgleichung beliebiger Ordnung $n \in \mathbb{N}$ lässt sich beispielsweise immer durch Einführung von Hilfsfunktionen auf ein System von n gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung zurückführen:

$$\begin{aligned} y &= y_1 \\ y_1' &= y_2 \\ &\vdots \\ y_n' &= f(x, y_1, y_2, \ldots, y_n) \end{aligned} \tag{6.5}$$

Die reellwertige Funktion $y = y(x)$, $y : I \to \mathbb{R}^m$ bezeichnet man als *Lösung* oder *Integral* von (6.3) auf dem Intervall $J \subseteq I$, wenn sie in J n-mal differenzierbar ist und für jedes $x \in J$ sowohl $(x, y(x)) \in U$ als auch

$$F(x, y(x), y'(x), \ldots, y^n(x)) \equiv 0 \tag{6.6}$$

gilt.

In der Regel besitzt eine Differentialgleichung, sofern sie überhaupt lösbar ist, unendlich viele Lösungen $y(x)$. Ist allerdings ein ausreichender Satz an Anfangswerten gegeben, reduziert sich diese Lösungsschar im Fall der Eindeutigkeit auf eine spezielle Lösung. Man spricht dabei von einem so genannten *Anfangswertproblem* (AWP):

$$\begin{aligned} &F(x, y, y', \ldots, y^{(n)}) = 0 \\ &y^{(i)}(x_0) = y_i \qquad \text{mit } i = 0, \ldots, n-1 \end{aligned} \tag{6.7}$$

Die Lösbarkeit von beliebigen Anfangswertproblemen ist generell nicht gegeben. Bei Anfangswertproblemen mit gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \tag{6.8}$$

kann jedoch bei stetiger rechter Seite $f(x, y)$ mit dem Satz von Peano zumindest lokal die Existenz einer Lösung gezeigt werden. Ist neben Stetigkeit noch gegeben, dass $f(x, y)$ einer in der Praxis fast immer erfüllten Lipschitzbedingung bzgl. y genügt, dann kann über den Satz von Picard-Lindelöf zur Existenz einer Lösung sogar deren Eindeutigkeit bewiesen werden [24]. Die Lipschitzbedingung bzgl. y fordert an $f(x, y)$, dass eine Konstante $L \geq 0$ existiert, so dass für jedes $x \in I$ und die Punkte $y_1, y_2 \in \mathbb{R}^m$ mit $(x, y_1), (x, y_2) \in U$ folgende Ungleichung erfüllt ist:

$$\|f(x, y_1) - f(x, y_2)\| \leq L \cdot \|y_1 - y_2\| \tag{6.9}$$

6.2. Das Runge-Kutta-Verfahren

Häufig kann analytisch für ein gegebenes Anfangswertproblem keine Lösung angegeben werden. In diesem Fall kann man oftmals zumindest eine Näherungslösung mit numerischen Lösungsverfahren berechnen. Die Differentialgleichung wird dabei über eine Diskretisierung approximiert. Dazu werden Einschritt- oder lineare Mehrschrittverfahren verwendet. Erstere benutzen im Gegensatz zu den Mehrschrittverfahren zur Berechnung der Näherungslösung im nächsten Punkt ausschließlich Daten des aktuellen Punkts. Neben dem Eulersches Polygonzugverfahren sind die Runge-Kutta-Verfahren die wichtigste Klasse der Einschrittverfahren.

Im Folgenden wird das so genannte *klassische Runge-Kutta-Verfahren* vorgestellt (vergleiche [24] und [67]), da dieses Verfahren erfahrungsgemäß einen guten Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Näherungslösung und der Anzahl der Berechnungen und damit der Berechnungszeit darstellt. In diesem Verfahren werden Ableitungen durch endliche Differenzenquotienten ersetzt. Als Konsequenz treten bei nichtlinearen Funktionen allerdings Fehler auf. Durch eine geeignete Kombination verschiedener Differenzquotienten versucht man diese entsprechend zu kompensieren.

Gegeben sei ein Anfangswertproblem einer expliziten gewöhnlichen Differentialgleichung erster Ordnung:

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0 \tag{6.10}$$

Dazu sei angenommen, dass $f(x, y)$ stetig und beschränkt ist und einer Lipschitzbedingung bzgl. y genügt. Dies sichert die Existenz und die Eindeutigkeit einer Lösung. Darüber hinaus sei eine Schrittweite h gegeben. Ausgehend von den Anfangswerten x_0 und y_0 und damit dem Startpunkt (x_0, y_0) ist das Ziel eine möglichst genaue Näherung des nächsten Punkts (x_1, y_1) mit $x_1 = x_0 + h$. Dazu wird im ersten Schritt zunächst mit der Differentialgleichung die Steigung im Punkt (x_0, y_0) berechnet (siehe Abbildung 6.1 (a)):

$$k_1 = f(x_0, y_0) \tag{6.11}$$

Dies ist die erste Hilfssteigung. Damit geht man im zweiten Schritt geradlinig weiter bis zur Schrittmitte und berechnet an dieser Stelle $(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{h}{2}k_1)$ wiederum mit der Differentialgleichung die zweite Hilfssteigung (siehe Abbildung 6.1 (b)):

$$k_2 = f(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{h}{2}k_1) \tag{6.12}$$

Ausgehend vom Startpunkt wiederholt man den vorherigen Schritt. Dieses Mal allerdings mit der zweiten Hilfssteigung k_2 (siehe Abbildung 6.1 (c)):

$$k_3 = f(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{h}{2}k_2) \tag{6.13}$$

Anschließend geht man im vierten Schritt wiederum vom Startpunkt mit der dritten Hilfssteigung k_3 bis zum Ende des Intervalls, um an diesem Punkt $(x_0 + h, y_0 + hk_3)$ die vierte Hilfssteigung zu berechnen (siehe Abbildung 6.1 (d)):

$$k_4 = f(x_0 + h, y_0 + hk_3) \tag{6.14}$$

Aus diesen vier Hilfssteigungen wird nun ein Mittelwert k gebildet. Dabei werden die Hilfssteigungen so kombiniert, dass an der Stelle x_1 der Näherungswert $y_1 = y_0 + hk$ mit der exakten Lösung $y(x_1)$ bei der Taylor-Entwicklung von x_0 aus in möglichst vielen Potenzen von h übereinstimmt:

$$k = \frac{1}{6}\left(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4\right) \tag{6.15}$$

Damit ergibt sich schließlich der Punkt (x_1, y_1) zu:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + h \\ y_1 &= y_0 + hk = y_0 + \frac{h}{6}\left(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4\right) \end{aligned} \tag{6.16}$$

Dieser durch den ersten Durchlauf des Verfahrens berechnete Punkt dient nun als nächster Ausgangspunkt.

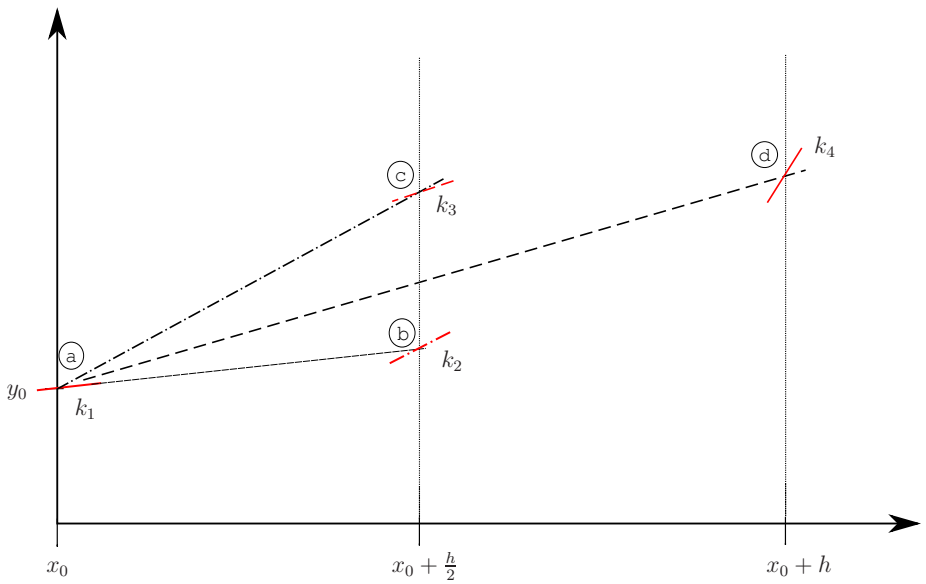


Abbildung 6.1.: Die Hilfssteigungen des Runge-Kutta-Verfahrens. Quelle: Peter Böhme, MPI für Plasmaphysik in Garching.

Der Fehler des Runge-Kutta-Verfahrens liegt bei genügend glattem $f(x, y)$ in der Größenordnung von h^5. Das bedeutet, dass die erzielte Genauigkeit in hohem Maße von der Wahl der Schrittweite abhängt. Kleine Schrittweiten liefern ein sehr genaues Ergebnis, erfordern aber viele Rechenschritte. Eine Erhöhung der Schrittweite reduziert zwar die Rechenschritte, lässt aber auch den Fehler rapide ansteigen. Demzufolge ist die richtige

Schrittweitenwahl von entscheidender Bedeutung. Über eine permanente Anpassung der Schrittweite kann demnach die Genauigkeit und die Effizienz des Verfahrens optimiert werden. Dabei spielt das Krümmungsverhalten von $f(x, y)$ eine entscheidende Rolle. Während der Berechnung kann dies über die Differenz der beiden Hilfssteigungen k_2 und k_3 beobachtet werden, da sich darüber die Abhängigkeit der Funktion $f(x, y)$ von y bei gleich bleibendem x widerspiegelt.

Als eine Möglichkeit der automatischen Schrittweitensteuerung schlägt Zurmühl [67] den Vergleich der Ergebnisse einer feinen Rechnung y_{fein} mit Schrittweite h und einer groben Rechnung y_{grob} mit der doppelten Schrittweite $2h$ vor. Dieses Vorgehen ist zwar etwas aufwendig, kann dafür aber auch bei Systemen von Differentialgleichungen problemlos angewendet werden. Bei hinreichend kleiner Schrittweite h kann man davon ausgehen, dass der Fehler der groben Rechnung etwa $(2h)^5 = 32h^5$ beträgt. Um mit der feinen Rechnung an dieselbe Stelle zu gelangen, sind insgesamt zwei Schritte notwendig. Dabei kommt es annähernd zu einer Verdopplung des Fehlers der feinen Rechnung, also etwa $2h^5$. Der Fehler der groben Rechnung ist somit ungefähr 16-mal so groß wie der der Feinen. Damit beträgt der Unterschied zwischen Grob- und Feinrechnung etwa das 15-fache des Fehlers der Feinrechnung δy:

$$\delta y \simeq \frac{1}{15}\left(y_{grob} - y_{fein}\right) \tag{6.17}$$

Mit dem so ermittelten Fehler der Feinrechnung geht man bei der Schrittweitensteuerung nach der Wahl einer Fehlertoleranz ϵ folgendermaßen vor:

$$\begin{aligned} \text{Falls } 0{,}15\epsilon < |\delta y| < 10\epsilon: &\ \text{Beibehalten von } h, \\ \text{falls } |\delta y| \geq 10\epsilon: &\ \text{Halbieren von } h, \\ \text{falls } |\delta y| \leq 0{,}15\epsilon: &\ \text{Verdoppeln von } h. \end{aligned} \tag{6.18}$$

Darüber hinaus lässt sich das klassische Runge-Kutta-Verfahren auch auf Systeme von Differentialgleichungen übertragen [67]. Beispielhaft wird dies nun an einem System zweier gekoppelter Differentialgleichungen erster Ordnung für zwei von der unabhängigen Variablen x abhängenden Variablen $y(x)$ und $z(x)$ gezeigt:

$$\begin{aligned} y' &= f(x, y, z), \quad y(x_0) = y_0 \\ z' &= g(x, y, z), \quad z(x_0) = y_0 \end{aligned} \tag{6.19}$$

Für dieses Anfangswertproblem sollen nun die Näherungslösungen $y(x)$ und $z(x)$ bestimmt werden. Die Funktionen $f(x, y, z)$ und $g(x, y, z)$ seien stetig, beschränkt und genügen jeweils Lipschitz-Bedingungen. Nun können ausgehend vom Startpunkt (x_0, y_0, z_0) analog zu obigem Verfahren mit der gegebenen Schrittweite h wiederum die Hilfssteigungen sowie deren Mittelwert berechnet werden:

$$
\begin{aligned}
k_1^{(1)} &= f(x_0, y_0, z_0) & k_1^{(2)} &= g(x_0, y_0, z_0) \\
k_2^{(1)} &= f(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{h}{2}k_1^{(1)}, z_0 + \frac{h}{2}k_1^{(2)}) & k_2^{(2)} &= g(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{h}{2}k_1^{(1)}, z_0 + \frac{h}{2}k_1^{(2)}) \\
k_3^{(1)} &= f(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{h}{2}k_2^{(1)}, z_0 + \frac{h}{2}k_2^{(2)}) & k_3^{(2)} &= g(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{h}{2}k_2^{(1)}, z_0 + \frac{h}{2}k_2^{(2)}) \\
k_4^{(1)} &= f(x_0 + h, y_0 + hk_3^{(1)}, z_0 + hk_3^{(2)}) & k_4^{(2)} &= g(x_0 + h, y_0 + hk_3^{(1)}, z_0 + hk_3^{(2)}) \\
\\
k^{(1)} &= \frac{1}{6}\left(k_1^{(1)} + 2k_2^{(1)} + 2k_3^{(1)} + k_4^{(1)}\right) & k^{(2)} &= \frac{1}{6}\left(k_1^{(2)} + 2k_2^{(2)} + 2k_3^{(2)} + k_4^{(2)}\right)
\end{aligned}
\tag{6.20}
$$

Anschließend kann mit diesen Werten analog zu Schritt (6.16) der Punkt (x_1, y_1, z_1) berechnet werden, der wiederum als nächster Ausgangspunkt dient:

$$x_1 = x_0 + h, \qquad y_1 = y_0 + hk^{(1)}, \qquad z_1 = y_0 + hk^{(2)} \tag{6.21}$$

Eine Schrittweitensteuerung ist auch bei der numerischen Lösung von Differentialgleichungssystemen empfehlenswert. Wie im Falle einer Differentialgleichung ist dazu die näherungsweise Schätzung des Fehlers durch einen Vergleich mit einer Rechnung doppelter Schrittweite möglich. Dieser ergibt sich analog zu (6.17) für die beiden Variablen y und z aus obigem Beispiel:

$$\delta y \simeq \frac{1}{15}\left(y_{grob} - y_{fein}\right), \qquad \delta z \simeq \frac{1}{15}\left(z_{grob} - z_{fein}\right) \tag{6.22}$$

Das in der Entscheidungsregel (6.18) auftretende $|\delta y|$ wird nun allerdings durch den maximalen Betrag der Fehler δy und δz ersetzt:

$$\delta = \max\left(|\delta y|, |\delta z|\right) \tag{6.23}$$

7. Anwendung des Verkehrsmodells auf die Verbindung Paris - Marseille

Nachfolgend wird untersucht, ob das Verkehrsmodell aus Kapitel 5, das mit Hilfe der soziodynamischen Theorie entwickelt wurde, eine reale Verkehrssituation hinreichend gut beschreiben kann. Dazu wurde die Verbindung der beiden französischen Städte Paris und Marseille ausgewählt.

7.1. Darstellung der Verkehrssituation

Seit 2001 ist es möglich mit dem TGV von Paris über Lyon nach Marseille und zurück zu fahren. Diese TGV-Strecke setzt sich insgesamt aus drei Schnellfahrstrecken – franz.: „lignes à grande vitesse“ (LGV) – zusammen: der LGV Sud-Est, der LGV Rhône-Alpes und der LGV Méditerranée (siehe Abbildung 7.1). Die LGV Sud-Est wurde 1981 eröffnet und ist damit die erste Schnellfahrstrecke Frankreichs. Sie verbindet Paris und Lyon und ist insgesamt 427 km lang [62]. Zwischen 1990 und 1994 wurde sie von Lyon bis Valence mit der LGV Rhône-Alpes verlängert. Zudem wurde östlich von Lyon eine Umfahrung gebaut, damit der TGV auch ohne Halt in Lyon mit unverminderter Geschwindigkeit weiter fahren kann. Daran schließt sich seit 2001 die LGV Méditerranée an. Sie führt über eine Abzweigung bei Avignon sowohl nach Marseille als auch nach Nîmes. Insgesamt benötigt der TGV für die 749 km lange Strecke von Paris nach Marseille etwa 3 Stunden [6]. Damit ist nach Dünbier der TGV auf dieser Strecke im Vergleich zum Flugzeug konkurrenzfähig und eine Rückreise ist noch am selben Tag möglich [17].

