Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology. (http://www.ub.tuwien.ac.at/eng/).

# DISSERTATION

## **Doctoral Thesis**

# Erdöl und Verkehr – Ein systemdynamisches Modell zur Beschreibung des Personenverkehrs in Österreich bei steigenden Treibstoffpreisen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften (Dr. techn.)

unter der Betreuung von

Em. O. Univ.-Prof. DI Dr. techn. Hermann Knoflacher

eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen

von

DI (FH) Markus Foltin

Matr.Nr. 0527225

Mühlgasse 8/4/15, A-1040 Wien

Vien, im Februar 2010	
vieli, illi rebi uai 2010	

# INHALTSVERZEICHNIS

1	VORV	VORT & DANKSAGUNG	1
2	KURZ	FASSUNG	3
3	ABST	RACT	4
4	ABBI	LDUNGSVERZEICHNIS	5
5	TABE	LLENVERZEICHNIS	9
6	PROL	OG	10
7	GRUN	IDLAGEN	14
7.1	Was	ist ein System?	14
7.2	Assi	milation und Dissimilation als Grundlage des Systems Leben	15
7.3	Das	System Weltbevölkerung	17
7.4	Die	ndustrielle Revolution – Ein "Störfaktor" im System <i>Erde</i>	19
7.5	Subs	titutionsprozesse	21
7.6	Der	fossile Energiehaushalt	25
7.7	Die	Hubbert-Kurve als Ausgangstheorie für die Berechnung der Produktionsrate	26
7.8	Erdö	l – Das schwarze Gold	30
7	.8.1 D	e Förderung	30
7	.8.2 D	e Destillation	30
7		onventionelles und unkonventionelles Erdöl	
7	.8.4 Eı	dölvorkommen	
	7.8.4.1	Reserven	31
	7.8.4.2	Ressourcen	31
	7.8.4.3	Gesamtressourcen (verbleibendes Potenzial bei Kohlenwasserstoffen)	33

	7.8.4.4	Gesamtpotential (Estimated Ultimate Recovery EUR)	33
7.8	3.5 Ste	igende Preise am Erdölmarkt – Ein Resultat aus knappem Angebot und hoher Nachfrage	34
8	SYSTE	M DYNAMICS	35
8.1	Allger	neines	35
8.2	Offen	e und geschlossene Systeme in der Systemtheorie	35
8.2	.1 Pos	sitive Rückkopplungssysteme	35
8.2	2 Ne	gative Rückkopplungssysteme	36
8.3	Die Sy	rstemgrenze	37
8.4	Besta	ndsgrößen und Flussgrößen	38
8.5	Causa	l Loop Diagramme – Kybernetik	38
8.6	Softw	are für System Dynamics	39
8.7	Das Lo	otka-Volterra-Modell als Anwendungsbeispiel für Systemdynamik	39
8.7	'.1 CLE	Oder Räuber-Beute-Beziehung	40
8.7	'.2 Die	Umsetzung des qualitativen in ein quantitatives Modell	41
8.7	'.3 Sim	nulation	42
9	SYSTE	M DYNAMICS – TEILMODELL ERDÖL	44
9.1	Causa	l-Loop-Diagramm (CLD)	44
9.2	Syste	m-Dynamics Implementierung	46
9.2	1 Loc	pp 1 (Der Ressourcenloop und der Angebot-Nachfrage-Loop)	48
	9.2.1.1	Entdeckungsrate	49
	9.2.1.2	Produktionskostenfunktion	51
	9.2.1.3	Kostenfunktion	54
	9.2.1.	3.1 Wirtschaftswachstum und Erdölnachfrage	56
	9.2.1.4	Nachfragefunktion	59
	9.2.1.5	Die Preiselastizität der Nachfrage'	61
	9.2.1.6	Die Produktionsrate, Ressourcen, Reserven und Produziertes Erdöl	63
9.2	2.2 Loc	p 2 (Der Technologieloop)	64
	9.2.2.1	Die Preiselastizität als Maß für F&E Investitionen	65
	9.2.2.2	Beispiel:	65
	9.2.2.3	Die Grenzen technologischen Fortschritts – Der Irrglaube exponentiellem Wachstums	67
	9.2.2.	3.1 Das Moore'sche Gesetz	67

	9.2.2	.3.2 Der supersonische Passagiertransport mit Flugzeugen	69
	9.2.2	.3.3 Die technologische Grenze für Autos	69
	9.2.2	.3.4 Die Weltbevölkerung	70
	9.2.2.4	Realisierung im Modell	70
	9.2.3 Lo	op 3 (Der Substitutionsloop)	74
	9.2.3.1	Die Substitutionsfunktion	75
	9.2.3	.1.1 Allgemeines	75
	9.2.3	.1.2 Realisierung im Modell	76
1(	) SYS	TEM DYNAMICS – TEILMODELL SYSTEMGESCHWINDIGKEIT	80
10	.1 Caus	al-Loop Diagramm (CLD)	80
	10.1.1	Konstantes Reisezeitbudget	80
	10.1.2	Konstante Wegeanzahl pro Tag	81
	10.1.3	Steigende Weglänge Pro Tag	82
10	.2 Syste	m Dynamics – Teilmodell Systemgeschwindigkeit	80
	10.2.1	Beschreibung des Teilmodells	
	10.2.2	Berechnung des Verkehrsmittelanteils am Gesamtverkehrsaufwand	
	10.2.2.1		
	10.2.2.2		
	10.2.2.3		
	10.2.2.4		
	10.2.2.5	C .	
	10.2.2.6		
		Der Gesamt(personen)verkehrsaufwand	
	10.2.3	Die Berechnung des Motorisierungsgrades	
	10.2.3.1		
	10.2.3.2	·	
	10.2.3.3		
	10.2.4	Die Tagesgebietsfläche	104
11	SYS'	TEM DYNAMICS – TEILMODELL INDIVIDUALVERKEHR	.107
11	.1 Caus	al Loop Diagramm	107
	11.1.1	Der technologische Fortschritt	107
	11.1.1.1	Die Erfahrungskurve	109
11	.2 Der S	ubstitutionsprozess bei Fahrzeugen	110
	11 2 1 1	Fuhrwerke	110

	Hybridfahrzeuge	111
11.2.1.3	Brennstoffzellenfahrzeuge	112
11.2.1.4	Aktuelle Tendenzen	114
11.3 Syste	m Dynamics – Teilmodell Individualverkehr	115
	Das Kostenmodell	
11.3.1.1		
11.3.1	.1.1 Der Treibstoffpreis	116
11.3.1	.1.2 Die Treibstoffeffizienz	117
11.3.1	L.1.3 Distanz pro Jahr	119
11.3.1.2	Die Fixkosten	119
11.3.1.3	Die Gesamtkosten pro Fahrzeug und Jahr	122
11.3.1.4	Der Investitionsfaktor	123
11.3.2	Das IV-Substitutionsmodell	124
11.3.2.1	Die Abflussvariable	125
11.3.2.2	Die Zuflussvariable	125
11.3.2	2.2.1 Die Kapazität neuer Fahrzeuge	126
11.3.2	2.2.2 Die IV-Substitutionsfunktion	126
11.3.3	Die Durchschnittsgeschwindigkeit im Individualverkehr	128
11.3.3.1	Der Level of Service	129
		_
12 SYS	TEM DYNAMICS - DAS GESAMTMODELL	
		133
	ΓΕΜ DYNAMICS - DAS GESAMTMODELL	133
12.1 Causa	ıl Loop Diagramm Gesamtmodell	133
12.1 Causa		133
12.1 Causa	ıl Loop Diagramm Gesamtmodell	133
12.1 Causa  13 VER  13.1 Produ	GLEICH MODELL MIT EMPIRISCHEN DATEN	133
12.1 Causa 13 VER 13.1 Produ 13.2 Der P	Il Loop Diagramm Gesamtmodell	133135137
12.1 Causa 13 VER 13.1 Produ 13.2 Der P	Il Loop Diagramm Gesamtmodell	133135137138
12.1 Causa 13 VER 13.1 Produ 13.2 Der P	Il Loop Diagramm Gesamtmodell	133135137138
12.1 Causa 13 VER 13.1 Produ 13.2 Der P 13.3 Der M 13.4 Gesan	Il Loop Diagramm Gesamtmodell	133135137138140
12.1 Causa 13 VER 13.1 Produ 13.2 Der P 13.3 Der M 13.4 Gesar 13.5 Verke	IL Loop Diagramm Gesamtmodell	133135137138140141
12.1 Causa 13 VER 13.1 Produ 13.2 Der P 13.3 Der N 13.4 Gesar 13.5 Verke 13.6 Der V	Il Loop Diagramm Gesamtmodell	133135137138140141

14.1	Tei	lmodell Erdöl	147
14.	1.1	Die Finanzkrise 2007/2008	148
14.2	Tei	Imodell Systemgeschwindigkeit	149
14.2	T-:	ilas adall tadicido alcadado	150
14.3	ıeı	lmodell Individualverkehr	150
15	SZ	ENARIENENTWICKLUNG	151
15.1	Sze	enarium <i>URR 7000 Gb</i>	151
15.2	Sze	enarium <i>URR 3500 Gb</i>	155
15.	2.1	Substitution zu alternativen Antriebsformen (URR 3500Gb a)	156
15.	2.2	Keine Substitution zu alternativen Antriebsformen (URR 3500Gb b)	157
15.3	Sze	enarium <i>URR 4500 Gb</i>	159
15.	3.1	Substitution zu alternativen Antriebsformen (URR 4500Gb a)	159
15.	3.2	Keine Substitution zu alternativen Antriebsformen (URR 4500Gb b)	161
15.4	Sze	enarium <i>SOLAR</i>	162
15.5	<b>S</b> 70	enarium <i>OLDUVAI</i>	164
13.3	326	charium oldovar	104
16	DI	E SENSITIVITÄTSANALYSE FÜR DIE PRODUKTIONSKURVE VO	N ERDÖL 167
16.1	Ge	samtpotential	167
16.2	Brı	uttoweltproduktrate	169
10.2		·	
16.3	Ted	chnologiedauer	169
16.4	Erg	gebnisse	169
45	DE	ACEDNICCE DED CZENIA DIENENWANOWI UNIC	454
17		RGEBNISSE DER SZENARIENENTWICKLUNG	
	1.1	Erdölreserven	
	1.2	Der Substitutionsanteil	
	1.3	Die Produktionsrate	
	1.4	Der Preis pro Fass	
	1.5	Der Motorisierungsgrad  Der Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand	
	1.6	Streckenlänge pro Weg	
	1.7	Streckenlange pro Weg  Der Gesamtverkehrsaufwand	
1/.	1.8	Der Gesamtverkenrsaufwand	1//

18	ZUS	SAMMENFASSUNG UND SCHLUSSWORT17	8
19	LIT	TERATURVERZEICHNIS18	3
20	AP	PENDIX	. I
20.1	Bere	echnung der Preiselastizität aus der Nachfragefunktion	I
20.2	Übe	rsicht der Konstanten nach Szenarium	.H
20.3	Übe	rsicht der verwendeten Daten	V
20.	3.1	Bruttoweltprodukt (BWP), BIP pro Kopf in Österreich, Bevölkerung in Österreich	٧
20.	3.2	Preis für ein Fass Rohöl im Jahr 1900	Χ
20.	3.3	Straßenlänge	Χ
20.	3.4	Anfangswerte für Fuhrwerke, konventionelle Autos, Hybridfahrzeuge und Wasserstofffahrzeuge	X
20.	3.5	Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrsmittel	X
20.4	Mod	dellübersicht	ΧI
20.	4.1	VENSIM-Quelltext	ΧI

## 1 VORWORT & DANKSAGUNG

"97 Prozent des gesamten Verkehrs in den USA basieren auf Erdöl. 1 95 Prozent der Waren werden mit Hilfe von Erdöl zu den Geschäften transportiert. 2 95 Prozent aller Früchte in Großbritannien werden aus dem Ausland importiert". 3

Wir leben in einer Gesellschaft, die ihren Wohlstand auf Erdöl aufbaut. Der Verkehr, die Industrie, die Landwirtschaft, aber auch alltägliche Gegenstände wie Lebensmittel, Fensterrahmen, Fußbodenbeläge, Polstermöbel, Matratzen, Gießkannen, Staubsauger, Waschmittel, CDs, Medikamente in der Apotheke und vieles mehr benötigen in irgendeiner Weise Erdöl.