Vor der Eröffnung der TGV-Strecke konnte man sich zwischen Flugzeug und Auto entscheiden, wenn man von Marseille über Lyon nach Paris oder umgekehrt fahren wollte. Mit dem Auto muss dazu eine Strecke von etwa 775 km zurücklegt werden, wofür die

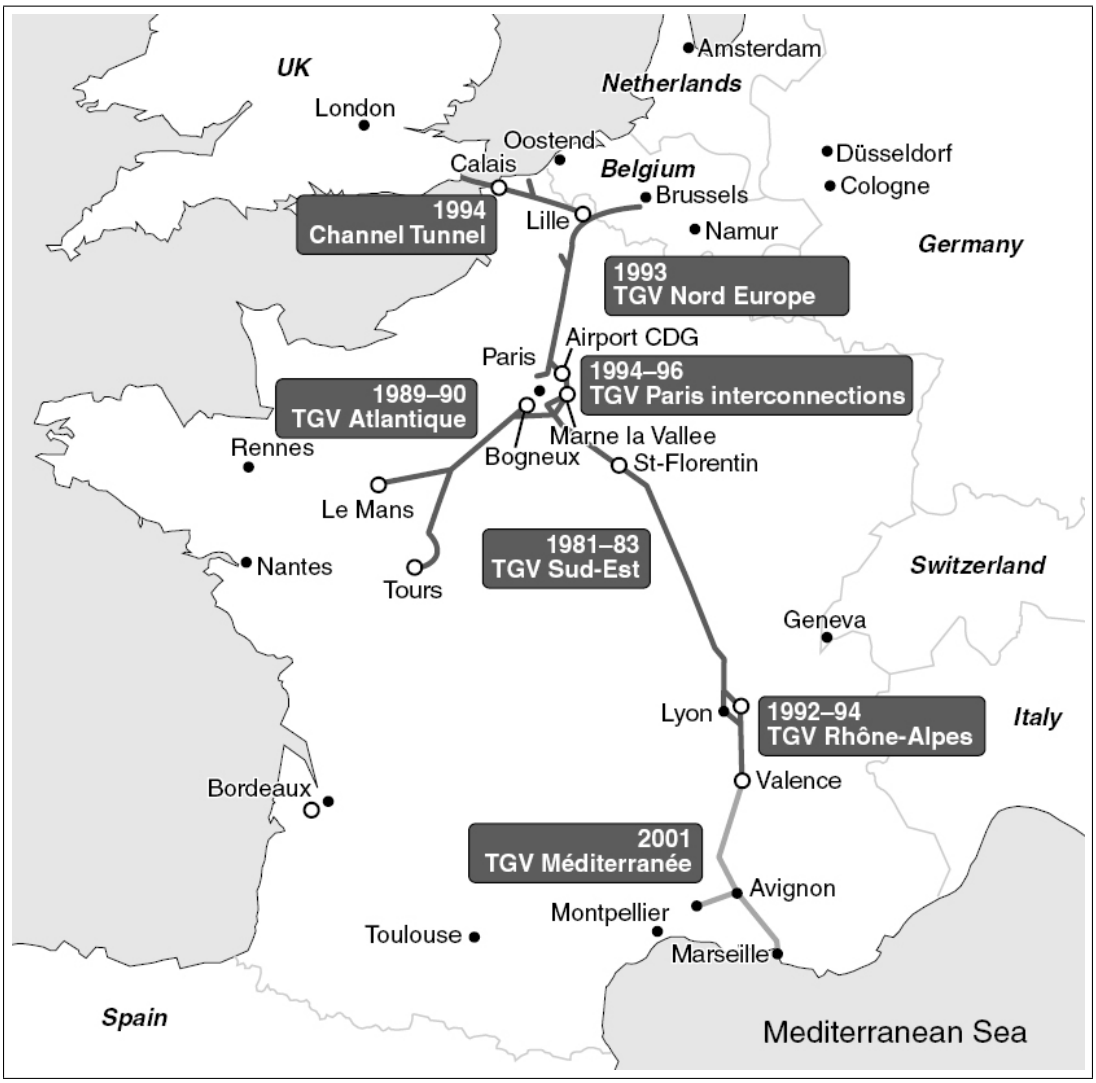


Abbildung 7.1.: Die Schnellfahrstrecken des TGV. Quelle: [6]

reine Fahrzeit ohne Pausen bei ungefähr 7 Stunden liegt [21]. Somit gehört diese Verbindung zum Mittelstreckenbereich, der schon überwiegend vom Flugzeug dominiert wird (vergleiche Abbildung 3.8). Folglich kann man annehmen, dass der Anteil des Autos am Modal-Split dieser Verbindung sehr gering und dass das Auto in diesem Zusammenhang eher vernachlässigbar ist. Das bedeutet, dass die Reisenden vor dem Bau der TGV-Verbindung hauptsächlich auf das Flugzeug zurückgegriffen haben. Danach hat sich dies allerdings schlagartig geändert (siehe Abbildungen 7.2 und 7.3). So besitzt der TGV auf dieser Strecke mittlerweile einen Marktanteil von rund 70% [61]. Generell ist festzustellen, dass der TGV bei Verbindungen mit einer Fahrzeit von bis zu viereinhalb Stunden gegenüber Auto und Flugzeug auf einen Marktanteil von mehr als 50% kommt. Damit

stellt der TGV auf Mittelstrecken eine ernstzunehmende Konkurrenz zum Flugzeug dar [14]. Infolgedessen mussten schon einige Flugverbindungen aus wirtschaftlichen Gründen ganz eingestellt werden.

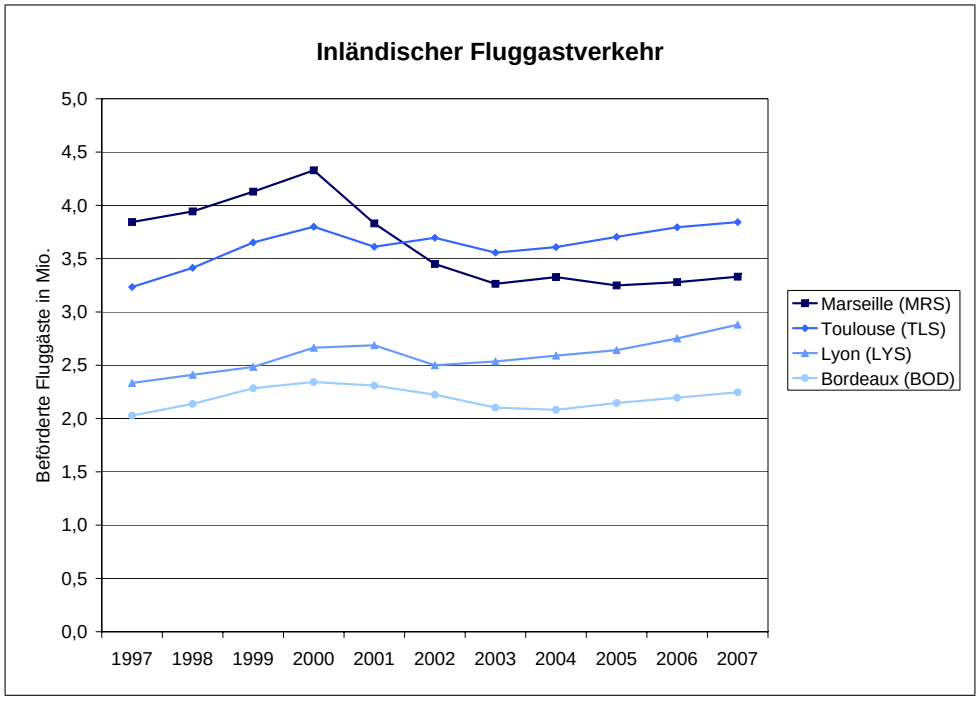


Abbildung 7.2.: Der inländische Fluggastverkehr ausgewählter französischer Flughäfen: MRS: Marseille Provence / TLS: Toulouse Blagnac / LYS: Lyon Saint-Exupery / BOD: Bordeaux Merignac. Quelle: Eurostat [18]

Der Flughafen Marseille Provence (MRS) ist nach Nizza Côte d'Azur und Lyon Saint Exupéry der drittgrößte Flughafen Frankreichs außerhalb von Paris in Bezug auf Passagiere und Fracht. Die Fluggesellschaft Air France hat dort den größten Anteil der Flüge. Wie in Abbildung 7.2 zu sehen ist, kam es nach der Eröffnung der LGV Méditerranée im Jahre 2001 in Verbindung mit den Terroranschlägen des 11. September 2001 zu einem Einbruch der Passagierzahlen des Marseiller Flughafens. Auch andere französische Flughäfen spürten den Einfluss der Terroranschläge, haben sich davon aber über die Jahre wieder erholt.

Betrachtet man speziell die Anzahl der beförderten Fluggäste der Strecke Paris - Marseille, ist deutlich zu erkennen, dass sich die Passagierzahlen der Flugverbindung Paris Charles de Gaulle - Marseille Provence nach 2001 nur gering änderten, wobei sie hingegen auf der Verbindung Paris Orly - Marseille Provence von 2000 bis 2007 um 48% zurück gegangen sind (siehe Abbildung 7.3). Dies lässt sich dadurch erklären, dass der

Flughafen Paris Charles de Gaulle eher als Zwischenstation für internationale Flüge und Paris Orly vor allem dem Inlandsverkehr dient. Das bedeutet, dass der TGV als Inlandsverkehrsmittel hauptsächlich der Flugverbindung Marseille Provence - Paris Orly Passagiere entzogen hat.

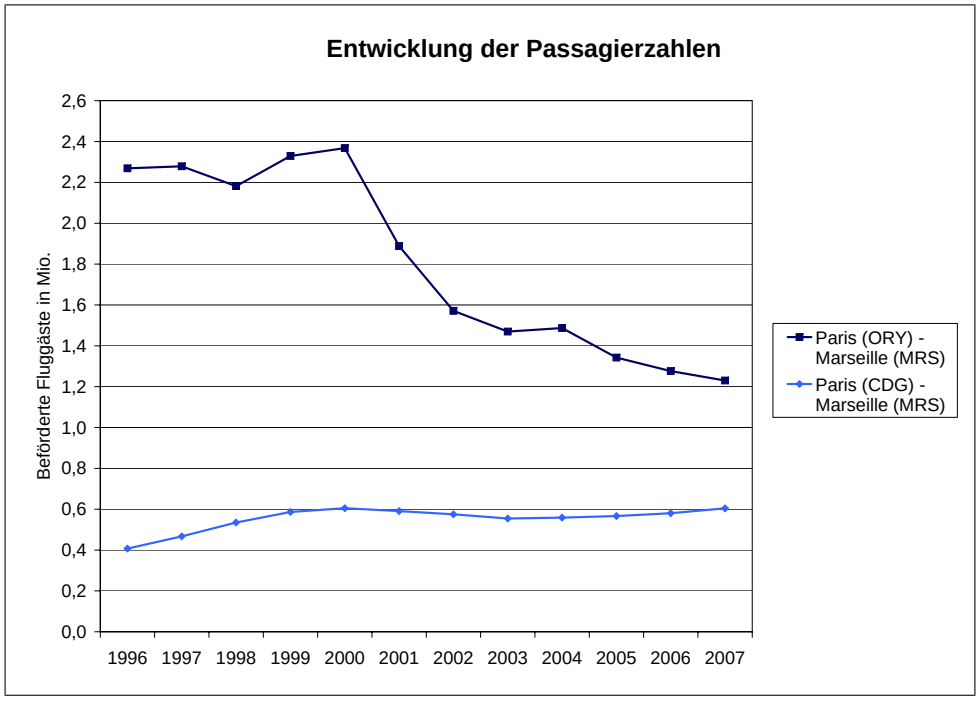


Abbildung 7.3.: Die Entwicklung der Passagierzahlen der Flugverbindung Marseille - Paris. MRS: Marseille Provence / ORY: Paris Orly / CDG: Paris Charles de Gauille. Quelle: Aéroport Marseille Provence, Direction Marketing et Communication; Eurostat [18]

Zur Hintergrundanalyse dieser Entwicklung müssen nun die Faktoren Reisezeit und Reisekosten betrachtet werden. Dazu werden mit Hilfe einer einfachen Monte-Carlo-Simulation für beide Richtungen und jeweils zehn Wochen pro Kalenderwoche fünf Wochentage mit Tageszeiten ausgewählt. Anschließend werden über die Internetseiten der Air France[1] und der SNCF[2] entsprechende Verbindungen recherchiert und die jeweiligen Reisezeiten und Ticketkosten notiert. Dabei wird jeweils auf günstige Preise und kurze Reisezeiten geachtet. Da von den Passagieren leider keine Informationen zum exakten Start- und Zielort vorliegen, werden nachfolgend Zeitbedarf und Kosten der Zu-/Abgangsphasen unter der Annahme vernachlässigt, dass sich deren Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl über alle Passagiere herausmittelt. Für den Zeitbedarf in den Übergangsphasen werden die Durchschnittswerte für Übergänge an Flughäfen und an

[1] http://www.airfrance.de
[2] http://www.tgv-europe.de

Bahnhöfen angenommen (vergleiche Kapitel 3.3.2 und 3.3.3). Im Zuge dessen lässt sich feststellen, dass trotz des hohen Zeitbedarfs in den Übergangsphasen am Flughafen das Flugzeug auf dieser Strecke im Mittel um 53 Minuten schneller ist als der TGV (siehe Tabelle 7.1). Die Standardabweichung des Zeitbedarfs für den Hauptlauf bei Flügen liegt bei etwa 3 Minuten, bei Reisen mit dem TGV bei etwa 6 Minuten.

Phase	**Flugzeug**	**TGV**
1. Zugang	0 min	0 min
2. Übergang	63 min	25 min
3. Hauptlauf	77 min	192 min
4. Übergang	34 min	10 min
5. Abgang	0 min	0 min
INSGESAMT	174 min	227 min

Tabelle 7.1.: Der Zeitbedarf der Strecke Paris - Marseille

Addiert man zu der Großkreisentfernung der beiden Flughäfen von 628 km [13] pauschal 50 km für Umwege, ergibt sich die Länge der Flugstrecke zu ungefähr 678 km. Folglich liegt die durchschnittliche Geschwindigkeit für den Hauptlauf mit dem Flugzeug bei 528 km/h. Bezieht man die Übergangsphasen mit ein, reduziert sich diese auf nur noch 234 km/h. Der TGV erreicht im Hauptlauf auf der 749 km langen Strecke im Mittel eine Geschwindigkeit von 234 km/h. Unter Berücksichtigung der Übergangsphasen liegt der TGV infolgedessen bei durchschnittlich 198 km/h.

Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Kosten für ein Flug- oder TGV-Ticket stellt man fest, dass der TGV hierbei deutliche Vorteile besitzt (siehe Tabelle 7.2). Darüber hinaus ist die Standardabweichung des Flugtickets deutlich größer als die des TGV-Tickets. Das bedeutet, dass die Preise für einen Flug insgesamt sehr unterschiedlich sein können. Dabei ist die Tendenz festzustellen, dass der Preis umso günstiger ist, je früher das Flugticket gebucht wird. Umgelegt auf die Strecken ergeben sich durchschnittlich 31 Cent/km für die Flugreise und 5 Cent/km für die Fahrt mit dem TGV.

	Mittelwert	**Standardabweichung**
Flugzeug	207 EUR	137 EUR
TGV	39 EUR	23 EUR

Tabelle 7.2.: Die Ticketkosten der Strecke Paris - Marseille

Hinsichtlich des Gütefaktors wird an dieser Stelle auf die allgemeinen Ausführungen zum Flugzeug in Kapitel 3.3.3 und zum TGV als Hochgeschwindigkeitsschienenverkehrsmittel in Kapitel 3.4.2 verwiesen. Beispielsweise wird die Energie für den elektrisch betriebenen TGV über das französische Stromnetz hauptsächlich von Atomkraftwerken bereitgestellt. Folglich ist die CO_2-Emission des TGVs im Vergleich zum kerosinbetriebenen Flugzeug deutlich geringer. Damit sammelt der TGV zunächst mehr Umweltpunkte. Ferner kann man im TGV während der Fahrt aufstehen und sich die Beine vertreten. Im Zug herrscht zudem keine Anschnallpflicht und man kann ohne Unterbrechung einen Großteil der Reisezeit zum Arbeiten nutzen. Ein weiterer Komfortvorteil des TGVs ist die zentrumsnahe Lage der Bahnhöfe Gare de Lyon in Paris und Marseille-Saint-Charles. Der Flughafen Paris Orly hingegen liegt neun Kilometer südlich von Paris und damit außerhalb, ebenso der Flughafen Marseille Provence, der sich ungefähr 20 km nordwestlich von Marseille befindet. Letztlich gilt der TGV im Vergleich zum Flugzeug auch als sicherer.

Demnach beruht der große Anteil des TGVs am Modal-Split der Verbindung Paris - Marseille und der rapide Rückgang der Passagierzahlen der Flugverbindung zwischen den Flughäfen Paris Orly und Marseille Provence bei annähernd gleichen Gesamtreisezeiten hauptsächlich auf den deutlich günstigeren Preisen des TGVs sowie einer entsprechend höher eingestuften Verkehrsmittelgüte.

7.2. Simulation mit einem Verkehrsmodell

Nun ist das Ziel, die im vorherigen Abschnitt dokumentierte Situation der Strecke Paris - Marseille, insbesondere die Entwicklung des Verkehrsaufkommens der Flugverbindung Marseille Provence - Paris Orly mit dem Verkehrsmodell aus Kapitel 5 hinreichend gut zu beschreiben. Im Zuge dessen wird das Flugzeug dem etablierten Verkehrssystem und der TGV dem neuen Verkehrssystem zugeordnet. Darüber hinaus besitzen beide Verkehrssysteme keine weiteren Verkehrsmittel. Demgemäß steht im Folgenden der Index „0“ für das Flugzeug und der Index „1“ für den TGV. Ferner wird aufgrund fehlender Informationen zu den Passagieren lediglich eine Population angenommen, die aus französischen „Durchschnittsbürgern“ besteht.

Folglich besteht die Soziokonfiguration in diesem Fall aus lediglich zwei Variablen:

$$n_0 \equiv \text{Anzahl der Verkehrsteilnehmer, die das Flugzeug nutzen} \tag{7.1}$$

$$n_1 \equiv \text{Anzahl der Verkehrsteilnehmer, die den TGV nutzen} \tag{7.2}$$

Da über die Entwicklung des gesamten Verkehrsaufkommens dieser Strecke keine Daten vorliegen, wird weiterhin angenommen, dass dieses über den gesamten Zeitraum konstant geblieben ist. Zudem werden Passagiere vernachlässigt, die ein internationales Ziel haben, da sie Paris beziehungsweise Paris Charles de Gaulle lediglich als Zwischenstation nutzen und folglich auch nach dem Bau der TGV-Verbindung hauptsächlich das Flugzeug als Transportmittel für die Reiseetappe Marseille-Paris wählten (vergleiche Abbildung 7.3).

Vor der Eröffnung der TGV-Verbindung im Jahr 2001 lag das Verkehrsaufkommen der Flugverbindung Marseille Provence - Paris Orly und infolgedessen der gesamten Verbindung bei etwa 2,37 Mio. Passagieren pro Jahr (vergleiche Abbildung 7.3). Geht man davon aus, dass jeder Verkehrsteilnehmer im Schnitt ein Mal pro Monat hin und zurück fährt bzw. fliegt, muss die Größe der Verkehrspopulation bei ungefähr 100.000 Personen liegen. Als Startzeitpunkt des Modells wird die Eröffnung der TGV-Verbindung 2001 gewählt. Dies ist sinnvoll, da die Verkehrsteilnehmer zuvor noch keine Wahlmöglichkeit aufgrund der Annahme hatten, dass der mobile Individualverkehr bei der vorliegenden Betrachtung lediglich eine untergeordnete Rolle spielt. Das bedeutet:

$$N = 100.000 = n_0(t) + n_1(t) \qquad \forall t \geq 0 \tag{7.3}$$

$$\text{mit } n_0(0) = 100.000 \tag{7.4}$$

N wird zeitlich als konstant angenommen. Somit ist es ausreichend die Dynamik des Systems wiederum über die Variable $x(t)$ zu beschreiben:

$$x(t) = \frac{n_0(t) - n_1(t)}{N} \tag{7.5}$$

$$\text{mit } x(0) = 1 \tag{7.6}$$

Die Arbeitszeit eines französischen Durchschnittsbürgers beträgt im Mittel 36 Stunden pro Woche [37]. Unter Berücksichtigung der gesetzlichen Urlaubszeit von fünf Wochen arbeitet er damit im Mittel 135 Stunden pro Monat (18,8 Tage pro Monat). Der durchschnittliche Nettolohn eines Beschäftigten liegt in Frankreich bei 21.480 Euro im Jahr und damit bei 1790 Euro pro Monat [38]. Diese Werte werden im Modell nun für die Verkehrspopulation angenommen (siehe Tabelle 7.3).

N	e	a
100.000	1790 EUR	135 h

Tabelle 7.3.: Parameter der Verkehrspopulation

Zur Berechnung der Einflussfaktoren Z_i, K_i und G_i der Nutzenfunktion u_i werden die Eigenschaften der beiden Verkehrsmittel den Ausführungen des vorherigen Abschnitts entsprechend festgelegt (siehe Tabelle 7.4). Die Güte der beiden Verkehrsmittel, g_0 und g_1, wird dabei so gewählt, dass G_0 und G_1 im Vergleich mit den anderen Faktoren jeweils in der selben Größenordnung liegen. Zudem wird angenommen, dass die Verkehrsmittelgüte des TGVs aus oben genannten Gründen etwa doppelt so groß ist.

	f_i	v_i	k_i	g_i
Flugzeug (i=0)	1356 km	234 km/h	31 ct/km	0,05
TGV (i=1)	1498 km	198 km/h	5 ct/km	0,10

Tabelle 7.4.: Parameter der beiden Verkehrsmittel

Schließlich kann nach der Festlegung der Gewichtungsfaktoren und der Wechselbereitschaft die Quasimittelwertgleichung dieses Verkehrsmodells analog zu Gleichung (5.37) aufgestellt werden. Dazu wird der Gewichtungsfaktor θ so gewählt, dass der Gewohnheitsfaktor θx einen mit den anderen Faktoren vergleichbaren Einfluss auf die Nutzenfunktion u_i hat. Weiterhin wird angenommen, dass dem Faktor Zeit als wichtigstem Faktor der Verkehrsmittelwahl im Vergleich zu den anderen Faktoren ungefähr doppelt so viel Einfluss beigemessen werden muss (siehe Tabelle 7.5).

ζ	κ	γ	θ	ν
2,0	1,0	1,0	1,0	0,2

Tabelle 7.5.: Gewichtungsfaktoren und Wechselflexibilität des Verkehrsmodells

Infolgedessen stellt sich die Quasimittelwertgleichung dieses Verkehrsmodells nun folgendermaßen dar, wobei $x(t)$ die Verteilung der Population auf die beiden Verkehrsmittel angibt (vergleiche Gleichung (5.37)):

$$\frac{dx(t)}{dt} = \nu\Big[(1-x)\,e^{\Delta u(\boldsymbol{s})} - (1+x)\,e^{-\Delta u(\boldsymbol{s})}\Big] \tag{7.7}$$

mit

$$\Delta u(\boldsymbol{s}) = -\zeta\big[Z_0(\boldsymbol{s}) - Z_1(\boldsymbol{s})\big] - \kappa\big[K_0(\boldsymbol{s}) - K_1(\boldsymbol{s})\big] + \gamma\big[G_0(\boldsymbol{s}) - G_1(\boldsymbol{s})\big] + \theta\big[x\big] \tag{7.8}$$

Hierbei handelt es sich um eine gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung mit stetiger rechter Seite. Für diese Gleichung wird mit Hilfe des klassischen Runge-Kutta-Verfahrens (siehe Kapitel 6.2) in Verbindung mit dem Anfangswert $x(0) = 1$ eine numerische Näherungslösung berechnet (siehe Abbildung 7.4).

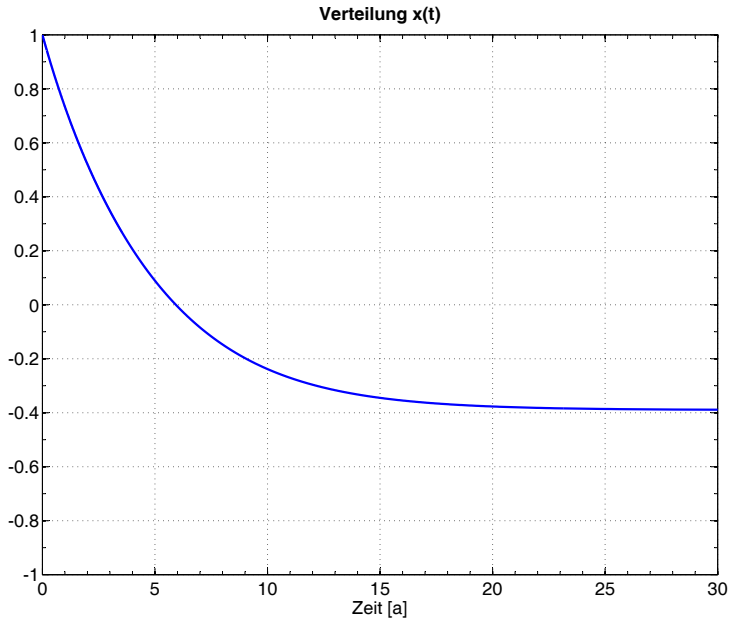


Abbildung 7.4.: Numerische Lösung der Bewegungsgleichung

Um das Modellergebnis nun mit der realen Verkehrssituation vergleichen zu können, muss die Entwicklung der Passagierzahlen des Flugzeugs aus $x(t)$, der Verteilung der Verkehrsteilnehmer auf die beiden Verkehrsmittel, ermittelt werden. Dazu bestimmt

man zunächst die Anzahl der Personen, die das Flugzeug nutzen. Anschließend wird über eine Multiplikation mit der durchschnittlichen Anzahl an Reisen das Verkehrsaufkommen der Flugverbindung berechnet. In Abbildung 7.5 ist neben dem berechneten Modellergebnis auch die reale Verkehrsentwicklung dargestellt.

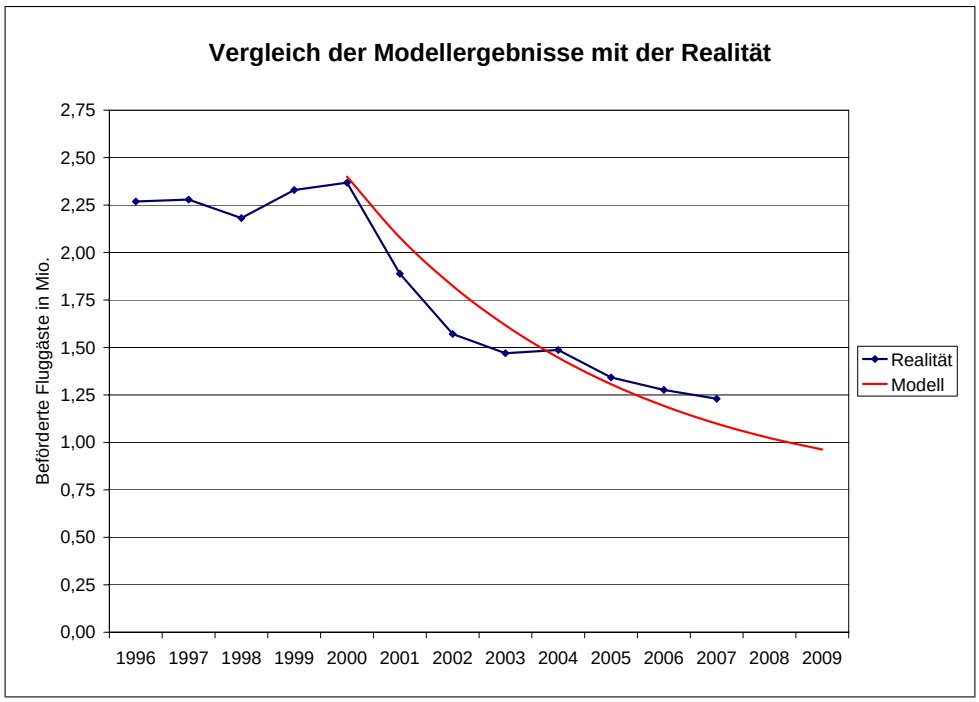


Abbildung 7.5.: Vergleich der Ergebnisse des Verkehrsmodells mit der Realität

Beide Verläufe zeigen ein ähnliches Verhalten. In den Jahren von 2001 bis 2003, also kurz nach der Eröffnung der TGV-Verbindung, liegen die tatsächlichen Passagierzahlen etwas unter dem berechneten Verlauf. Dies könnte unter anderem daran liegen, dass im Modell der Rückgang des gesamten Verkehrsaufkommens im Flugverkehr nach den Terroranschlägen des 11. September 2001 nicht berücksichtigt ist. Möchte man diese Art von Einflüssen abbilden, ist dies im Verkehrsmodell beispielsweise über eine exogene Dynamik des Gütefaktors möglich.

Ferner ist die mit dem Verkehrsmodell berechnete Passagierzahl in den Jahren 2006 und 2007 zu niedrig. Diese Differenz scheint sich tendenziell auch im weiteren Verlauf fortzusetzen. Vermutlich basiert dies auf der Annahme, dass sich das gesamte Verkehrsaufkommen dieser Verbindung über die Jahre nicht verändert. Diese Annahme ist demnach wohl nicht ganz korrekt, wurde aber aufgrund von fehlenden Informationen getroffen.

Weiterhin ist in Abbildung 7.5 ansatzweise, in Abbildung 7.4 jedoch recht deutlich zu erkennen, dass das Verkehrssystem im Modell einen stationären Zustand anstrebt. Befindet sich das System in diesem stationären Zustand x_s, dann verschwindet die rechte Seite von Gleichung (7.7). Damit kann x_s wie folgt berechnet werden:

$$\frac{dx_s}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad (1 - x_s)\, e^{\Delta u(\boldsymbol{s})} - (1 + x_s)\, e^{-\Delta u(\boldsymbol{s})} \stackrel{!}{=} 0$$

$$\Leftrightarrow \quad x_s = \frac{e^{2\Delta u(\boldsymbol{s})} - 1}{e^{2\Delta u(\boldsymbol{s})} + 1} \tag{7.9}$$

Da allerdings $\Delta u(\boldsymbol{s})$ wiederum von x abhängt, ist x_s über Gleichung (7.9) nur implizit gegeben. Folglich kann x_s lediglich über eine numerische Nullstellenbestimmung der Funktion

$$f(x) = x - \frac{e^{2\Delta u(\boldsymbol{s})} - 1}{e^{2\Delta u(\boldsymbol{s})} + 1} \tag{7.10}$$

ermittelt werden. Bei Annahme der oben festgelegten Parameter liegt x_s ungefähr bei -0,390. Dies entspricht einem Anteil des TGV am gesamten Verkehrsaufkommen der Strecke Paris - Marseille in Höhe von etwa 69,5%. Das bedeutet, dass der Marktanteil, den der TGV im Modell auf lange Sicht einnimmt, in etwa dem Anteil entspricht, der sich in der Realität einige Jahre nach Eröffnung der TGV-Strecke einstellte [61].

An dieser Stelle sei vermerkt, dass es für das Verkehrsmodell wünschenswert gewesen wäre, wenn man auf einen größeren Pool an Informationen hätte zurückgreifen können. Folgende Daten wären unter anderem speziell für diese Strecke und für den ganzen Zeitraum interessant gewesen: das gesamte Verkehrsaufkommen, die Passagierdaten des TGVs, die Kostenentwicklung der jeweiligen Tickets, detaillierte Daten zu die jeweiligen Passagieren (Wegezweck, Wegehäufigkeit, Herkunftsort, Alter, Informationen über den Arbeitsplatz und die Einkommensgruppe usw.). Damit wäre es möglich gewesen, die getroffenen Annahmen weiter zu hinterfragen und diese gegebenenfalls zu korrigieren.

8. Simulation einer einfachen Modellwelt

Nach der Anwendung des Verkehrsmodells auf eine reale Verkehrssituation geht es in diesem Kapitel darum, anhand einer einfachen Modellwelt und ausgewählten Szenarien mögliche Entwicklungen im Verkehrssektor zu beschreiben, um anschließend aus dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer im Modell Rückschlüsse ziehen zu können.

8.1. Darstellung der Modellwelt

Abbildung 8.1 zeigt schematisch die symmetrische Modellwelt. Darin befinden sich die beiden Städte A und B, die jeweils in Stadtzentrum (dunkelgrau) und Umland (hellgrau) untergliedert sind. Beide Städte sind mit einer Autobahn verbunden, die eine Länge von 400 km hat. Für ihre Bewohner sind sie zugleich Wohn-, Arbeits- und Lebensraum. Gelegentlich fahren diese allerdings aus privaten oder beruflichen Gründen in die jeweils andere Stadt.