In meiner Arbeit werden die systematischen Zusammenhänge der Erdölindustrie qualitativ aufgezeigt, mit Hilfe der Systemdynamik quantifiziert und gezeigt, dass auf lange Sicht der Erdölpreis und damit auch der Treibstoffpreis nur steigen können. Die Geschwindigkeit bzw. Art, mit welcher dieser steigt, hängt von einer Reihe von Faktoren ab und wird in unterschiedlichen Szenarien bewertet. Steigende Transportkosten dienen des Weiteren als Basis für die Bewertung des Personenverkehrs in Österreich. Die Systemdynamik setzt die einzelnen Mobilitätskennzahlen in ein Ursache-Wirkungsprinzip und zeigt wie Motorisierungsgrad, Verkehrsaufwand, Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand, Reisezeitbudget etc. miteinander zusammenhängen und sich gegeneinander beeinflussen.

Da in meiner Dissertation der Zeitraum vom Jahr 1900 bis zum Jahr 2070 erfasst wird und dadurch eine Prognose einerseits in die Zukunft wie auch andererseits, aus Mangel an Daten, in die Vergangenheit durchgeführt wird, möchte ich am Anfang meiner Dissertation einen kurzen geschichtlichen Rückblick und eine Einführung in Substitutionsprozesse machen. Ich hoffe durch die vielen Verweise und Hintergrundinformationen eine spannende und interessante Arbeit für den Leser, geschrieben zu haben und, dass der Blick in die Blackbox "Verkehr" gelingt.

Mein größter Dank für die Entstehung meiner Dissertation geht an meine Eltern, Martina Foltin und Mag. arch. Klaudius Foltin. Ohne deren mentalen und finanziellen Unterstützung für mein Projekt *Doktor an der TU Wien* wäre diese Arbeit mit Sicherheit nicht zu Stande gekommen. Sie

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Steve MARSHALL, Renewable Energy in the Pacific Northwest, 2007, Seite 2

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Chris SKREBOWSKI, *The production reality, online,* Seite 12

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> DEFRA, The Validity of Food Miles as an Indicator of Sustainable Development, Final Report, 2005, Seite 7

halfen mir durch Zeiten, in welchen ich oft den Faden während meiner Arbeit bzw. während meines Studiums verloren hatte und brachten mich wieder am Weg zum Ziel zurück.

Gleichzeitig möchte ich mich bei meiner Freundin Mag.<sup>a</sup> Barbara Kubica für die Stunden, Tage, ja Wochen, in welchen wir beide für unsere Diplomarbeit bzw. Dissertation parallel gearbeitet haben, sehr herzlich bedanken. Wir konnten so nicht nur eine schöne und intensive Zeit miteinander verbringen, sondern unterstützten und motivierten uns auch gegenseitig.

Ich möchte mich bei Herrn Em. O. Univ. Prof. DI Dr. techn. Hermann Knoflacher für die Erweiterung meines Horizonts in Sachen Verkehrsplanung, welche eine interdisziplinäre Wissenschaft in einem weiten Netzwerk von anderen Wissenschaften darstellt und dessen großer Einfluss auf den Menschen oft nicht gesehen oder erkannt wird, bedanken. Gleichzeitig gilt mein Dank seinem sofortigen Willen mich bei meiner Dissertation zu betreuen, obwohl ich ursprünglich von einer Fachhochschule (FH Joanneum, Studienrichtung: Luftfahrt) gekommen bin und es hier und dort diesbezüglich leider noch Ressentiments gibt.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei den Herren Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Günter Emberger und DI Dr. techn. Paul Pfaffenbichler bedanken für die immer hilfsbereite Art bei der Beantwortung meiner Fragen während der Erstellung meiner Arbeit.

Wie bei jeder technischen Arbeit lassen sich leider einzelne Wortwiederholungen oder komplizierte Satzkonstruktionen nicht vermeiden und ich möchte in diesem Zusammenhang das Vorwort mit den Worten des überragenden Physikers Albert Einstein schließen: "Im Interesse der Deutlichkeit erschien es mir unvermeidlich, mich oft zu wiederholen, ohne auf die Eleganz der Darstellung die geringste Rücksicht zu nehmen; ich hielt mich gewissenhaft an die Vorschrift des genialen Theoretikers L. Boltzmann, man solle die Eleganz Sache der Schneider und Schuster sein lassen".4

2

 $<sup>^{\</sup>rm 4}$  Albert EINSTEIN, Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Braunschweig, 1917, Vorwort

## 2 Kurzfassung

Eine limitierte nicht erneuerbare Ressource und eine Weltwirtschaft, welche auf dieser Ressource aufbaut – dieser elementare Konnex macht es eindeutig, dass der Preis für diese Ressource im langfristigen Kontext nur anwachsen kann. In dieser Arbeit werden die systemdynamischen Mechanismen hinter dieser Preissteigerung und deren Auswirkungen auf den Personenverkehr in Österreich qualifiziert und quantifiziert.

Als Ausgangsmodell für die Erdölmechanismen dient eine Arbeit von William W. BEHRENS von der *System Dynamics Group* am *MIT* bzw. ein systemdynamisches Modell von Paulo GONCALVES. BEHRENS veranschaulichte anhand von Causal-Loop-Diagrammen die Ursache-Wirkungsketten einer nicht-erneuerbaren Ressource und beschrieb mit Hilfe von empirischen Daten die systemdynamische Funktion komplexer Systeme.

In diesem Modell wurden jene Ansätze aufgenommen und für die nicht-erneuerbare Ressource *Erdöl* adaptiert. Die zentralen Fragen über das Gesamtpotential von Erdöl bzw. die Substituierbarkeit zu anderen Energieträgern können in dieser Arbeit nicht eindeutig beantwortet werden. Repräsentative Modellausgangsgrößen wie die gerade genannten werden jedoch durch Variation der Eingangsgrößen in sieben unterschiedlichen Szenarien geschätzt.

Unter der Prämisse steigender Treibstoffpreise werden Ursache-Wirkungs-Beziehungen im Personenverkehr in Österreich untersucht. Ziel der Modellbildung war die Verwendung von möglichst vielen konstanten Mobilitätsparametern, wie *konstantes Reisezeitbudget, konstante Wege pro Tag, etc.* um die Komplexität – ohne Verlust der Aussagekraft – so niedrig wie möglich zu halten.

Um die Plausibilität des Modells bewerten zu können, wurden ausgewählte primäre Modellausgangsgrößen mit empirischen Zeitreihendaten verglichen und analysiert. Eine anschließende kritische Reflexion gibt Aufschluss über die Grenzen des Modells und Restriktionen, welche mit bestimmten Annahmen verbunden sind.

Die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 16 soll Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit des "Peak-Oil" Zeitpunktes durch zufällige Variation der Eingangsgrößen innerhalb bestimmter Größen geben.

Die Aufschlüsselung des gesamten verwendeten Quellcodes und eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Szenarien mit den wichtigsten Modellausgangsgrößen runden diese Arbeit ab und sollen einen Einblick in das vergangene-, gegenwärtige- und zukünftige Verkehrsverhalten von Menschen gewähren.

# 3 ABSTRACT

The elemental contrast of a limited non-renewable natural resource and a global economy, that primarily builds on that resource, constitutes the fact that in the long run the price for crude oil can only increase.

In the thesis at hand, the system-dynamic mechanics behind these price rises and their consequences for the passenger transportation in Austria will be illustrated and quantified.

As the basic model for the mechanics of crude oil serves the model of Paulo GONCALVES which is based on the paper of William W. BEHRENS of the MIT System Dynamics Group. By using causal-loop diagrams, BEHRENS shows the dynamics of the cause-and-effect chain of a non-renewable resource in general and additionally describes the basic approach for quantifying such feedback control systems with the help of empiric data.

In the case of this thesis, BEHRENS' paper is implemented and adapted for the non-renewable resource *crude oil*. The central questions about the ultimate recoverable reserves of crude oil or the substitutability to other energy sources cannot be answered clearly, but representative output parameters will be estimated in seven different scenarios.

Assuming a state of rising fuel prices, cause-and-effect relations of the passenger transportation in Austria are examined. By using a large number of constant mobility parameters, such as constant time-travel-budget, or constant travels per day, it was possible to keep the model compact and clear.

To check the plausibility of this model, empiric time series data was used. Subsequently a critical reflection analyzes the limits and restrictions of this model.

The sensitivity analysis in chapter 16 is used to estimate the probable time of peak-oil by randomly varying the input parameters within certain limits.

By unfolding the whole source code and by giving detailed descriptions of each scenario, this thesis is rounded off and should deliver insight into the past, present and future mobility behavior of people.

# 4 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 7-1, DAS SYSTEM LEBEN, EIGENE DARSTELLUNG	17
ABBILDUNG 7-2, WELTBEVÖLKERUNG IN MILLIARDEN MENSCHEN, EIGENE DARSTELLUNG	17
ABBILDUNG 7-3, BIP PRO KOPF UND GEBURTENZIFFER, EIGENE DARSTELLUNG	18
ABBILDUNG 7-4, WELTBEVÖLKERUNG NACH KONTINENTEN, EIGENE DARSTELLUNG	18
ABBILDUNG 7-5, DAS SYSTEM <i>WELTBEVÖLKERUNG</i> , EIGENE DARSTELLUNG	19
ABBILDUNG 7-6, ANZAHL DER ZUGTIERE UND ANZAHL DER AUTOMOBILE IN DEN USA	22
ABBILDUNG 7-7 ANTEILE VON AUTOMOBILEN NACH EMISSIONSKONTROLLEN, EIGENE DARSTELLUNG MIT LOGISTIC	
SUBSTITUTION MODEL II	23
ABBILDUNG 7-8, ANTEILE DER INFRASTRUKTURWEGE IN DEN USA, EIGENE DARSTELLUNG MIT LOGISTIC SUBSTITUTION	I
MODEL II	24
ABBILDUNG 7-9, ENERGIEVERBRAUCH DER USA IN BTU, EIGENE DARSTELLUNG	25
ABBILDUNG 7-10, ZUSAMMENHANG ZWISCHEN ERDÖLFÖRDERUNGSRATE UND KUMULATIVER ERDÖLFÖRDERUNG IN	DEN
USA (PFÖRDERUNGSRATE, QKUMULATIVE FÖRDERMENGE), EIGENE DARSTELLUNG	26
ABBILDUNG 7-11, HUBBERT KURVE FÜR DIE USA, EIGENE BERECHNUNG UND DARSTELLUNG	27
ABBILDUNG 7-12, ERDÖLFÖRDERUNG NORWEGEN, EIGENE DARSTELLUNG	28
ABBILDUNG 7-13, VORHERSAGEN DER WELTWEITEN ERDÖLPRODUKTION IN MBPD (MILLION BARRELS PER DAY)	29
ABBILDUNG 7-14, ÜBERSICHT RESERVEN UND RESSOURCEN	31
ABBILDUNG 7-15, ZUSAMMENHANG ZWISCHEN RESSOURCEN, RESERVEN UND PRODUZIERTES ERDÖL FÜR DIE USA	32
ABBILDUNG 7-16, SCHÄTZUNGEN VERSCHIEDENER STUDIEN FÜR DAS GESAMTPOTENTIAL KONVENTIONELLEM ERDÖLS	s,
(ESTIMATED ULTIMATE RECOVERY – EUR), EIGENE DARSTELLUNG	33
ABBILDUNG 7-17, WELTWEITES ERDÖLVERSORGUNGSWACHSTUM	34
ABBILDUNG 8-1, EXPONENTIELLES WACHSTUM BEI POSITIVEN RÜCKKOPPLUNGSPROZESSEN, EIGENE DARSTELLUNG	36
ABBILDUNG 8-2, RADIOAKTIVE ZERFALL VON CÄSIUM 137 BEI EINER HALBWERTSZEIT VON 30,2 JAHREN, EIGENE	
DARSTELLUNG	37
ABBILDUNG 8-3, CLD POSITIVE RÜCKKOPPLUNG, EIGENE DARSTELLUNG	38
ABBILDUNG 8-4, CLD NEGATIVE RÜCKKOPPLUNG, EIGENE DARSTELLUNG	39
ABBILDUNG 8-5, FELLZAHLEN VON SCHNEESCHUHHASEN UND LUCHSEN, WELCHE BEI DER HUDSON'S BAY COMPANY	
ZWISCHEN 1850 UND 1900 ABGEGEBEN WORDEN SIND,	39
ABBILDUNG 8-6, CLD DER RÄUBER-BEUTE-BEZIEHUNG, EIGENE DARSTELLUNG	41
ABBILDUNG 8-7, RÄUBER-BEUTE MODELL IN VENSIM, EIGENE DARSTELLUNG	42
ABBILDUNG 8-8, RÄUBER-BEUTE-SIMULATION 1 IN VENSIM,	43
ABBILDUNG 8-9, RÄUBER-BEUTE-SIMULATION 2 IN VENSIM,	43
ABBILDUNG 9-1, BEHRENS W. W., THE DYNAMICS OF NATURAL RESOURCE UTILIZATION, SYSTEM DYNAMICS GROUP,	
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY ,CAMBRIDGE, 1972, SEITE 93, © 1972 SIMULATION COUNCILS INC	44
ABBILDUNG 9-2, CLD TEILMODELL ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG	45
ABBILDUNG 9-3, STOCK - FLOW DIAGRAMM, DENNIS L. MEADOWS, <i>LIMITS TO GROWTH - THE 30-YEAR UPDATE</i> , WHIT	E
RIVER JUNCTION, 2004, SEITE 90, EIGENE DARSTELLUNG	46
ABBILDUNG 9-4, DE CASTRO C., MIGUEL L. J., MEDIAVILLA M THE ROLE OF NON CONVENTIONAL OIL IN THE	
ATTENUATION OF PEAKOIL, ENERGY POLICY (2009), SEITE 1827, © 2009 ELSEVIER LTD	47
ABBILDUNG 9-5, VERGLEICH HISTORISCHER DATEN UND MODELL FÜR DIE USA,	47

ABBILDUNG 9-6, TECHNOLOGIELOOP UND ANGEBOT-NACHFRAGE-LOOP, EIGENE DARSTELLUNG	48
ABBILDUNG 9-7, GESCHÄTZTE PRODUKTIONSRATEN VON ERDÖL IN DEN POLARGEBIETEN	49
ABBILDUNG 9-8, ERDÖLENTDECKUNGEN IN MRD. FASS ERDÖL PRO JAHR	49
ABBILDUNG 9-9, VARIABLE ENTDECKUNGSRATE, EIGENE DARSTELLUNG	50
ABBILDUNG 9-10, VARIABLE ANTEIL GESAMTRESSOURCEN ZU GESAMTPOTENTIAL, EIGENE DARSTELLUNG	51
ABBILDUNG 9-11, PRODUKTIONSKOSTENFUNKTION, EIGENE DARSTELLUNG	53
ABBILDUNG 9-12, VARIABLE PRODUKTIONS <i>KOSTEN MULTIPLIKATOR,</i> EIGENE DARSTELLUNG	54
ABBILDUNG 9-13, KOSTENFUNKTION, EIGENE DARSTELLUNG	55
ABBILDUNG 9-14, NETTO IMPORT- UND EXPORTMENGEN VON ERDÖL IN CHINA,	57
ABBILDUNG 9-15, GLOBALES BWP-WACHSTUM UND ÖLNACHFRAGEWACHSTUM IN %, EIGENE DARSTELLUNG	58
ABBILDUNG 9-16, ERDÖLPRODUKTION UND ERDÖLVERBRAUCH IN MRD. FASS ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG	58
ABBILDUNG 9-17, NACHFRAGEFUNKTION UND PREISELASTIZITÄT DER NACHFRAGE, EIGENE DARSTELLUNG	59
ABBILDUNG 9-18, VARIABLE NACHFRAGE ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG	61
ABBILDUNG 9-19, LOOP 2 (DER TECHNOLOGIELOOP), EIGENE DARSTELLUNG	64
ABBILDUNG 9-20, PREISELASTIZITÄT DER NACHFRAGE UND PROZENT INVESTIERT IN FORSCHUNG U. ENTWICKLUNG	66
ABBILDUNG 9-21, VARIABLE INVESTITION FE, EIGENE DARSTELLUNG	
ABBILDUNG 9-22, VARIABLE <i>UMSATZ,</i> EIGENE DARSTELLUNG	67
ABBILDUNG 9-23, ANZAHL DER TRANSISTOREN EINES MIKROPROZESSORS	68
ABBILDUNG 9-24, JÄHRLICHES BEVÖLKERUNGSWACHSTUM IN EUROPA IN % (ZEITRAUM 1998-2015)	70
ABBILDUNG 9-25, VARIABLE PRODUKTIONSTECHNOLOGIEÄNDERUNG, EIGENE DARSTELLUNG	71
ABBILDUNG 9-26, VARIABLE TECHNOLOGIE MULTIPLIKATOR, EIGENE DARSTELLUNG	72
ABBILDUNG 9-27, KOSTENFUNKTION MIT MULTIPLIKATOREN, EIGENE DARSTELLUNG	73
ABBILDUNG 9-28, LOOP 3 (DER SUBSTITUTIONSLOOP) , EIGENE DARSTELLUNG	74
ABBILDUNG 9-29, ANTEIL DER EINZELNEN WELTWEITEN PRIMÄRENERGIETRÄGER	
ABBILDUNG 9-30, SUBSTITUTIONSFUNKTION, EIGENE DARSTELLUNG	77
ABBILDUNG 9-31, VARIABLEN SUBSTITUTIONSANTEIL, POTENTIELLER SUBSTITUTIONSANTEIL, EIGENE DARSTELLUNG	78
ABBILDUNG 10-1, CLD SYSTEMGESCHWINDIGKEIT, EIGENE DARSTELLUNG	80
ABBILDUNG 10-2, REISEZEITBUDGET	81
ABBILDUNG 10-3, MITTLERE WEGEANZAHL IN DEUTSCHLAND, STUDIE ÜBER 1 JAHR	82
ABBILDUNG 10-4, DURCHSCHNITTLICHE WEGLÄNGE IN MEILEN	83
ABBILDUNG 10-5, SD TEILMODELL: SYSTEMGESCHWINDIGKEIT, EIGENE DARSTELLUNG	80
ABBILDUNG 10-6, VARIABLE SYSTEMGESCHWINDIGKEIT, EIGENE DARSTELLUNG	86
ABBILDUNG 10-7, VARIABLE STRECKENLÄNGE PRO WEG, EIGENE DARSTELLUNG	86
ABBILDUNG 10-8, BIP/KOPF UND MOTORISIERUNGSGRAD WELTWEIT, EIGENE DARSTELLUNG	89
ABBILDUNG 10-9, BEZIEHUNG VON STRUKTUREN, VERHALTEN UND DATEN,	90
ABBILDUNG 10-10, POSITIVE RÜCKKOPPLUNG ZWISCHEN STRAßEN UND MOTORISIERUNGSGRAD, EIGENE DARSTELLUN	G 91
ABBILDUNG 10-11, STRAßENLÄNGE PRO EINWOHNER ZU MOTORISIERUNGSGRAD, EIGENE DARSTELLUNG	91
ABBILDUNG 10-12, SCHIENENDICHTE ZU PERSONENKILOMETER PRO EINWOHNER IM SCHIENENVERKEHR,	92
ABBILDUNG 10-13, STRAßENDICHTE ZU SCHIENENDICHTE, EIGENE DARSTELLUNG	92
ABBILDUNG 10-14, ANTEILE DER EINZELNEN VERKEHRSMITTEL IM SZENARIUM <i>URR 3500GB A</i> , EIGENE DARSTELLUNG	94
ABBILDUNG 10-15, VARIABLE GESAMTVERKEHRSAUFWAND IN MILLIARDEN PERSONENKILOMETER	96
ABBILDUNG 10-16, VARIABLE VERKEHRSAUFWAND IV IN MILLIARDEN PERSONENKILOMETER, EIGENE DARSTELLUNG	97
ABBILDUNG 10-17. BESETZUNGSGRAD AUF US-HIGHWAYS. EIGENE BERECHNUNG UND DARSTELLUNG	98