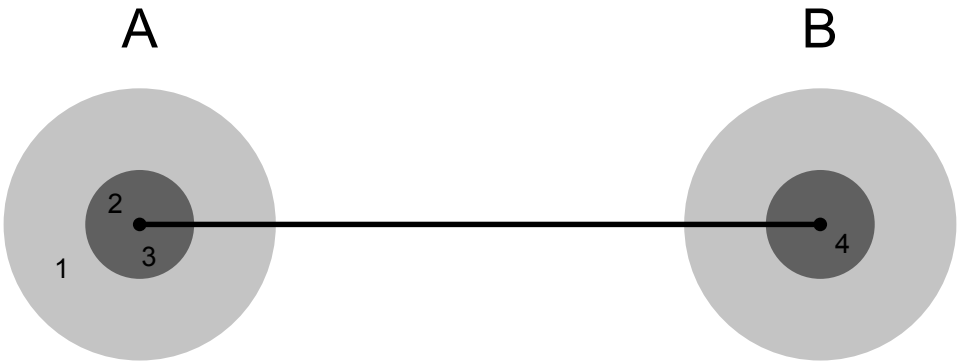


Abbildung 8.1.: Schematische Darstellung der Modellwelt

Aus Symmetriegründen ist es ausreichend die Population der Modellwelt in lediglich vier Subpopulationen (SP) zu unterteilen. Die Subpopulationen (1), (2) und (3) wohnen, ar-

beiten und leben in A, Subpopulation (4) in B. Bis auf die Mitglieder von Subpopulation (3), die zur Oberschicht gehören, befinden sich alle Bewohner hinsichtlich Arbeitszeit und Einkommen in durchschnittlichen Arbeitsverhältnissen. Das in Tabelle 8.1 angegebene mittlere Einkommen stellt den Nettolohn in Euro pro Monat dar. Die Arbeitszeit ist durchschnittlich pro Monat und in Klammern pro Arbeitswoche laut Arbeitsvertrag aufgelistet. Dabei wurde angenommen, dass der Urlaubsanspruch der Subpopulationen (1), (2) und (4) im Mittel bei etwa 28 Tagen und der der Subpopulation (3) bei etwa 20 Tagen pro Jahr liegt.

SP	**Wohnort**	**Anzahl (n^α)**	**Einkommen (e^α)**	**Arbeitszeit (a^α)**
(1)	Umland von A	100.000	2.000 EUR	141 h ($\widehat{=}$ 38 h)
(2)	Zentrum von A	100.000	2.000 EUR	141 h ($\widehat{=}$ 38 h)
(3)	Zentrum von A	10.000	5.000 EUR	193 h ($\widehat{=}$ 50 h)
(4)	Zentrum von B	100.000	2.000 EUR	141 h ($\widehat{=}$ 38 h)

Tabelle 8.1.: Die Eigenschaften der Subpopulationen der Modellwelt

Zu Beginn benutzen alle Bewohner der Modellwelt ausschließlich Autos mit konventionellem Verbrennungsmotor, um ihr Mobilitätsbedürfnis zu befriedigen. Bei entsprechender Nachfrage besteht die Möglichkeit parallel zur Autobahn eine Hochgeschwindigkeitsschienenverbindung (z.B. Transrapid) zwischen den beiden Städten zu errichten. In diesem Fall können Fahrten innerhalb der Städte mit kleinen verbrauchsoptimierten Elektroautos erledigt werden. Ansonsten ist dies nicht möglich, da die Reichweite der Elektroautos nicht ausreichend ist, um in die andere Stadt und zurück zu kommen.

Folglich können die Bürger zwischen zwei verschiedenen Verkehrssystemen wählen. Das etablierte Verkehrssystem besteht aus Autos mit Verbrennungsmotor ($i = 0$, $j = 1$), das neue Verkehrssystem aus Elektroautos ($i = 1$, $j = 1$) und dem Transrapid ($i = 1$, $j = 2$). Dabei wird angenommen, dass die Bewohner generell durchschnittliche Autos der Mittelklasse besitzen und im öffentlichen Fernverkehr in der 2. Klasse fahren würden. Lediglich die Mitglieder der Subpopulation (3) fahren schnellere und teurere Autos aus der Oberklasse und bestehen auf bessere Sitzplätze im öffentlichen Fernverkehr.

Zur Festlegung der Fahrleistung mit den verschiedenen Verkehrsmitteln werden folgende Annahmen getroffen. Im Durchschnitt fahren die Bewohner etwa ein Mal pro Monat in die andere Stadt und zurück. Mitglieder der Subpopulation (3) fahren hingegen ungefähr vier Mal pro Monat diesen Weg, da sie häufiger berufliche oder private Termine in der

anderen Stadt haben. In der eigenen Stadt fahren Bewohner des Zentrums pro Monat etwa 600 km und Bewohner des Umlands ungefähr das Doppelte.

Für Stadt- und Überlandfahrten mit dem Auto wird eine Durchschnittsgeschwindigkeit von generell 30 km/h festgelegt. Dabei macht es keinen Unterschied, ob das Auto mit Verbrennungs- oder Elektromotor angetrieben ist. Bedingt durch den größeren Anteil an Überlandfahrten erhöht sich für Bewohner des Umlands dieser Wert auf 50 km/h. Für Autobahnfahrten wird im Mittel eine Geschwindigkeit von 90 km/h für Autos der Mittelklasse bzw. von 120 km/h für Autos der Oberklasse angenommen. Mit der jeweiligen Fahrleistung gewichtet können damit nun die Durchschnittsgeschwindigkeiten berechnet werden. Für den Transrapid wird für alle Subpopulationen eine Reisegeschwindigkeit in Höhe von 200 km/h angenommen. Dabei sind die Übergangszeiten am Bahnhof mit eingerechnet.

Die Kosten pro Kilometer für Autos mit Verbrennungsmotor wurden den Autokosten des ADAC entsprechend festgelegt [1]. Die Kosten für das Elektroauto werden der Argumentation in Kapitel 3.4.1 folgend etwas geringer angenommen. Lediglich bei Bewohnern des Umlands sind die Kosten identisch, da sie durch mehr Überlandanteil und schlechteren Zugang zu Ladestationen größere Elektroautos mit besseren Akkumulatoren kaufen. Die durchschnittlichen Kosten für eine Fahrt mit dem Transrapid orientieren sich an den bisher in der Arbeit berechneten Kosten für konventionelle Schienenverkehrsmittel bzw. Hochgeschwindigkeitsschienenverkehrsmittel.

Die Güte aller Verkehrsmittel wird ungefähr in gleicher Höhe festgelegt wird, da angenommen wird, dass sich Vor- und Nachteile der Verkehrsmittel insgesamt die Wage halten. Subpopulation (3) legt allerdings großen Wert auf individuelle Zeitplanung und die Möglichkeit ihren Status repräsentieren zu können, weshalb für sie die Güte des etablierten Verkehrssystems etwas höher ist. Dies gilt auch für Bewohner des Umlands, für die ebenfalls die Vorteile des konventionellen Autos überwiegen.

In Tabelle 8.2 und 8.3 sind die obigen Annahmen zusammengefasst und damit die Werte der im Modell verwendeten Parameter der Verkehrsmittel aufgelistet. Folglich können nun die Faktoren der Nutzenfunktion $Z_i^\alpha(\boldsymbol{s})$, $K_i^\alpha(\boldsymbol{s})$ und $G_i^\alpha(\boldsymbol{s})$ für alle Subpopulationen bestimmt werden. Deren Gewichtungsfaktoren und die Bereitschaft das Verkehrssystem zu wechseln werden für alle Subpopulationen wie im vorherigen Kapitel gewählt (siehe Tabelle 7.5). Nur Subpopulation (3) weist insgesamt eine größere Flexibilität auf.

konv. Auto	SP	$f^{\alpha}_{0,1}$ [Pkm]	$v^{\alpha}_{0,1}$ [km/h]	$k^{\alpha}_{0,1}$ [EUR/km]	$g^{\alpha}_{0,1}$
	(1)	2.000	66	0,50	0,5
	(2)	1.400	64	0,50	0,2
	(3)	3.800	106	1,20	0,5
	(4)	600	30	0,50	0,2

Tabelle 8.2.: Parameter des etablierten Verkehrssystems

Elektroauto	SP	$f^{\alpha}_{1,1}$ [Pkm]	$v^{\alpha}_{1,1}$ [km/h]	$k^{\alpha}_{1,1}$ [EUR/km]	$g^{\alpha}_{1,1}$
	(1)	1.200	50	0,30	0,2
	(2)	600	30	0,30	0,2
	(3)	600	30	0,50	0,2
	(4)	600	30	0,30	0,2

Transrapid	SP	$f^{\alpha}_{1,2}$ [Pkm]	$v^{\alpha}_{1,2}$ [km/h]	$k^{\alpha}_{1,2}$ [EUR/km]	$g^{\alpha}_{1,2}$
	(1)	800	200	0,20	0,2
	(2)	800	200	0,20	0,2
	(3)	3.200	200	0,40	0,2
	(4)	0	200	0,20	0,2

Tabelle 8.3.: Parameter des neuen Verkehrssystems

Zu Beginn der Simulation nutzen wie bereits erwähnt alle Verkehrsteilnehmer Autos mit Verbrennungsmotor und befinden sich demnach im etablierten Verkehrssystem. Das bedeutet:

$$n^{\alpha}_{0}(0) = N^{\alpha} \quad \text{und} \quad n^{\alpha}_{1}(0) = 0 \qquad \text{für } \alpha = 1, \ldots, 4 \tag{8.1}$$

$$\Rightarrow \quad x^{\alpha}(0) = 1 \qquad \text{für } \alpha = 1, \ldots, 4 \tag{8.2}$$

Zu diesem Zeitpunkt ist die Transrapid-Strecke noch nicht gebaut, das heißt ein Wechsel in das neue Verkehrssystem ist für alle Bewohner ausgeschlossen, die nicht auf Fahrten in die andere Stadt verzichten können oder möchten. Im Modell gilt das für die Subpopulationen (1), (2) und (3). Die Tatsache, dass ein Wechsel des Verkehrssystems vor der Eröffnung unmöglich ist, wird in das Modell integriert, indem die durchschnittliche Geschwindigkeit des Transrapids $v^{\alpha}_{1,2}$ zu Beginn auf Null beziehungsweise auf einen sehr

kleinen Wert gesetzt wird. Damit würde eine fiktive Fahrt unendlich lange dauern und es folgt für $\alpha = 1, \ldots, 3$:

$$Z_1^\alpha(\boldsymbol{s}) = \sum_{j=1}^{2} \frac{f_{1,j}^\alpha}{v_{1,j}^\alpha \cdot a^\alpha} \quad \xrightarrow[v_{1,2}^\alpha \to 0]{} \infty \tag{8.3}$$

Dadurch gilt für den Nutzen des neuen Verkehrssystems $u_1^\alpha(\boldsymbol{s})$ über Gleichung (5.21) beziehungsweise infolgedessen für die Nutzendifferenz $\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})$:

$$u_1^\alpha(\boldsymbol{s}) \to -\infty \quad \Rightarrow \quad \Delta u^\alpha(\boldsymbol{s}) \to \infty \tag{8.4}$$

Als Konsequenz verschwinden die Übergangsraten und folglich auch die rechten Seiten der vereinfachten Quasimittelwertgleichungen (5.37):

$$\mathrm{w}_{01}^\alpha(\boldsymbol{s}) = \nu^\alpha n_1^\alpha \; e^{\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} = 0, \qquad \text{da } n_1^\alpha(0) = 0 \tag{8.5}$$

$$\mathrm{w}_{10}^\alpha(\boldsymbol{s}) = \nu^\alpha n_0^\alpha \; e^{-\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} = 0 \tag{8.6}$$

$$\Rightarrow \; \frac{dx^\alpha}{dt} = \nu^\alpha \Big[(1 - x^\alpha) \; e^{\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} - (1 + x^\alpha) \; e^{-\Delta u^\alpha(\boldsymbol{s})} \Big] = 0 \tag{8.7}$$

Damit befinden sich die Subpopulationen (1), (2) und (3) vor dem eventuellen Bau der Transrapid-Strecke in einem stabilen Zustand. Das bedeutet, dass deren Subpopulationsmitglieder bis zur Eröffnung der Transrapid-Strecke im etablierten Verkehrssystem bleiben.

Aus Rentabilitätsgründen warten die möglichen Betreiber allerdings mit dem Bau bis die erwartete Nachfrage beziehungsweise der erwartete Marktanteil einen gewissen Grenzwert T überschreitet. Der erwartete Marktanteil ergibt sich aus der Bestimmung derjenigen Anzahl an Personen, die nach dem Bau der Strecke bereit wären diese auch zu nutzen und damit das Verkehrssystem zu wechseln. Das bedeutet, es muss der stationären Zustand x_s^α unter der Annahme ermittelt werden, dass sich die momentanen Parameter nicht verändern und dass für die durchschnittliche Geschwindigkeit des Transrapids $v_{1,2}^\alpha$ anstatt Null derjenige Wert eingesetzt wird, der sich unmittelbar nach der Eröffnung der Strecke einstellen würde (siehe Tabelle 8.3). Diese Konfiguration wird $\{\tilde{\boldsymbol{s}}\}$ genannt.

Analog zur Herleitung im vorherigen Kapitel wird der stationäre Zustand berechnet, indem angenommen wird, dass in diesem Zustand die Übergangsraten in beide Richtungen gleich groß sind und damit die rechten Seiten der Quasimittelwertgleichungen verschwinden (siehe Gleichung (7.9)):

$$x_s^\alpha(\tilde{\boldsymbol{s}}) = \frac{e^{2\Delta u^\alpha(\tilde{\boldsymbol{s}})} - 1}{e^{2\Delta u^\alpha(\tilde{\boldsymbol{s}})} + 1} \tag{8.8}$$

Wiederum kann $x_s^\alpha(\tilde{\boldsymbol{s}})$ nur numerisch mithilfe einer Nullstellenbestimmung ermittelt werden. Anschließend kann damit über Gleichung (5.35) die Anzahl der Personen berechnet werden, die das neue System in der momentanen Situation nutzen würden. Durch einen Bezug auf den insgesamt möglichen Nutzerkreis ergibt sich schließlich der Marktanteil des neuen Verkehrssystems und folglich auch der Transrapid-Strecke:

$$\text{Marktanteil } = \frac{\sum_{\alpha=1}^{3} \frac{N^\alpha}{2} \left(1 - x_s^\alpha(\tilde{\boldsymbol{s}})\right)}{\sum_{\alpha=1}^{3} N^\alpha} \tag{8.9}$$

Als Grenzwert für die Bauentscheidung wird im Modell ein erwarteter Marktanteil in Höhe von $T = 55\%$ festgelegt. Überschreitet der Marktanteil diesen Grenzwert, wird idealisiert angenommen, dass die Transrapid-Strecke instantan gebaut und zum Betrieb freigegeben wird. Damit springt in diesem Moment der Wert für die durchschnittliche Geschwindigkeit des Transrapids von 0 km/h auf den in Tabelle 8.3 angegebenen Wert. Folglich ist die rechte Seite der Quasimittelwertgleichung und damit die erste Ableitung der Variablen x^α in diesem Punkt unstetig. Dieser Sprung des Kontroll- bzw. Trendparameters $\boldsymbol{v}$ kann physikalisch als Phasenübergang erster Ordnung angesehen werden.

8.2. Basisszenario

Zunächst wird im Basisszenario angenommen, dass alle Trend- und Kontrollparameter keine eigene Dynamik besitzen und folglich konstant sind. Weiterhin sei die Transrapid-Strecke zu Beginn noch nicht gebaut, d.h. $v_{1,2}^\alpha(0) = 0$. Abbildung 8.2 zeigt das Ergebnis der numerischen Berechnungen, wobei die Entwicklungen der nächsten 20 Jahre dargestellt sind. Die Abszisse gibt die Zeit in Jahren und die Ordinate die Verteilung der Subpopulationsmitglieder auf die beiden Verkehrssysteme an.

Wie an der waagrechten roten Linie, die im Übrigen die Blaue und die Grüne verdeckt, zu sehen ist, nutzen alle Mitglieder der Subpopulationen (1), (2) und (3) während des ganzen Zeitraums ausschließlich das etablierte Verkehrssystem, da es nicht zum Bau der Transrapid-Strecke kommt und folglich für sie ein Wechsel des Verkehrssystems ausgeschlossen ist. Lediglich der Verlauf der orangen Linie zeigt den Wechsel einer zunehmenden Anzahl von Mitgliedern der Subpopulation (4) in das neue Verkehrssystem. Somit sehen auf lange Sicht etwas mehr als die Hälfte der Bewohner, die nur Fahrten innerhalb ihrer eigenen Stadt tätigen, das neue Verkehrssystem als nützlicher an. Allen anderen bleibt in diesem Szenario keine Wahl.