ABBILDUNG 10-18, PERSONENVERKEHRSAUFWAND PRO PKW IN ÖSTERREICH, EIGENE BERECHNUNG UND DARSTELI	UNG99
ABBILDUNG 10-19, PERSONENVERKEHRSAUFWAND PRO PKW IM EUROPAVERGLEICH	99
ABBILDUNG 10-20, VARIABLE POTENTIELLER VERKEHRSAUFWAND PRO IV, EIGENE DARSTELLUNG	100
ABBILDUNG 10-21, SUBURBANISIERUNG IN ÖSTERREICH – BEVÖLKERUNGSWACHSTUM DER STÄDTE UND DEREN	
UMLIEGENDEN BEZIRKE IN ÖSTERREICH, EIGENE BERECHNUNG UND DARSTELLUNG	101
ABBILDUNG 10-22, URBANISIERUNGSGRAD IN ÖSTERREICH, , EIGENE BERECHNUNG UND DARSTELLUNG	102
ABBILDUNG 10-23, DER MOTORISIERUNGSGRAD IN ABHÄNGIGKEIT DER BEVÖLKERUNGSDICHTE	102
ABBILDUNG 10-24, DER MOTORISIERUNGSGRAD IN ABHÄNGIGKEIT DES URBANISIERUNGSGRADES FÜR DIE	
ÖSTERREICHISCHEN BEZIRKE BZW. STÄDTE	103
ABBILDUNG 10-25, VARIABLE MOTORISIERUNGSGRAD, EIGENE DARSTELLUNG	104
ABBILDUNG 10-26, TAGESGEBIETSFLÄCHE, EIGENE DARSTELLUNG	104
ABBILDUNG 10-27, VARIABLE TAGESGEBIETSFLÄCHE, EIGENE DARSTELLUNG	105
ABBILDUNG 10-28, TAGESGEBIETSFLÄCHE IM JAHR 1900 UND IM JAHR 2008, EIGENE DARSTELLUNG	106
ABBILDUNG 11-1, CLD TEILMODELL INDIVIDUALVERKEHR, EIGENE DARSTELLUNG	107
ABBILDUNG 11-2, TREIBSTOFFVERBRAUCH IN DEN USA, EIGENE BERECHNUNG UND DARSTELLUNG	108
ABBILDUNG 11-3, DIE ERFAHRUNGSKURVE NACH T.P. WRIGHT,	109
ABBILDUNG 11-4, BESTAND DER ÖFFENTLICHEN DROSCHKEN IN BERLIN	111
ABBILDUNG 11-5, VERSCHIEDENE ERFAHRUNGSKURVEN FÜR DIE BRENNSTOFFZELLENTECHNOLOGIE	113
ABBILDUNG 11-6, DAS KOSTENMODELL, EIGENE DARSTELLUNG	115
ABBILDUNG 11-7, ROHÖLPREIS (EUROPE BRENT SPOT PRICE) UND NORMALBENZINPREIS (ROTTERDAM (ARA)	
CONVENTIONAL GASOLINE REGULAR SPOT PRICE) IM VERGLEICH, EIGENE DARSTELLUNG	116
ABBILDUNG 11-8, VARIABLE TREIBSTOFFPREIS, EIGENE DARSTELLUNG	117
ABBILDUNG 11-9, TECHNOLOGIEREIFEPROZESS TREIBSTOFFVERBRAUCH, EIGENE DARSTELLUNG	117
ABBILDUNG 11-10, VARIABLE TREIBSTOFFVERBRAUCH VERBRENNUNGSMOTOR, EIGENE DARSTELLUNG	118
ABBILDUNG 11-11, WERKSTOFFANTEILE [%] IM PKW, QUELLE: BRAESS HH., SEIFFERT U., VIEWEG-HANDBUCH	
KRAFTFAHRZEUGTECHNIK, WIESBADEN, 2007, SEITE 735, © FRIEDR. VIEWEG & SOHN VERLAG	119
ABBILDUNG 11-12, PREISE FÜR EISENERZ MIT 67.55% EISENGEHALT	120
ABBILDUNG 11-13, TECHNOLOGIEREIFEPROZESS: ANSCHAFFUNGSKOSTEN KONVENTIONELLER FAHRZEUGE, EIGENE	
DARSTELLUNG	121
ABBILDUNG 11-14, VARIABLE ANSCHAFFUNGSKOSTEN KONVENTIONELLER AUTOS, EIGENE DARSTELLUNG	121
ABBILDUNG 11-15, VARIABLE KONVENTIONELLE AUTOS GESAMTKOSTEN, EIGENE DARSTELLUNG	122
ABBILDUNG 11-16, TECHNOLOGIEREIFEPROZESS VON HYBRID- UND WASSERSTOFFTECHNOLOGIE, EIGENE DARSTELL	.UNG
	124
ABBILDUNG 11-17, DAS SUBSTITUTIONSMODELL, EIGENE DARSTELLUNG	124
ABBILDUNG 11-18, MODELLAUFBAU FAHRZEUGTYP, EIGENE DARSTELLUNG	125
ABBILDUNG 11-19, IV SUBSTITUTIONSFUNKTION, EIGENE DARSTELLUNG	126
ABBILDUNG 11-20, VARIABLEN FUHRWERKE, KONVENTIONELLE AUTOS, HYBRIDAUTOS, WASSERSTOFFAUTOS, KAPA.	ZITÄT
FAHRZEUGE IM SZENARIUM URR 4500GB A, EIGENE DARSTELLUNG	
ABBILDUNG 11-21, GESAMTLÄNGE DES NATIONALEN STRAßENNETZES IN EUROPA, EIGENE DARSTELLUNG	129
ABBILDUNG 11-22, MODELLAUFBAU STRAßENLÄNGE, EIGENE DARSTELLUNG	
ABBILDUNG 11-23, VARIABLE STRAßENLÄNGE, EIGENE DARSTELLUNG	
ABBILDUNG 11-24, VARIABLE FAHRZEUGDICHTE, EIGENE DARSTELLUNG	
ABBILDUNG 11-25. DIE STAUFUNKTION. FIGENE DARSTELLUNG	132

ABBILDUNG 12-1, CLD GESAMTMODELL, EIGENE DARSTELLUNG	134
ABBILDUNG 13-1, MODELLEVALUIERUNG: PRODUKTIONSRATE ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG	137
ABBILDUNG 13-2, WELTWEITER PRO-KOPF-ERDÖLVERBRAUCH IN FÄSSER PRO JAHR, DATEN: BP, STATISTICAL REVIEW	
ABBILDUNG 13-3, VERGLEICH BEOBACHTETE UND ERRECHNETE WERTE FÜR DEN ZEITRAUM VON 1900 BIS 2006,	137
PRODUKTIONSRATE ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	138
ABBILDUNG 13-4, VERGLEICH MODELL MIT EMPIRISCHEN DATEN, REALER PREIS PRO FASS ERDÖL, EIGENE DARSTELLU	
ABBILDUNG 13-5, VERGLEICH BEOBACHTETE UND ERRECHNETE WERTE FÜR DEN ZEITRAUM VON 1900 BIS 2006, PREI:	
FASS ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	139
ABBILDUNG 13-6, VERGLEICH MODELL MIT EMPIRISCHEN DATEN, MOTORISIERUNGSGRAD, , EIGENE DARSTELLUNG	140
ABBILDUNG 13-7, VERGLEICH BEOBACHTETE UND ERRECHNETE WERTE FÜR DEN ZEITRAUM VON 1965 BIS 2005,	
MOTORISIERUNGSGRAD, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	141
ABBILDUNG 13-8, VERGLEICH MODELL MIT EMPIRISCHEN DATEN, GESAMTV <i>ERKEHRSAUFWAND</i> , EIGENE DARSTELLUN	
ABBILDUNG 13-9, VERGLEICH BEOBACHTETE UND ERRECHNETE WERTE FÜR DEN ZEITRAUM VON 1950 BIS 1996,	
GESAMTVERKEHRSAUFWAND, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	142
ABBILDUNG 13-10, VERGLEICH MODELL MIT EMPIRISCHEN DATEN, VERKEHRSAUFWAND VON PKW, EIGENE DARSTELL	UNG
UND BERECHNUNG	143
ABBILDUNG 13-11, VERGLEICH BEOBACHTETE UND ERRECHNETE WERTE FÜR DEN ZEITRAUM VON 1950 BIS 2006,	
VERKEHRSAUFWAND PKW, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	143
ABBILDUNG 13-12, VERGLEICH MODELL MIT EMPIRISCHEN DATEN, VERKEHRSMITTELANTEIL AM	
GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER, EIGENE BERECHNUNG UND DARSTELLUNG	145
ABBILDUNG 13-13, VERGLEICH BEOBACHTETE UND ERRECHNETE WERTE FÜR DEN ZEITRAUM VON 1950 BIS 1996,	
VERKEHRSMITTELANTEIL NACH GESAMTVERKEHRSAUFWAND, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	145
ABBILDUNG 15-1, SZENARIUM URR 7000 GB, EIGENE DARSTELLUNG	153
ABBILDUNG 15-2 - SZENARIUM URR 3500 GB A MIT SUBSTITUTION, EIGENE DARSTELLUNG	156
ABBILDUNG 15-3, SZENARIUM URR 3500 GB B OHNE SUBSTITUTION, EIGENE DARSTELLUNG	158
ABBILDUNG 15-4, SZENARIUM URR 4500 GBA MIT SUBSTITUTION, EIGENE DARSTELLUNG	160
ABBILDUNG 15-5, SZENARIUM URR 4500 GBB OHNE SUBSTITUTION, EIGENE DARSTELLUNG	161
ABBILDUNG 15-6, SZENARIUM SOLAR, EIGENE DARSTELLUNG	163
ABBILDUNG 15-7, SZENARIUM OLDUVAI, EIGENE DARSTELLUNG	165
ABBILDUNG 16-1, SENSITIVITÄTSANALYSE; PLOT DER EINZELNEN SIMULATIONEN	169
ABBILDUNG 16-2, SENSITIVITÄTSANALYSE; PLOT DER SIMULATIONEN, IN KONFIDENZINTERVALLE ZUSAMMENGEFASS	Γ 170
ABBILDUNG 17-1, SZENARIENÜBERSICHT: RESERVEN, EIGENE DARSTELLUNG	171
ABBILDUNG 17-2, SZENARIENÜBERSICHT, SUBSTITUTIONSANTEIL, EIGENE DARSTELLUNG	172
ABBILDUNG 17-3, SZENARIENÜBERSICHT: PRODUKTIONSRATE, EIGENE DARSTELLUNG	173
ABBILDUNG 17-4, SZENARIENÜBERSICHT, PREIS PRO FASS ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG	174
ABBILDUNG 17-5, SZENARIENÜBERSICHT, MOTORISIERUNGSGRAD, EIGENE DARSTELLUNG	175
ABBILDUNG 17-6, SZENARIENÜBERSICHT, VERKEHRSMITTELANTEILE VON PKW AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND, EIG	
DARSTELLUNG	
ABBILDUNG 17-7, SZENARIENÜBERSICHT, STRECKENLÄNGE, EIGENE DARSTELLUNG	176
ABBILDUNG 17-8. SZENARIENÜBERSICHT. GESAMTVERKEHRSAUFWAND. EIGENE DARSTELLUNG	177

# 5 TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 7-1, ANZAHL DER AUTOMOBILE IN DEN USA IN VERSCHIEDENEN JAHREN, EIGENE DARSTELLUNG	21
TABELLE 9-1, ABBAU VON STEINKOHLE IN DEN USA, EIGENE DARSTELLUNG	52
TABELLE 10-1, ANZAHL DER WEGE PRO TAG IN DEUTSCHLAND, EIGENE DARSTELLUNG	82
TABELLE 10-2, DURCHSCHNITTSWERTE DES ENERGIEVERBRAUCHS UNTERSCHIEDLICHER AKTIVITÄTEN, EIGENE	
DARSTELLUNG	93
TABELLE 13-1, PARAMETER FÜR PRODUKTIONSRATE ERDÖL, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	138
TABELLE 13-2, PARAMETER FÜR PREIS PRO FASS ERDÖL, BLAU: URR 7000GB, ROT: OLDUVAI, EIGENE DARSTELLUNG UN	1D
BERECHNUNG	139
TABELLE 13-3, PARAMETER FÜR MOTORISIERUNGSGRAD, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	141
TABELLE 13-4, PARAMETER FÜR GESAMTVERKEHRSAUFWAND, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	142
TABELLE 13-5, PARAMETER FÜR VERKEHRSAUFWAND PKW, EIGENE DARSTELLUNG UND BERECHNUNG	144
TABELLE 14-1, BEVÖLKERUNGSWACHSTUM WELTWEIT	148
TABELLE 15-1, VERKEHRSMITTELANTEILE AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER IM JAHR 2070	NI C
ÖSTERREICH IM SZENARIUM URR 7000 GB, EIGENE DARSTELLUNG	153
TABELLE 15-2, VERKEHRSMITTELANTEILE AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER IM JAHR 2070	NI C
ÖSTERREICH IM SZENARIUM URR 3500 GB A, EIGENE DARSTELLUNG	157
TABELLE 15-3, VERKEHRSMITTELANTEILE AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER IM JAHR 2070	NI C
ÖSTERREICH IM SZENARIUM URR 3500 GB B, EIGENE DARSTELLUNG	158
TABELLE 15-4, VERKEHRSMITTELANTEILE AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER IM JAHR 2070	NI C
ÖSTERREICH IM SZENARIUM URR 4500 GB A, EIGENE DARSTELLUNG	160
TABELLE 15-5, VERKEHRSMITTELANTEILE AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER IM JAHR 2070	NI C
ÖSTERREICH IM SZENARIUM URR 4500 GB B, EIGENE DARSTELLUNG	161
TABELLE 15-6, VERKEHRSMITTELANTEILE AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER IM JAHR 2070	NI C
ÖSTERREICH IM SZENARIUM SOLAR, EIGENE DARSTELLUNG	163
TABELLE 15-7, VERKEHRSMITTELANTEILE AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND NACH PERSONENKILOMETER IM JAHR 2070	NI C
ÖSTERREICH IM SZENARIUM <i>OLDUVAI</i> , EIGENE DARSTELLUNG	166
TABELLE 16-1 - SENSITIVITÄTSANALYSE: PARAMETERWERTE FÜR DAS GESAMTPOTENTIAL	169
TABELLE 20-1, BWP, BIP PRO KOPF IN ÖSTERREICH, BEVÖLKERUNG IN ÖSTERREICH	IX

## 6 Prolog

"Es war einmal ein Planet, auf dem sich das Leben so weit entwickelt hatte, dass die am höchsten stehende Tiergattung denken konnte. Diese Tiere waren sich ihrer eigenen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft bewusst. Sie konnten Parties organisieren und erfanden Koffer mit Rollen. Sie konnten auch mit erschreckender Grausamkeit kämpfen und den Strommarkt manipulieren. Bis es soweit war dauerte es 4,5 Milliarden Jahre, doch dann sah alles sehr bemerkenswert aus. [...] Einige Denker bauten ein Raumschiff, das von dem Planeten abheben und auf einem großen Felsbrocken in einer Umlaufbahn des Planten landen konnte. Die Besatzung des Raumschiffes stand auf der kahlen und leblosen Oberfläche des Felsbrockens und betrachtete den Planeten. Eine kleine blaue Perle in einem dichten Meer mysteriöser Schwärze. [...]

Etwa 250 Millionen Jahre bevor unsere Geschichte endet, ereignete sich eine Katastrophe. Etwas zerstörte den empfindlichen Mantel der Blauen Perle mit ihrem Sauerstoff und den von Lebewesen bevölkerten Meeren, und das Leben auf dem Planeten wurde beinahe komplett ausgelöscht. [...]

Die Denker sprachen später vom Aussterben der Arten. Einige Spezialisten krochen mit Hammer, Notizbuch und Lupe über die Felsen, die sich gebildet hatten, und arbeiteten anhand der Fossilien im Gestein heraus, welche Spezies ausgestorben waren und welche Arten überlebt hatten. Die Forscher stellten fest, dass 90 Prozent aller Arten verschwunden waren. Über den Grund für die Apokalypse waren sich die Denker allerdings nicht einig...Die Blaue Perle heilte sich mit der Zeit selbst. [...]

Die Blaue Perle hatte mittlerweile verschiedene seltsame Naturphänomene erlebt und nachdem über 4.450 Millionen Jahre unserer Geschichte vergangen sind kam es zu einer gigantischen Blüte mikroskopisch kleiner Pflanzen. Milliarden und Abermilliarden dieser Pflanzen wuchsen, blühten und starben wieder ab. Das dabei entstandene organische Material sank auf dem Meeresboden und sammelte sich dort. Dieser Regen aus abgestorbenen Pflanzen war so heftig, dass der ganze Sauerstoff am Meeresgrund verbraucht und das organische Material nicht wie sonst üblich zersetzt wurde. An einigen Stellen türmten sich die Sedimente besonders schnell und hoch auf; ihr Gewicht erzeugte so viel Druck und Hitze, dass das organische Material zu kochen begann und sich in eine Substanz verwandelte, die Öl genannt wurde. [...]

Ungefähr 65 Millionen Jahre vor dem Ende unserer Geschichte schlug auf dem Planeten ein riesiger Meteorit ein. Er hatte einen Durchmesser von zehn Kilometern, besaß aber die Zerstörungskraft von Zehntausenden Atombomben. Wieder einmal verdunkelte sich der Himmel. Wieder veränderte sich das Klima. [...] Etwa 50 Prozent aller Arten starben dieses Mal aus, darunter auch die Riesenechsen. [...]

Etwa sieben Millionen Jahre vor dem Ende der Geschichte entwickelten sich zweibeinige Wesen. Diese Tiere waren am ganzen Körper behaart und gingen gebückt, aber sie konnten denken, zumindest in dem Sinn, dass sie einen Stock nehmen und damit Insektenlarven ausgraben konnten. Schon bald waren diese weit über das Ausgraben von Larven hinaus. Rasch wurde aus ihren Grunzlauten eine Sprache, und schnell entdeckten sie, dass man, wenn man zwei Stöcke aneinander rieb, Feuer machen konnte. Die Denker waren endlich auf der Blauen Perle eingetroffen. Wenn man sich die Lebenszeit des Planeten als Uhr mit 24 Stunden vorstellt, dann tauchten die Denker eine Sekunde vor Mitternacht auf. [...]

Bald darauf kamen die Denker auf die Idee, anstelle von Holz Kohle zu verbrennen, und schon bald fanden sie eine Möglichkeit, Kohle in Dampfmaschinen zu verbrennen, die Schiffe viel besser antreiben konnten als Segel. Dampf trieb auch die Maschinen an Land an. Jetzt konnten die Denker Fabriken bauen und reich werden, ohne dass die dafür losziehen und am anderen Ende der Welt Gewürze finden mussten. Aber Kohle war schmutzig. Sie verbrannte nicht rückstandslos, sondern hinterließ überall Ruß, der die Maschinen verschmutzte und es einem schwer machte, die Leinentücher am Waschtag trocken zu bekommen. Kurz bevor dieser Umstand zu einem wirklichen Ärgernis wurde, stellten die Denker fest, dass sie Löcher in die Erde bohren, Erdöl herauspumpen und das Öl verbrennen konnten. Meistens sprudelte das Öl aufgrund des Eigendrucks von selbst aus der Erde und außerdem entstand beim Verbrennen von Öl weniger Ruß. [...]

Erdöl eignete sich auch für eine weitere neue Erfindung, den sogenannten pferdelosen oder selbstfahrenden Wagen, besser bekannt als Automobil[...]. Die Automobile fanden rasch weite Verbreitung, ebenso wie die Stromkraftwerke, und schon bald wurden die Nationalstaaten kreuz und quer von breiten Straßen durchzogen. [...]

Das Problem war, dass bei der Verbrennung von Öl, Erdgas und Kohle unweigerlich Kohlendioxid entstand und Kohlendioxid die Hitze in der Erdatmosphäre festhielt. Der erhöhte Kohlendioxidgehalt funktionierte wie ein Treibhaus in der Atmosphäre, er ließ das Licht der Sonne herein, aber nicht wieder nach außen, wenn es von der Erdoberfläche reflektiert wurde. Nie um eine originelle Formulierung verlegen, bezeichneten die Denker das Kohlendioxid daher als "Treibhausgas". [...]

Nachdem man hemmungslos über hundert Jahre lang Öl und über 200 Jahre lang fleißig Kohle verbrannt hatte, waren damit handfeste finanzielle Interessen verknüpft. Viele Unternehmen und auch einige Nationalstaaten [...] drohten auf ihren Investitionen sitzen zu bleiben. Diese finanziellen Interessen hatten ein Netz der Macht geschaffen, dem die anderen Nationalstaaten kaum etwas entgegenzusetzen hatten. Im Grunde war mit dem Netzwerk ein eigenes Imperium entstanden. [...]

Die Zeit verging. Die Anführer der Nationalstaaten versammelten sich regelmäßig und sprachen über das Problem des allmählichen Anstiegs der Treibhausgase, doch bei ihren Verhandlungen gab es viel heiße Luft, aber wenig Ergebnisse. Dafür sorgte schon das Ölimperium[...]. Die Denker wussten schon ziemlich lange, dass es Alternativen gab, doch das Ölimperium hatte verkündet, dass weitere Forschungsarbeit nötig sei, bevor man die alternativen Energien verlässlich einsetzen könne., und in der Zwischenzeit wolle man doch sicher weiter den Tiger in den Tank packen, oder? Man wolle doch einen Ultimate-Kraftstoff in seinen eigenen schicken Streitwagen tanken, wolle mehr Leistung mit weniger Schadstoffen, wie es in der Werbung hieß. Daher gaben sich die meisten Denker damit zufrieden, weiterhin die Produkte des Ölimperiums zu nutzen. [...]