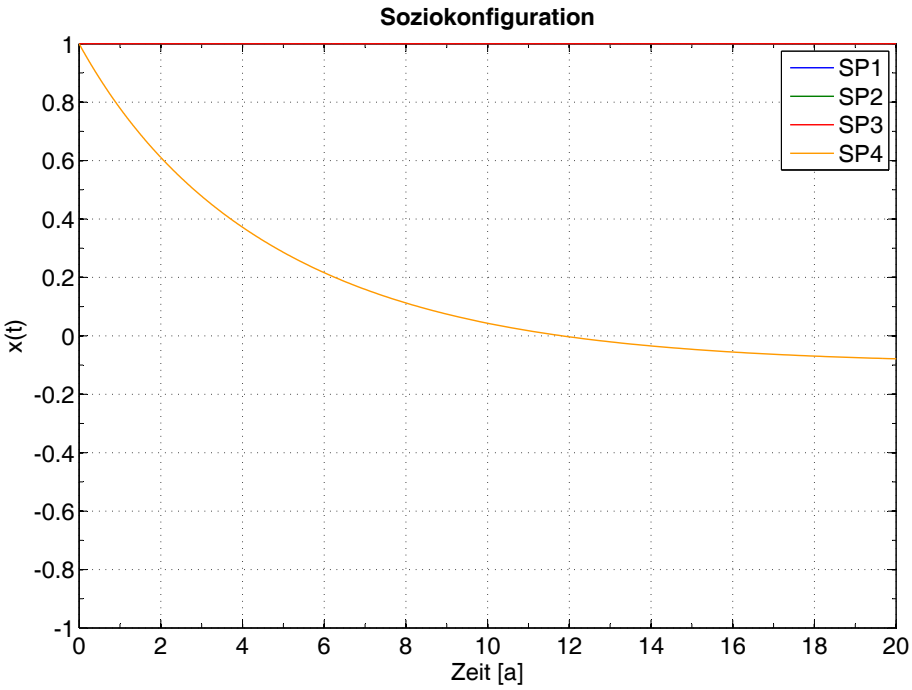


Abbildung 8.2.: Basisszenario: Soziokonfiguration

8.3. Szenario I: Niedrigerer Grenzwert für den Marktanteil

Um zu sehen, wie sich die Verkehrsteilnehmer bei konstanten Trendparametern entscheiden würden, wenn von Beginn an die Transrapid-Strecke in Betrieb wäre und in welcher Höhe sich in diesem Fall der Marktanteil des neuen Verkehrssystems einstellen wür-

de, geht man nun davon aus, dass die möglichen Betreiber einen wesentlich geringeren Marktanteil für ausreichend ansehen. Dieser sei von Beginn an gegeben. Das bedeutet, die Transrapid-Strecke wird in diesem Fall direkt nach dem ersten Schritt gebaut und eröffnet.

Wie in Abbildung 8.3 zu sehen ist, verändert sich infolgedessen bei allen Subpopulationen die Verteilung der Mitglieder auf die beiden Verkehrssysteme vom Ausgangszustand, in dem alle das etablierte Verkehrssystem nutzen, dahingehend, dass sich jeweils ein zunehmender Teil für das neue Verkehrssystem entscheidet.

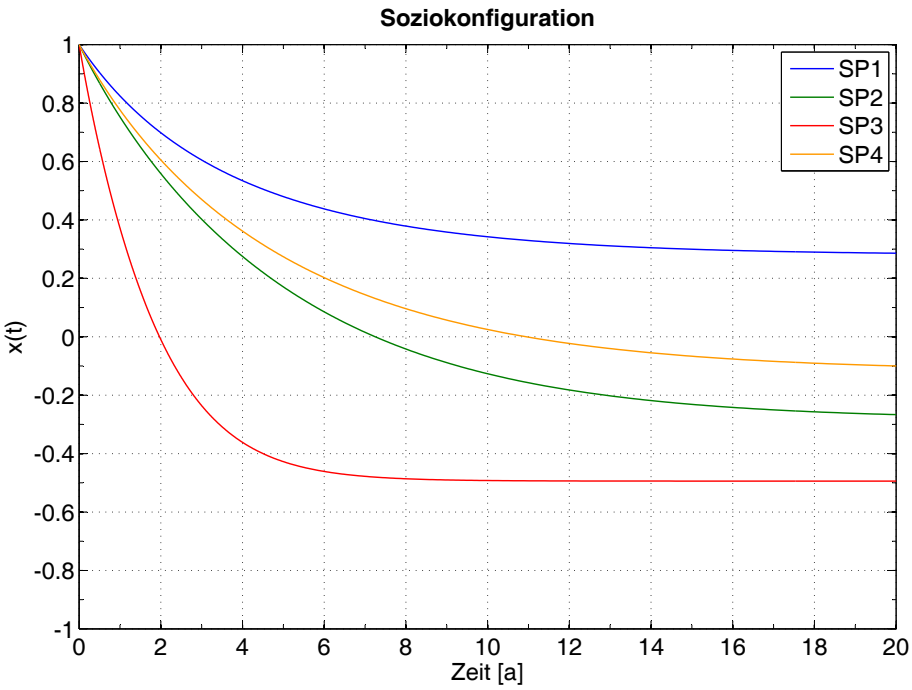


Abbildung 8.3.: Szenario I: Soziokonfiguration

Nach einer gewissen Zeit stellt sich offensichtlich ein stabiles Gleichgewicht ein, in dem pro Zeiteinheit die Anzahl der Wechsler für beide Richtungen gleich groß ist. Dieses hängt von den oben festgelegten Parametern ab, wodurch sich für jede Subpopulation ein anderer Wert ergibt.

Von Subpopulation (3) wechseln beispielsweise etwa 75% der Mitglieder in das neue Verkehrsystem ($x^3 = -0{,}49$). Dies ist insofern auch klar, da sie deutlich häufiger Fahrten in die andere Stadt unternehmen und der Transrapid für sie somit finanziell wesentlich günstiger ist. Der Zeitfaktor beider Verkehrssysteme ist in diesem speziellen Fall sogar

identisch. Es würden folglich noch mehr Mitglieder von Subpopulation (3) wechseln, wenn der Transrapid noch schneller wäre oder wenn sie die Güte des etablierten Verkehrssystems nicht wesentlich höher als die des Neuen eingestuft hätten. Bedingt durch ihre größere Flexibilität erreichen sie zudem den Gleichgewichtszustand deutlich früher als die anderen Subpopulationen.

Im Gegensatz dazu verbleibt die Mehrheit der Mitglieder von Subpopulation (1) mit etwa 64% im etablierten Verkehrssystem. Dieses hat für sie zwar vom Kosten- und Zeitbedarf her gesehen gewisse Nachteile, erweist sich aber durch eine höhere Einschätzung der Güte des etablierten Verkehrssystems als nützlicher. Bei Subpopulation (4) ist keine Veränderung zum Basisszenario festzustellen, da für sie der Bau der Transrapid-Strecke irrelevant ist und die Trendparameter ansonsten gleich geblieben sind. Für Mitglieder von Subpopulation (2) liegt das stabile Gleichgewicht zwischen dem von Subpopulation (3) und dem von Subpopulation (4). Dies zeigt, dass der Transrapid auch auf durchschnittliche Bewohner des Stadtzentrums, die auf Fahrten in die andere Stadt nicht verzichten wollen, einen positiven Einfluss hinsichtlich eines möglichen Verkehrssystemwechsels hat.

8.4. Szenario II: Steigende Kraftstoffpreise

Der Marktwert, der sich aus der Zusammensetzung in Szenario I ergibt, liegt unter dem Grenzwert, den die möglichen Betreiber festgelegt haben. Aus diesem Grund wurde im Basisszenario die Transrapid-Strecke nicht gebaut. Hauptsächlich liegt dies daran, dass Subpopulation (1) das etablierte Verkehrssystem als vorteilhafter ansieht. Hinzu kommt, dass der Anteil der Subpopulation (3) an der Gesamtpopulation zu gering ist, um dort entscheidenden Einfluss zu haben. Es gilt nun herauszufinden, ob und wie sich diese Situation ändert, wenn die Trendparameter einer eigenen Dynamik folgen. Dazu wird in diesem Szenario angenommen, dass die spezifischen Kosten für Autos mit Verbrennungsmotor aufgrund eines deutlichen Anstiegs der Kraftstoffpreise zunehmen. Dieser Entwicklung wird ein exponentielles Wachstum unterstellt, das folgendem Gesetz genügt:

$$k_{0,1}^{\alpha}(t) = k_{0,1}^{\alpha}(0) \cdot \exp\left[b^{\alpha} \cdot t\right] \tag{8.10}$$

Der Wachstumsfaktor b^α wird dabei so gewählt, dass sich die Autokosten $k^\alpha_{0,1}$ in 20 Jahren etwa um 50% erhöhen (siehe Abbildung 8.4). Diese Entwicklung wird von außen vorgegeben und ist folglich exogen.

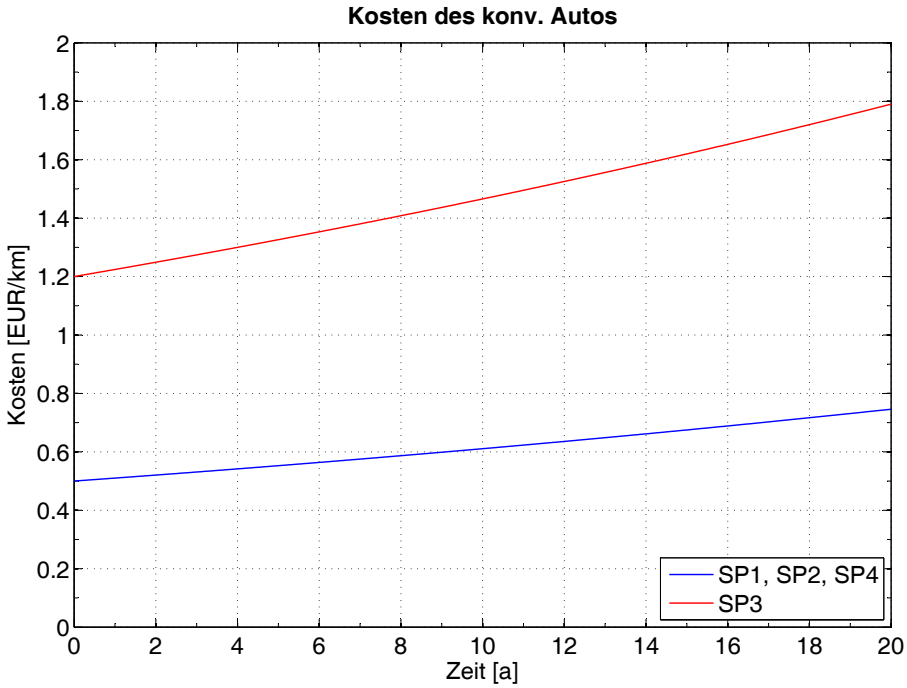


Abbildung 8.4.: Szenario II: Entwicklung der Kosten des konv. Autos

Durch den Anstieg der Kosten des konventionellen Autos wird das etablierte Verkehrssystem immer ungünstiger. Infolgedessen steigt die Tendenz in das neue Verkehrssystem zu wechseln, falls die Transrapid-Strecke gebaut werden würde. Folglich nimmt der erwartete Marktanteil des neuen Verkehrssystems stetig zu, bis nach ungefähr 5,3 Jahren schließlich der festgelegte Grenzwert überschritten wird (siehe Abbildung 8.5). Anschließend wird instantan die Transrapid-Strecke gebaut und eröffnet, so dass ab diesem Zeitpunkt auch für die Subpopulationen (1), (2) und (3) ein Wechsel in das neue Verkehrssystem möglich ist. Als Konsequenz wechseln immer mehr Mitglieder dieser Subpopulationen mit anhaltender Tendenz in das neue Verkehrssystem, so dass etwa 15 Jahre nach der Eröffnung der Transrapid-Strecke über 50% jeder Subpopulation das neue Verkehrssystem nutzen. Aufgrund der weiterhin steigenden Kosten der konventionellen Autos und damit des etablierten Verkehrssystems, würde sich diese Entwicklung solange fortsetzen, bis alle Verkehrsteilnehmer das neue Verkehrssystem nutzen. Das bedeutet, es stellt sich hierbei kein stationärer Zustand ein, der nicht an den Rändern $x^\alpha = +1$ bzw. $x^\alpha = -1$ liegt.

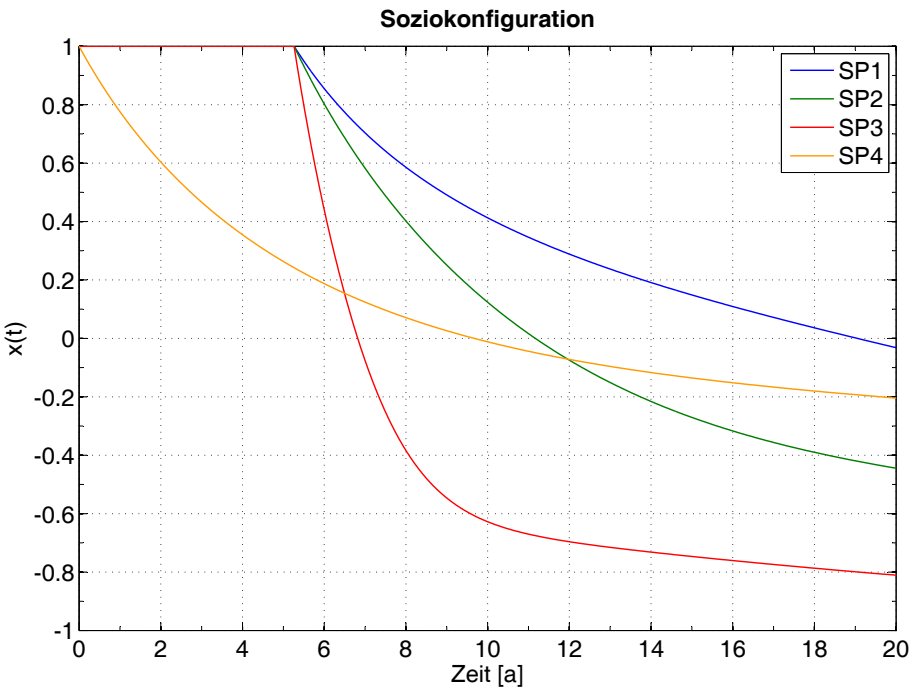


Abbildung 8.5.: Szenario II: Soziokonfiguration

Der Knick im Verlauf der Soziokonfiguration der Subpopulationen (1), (2) und (3) zum Zeitpunkt der Eröffnung des Transrapids lässt erkennen, dass hier eine Unstetigkeit in der ersten Ableitung dieser Variablen und damit in den Quasimittelwertgleichungen auftritt. Folglich ist im System ein Phasenübergang erster Ordnung geschehen, der auf der sprunghaften Veränderung der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Transrapids und somit des Kontrollparameters $v_{1,2}^{\alpha}$ basiert.

8.5. Szenario III: Innovationen im neuen Verkehrssystem

In diesem Szenario soll schließlich analysiert werden, wie sich die Entscheidungen der Bewohner der Modellwelt verändern, falls es durch Innovationen zu einer Weiterentwicklung und infolgedessen zu einer Verbesserung der Eigenschaften der Verkehrsmittel des neuen Verkehrssystems kommt. Dazu wird zunächst angenommen, dass im Zuge dessen die Güte aller Verkehrsmittel des neuen Verkehrssystems zunehmend besser bewertet

wird. Konkret geht es also um eine Zunahme der Güte der Elektroautos und des Transrapids infolge von Innovationen. Zu Beginn ist die Güte dieser Verkehrsmittel bei allen Subpopulationen gleich und es wird eine konstante Steigerung auf den doppelten Anfangswert in den 20 Jahren des Betrachtungszeitraums angenommen. Abbildung 8.6 zeigt die Entwicklung der Güte dieser Verkehrsmittel, die in diesem Fall identisch ist. Am Ende des Betrachtungszeitraums nimmt somit die Güte der beiden Verkehrsmittel jeweils einen relativ hohen Wert an. Das bedeutet, dass die Güte des neuen Verkehrssystems insgesamt bedeutend besser als zuvor eingestuft wird.

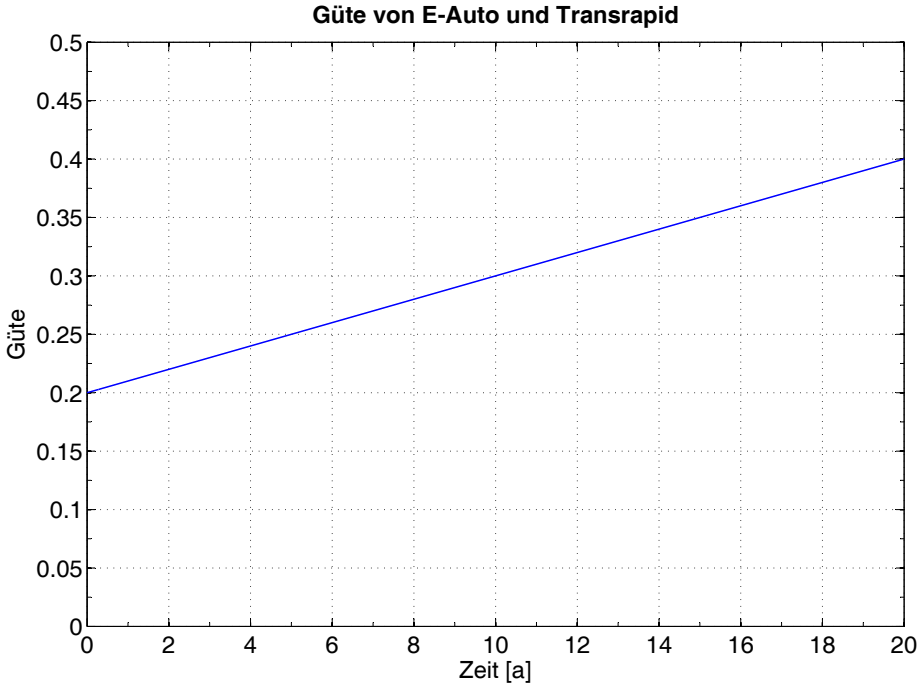


Abbildung 8.6.: Szenario III: Entwicklung der Güte von Elektroauto und Transrapid

Darüber hinaus wird in diesem Szenario angenommen, dass sich die Geschwindigkeit des Transrapids durch technische Innovationen steigern lässt und dass der Zeitbedarf in den Übergangsphasen am Bahnhof zunehmend reduziert werden kann. Infolgedessen nimmt die Durchschnittsgeschwindigkeit des Transrapids konstant zu (siehe Abbildung 8.7 links).

Die Kosten dieser technologischen Weiterentwicklungen des Transrapids sollen allerdings auf die Kunden umgelegt werden. Dadurch verteuern sich die Fahrscheine und folglich auch die spezifischen Kosten des Transrapids (siehe Abbildung 8.7 rechts).

Die Entwicklung der spezifischen Kosten des Transrapids wird mithilfe einer Differentialgleichung beschrieben, die folgende Form hat:

$$\frac{k_{1,2}^{\alpha}(t)}{dt} = 0{,}005 - 0{,}02 \cdot \left(\frac{\sum_{\alpha=1}^{3} \frac{1}{2} N^{\alpha} \left(1 - x^{\alpha}(t)\right)}{\sum_{\alpha=1}^{3} N^{\alpha}} - T \right) \qquad \text{für } \alpha = 1, \ldots, 3 \tag{8.11}$$

Die rechte Seite der obigen Differentialgleichung besteht aus einem konstanten, positiven Term und einem Term, mit dem bei der Umlegung der Investitionen die konkrete Nutzerzahl berücksichtigt werden soll. Dazu wird in der Klammer die Differenz aus dem momentanen Marktanteil des Transrapids und dem Grenzwert T gebildet, der von den Betreibern für die Bauentscheidung festgesetzten wurde. Vor der Eröffnung der Transrapid-Strecke ergibt sich folglich eine konstante Steigung für die spezifischen Kosten des Transrapids. Nach der Eröffnung wird diese hingegen in Abhängigkeit vom konkreten Marktanteil zunehmend kleiner, obwohl sich der technologische Fortschritt konstant fortsetzt. Subpopulation (4) wird hierbei nicht berücksichtigt, da deren Mitglieder den Transrapid nicht nutzen.

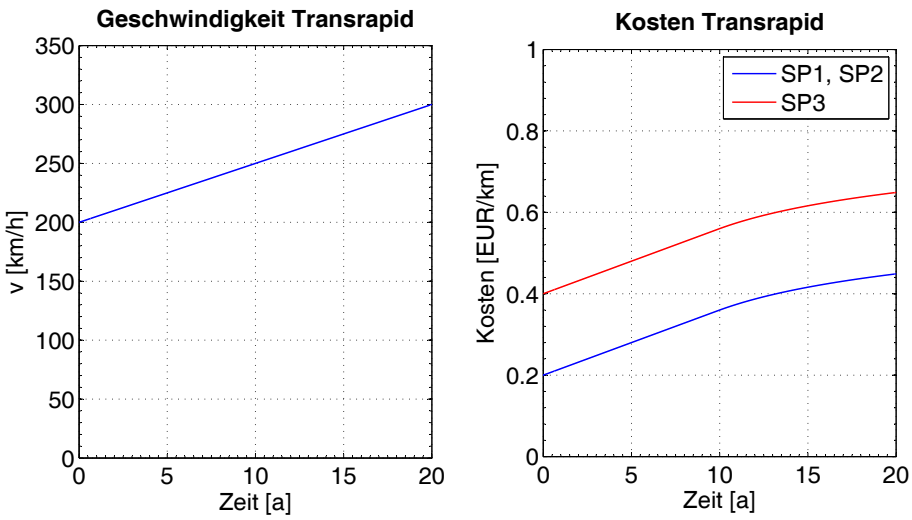


Abbildung 8.7.: Szenario III: Entwicklung weiterer Eigenschaften des Transrapids

Trotz der steigenden Kosten für den Transrapid nimmt die erwartete Nachfrage permanent zu, so dass diese nach etwa 10 Jahren für die Betreiber ausreichend ist, um die Transrapid-Strecke zu bauen und in Betrieb zu nehmen (siehe Abbildung 8.8). Ab diesem Zeitpunkt ist es wiederum auch für die Mitglieder der Subpopulationen (1), (2) und (3) möglich, in das neue Verkehrssystem zu wechseln. Verglichen mit Szenario I, bei dem die

Trendparameter ansonsten während des ganzen Betrachtungszeitraums konstant geblieben sind, ist in diesem Szenario am Ende der Anteil der Mitglieder jeder Subpopulation, die das neue Verkehrssystem nutzen, deutlich größer. Diese Entwicklung scheint sich auch in Zukunft mit gleich bleibender Tendenz fortzusetzen. Dies liegt unter anderem an der besseren Einstufung der Güte der Elektroautos und der des Transrapids. Aber auch die höhere Geschwindigkeit des Transrapids spielt hierbei eine Rolle, für die nicht nur die reicheren Bewohner der Modellwelt, d.h. die Mitglieder der Subpopulation (3), bereit sind einen entsprechend höheren Preis zu bezahlen. Der Hintergrund dessen ist hauptsächlich die Tatsache, dass der Zeitfaktor bei allen Subpopulationen mit der höchsten Gewichtung versehen ist (siehe Tabelle 7.5).

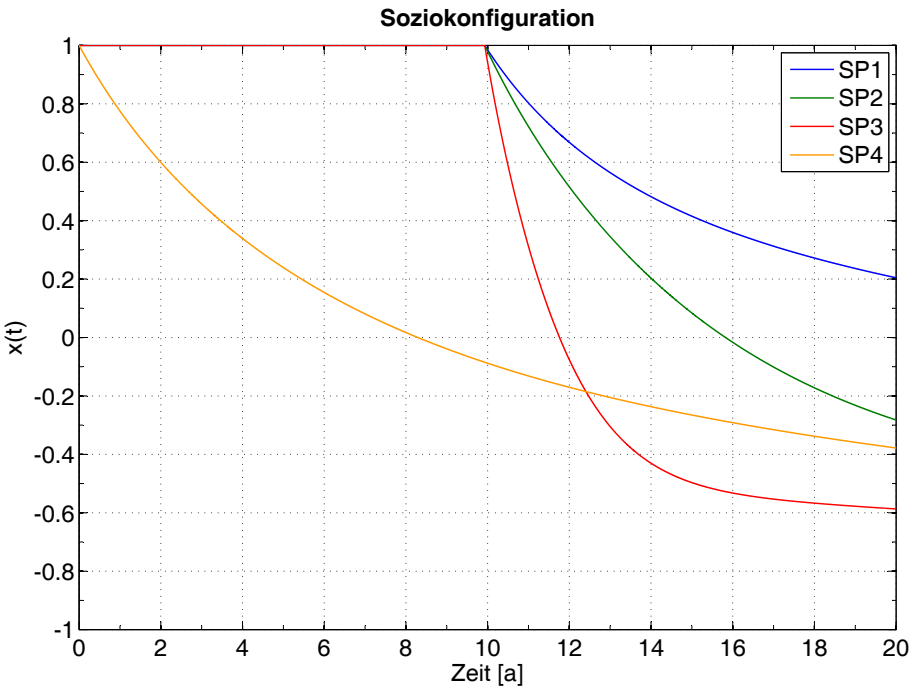


Abbildung 8.8.: Szenario III: Soziokonfguration

9. Zusammenfassung und Ausblick

Die Kapitel 7 und 8 haben gezeigt, dass man mithilfe des in dieser Arbeit entwickelten Verkehrsmodells Übergänge von einem konventionellen, etablierten Verkehrssystem zu einem fortschrittlichen, neuen Verkehrssystem beschreiben kann. Die Entwicklungen auf der Verbindung Paris und Marseille wurden dabei bewusst aufgrund ihrer Struktur für einen Abgleich des Verkehrsmodells mit der Realität gewählt. Zunächst stellen diese Entwicklungen einen radikalen Verkehrsübergang dar, für dessen Beschreibung das Verkehrsmodell speziell entwickelt wurde. Darüber hinaus waren trotz der relativ einfachen Situation die Daten nur begrenzt verfügbar, weshalb man zu einigen Annahmen und Abschätzungen gezwungen war. Bei einem komplexeren Übergang ist infolgedessen die Aussicht auf ein ausreichendes Datenmaterial noch geringer. In diesem Fall hätte man darauf aber noch weniger verzichten können. Dennoch wäre es interessant, wenn entsprechende Daten vorliegen, einen komplexeren Übergang zu untersuchen und damit die Modellbildung und die Annahmen deutlich besser verifizieren zu können.

Auch die Modellwelt in Kapitel 8 wurde bewusst einfach gewählt. Daran könnte man nun im Folgenden ansetzen und die Modellwelt so ausweiten, dass sie der Verkehrsstruktur einer ganzen Region entspricht. Auch eine genauere Unterteilung der Population ist denkbar. Gerade im Verkehrsbereich gibt es trotz gewisser Tendenzen innerhalb der verschiedenen Gesellschaftsklassen signifikante Unterschiede, da Status und Mobilitätsbedürfnisse nur bedingt korrelieren.

Weiterhin könnte über empirische Studien die Festlegung und die Gewichtung der Einflussfaktoren der Nutzenfunktion des Verkehrsmodells optimiert werden. Beispielsweise ist es denkbar, dass die Zusammenfassung der sonstigen Faktoren zu einem Gütefaktor zu oberflächlich ist. Ferner besteht die Möglichkeit das Verkehrsmodell durch eine Modifikation der Definition der Soziokonfiguration von einer Beschreibungsmöglichkeit für radikale Übergänge auf ein Verkehrsmodell auszuweiten, das geeignet ist allgemein das Verkehrsverhalten und die Verkehrsmittelwahl zu beschreiben.

Darüber hinaus haben die Ausführungen gezeigt, dass der Energiebedarf der Elektroautos insgesamt geringer einzustufen ist als der der Pkws mit Verbrennungsmotor, die im Moment ausnahmslos den Markt beherrschen. Zudem könnte man sich durch eine Umstellung des Antriebskonzepts zumindest im Verkehrssektor von der Abhängigkeit vom Erdöl lösen, um nachhaltig eine Mobilität zu annehmbaren Preisen gewährleisten zu können. Dazu sind allerdings in nächster Zeit noch deutliche Fortschritte insbesondere in der Technologie der Akkumulatoren notwendig. Ferner gilt es ein flächendeckendes Netz an Ladestationen aufzubauen. Weiterhin müssen vermutlich die Gewohnheiten und Selbstverständnisse im Verkehrssektor angepasst werden. Eine Möglichkeit dazu ist die Trennung von überdimensionierten Allroundfahrzeugen, hin zu verbrauchsoptimierten Kleinfahrzeugen für den Alltag, die bei der Bewältigung großer Strecken von schnellen öffentlichen Verkehrsmitteln unterstützt werden.

Letztendlich ist festzustellen, dass die Theorie der Soziodynamik, die dem Verkehrsmodell dieser Arbeit als Grundlage dient, eine Möglichkeit darstellen kann, die in der Einleitung angesprochenen Probleme der derzeitigen Energiemodellierung anzugehen. Dafür spricht, dass mit dem Konstrukt der Differentialgleichungen, die in der Soziodynamik eine zentrale Rolle spielen, neben linearen eben auch nichtlineare Entwicklungen beschrieben werden können. Darüber hinaus wird in Modellen, die auf der Soziodynamik basieren, nicht unbedingt von jedem Konstituenten die rational optimale Alternative gewählt, wie dies lineare Optimierungsprogramme hauptsächlich vorgegeben würden. Sondern lediglich die Mittelwerte bzw. Quasimittelwerte, die extreme Ausreißer beinhalten können, streben über dynamische Balancegleichungen in Richtung des Nutzenmaximums. Die Eignung der Soziodynamik für die Energiemodellierung müsste allerdings über einen konkreten Integrationsversuch in diesen Forschungsbereich analysiert werden.

Literaturverzeichnis

[1] ADAC: *Autokosten*. http://www.adac.de/autokosten, Stand: 24.07.2008.

[2] ADAC: *EcoTest*. http://www.adac.de/Tests/Autotest/Ecotest, Stand: 24.07.2008.

[3] ADAC: *Durchschnittspreise Kraftstoffe*. http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Tanken/zahlen_fakten/Die_Entwicklung_der_jaehrlichen_Durchschnittspreise_fuer_Kraftstoffe/default.asp?ComponentID=4252&SourcePageID=10100, Stand: 07.03.2008.

[4] Albrecht, Alexander: *Der Energiemarkt und dessen techno-ökonomische Modellierung - Potentiale zukünftiger Technologien*. Diplomarbeit, Universität Augsburg, 2004.

[5] Angermann, Anne; Beuschel, Michael; Rau, Martin & Wohlfahrt, Ulrich: *MATLAB - Simulink - Stateflow*. 5. Auflage, München: Oldenbourg Verlag, 2007.

[6] Arduin, Jean-Pierre & Ni, Jincheng: *French TGV Network Development*. In: Japan Railway & Transport Review 40, East Japan Railway Culture Foundation (Hrsg.). 2005

[7] Atmosfair: *Hintergrundpapier Emissionsrechner*. https://www.atmosfair.de/fileadmin/user_upload/Medienecke/Downloadmaterial/Rund_um_atmosfair/Documentation_Calculator_DE_2008.pdf, Stand: 29.07.2008.

[8] BP: *Steht das weltweite Ende der Ölvorkommen unmittelbar bevor?* http://www.deutschebp.de/genericarticle.do?categoryId=416&contentId=2014994, Stand: 09.07.2008.

[9] Bundesministerium der Finanzen: *Wie setzt sich der Spritpreis zusammen?*

http://www.bundesfinanzministerium.de/nn_53510/DE/Buergerinnen__und__Buerger/Mobilitaet__und__Reisen/Rund__ums__Auto/0001__Spritpreis.html, Stand: 08.07.2008.

[10] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Verkehrssicherheit.* http://www.bmvbs.de/Verkehr/Strasse/Verkehrssicherheit-,2835.989686/Strassenverkehrssicherheit.htm, Stand: 17.07.2008.

[11] Braess, Hans-Hermann & Seiffert, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 5. Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2007.

[12] Bundesministerium für Verkehr, Bau-, und Wohnungswesen: *Verkehr in Zahlen 2007/2008.* Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2007.

[13] Cactus 2000: *Großkreis-Berechner*: http://www.cactus2000.de/de/unit/massgrk.shtml, Stand: 12.08.2008.

[14] Der Tagesspiegel: *TGV - Die Concorde auf Schienen wird 25.* http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/Wirtschaft-TGV;art115,1869140, Stand: 13.05.2008.

[15] Deutsche Bahn AG: *Reiseauskunft*: http://reiseauskunft.bahn.de, Stand: 08.08.2008.

[16] ESSO Deutschland GmbH: *Öl- und Gasreserven.* http://www.esso.de/ueber_uns/energie_umwelt/oel_gasreserven/index.html, Stand: 09.07.2008.