Und so machten sie das Imperium so reich, dass es noch mächtiger wurde. Die Drogenbarone des Ölimperiums reisten in firmeneigenen Jets und waren mächtiger als jeder Präsident, mit Ausnahme des Präsidenten von Nationalstaat Nummer eins. Aber das war ohnehin einer von ihnen. [...]

Es war nun einmal so, dass sich das meiste Öl während zwei ziemlich kurzen Perioden in der Geschichte des Planeten gebildet hatte und ganz besondere Voraussetzungen erforderlich gewesen waren damit die Öllagerstätten entstehen konnten. Wieder wussten die Denker das, zumindest ansatzweise. Das bedeutete, dass das Öl, von dem sie selbst verschuldet so abhängig waren, eines Tages aufgebraucht sein würde. Daran zweifelte kaum jemand. Die Denker redeten einfach nicht oft darüber. Das lag vor allem daran, dass das Ölimperium jedem einredete, es gebe keinen Anlass zur Sorge. [...]

Dann verloren einige Dissidenten aus dem Ölimperium die Beherrschung. Die setzten sich zusammen und sagten: »Einen Moment mal, Jungs, spielt mit offenen Karten: Das Öl geht schneller zur Neige. « Diese Aussteiger hatten ein bisschen gerechnet und erkannt, dass die Tage des leicht erschließbaren billigen Öls schon bald zu Ende gehen würden. Sie berechneten den Zeitpunkt an dem die Hälfte des Öls, verbraucht sein würde. Spätestens dann, sagten die Dissidenten, würde der [...] Denkfehler jedem klar sein. Die Denker würden dann nicht mehr in der Lage sein, ihr Leben und ihre Wirtschaft auf der Grundlage wachsender Mengen billigen Öls aufzubauen. Sie könnten nur noch mit schwindenden Mengen teuren Öls rechnen. Sie würden sich nach den alternativen Energien zu ihrer Rettung umsehen, doch diese stünden nicht in ausreichender Menge zur Verfügung, weil das Ölimperium sie all die Jahre während der großen Sucht unterdrückt und behindert hatte. Dann würde die große Erkenntnis mit voller Wucht einsetzen. [...]

Es würde eine düstere Zeit anbrechen, warnten die Dissidenten. Sobald klar sei, dass es keinen Ausweg gebe, und Öl immer knapper und damit auch immer teurer werde, bräche Panik aus. Die Denker würden sich einer Energiekrise von gigantischen Ausmaßen stellen müssen, und diese würde zusammen mit der einsetzenden Panik zu einem wirtschaftlichen Zusammenbruch nie gekannten Ausmaßes führen. [...]

Und hier endet die Geschichte von der Blauen Perle. Nur dass das natürlich nicht wirklich das Ende ist. Es ist bloß der aktuelle Zustand auf dem Planeten Erde heute. Und in diesem Sinn ist es angesichts der vielen Arbeit, die noch geleistet werden muss, und des erschreckend hohen Einsatzes, des auf dem Spiel steht, erst der Anfang, auch wenn es 4,5 Milliarden Jahre dauerte, bis dieser Punkt erreicht war."5

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Jeremy K. LEGGETT, *Peak-Oil - Die globale Energiekrise, die Klimakatastrophe und das Ende des Ölzeitalters*, Köln, 2006, Seite 7ff

### 7 Grundlagen

#### 7.1 Was ist ein System?

#### Definition nach Meyers Lexikon:

"Unter System versteht man im allgemeinen Sinn den ganzheitlichen Zusammenhang von Dingen, Vorgängen, Teilen, der entweder in der Natur gegeben (ein Gas, eine Flüssigkeit) oder vom Menschen hergestellt ist (z.B. politisches System); auch ein auf allgemeine Grundsätze zurückgeführtes und danach geordnetes Ganzes von Einzelerkenntnissen einer Wissenschaft oder des menschlichen Wissens überhaupt; Prinzip oder Ordnung, nach der etwas aufgebaut wird.

In der Kybernetik, Physik und Technik ist es ein fundamentaler Begriff, der die Zusammenfassung mehrerer, im Allgemeinen untereinander in Wechselwirkung stehender Komponenten zu einer als Ganzes aufzufassenden Einheit bezeichnet, z. B. kybernetische Systeme (Kybernetik), technische Systeme (wie Maschinen, technische Anlagen, Netzwerke oder Schaltungen), physikalische Systeme, sofern physikalische Objekte betrachtet werden (atomares System, Planetensystem, Vielteilchensystem, thermodynamisches System u. a.), oder in der Informatik die Zusammenfassung von Hard- und Software zu einem Rechnersystem. Die Systemkomponenten können von gleicher (homogenes System) oder unterschiedlicher Art (heterogenes System) sein. Je nachdem, ob das System mit der Umgebung in Wechselwirkung (Energie- und Materieaustausch) steht oder nicht, unterscheidet man offene und abgeschlossene Systeme."6

In der Definition nach Meyer sind die Eigenschaften eines Systems durch ein geordnetes Ganzes bzw. einer offenen bzw. geschlossenen Charakteristik beschrieben. In der Thermodynamik finden wir eine ähnliche Beschreibung zum Begriff *System*:

"Als thermodynamisches System bezeichnet man einen abgegrenzten Bereich, der untersucht werden soll. Er ist von seiner Umgebung durch Systemgrenzen getrennt. Zwischen dem System und seiner Umgebung können Wechselwirkungen auftreten, indem Materie, Arbeit oder Wärme die Systemgrenze überschreiten. Ein System, über dessen Grenze keine Materie tritt, heißt geschlossenes System. Es enthält eine abgemessene, unverändert große Stoffmenge. Ein System, über dessen Grenze Materie tritt, heißt offenes System. Systemgrenzen können wirkliche oder gedachte Wände sein. Sie sind entweder verschiebbar oder auch starr. Systemgrenzen heißen auch Bilanzhüllen, weil Energie- und Stoffströme, die die Systemgrenze überschreiten, erfasst und bilanziert werden."7

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>MEYERS LEXIKONVERLAG, System, online

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Günter CERBE, Hans-Joachim HOFFMANN, *Einführung in die Thermodynamik – Von den Grundlagen zur technischen Anwendung*, Wien, 1999, Seite 34

"Ein System, bei dem Wechselwirkungen mit seiner Umgebung ausgeschlossen sind, bei dem also weder Stoff noch Energie die Systemgrenze überschreiten können, heißt isoliertes oder abgeschlossenes System."<sup>7</sup>

#### Das Verhalten der Energie folgt den Gesetzen der Thermodynamik.

"Organismen, Ökosysteme und die gesamte Biosphäre folgen den thermodynamischen Gesetzen, und sind dabei in der Lage, ein hohes Maß innerer Ordnung zu schaffen und zu bewahren, d.h. einen Zustand geringer Entropie. Entropie ist ein Maß für die Unordnung oder die Menge an nicht verfügbarer Energie in einem System. Die Ordnung im Ökosystem, die Struktur der komplexen Biomasse, wird durch die Atmung der gesamten Gemeinschaft gewährleistet, denn sie pumpt kontinuierlich, die "Unordnung heraus". Ökosysteme und Organismen sind dementsprechend offene, nicht im Gleichgewicht stehende, thermodynamische Systeme, die Energie und Stoff kontinuierlich mit der Umwelt austauschen, um die innere Entropie zu verringern und die äußere Entropie zu vergrößern".8

Auch das Gesamtsystem *Planet Erde* ist ein offenes System. Sonnenenergie tritt über die Systemgrenze (Atmosphäre um Planet) und dient als Grundlage alles Lebens. Gleichzeitig gibt der Planet Wärme über die Systemgrenze wieder ins Weltall ab. Der Nobelpreisträger Ilya Prigogine konnte zeigen, dass alle lebenden Systeme auf dem Planeten offene System sind und unter Energiezufuhr und Entropieabfuhr in die Umgebung, *dissipative Strukturen* aufbauen können. Unter dissipative Strukturen versteht man das Phänomen stabiler geordneter Strukturen in Systemen, welche sich fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht befinden.

"Systeme einer lebenden Zelle oder einer Stadt bestehen nur aus dem Grund, weil sie offene Systeme sind. Sie leben von dem aus der Außenwelt kommenden Materie- oder Energiestrom. Städte und Zellen sterben, wenn sie von ihrer Umgebung abgeschnitten werden. Sie bilden einen integralen Bestandteil der Welt, aus der sie ihre Nahrung beziehen. Man kann sie von den Strömen, welche sie unablässig umformen, nicht trennen". 9

#### 7.2 Assimilation und Dissimilation als Grundlage des Systems *Leben*

"Die Kohlendioxidassimilation der Pflanzen bildet die Grundlage des Lebens auf der Erde. Dabei werden aus dem Kohlendioxid der Luft und aus Wasser mittels Lichtenergie (Photosynthese) oder

Denkens, München, 1981, Seite 136

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Eugene P. ODUM, *Ökologie – Grundlagen, Standorte, Anwendung,* Stuttgart, 1999, Seite 42 <sup>9</sup>Ilya PRIGOGINE, Isabelle STENGERS, Dialog mit der Natur – Neue Wege naturwissenschaftlichen

chemischer Energie (Chemosynthese) Kohlenhydrate (Zucker, Stärke) u.a. organische Verbindungen gebildet". <sup>10</sup>

Die Dissimilation ist der Umkehrprozess der Assimilation. Körpereigene Stoffe werden in lebenden Zellen der Organismen abgebaut unter Freisetzung von Energie. In Gegenwart von Sauerstoff bezeichnet man die Dissimilation als innere Atmung oder Zellatmung, ohne Sauerstoff als Gärung. <sup>11</sup>

• Zellatmung<sup>12</sup>: 
$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$
 (7.1)

• <u>einfache Verbrennung von Kohlenstoff mit Sauerstoff</u><sup>13</sup>:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \tag{7.2}$$

$$2 C+O_2 \rightarrow 2 CO \tag{7.3}$$

Das ganze Leben auf der Erde ist auf Kohlenstoff und deren Verbindungen aufgebaut. Bei der Zellatmung, als auch bei der Verbrennung entsteht Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Durch das Koexistieren von Pflanzen und Bäume, welche nach der Photosynthese aus Kohlendioxid wieder Sauerstoff erzeugen können, kann das System "Leben" funktionieren.

Photosynthese<sup>14</sup>: 
$$6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$$
 (7.4)

Seit Jahrmillionen besteht diese grundlegende Wechselwirkung zwischen Fauna und Flora. Im Laufe der letzten zwei Jahrhunderte ist aber der Gleichgewichtszustand dieser Wechselwirkung durch das Aufkeimen von Störgrößen, wie die explodierende Weltbevölkerungszunahme, die Industrialisierung, die Spezialisierung auf fossile Energieträger und die fortschreitende Entwaldung ins Wanken geraten und es wird immer mehr CO<sub>2</sub> produziert als absorbiert werden kann.

Das System *Leben* besteht aus zwei Entitäten:

1. C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> Traubenzucker

2.  $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$  Kohlendioxid und Wasser

Diese sind über die Prozesse Assimilation (Photosynthese) und Dissimilation (Atmung) verbunden. Die notwendige Energie zur Aufrechterhaltung des Systems liefert die Sonne.

<sup>11</sup>MEYERS LEXIKONVERLAG, Dissimilation, online

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>MEYERS LEXIKONVERLAG, Assimilation, online

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>Theodore L. BROWN, *Chemistry - the central science*, Upper Saddle River, 2006, Seite 102

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>Theodore L. BROWN, Chemistry - the central science, Upper Saddle River, 2006, Seite 973ff

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Theodore L. BROWN, Chemistry - the central science, Upper Saddle River, 2006, Seite 1035

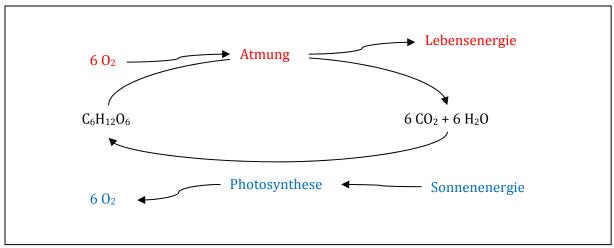


Abbildung 7-1, Das System Leben, eigene Darstellung

## 7.3 DAS SYSTEM WELTBEVÖLKERUNG

Die Weltbevölkerung ist, verglichen mit den vergangenen 150.000 Jahren des homo sapiens, explodiert. Alleine in den letzten 2000 Jahren ist die Weltbevölkerung von 0,17 Milliarden auf 6,68 Milliarden Menschen gestiegen. <sup>15</sup>

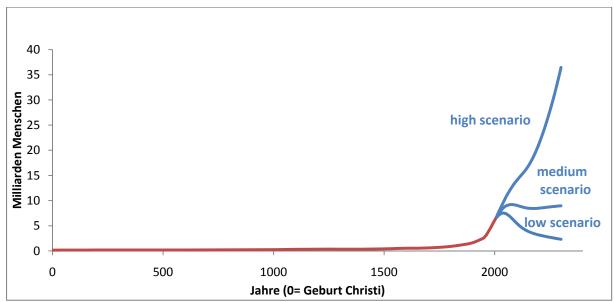


Abbildung 7-2, Weltbevölkerung in Milliarden Menschen, eigene Darstellung

Daten: U.S. CENSUS BUREAU, Historical Estimates of World Population und UNITED NATIONS, World Population to 2300

Internet: http://www.census.gov/ipc/www/worldhis.html, Stand: 23. Juni 2008

Internet: http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf, Stand 23. Juni 2008

<sup>15</sup>Gustav FEICHTINGER, Demographische Entwicklungstendenzen in der Welt und in Österreich, in Evolution, Mensch, Technik – Perspektiven für das nächste Jahrzehnt, Wien, 1986, Seite 9ff

17

In der Weltbevölkerungsprognose bis ins Jahr 2300 geht die UNO von Prognosen mit einer sehr großen Bandbreite zwischen den einzelnen Szenarien aus, wobei das "high-scenario", angesichts limitierter Ressourcen auf der Erde, stark zu bezweifeln ist.¹6 Während die reichen Länder eine niedrige Geburtenziffer (zwischen 8 bis 16) haben, sind die ärmeren Länder durch eine hohe Geburtenziffer gekennzeichnet (bis 51).¹7 Dieser Anstieg der Weltbevölkerung wird dazuführen, dass immer mehr Energie bereitgestellt werden muss. Die Energiewirtschaft baut jedoch auf nicht-erneuerbare Energieträger auf und wenn ein Umdenken in den nächsten Jahrzehnten nicht stattfinden wird, wird dieser Durst nach Energie nicht zu stillen sein.

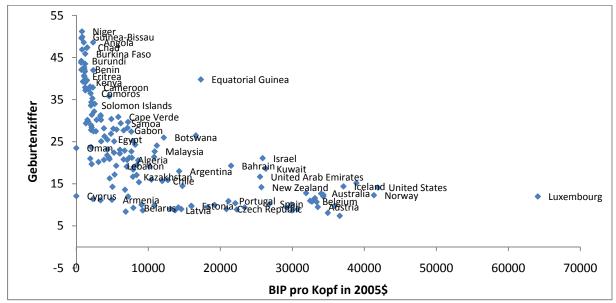


Abbildung 7-3, BIP pro Kopf und Geburtenziffer, eigene Darstellung

Daten: UNITED NATIONS COMMON DATABASE (UNCDB)

Internet: http://unstats.un.org/unsd/cdb\_discontinued/cdb\_discontinued.asp, Stand: 13. August 2008

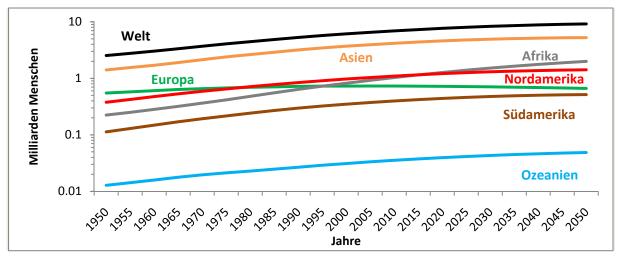


Abbildung 7-4, Weltbevölkerung nach Kontinenten, eigene Darstellung

Daten: UNITED NATIONS COMMON DATABASE (UNCDB)

Internet: http://unstats.un.org/unsd/cdb\_discontinued/cdb\_discontinued.asp, Stand: 13. August 2008

 $<sup>^{\</sup>rm 16}$  Dennis L. MEADOWS, Limits to Growth - The 30-Year Update, White River Junction, 2004, Seite 87ff

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Geburtenziffer = Geburten pro 1000 Einwohner

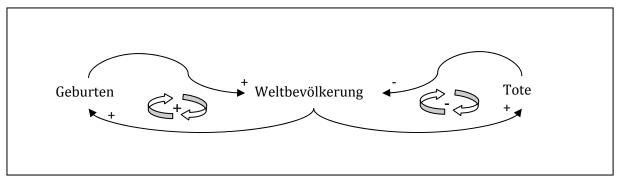


Abbildung 7-5, Das System Weltbevölkerung, eigene Darstellung

Das System *Weltbevölkerung* wurde von zwei Regelkreisen für Jahrtausende lang im Gleichgewicht gehalten (siehe Abbildung 7-2) – durch Geburten erhöhte sich die Anzahl der Weltbevölkerung, durch Todesfälle wurde diese reduziert. Ab dem 18. Jahrhundert wurde aus diesem stabilen System ein instabiles. Der steigende Wohlstand der Bevölkerung, gepaart mit einer stark verbesserten medizinischen Versorgung, und dadurch einer höheren Lebenserwartung, führte dazu, dass der linke Regelkreis im Vergleich zum rechten Regelkreis in Abbildung 7-5 immer mächtiger wurde und die Weltbevölkerung stark anstieg. <sup>18</sup>

Die Industrielle Revolution sollte Auswirkungen auf die Menschheit haben, welche zu Lebzeiten von James Watt, Eli Whitney oder auch Nikolaus Otto in ihrer Dimension nicht abschätzbar waren. Die immense Produktivitätssteigerung in der Landwirtschaft machte es möglich, dass eine viel größere Anzahl von Menschen auf dieser Welt theoretisch mit Nahrung versorgt werden könne.

Im folgenden Kapitel folgt ein kurzer Abriss über die Geschichte der Industriellen Revolution und eine Einführung in Substitutionsprozesse, welche eine wichtige Grundlage für das Teilmodell *Erdöl*, wie auch das Teilmodell *Individualverkehr* darstellen.

#### 7.4 DIE INDUSTRIELLE REVOLUTION – EIN "STÖRFAKTOR" IM SYSTEM ERDE

Das Sprichwort "Die Not macht erfinderisch" oder auf englisch "The necessity is the mother of invention", welches dem griechischen Philosophen Platon zugeschrieben wird, charakterisiert sehr treffend wie die Menschheit immer wieder aus der Not heraus Erfindungen hervorbrachte, welche ihr Leben erleichtern sollten:

Im 18. Jahrhundert wurde die Dampfmaschine erfunden um Wasser aus britischen Kohleminen herauszupumpen. Die erste Dampfmaschine wurde 1712 von Thomas Newcomen entwickelt und später durch James Watt 1769 erheblich verbessert. Eli Whitney erfand im Jahre 1794 eine

<sup>18</sup>Jay. W. FORRESTER, Grundzüge einer Systemtheorie (Principles of Systems), Wiesbaden, 1972, Seite 15ff

Maschine zur Entkörnung von Baumwolle, die die Baumwollfasern von den Samenkapseln trennt (Egreniermaschine oder cotton gin genannt) und konnte so die sehr aufwendige Arbeit des Baumwohlrupfens erleichtern. Whitney starb im Jahr 1825 und konnte nicht voraussehen wie seine Maschine die Gesellschaft des frühen 19. Jahrhunderts verändern sollte. Die Egreniermaschine, welche eigentlich die Arbeit der Sklaven erleichtern sollte, führte zu einem enormen wirtschaftlichen Aufschwung der Baumwollindustrie und konnte nur durch billige Arbeitskräfte gedeckt werden. Sklaven wurden zu tausenden aus Afrika importiert um die riesigen Plantagen im Südwesten der USA zu bewirtschaften. 19,20

In 1942, während des zweiten Weltkrieges, startete die amerikanische Regierung das Manhattan Projekt mit dem Ziel eine Atombombe zu bauen, bevor das Nazi-Regime in Deutschland dies tun konnte. Das Projekt dauerte drei Jahre lang und verschlang auf heutigen Dollarwert umgerechnet 20 Milliarden US Dollar. Diese genannten Beispiele lassen uns vermuten, dass auch andere Erfindungen immer als Ausgangspunkt einen ausdrücklichen Bedarf an eben dieser Technologie hatten. In Wirklichkeit sind jedoch die vielen Erfindungen getätigt worden, ohne wirklichen Bedarf oder die notwendige Infrastruktur. Viele bedeutende Erfindungen der Neuzeit wurden getätigt und erst Jahre später begann sich der entsprechende Bedarf an dieser Technologie einzustellen. In 1877 baute Thomas Edison seinen ersten Phonographen. Er veröffentlichte einen Artikel in welchem er zehn nützliche Anwendungsmöglichkeiten für seinen Phonographen anführte. Er schrieb über Möglichkeiten wie das Aufbewahren von den letzten Wörtern von sterbenden Personen, das Aufnehmen von Büchern für Blinde und eher am Schluss von seiner Liste die Wiedergabe von Musik. Erst 20 Jahre später konnte sich sein Phonograph am Markt als Musikspieler etablieren. Ein anderes Beispiel ist die Erfindung des Automobils. Als Nikolaus Otto im Jahr 1866 seinen ersten Verbrennungsmotor baute, hatten Pferde den Menschen fast sechstausend Jahre und die Eisenbahn erst seit kurzem als Fortbewegung gedient. Es war nicht absehbar, dass das Automobil einen Siegeszug im 20. Jahrhundert feiern wird - es gab keinen Mangel an Pferden, noch war man mit der Eisenbahn unzufrieden. 1905 waren Automobile noch immer ein Spielzeug für die Oberschicht und die Zufriedenheit der Bevölkerung mit den klassischen Fortbewegungsmitteln war bis zum ersten Weltkrieg sehr hoch. 20

Durch die Einführung der Massenproduktion konnten die Kosten für Automobile drastisch gesenkt werden und der Prozess der Substitution von Zugtieren zu Automobilen kam ins Rollen.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> THE US NATIONAL ARCHIVES, Eli Whitney's Patent for the Cotton Gin, online

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Jared M. DIAMOND, Guns, germs and steel - The fates of human societies, New York, 1999, Seite 242ff

Der Wechsel vom Zugtiergespann hin zum Automobil dauerte in den größten amerikanischen Städten bis zu 50 Jahre.