[17] Dünbier, Ludwig: *Chancen und Risiken von Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken.* Frankfurt/Main: Harry-Deutsch-Verlag, 1984.

[18] Eurostat: http://ec.europa.eu/eurostat, Stand: 01.07.2008.

[19] Frewein, Markus & Seebauer, Sebastian: *Modelle zur Beschreibung der Verkehrsmittelwahl.* Seminararbeit, Technische Universität Graz, 2003.

[20] Gollnick, Volker: *Untersuchungen zur Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel.* Dissertation, Technischen Universität München, 2003.

[21] Google Maps: http://maps.google.de, Stand: 11.08.2008.

[22] Greenpeace Energy: Stromkennzeichnung: http://greenpeace-energy.de/strom_kennzeichnung.php, Stand: 17.07.2008.

[23] Haken, Hermann: *Synergetics: An Introduction.* Berlin: Springer, 1983.

[24] Heuser, Harro: *Gewöhnliche Differantialgleichungen.* Stuttgart: Teubner, 1989.

[25] Heute: *Diesel-Pkw und Ottomotoren haben bald ausgedient.* http://www.heute.de/ZDFheute/inhalt/21/0,3672,7258837,00.html, Stand 05.08.2008.

[26] Hofer, Klaus: *Elektrotraktion, Elektrische Antriebe in Fahrzeugen.* Berlin: VDE Verlag GmbH, 2006.

[27] Institut für Demoskopie Allensbach: *Wieder mehr Flugreisen - Aber jede fünfte Frau leidet unter Flugangst.* http://www.ifd-allensbach.de/news/prd_0316.html, Stand 29.07.2008.

[28] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU): *Die CO2 Bilanz des Bürgers.* Heidelberg, 2007.

[29] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU): *UmweltMobilCheck - Wissenschaftlicher Grundlagenbericht.* Heidelberg, 2006.

[30] Innenministerium Baden-Württemberg: *Energiesparend Fahren.* http://www.innenministerium.baden-wuerttemberg.de/fm/1227/Energiesparend%20Fahren_neu.pdf, 2006.

[31] Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infras), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW): *Mobilität in Deutschland 2002.* http://www.mobilitaet-in-deutschland.de.

[32] Kindel, Andreas: *Lohnt sich der TGV/ICE?.* In: Diskussionspapiere für liberale Politik Nr. 2 März 1996, Institut für liberale Politik e.V. (Hrsg.). Saarbrücken: 1996.

[33] Kraftfahrtbundesamt: *Bestand am 1. Januar 2008 nach Emissionen und Kraftstoffen.* http://www.kbashop.de/wcsstore/KBA/Attachment/Kostenlose_Produkte/b_emissionen_kraftstoffe_2008.pdf, Stand: 05.08.2008.

[34] Loremo: http://evolution.loremo.com.

[35] Mineralölwirtschaftsverband e.V.: *Rohölpreisentwicklung 1960-2007.* http://www.mwv.de/cms/front_content.php?idcat=14&idart=63, Stand: 03.07.2008.

[36] Mineralölwirtschaftsverband e.V.: *Oft gestellte Fragen.* http://www.mwv.de/cms/front_content.php?idcat=15, Stand: 09.07.2008.

[37] Ministère des Affaires étrangères et européennes, France: *Die Arbeitsmarktpolitik in Frankreich.* http://www.diplomatie.gouv.fr/de/frankreich_3/frankreich-entdecken_244/portrat-frankreichs_247/die-wirtschaft_256/die-arbeitsmarktpolitik-in-frankreich_86.html, Stand: 13.08.2008.

[38] Ministère des Affaires étrangères et européennes, France: *Frankreich im Überblick - Die französische Gesellschaft.* http://www.diplomatie.gouv.fr/de/frankreich_3/frankreich-entdecken_244/frankreich-im-uberblick_246/die-franzosische-gesellschaft_119.html, Stand: 13.08.2008.

[39] Mitschke, Manfred & Wallentowitz, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge.* 4. Auflage, Berlin: Springer, 2004.

[40] Motorlexikon: *Leerlaufdrehzahl.* http://www.motorlexikon.de/?I=1230, Stand: 03.09.2008.

[41] Nowakowski, Tim: *Simulation der Energieflüsse des TOYOTA Prius im Europäischen Fahrzyklus.* Masterarbeit, Fachhochschule Düsseldorf, 2006.

[42] Robert Bosch GmbH: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch.* 25. Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2003.

[43] Schulberatung des Hamburger Verkehrsverbundes: *HVV Mobility.* http://www.hvv-mobility.com, Stand: 10.07.2008.

[44] Sigg, Timm: *Ein mathematisches Modell der Stadtentwicklung unter Populationsdruck.* Aachen: Shaker Verlag, 1996.

[45] Spiegel Online: *Verkehr: Prinzip Bimmelbahn.* http://wissen.spiegel.de/wissen/dokument/dokument-druck.html?id=51878460&top=S, Stand: 11.08.2008.

[46] Spiegel Online: *Winterkorn hält Elektroauto für den Wagen der Zukunft.* http://www.spiegel.de/wirtschaft/0,1518,559897,00.html, Stand: 05.08.2008.

[47] Statistisches Bundesamt: http://www.destatis.de.

[48] Statistisches Bundesamt: *Datenreport 2006 - Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland.*

[49] Statistisches Bundesamt: *Fachserie 8, Reihe 6.2: Verkehr - Luftverkehr auf allen Flugplätzen 2007.*

[50] Statistisches Bundesamt: *Verkehr in Deutschland 2006.*

[51] Statistisches Bundesamt: *Statistisches Jahrbuch 2007.*

[52] Stöcker, Horst: *Taschenbuch der Physik.* 5. Auflage, Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2004.

[53] Süddeutsche: *Ölreserven - Bergab mit aller Energie.* http://www.sueddeutsche.de/finanzen/artikel/781/169289/, Stand: 09.07.2008.

[54] Technischen Universität Dresden - Lehrstuhl für Verkehrsökonomie: *Was kostet Verkehr? Fragen und Antworten.* http://vplno2.vkw.tu-dresden.de/oeko/Ext-Kost/ext-kost-index.htm, Stand: 10.07.2008.

[55] Transrapid International: *Transrapid - Fragen und Antworten.* http://www.transrapid.de/cgi-tdb/de/basics.prg?a_no=38.

[56] Tübke, Jens: *Elektroauto, Hybridauto, Batterien und Brennstoffzellen.* http://www.elektroauto-tipp.de, Stand: 05.08.2008.

[57] Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Stadtplanung: *Stadtentwicklung mit dem*

TGV/ICE in Kaiserslautern. Albert Speer (Hrsg.). Kaiserslautern: Foto-Repro-Druck, 1996.

[58] Walter, Wolfgang: *Gewöhnliche Differentialgleichungen.* 7. Auflage, Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.

[59] Weidlich, Wolfgang: *Sociodynamics - A systematic approach to mathematical modelling in the social sciences.* Boston: Harwood Academic Publishers, 2000.

[60] Weidlich, Wolfgang: *Das Modellierungskonzept der Soziodynamik.* In: Curriculum Evolutorische Ökonomik - Lehrkonzepte zur Evolutorischen Ökonomik, Mathias Erlei & Marco Lehmann-Waffenschmidt (Hrsg.). Marburg: Metropolis-Verlag, 2002.

[61] Welt Online: *Verkehr: Schnellzüge hängen Flugzeuge ab.* http://www.welt.de/wirtschaft/article826853/Schnellzuege_haengen_Flugzeuge_ab.html, Stand: 06.08.2008.

[62] Werske, André: *TGV-Schnellstrecken.* http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/france/index_tgv_streckennetz.htm, Stand: 11.08.2008.

[63] Wikimedia Foundation Inc.: *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie.* http://de.wikipedia.org.

[64] WirtschaftsWoche: *Das ist die Zukunftstechnologie schlechthin.* http://www.wiwo.de/technik/das-ist-die-zukunftstechnologie-schlechthin-298652/, Stand: 05.08.2008.

[65] Zeit: *Billigflieger: Treibstoff wird teurer, Mobilität zum Luxus.* http://www.zeit.de/2008/29/Billigflieger, Stand: 28.07.2008.

[66] Zeit: *Erdöl-Förderung: Korrigiert die Energieagentur IEA ihre Prognosen?.* http://www.zeit.de/online/2008/22/iea-prognose, Stand: 09.07.2008.

[67] Zurmühl, Rudolf: *Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker.* 5. Aufl., Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1984.

A. Anhang

A.1. Physikalische und technische Simulation des Automobils

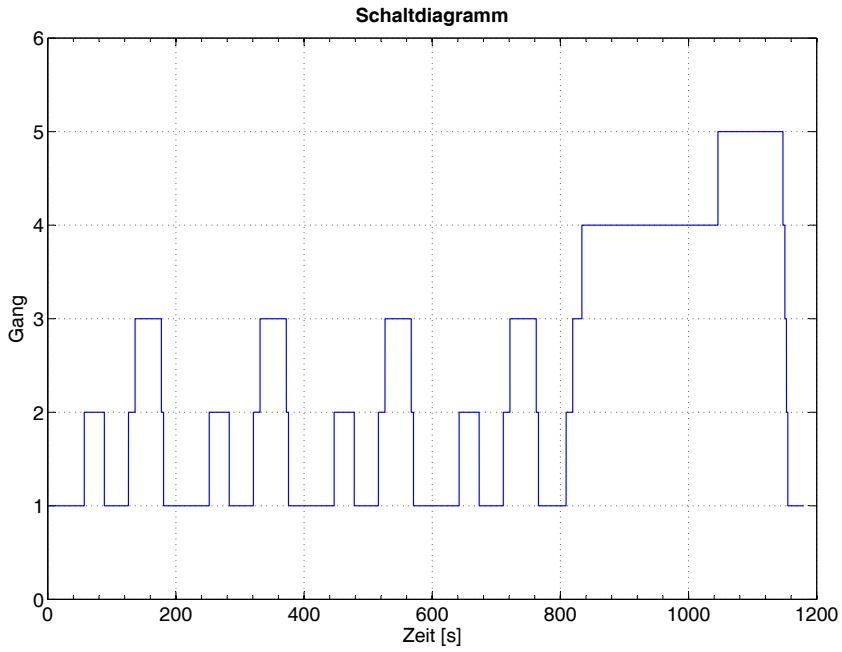


Abbildung A.1.: Schaltdiagramm der Simulation im NEFZ

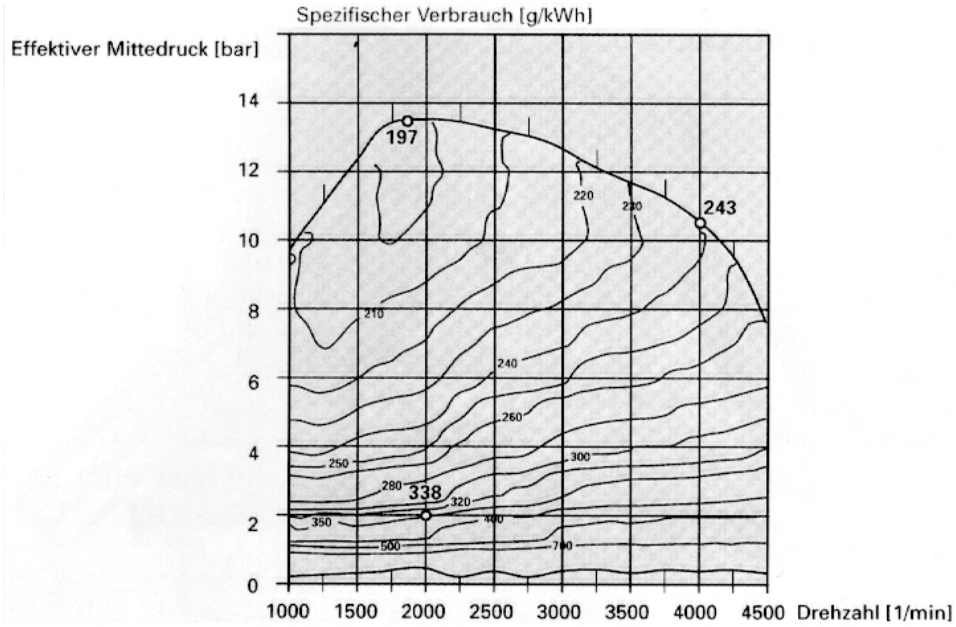


Abbildung A.2.: Muscheldiagramm 1,9 Liter TDI mit 66 kW / 90 PS. Quelle: Otte, Marius (Universität Dortmund): http://www.dt.e-technik.uni-dortmund.de/~otte/dieseltdi19.gif, Stand: 22.08.2008.

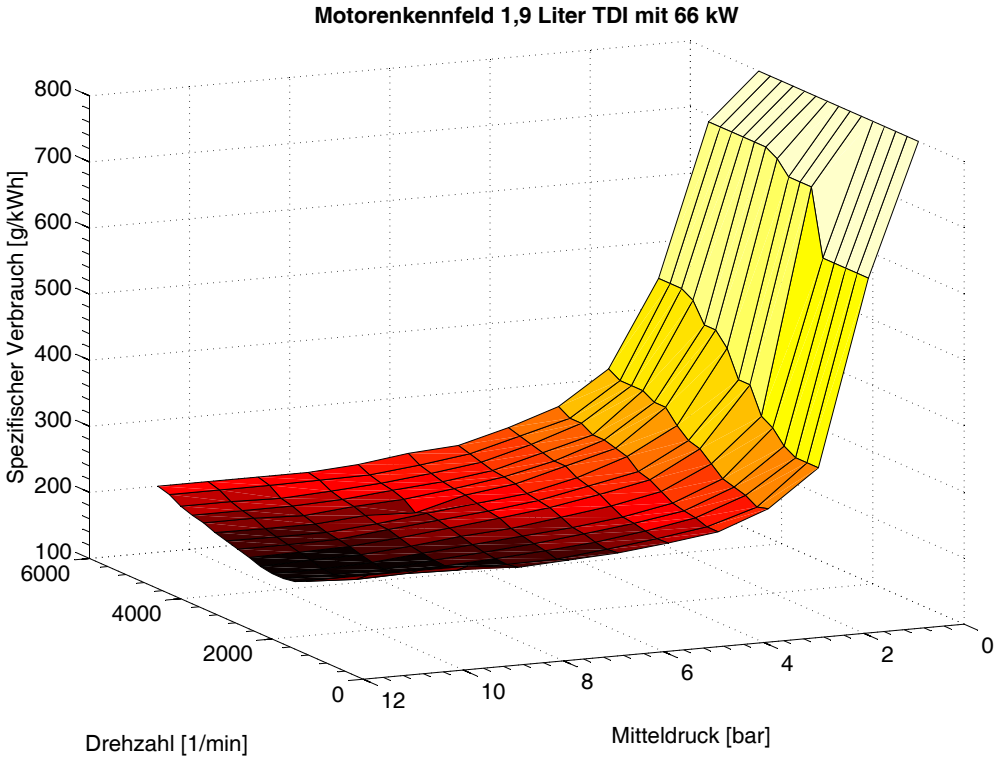


Abbildung A.3.: Motorenkennfeld 1,9 Liter TDI mit 66 kW

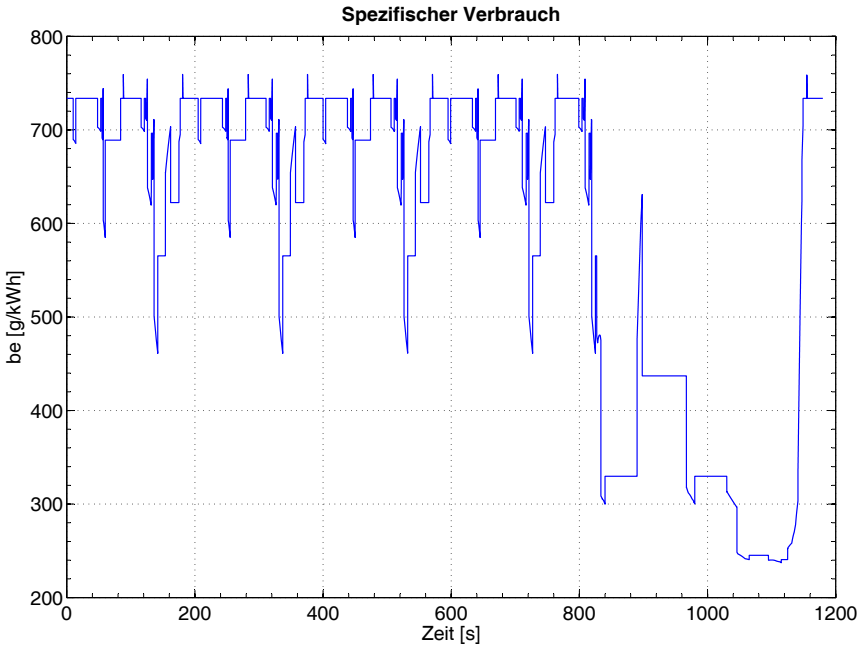


Abbildung A.4.: Spezifischer Verbrauch der Simulation im NEFZ

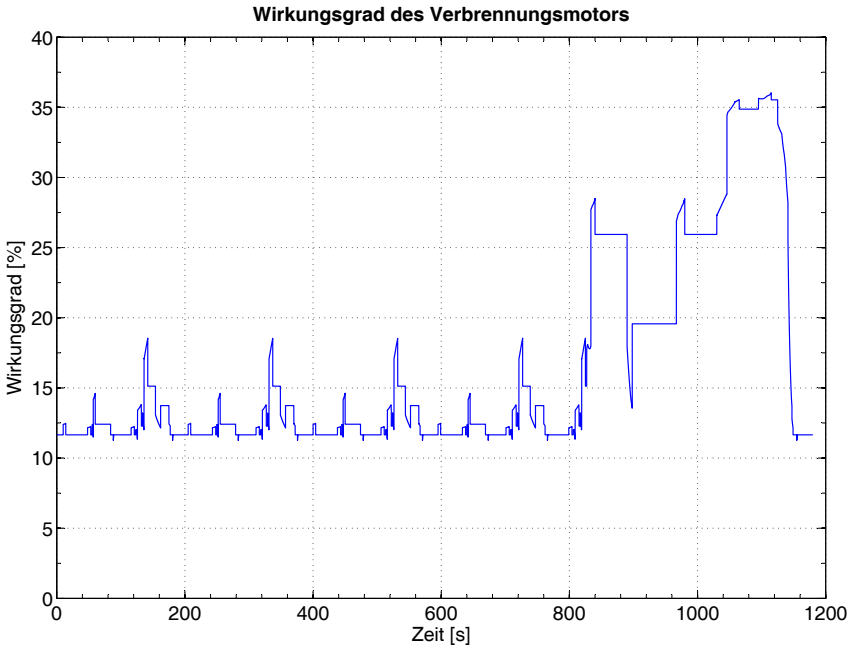


Abbildung A.5.: Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors der Simulation im NEFZ

A.2. Runge-Kutta-Verfahren

```
/**
* The class <i>RungeKutta</i> calculates a numerical solution
* of a ordinary differential equation system with the classical Runge-Kutta-Method
* @author Tobias Hartmann, Peter Böhme
*/
import java.util.Vector;


public class RungeKutta
{


    /**
     * This method solves the ordinary differential equation system
     * @param y array with the initial values including the x-value
     * @param xFinal final x-value
     * @param tolerance strictness of the numerical solution
     * @return numerical solution
     * */
    public static Vector<double[]> solve(double[] y, double xFinal, double tolerance)
    {
        Vector<double[]> results = new Vector<double[]>();
        results.add(y.clone());
        int numEqns = y.length;
        double[] yFein = new double[numEqns];
        double[] yGrob = new double[numEqns];
        double[] deltaY = new double[numEqns];
        double max;
        double h = tolerance;

        while(y[0] < xFinal)
        {
            yFein = oneStep(y, numEqns, h);
            yGrob = oneStep(y, numEqns, h*2);
            max = 0;
            y[0] = yFein[0];
            for (int j = 1; j<numEqns; j++)
            {
                deltaY[j] = (yFein[j] - yGrob[j])/15.;
                max = Math.max(Math.abs(deltaY[j]), max);
                y[j] = yFein[j];
            }
            if (max > 10*tolerance) h = h/2.;
            else if (max < 0.15*tolerance) h = h*2.;
            results.add(y.clone());
        }

        return results;
    }
```

Abbildung A.6.: Quellcode: Runge-Kutta-Algorithmus, Seite 1.

```
/**
 * This method calculates one step of the Runge-Kutta-Method
 * @param y0 initial value of this step
 * @param numEqns number of equations
 * @param h step size
 * @return final values of this step
 */
private static double[] oneStep(double[] y0, int numEqns, double h)
{
    double[] k1 = new double[numEqns];
    double[] k2 = new double[numEqns];
    double[] k3 = new double[numEqns];
    double[] k4 = new double[numEqns];
    double[] y = new double[numEqns];

    /** calculate k1 = f(y0) for every function */
    k1[0] = 1.;
    for(int i = 1; i<numEqns; i++)
    {
        k1[i] = equations(y0,i);
    }
    /** calculate point y0+h/2 */
    for(int i = 0; i<numEqns; i++)
    {
        y[i] = y0[i] + h/2.0*k1[i];
    }

    /** calculate k2 = f(y0+h/2) for every function */
    k2[0] = 1.;
    for(int i = 1; i<numEqns; i++)
    {
        k2[i] = equations(y,i);
    }
    /** calculate point y0+h/2  */
    for(int i = 0; i<numEqns; i++)
    {
        y[i] = y0[i] + h/2.0*k2[i];
    }

    /** calculate k3 = f(y2) for every function */
    k3[0] = 1.;
    for(int i = 1; i<numEqns; i++)
    {
        k3[i] = equations(y,i);
    }
    /** calculate point y0+h */
    for(int i = 0; i<numEqns; i++)
    {
        y[i] = y0[i] + h*k3[i];
    }

    /** calculate k4 = f(y0+h) for every function */
    k4[0] = 1.;
    for(int i = 1; i<numEqns; i++)
    {
        k4[i] = equations(y,i);
    }

    /** calculate result = y */
    for(int i = 1; i<numEqns; i++)
    {
        y[i] = y0[i] + h/6.0*( k1[i] + 2*k2[i] + 2*k3[i] + k4[i]);
    }

    return y;
}
```

Abbildung A.7.: Quellcode: Runge-Kutta-Algorithmus, Seite 2.

```
    /**
     * This method represents the ordinary differential equation system
     * dy1/dt = f(x,y1,y2)
     * dy2/dt = g(x,y1,y2)
     * @param y array with the values of the current state
     * @param id index of the equation
     * @return value of equation "id"
     */
    public static double equations(double[] y, int id)
    {
        switch(id)
        {
            case 1: return y[2];
            case 2: return -0.5*y[2]-Math.sin(y[1]);
            default: return 0;
        }
    }


    /**
    * MAIN-method to test the algorithm
    */
    public static void main(String[] args)
    {

        Vector<double[]> solution = solve(new double[]{0,1,1}, 10, 0.01);

        for(int i=0; i<solution.size(); i++)
        {
            for(double cell : solution.get(i))
            {
                System.out.print(Math.round((cell*1000))/1000. + "\t");
            }
            System.out.print("\n");
        }
    }

} /** end of class */
```

Abbildung A.8.: Quellcode: Runge-Kutta-Algorithmus, Seite 3.

A.3. Verkehrsmodell Paris - Marseille

Richtung: Paris - Marseille

	Flugzeug			TGV		
Datum	**Uhrzeit**	**Preis**	**Fahrtdauer**	**Uhrzeit**	**Preis**	**Fahrtdauer**
18.08.2008	16:30	339,00 €	01:15	18:16	41,00 €	03:05
22.08.2008	07:00	339,00 €	01:15	07:16	41,00 €	03:19
22.08.2008	16:30	339,00 €	01:15	16:16	72,00 €	03:06
24.08.2008	07:30	339,00 €	01:15	07:16	70,00 €	03:19
24.08.2008	20:30	75,00 €	01:15	19:16	29,00 €	03:19
26.08.2008	16:30	339,00 €	01:15	16:16	29,00 €	03:06
26.08.2008	20:30	75,00 €	01:15	19:16	29,00 €	03:19
28.08.2008	07:00	339,00 €	01:15	07:16	45,00 €	03:19
29.08.2008	07:00	339,00 €	01:15	06:16	40,00 €	03:13
29.08.2008	07:30	339,00 €	01:15	06:16	40,00 €	03:13
01.09.2008	06:30	339,00 €	01:15	06:16	45,00 €	03:13
02.09.2008	10:30	339,00 €	01:15	10:16	59,00 €	03:05
02.09.2008	19:00	229,00 €	01:15	19:16	22,00 €	03:19
04.09.2008	10:30	339,00 €	01:15	10:16	59,00 €	03:05
05.09.2008	07:00	339,00 €	01:15	07:16	40,00 €	03:19
08.09.2008	19:00	339,00 €	01:15	20:16	34,90 €	03:10
09.09.2008	16:30	339,00 €	01:15	16:46	22,00 €	03:12
11.09.2008	07:00	339,00 €	01:15	08:16	66,00 €	03:03
12.09.2008	14:30	339,00 €	01:15	15:13	61,90 €	03:21
12.09.2008	19:00	339,00 €	01:15	20:42	45,00 €	03:22
15.09.2008	06:30	339,00 €	01:15	06:16	25,00 €	03:13
15.09.2008	07:00	339,00 €	01:15	06:16	25,00 €	03:13
15.09.2008	18:00	339,00 €	01:15	18:16	22,00 €	03:05
18.09.2008	14:30	339,00 €	01:15	13:16	40,00 €	03:18
21.09.2008	18:00	339,00 €	01:15	18:16	45,00 €	03:05
22.09.2008	20:30	75,00 €	01:15	20:16	17,00 €	03:10
26.09.2008	16:30	63,00 €	01:15	16:46	67,00 €	03:12
26.09.2008	19:00	339,00 €	01:15	20:42	55,00 €	03:22
27.09.2008	14:30	63,00 €	01:15	14:16	40,00 €	03:05
28.09.2008	19:00	63,00 €	01:15	20:42	25,00 €	03:22
01.10.2008	10:30	63,00 €	01:15	11:16	17,00 €	03:19
02.10.2008	08:30	63,00 €	01:15	07:16	17,00 €	03:19
03.10.2008	07:00	63,00 €	01:15	07:16	22,00 €	03:19
03.10.2008	19:00	339,00 €	01:15	20:42	45,00 €	03:22
06.10.2008	08:30	63,00 €	01:15	08:16	17,00 €	03:03
06.10.2008	16:30	63,00 €	01:15	18:16	17,00 €	03:05
06.10.2008	17:00	63,00 €	01:15	18:16	17,00 €	03:05
06.10.2008	17:30	63,00 €	01:15	18:16	17,00 €	03:05
10.10.2008	16:30	63,00 €	01:15	16:46	45,00 €	03:12
13.10.2008	08:30	63,00 €	01:15	08:16	17,00 €	03:03
13.10.2008	14:30	63,00 €	01:15	14:16	17,00 €	03:05
13.10.2008	18:00	63,00 €	01:15	18:16	17,00 €	03:05
15.10.2008	06:30	63,00 €	01:15	06:16	17,00 €	03:13
17.10.2008	06:30	63,00 €	01:15	06:16	17,00 €	03:13
21.10.2008	16:30	63,00 €	01:15	06:16	17,00 €	03:06
21.10.2008	19:30	63,00 €	01:15	20:16	17,00 €	03:10
24.10.2008	07:00	63,00 €	01:15	07:16	40,00 €	03:19
26.10.2008	09:30	339,00 €	01:15	07:16	66,00 €	03:19
26.10.2008	19:00	63,00 €	01:15	19:16	17,00 €	03:19
26.10.2008	19:00	63,00 €	01:15	19:16	17,00 €	03:19
Mittelwert		**205,04 €**	**01:15:00**		**34,50 €**	**03:12:38**
Standardabweichung		**137,29 €**	**00:00:00**		**17,43 €**	**00:06:32**

Abbildung A.9.: Bestimmung von Ticketkosten und Fahrtdauer einer Reise von Paris nach Marseille mit Flugzeug oder TGV an zufällig ausgewählten Tagen.

Richtung: Marseille - Paris

	Flugzeug			TGV		
Datum	**Uhrzeit**	**Preis**	**Fahrtdauer**	**Uhrzeit**	**Preis**	**Fahrtdauer**
18.08.2008	10:30	335,00 €	01:20	10:28	133,30 €	03:09
20.08.2008	07:00	335,00 €	01:20	06:28	46,00 €	03:03
21.08.2008	07:00	335,00 €	01:20	07:28	61,00 €	03:17
22.08.2008	07:00	335,00 €	01:20	07:28	41,00 €	03:17
24.08.2008	19:00	335,00 €	01:20	19:28	93,90 €	03:17
25.08.2008	07:00	335,00 €	01:20	08:28	95,70 €	03:03
25.08.2008	19:30	335,00 €	01:20	19:28	78,20 €	03:17
29.08.2008	07:00	335,00 €	01:20	07:28	70,00 €	03:17
29.08.2008	19:30	335,00 €	01:20	19:28	65,90 €	03:17
31.08.2008	11:30	335,00 €	01:20	10:28	95,70 €	03:09
01.09.2008	20:30	71,00 €	01:20	19:28	61,90 €	03:17
04.09.2008	06:30	335,00 €	01:20	06:28	25,00 €	03:03
05.09.2008	16:30	335,00 €	01:20	17:28	67,00 €	03:17
06.09.2008	07:00	335,00 €	01:20	08:28	40,00 €	03:03
06.09.2008	14:30	335,00 €	01:20	15:28	40,00 €	03:13
08.09.2008	14:30	335,00 €	01:20	13:28	45,00 €	03:17
10.09.2008	16:30	335,00 €	01:20	16:28	40,00 €	03:03
12.09.2008	20:30	71,00 €	01:20	19:28	61,90 €	03:17
14.09.2008	09:00	335,00 €	01:20	07:28	51,00 €	03:17
14.09.2008	16:30	335,00 €	01:20	16:28	95,70 €	03:03
15.09.2008	06:30	335,00 €	01:20	06:28	50,00 €	03:03
19.09.2008	07:00	335,00 €	01:20	07:28	40,00 €	03:17
20.09.2008	07:00	335,00 €	01:20	09:28	40,00 €	03:17
21.09.2008	09:00	335,00 €	01:20	07:28	40,00 €	03:17
21.09.2008	11:30	335,00 €	01:20	10:28	38,90 €	03:09
23.09.2008	10:30	335,00 €	01:20	10:28	34,90 €	03:09
24.09.2008	10:30	62,00 €	01:20	10:28	17,00 €	03:09
24.09.2008	16:30	62,00 €	01:20	16:28	40,00 €	03:03
25.09.2008	07:00	62,00 €	01:20	07:28	17,00 €	03:17
26.09.2008	16:30	335,00 €	01:20	06:28	62,00 €	03:03
30.09.2008	08:30	62,00 €	01:20	08:28	17,00 €	03:03
03.10.2008	07:00	62,00 €	01:20	08:28	17,00 €	03:03
03.10.2008	10:30	62,00 €	01:20	10:28	34,90 €	03:09
04.10.2008	16:30	62,00 €	01:20	17:58	17,00 €	03:13
05.10.2008	19:00	62,00 €	01:20	19:28	65,90 €	03:17
07.10.2008	07:00	335,00 €	01:20	08:28	17,00 €	03:03
10.10.2008	07:00	62,00 €	01:20	08:28	17,00 €	03:03
11.10.2008	07:00	62,00 €	01:20	09:28	22,00 €	03:17
11.10.2008	14:30	62,00 €	01:20	15:28	17,00 €	03:13
11.10.2008	19:30	62,00 €	01:20	20:28	17,00 €	03:09
13.10.2008	09:00	62,00 €	01:20	09:28	25,00 €	03:17
14.10.2008	08:30	62,00 €	01:20	08:28	17,00 €	03:03
15.10.2008	19:00	62,00 €	01:20	19:28	17,00 €	03:17
16.10.2008	07:00	62,00 €	01:20	07:28	17,00 €	03:17
18.10.2008	07:00	62,00 €	01:20	08:28	17,00 €	03:03
22.10.2008	16:30	62,00 €	01:20	16:28	17,00 €	03:03
23.10.2008	07:00	62,00 €	01:20	09:28	22,00 €	03:17
23.10.2008	10:30	62,00 €	01:20	10:28	17,00 €	03:09
25.10.2008	07:00	62,00 €	01:20	08:28	62,00 €	03:03
26.10.2008	09:00	335,00 €	01:20	07:28	17,00 €	03:17
Mittelwert		**209,78 €**	**01:20:00**		**43,16 €**	**03:10:43**
Standardabweichung		**137,06 €**	**00:00:00**		**27,52 €**	**00:06:16**

GESAMT

Mittelwert	**207,41 €**	**01:17:30**		**38,83 €**	**03:11:41**
Standardabweichung	**136,50 €**	**00:02:31**		**23,33 €**	**00:06:26**

Abbildung A.10.: Bestimmung von Ticketkosten und Fahrtdauer einer Reise von Marseille nach Paris mit Flugzeug oder TGV an zufällig ausgewählten Tagen.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Ort, Datum

Tobias Hartmann