"In Österreich war der erste kommerzielle Automobilbauer die k. u. k. Hofwagenfabrik *Jacob Lohner& Cie.* Der Gründer Ludwig Lohner erkannte sofort das Potenzial des Automobilismus bzw. die Konkurrenz zu den Pferdewägen. Trotz intensiven Verhandlungen gelang es ihm jedoch nicht einen geeigneten Benzinmotor zu bekommen, er konzentrierte fortan seine Bemühungen in Richtung Elektromobil. Die Preise für die Anschaffung eines Automobils waren jedoch enorm. 1936 betrug der Jahresverdienst eines unqualifizierten Arbeiters 1017 Schilling, das Jahreseinkommen eines qualifizierten Arbeiters 1812 Schilling. Gleichzeitig kostete etwa der Steyr 200 8.500 Schilling und das Steyr-Baby, auch als Volkswagen bekannt, 4.500 Schilling. Die Massenproduktion kam in Österreich erst Ende der Vierzigerjahre in Schwung, als Steyr und Fiat 1948 einen Assembling-Vertrag schlossen. Es wurden bis Mitte der Sechzigerjahre etwa 100.000 Einheiten des Steyr-Fiats zusammengebaut" <sup>21</sup>. In den USA war der Einzug des Automobils ähnlich verspätet wie in Österreich. Im Gegensatz zu den Automobilländern wie Frankreich, Deutschland und Großbritannien waren in den USA im Jahre 1894 gerade einmal vier Automobile in Einsatz. Diesem schleppenden Start steht allerdings eine explosionsartige Vermehrung des Automobils in den Folgejahren gegenüber.

Tabelle 7-1, Anzahl der Automobile in den USA in verschiedenen Jahren, eigene Darstellung Quelle: NAKICENOVIC N., Dynamics and Replacement of U.S. Transport Infrastructures, in AUSUBEL J. H., Cities and their vital systems - Infrastructure past, present, and future, National Academy Press, Washington DC, 1988, Seite 184

Jahr	1894	1896	1897	1900	1910	1912
Anzahl	4	16	90	8000	500.000	1.000.000

#### 7.5 Substitutionsprozesse

Abbildung 7-6 zeigt einen typischen Substitutionsprozess. Die kontinuierliche Zunahme an Individualverkehrsmitteln im 19. Jahrhundert – in Form von Pferden – wurde ab dem 20. Jahrhundert – in Form von Autos – beibehalten. Der Substitutionsprozess war nach dem 2. Weltkrieg abgeschlossen und der Siegeszug des Individualverkehrs setzte sich danach ungehindert fort.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Johannes JETSCHGO, Ferdinand LACINA, Michael PRAMMER, Roman SANDGRUBER, *Österreichische Industriegeschichte - 1848-1955*, Linz, 2004, Seiten 237ff

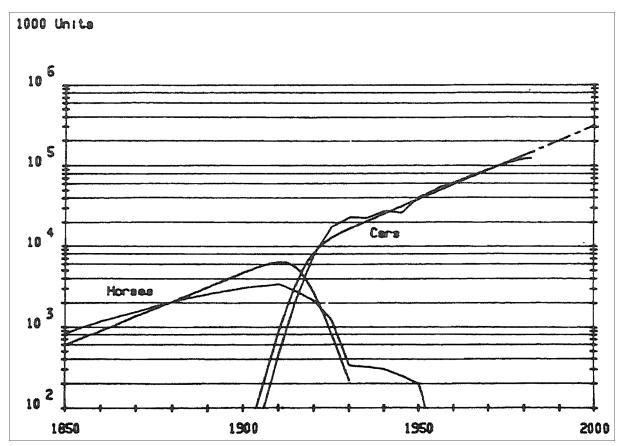


Abbildung 7-6, Anzahl der Zugtiere und Anzahl der Automobile in den USA Quelle: NAKICENOVIC N., *The automobile road to technological change - Diffusion of the Automobile as a Process of Technological Substitution*, IIASA, Laxenburg, 1987, Seite 321, © 1986 *Elsevier Science Publishing Co., Inc* 

Erfindungen, wie die ersten Kameras, Schreibmaschinen und Fernsehanlagen waren ähnlich erfolglos wie der erste Verbrennungsmotor von Otto. Während die Dampfmaschine von James Watt ursprünglich konzipiert war um Wasser aus Minen zu pumpen, war sie wenig später benutzt worden um Strom für die Baumwollspinnerei zu produzieren und Lokomotiven und Boote anzutreiben.

So wie Platon im Dialog mit seinem Bruder Adeimantos meinte, dass die Not erfinderisch macht ("Then, I said, let us begin and create in idea a State; and yet the true creator is necessity, who is the mother of our invention<sup>22</sup>"), so könnte man heute meinen, dass die Erfindung erst die notwendige Grundvoraussetzung für den aufkommenden Bedarf ist ("the invention is the mother of necessity").<sup>20,23</sup>

Substitutionsprozesse, wie das oben genannte Beispiel mit Autos und Pferden, waren in der Vergangenheit eine sehr häufige Erscheinung. Autos mit Katalysatoren kamen in den USA Mitte

\_

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Benjamin JOWETT, Translation of *The Republic- by Plato*, New York, 1968, Seite 111

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> siehe auch Kapitel 7.4

der 70er Jahre auf den Markt, nachdem die United States Environmental Protection Agency (EPA) Ende der 60er und Anfang der 70er Jahre Verordnungen für Abgase von Autos erließ. <sup>24</sup>

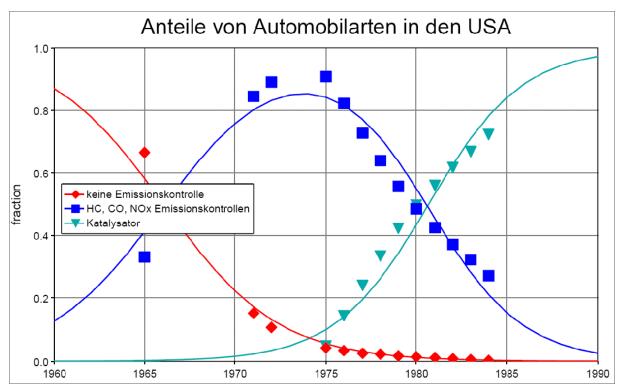


Abbildung 7-7 Anteile von Automobilen nach Emissionskontrollen, eigene Darstellung mit Logistic Substitution Model

Daten: IIASA

Internet: ftp://ftp.iiasa.ac.at/pub/ecs/ag\_book/usa-cars.csv, Stand: 2. April 2008

Auch die Infrastruktur der Verkehrswege veränderte sich in den letzten zwei Jahrhunderten. Anfang des 19. Jahrhunderts setzte die Eisenbahn den vielen Wasserwegen zwischen dem Mississippi und der Ostküste der USA erheblich zu. Bald setzte sich die Eisenbahn in den kommenden Jahrzehnten durch um fast 80 Jahre später von den Autos verdrängt zu werden. <sup>25,26</sup>

\_

 $<sup>^{24}</sup>$  Ida KUBISZEWSKI, *Motor Vehicle Air Pollution Control Act of 1965 - United States*, Encyclopedia of Earth, online

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Lynn M. ALPERIN, *History of the Gulf Intracoastal Waterway*, US Army Engineer Institute for Water Resources, Alexandria, 1983, Seiten 3, 13

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> W. WOLF, Verkehr. Umwelt. Klima - Die Globalisierung des Tempowahns, Wien, 2007, Seite 19ff

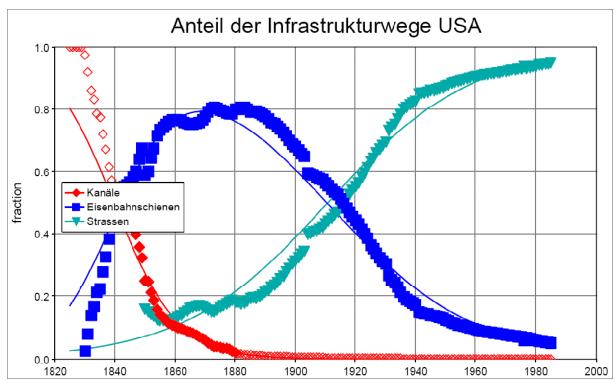


Abbildung 7-8, Anteile der Infrastrukturwege in den USA, eigene Darstellung mit Logistic Substitution Model II Daten: IIASA

Internet: ftp://ftp.iiasa.ac.at/pub/ecs/ag\_book/usa-infra.csv, Stand: 2. April 2008

#### 7.6 DER FOSSILE ENERGIEHAUSHALT

Durch den Siegeszug der Industrialisierung kristallisiert sich das Problem des weltweiten Energiehaushaltes heraus.

Der Mensch war am Anfang seiner Geschichte auf seine eigene Muskelkraft angewiesen. Die Energie, welche zur Aufbringung von Muskelkraft notwendig war, wurde anhand von aufgenommener Nahrung umgewandelt. Schon bald verwendeten die Menschen Werkzeuge um ihre Muskelkraft effizienter einsetzen zu können und mit der Domestizierung von Tieren konnten die Menschen Landwirtschaft betreiben. Im Laufe der Zeit wurde aus Wasser und Wind mechanische Energie gewonnen und es dauerte nicht lange bis mit der Nutzung fossiler Brennstoffe die Industrielle Revolution eingeleitet war. Mit der Industriellen Revolution explodierte der weltweite Energieverbauch, welcher heute zu 81% auf fossilen Brennstoffen aufbaut. <sup>2728</sup>

Die weltweite Förderungsrate von Erdöl durch den Menschen ist aber weit größer als die weltweite Entstehungsrate von Erdöl im sog. Kohlenstoffzyklus der Erde. Aus diesem Grund werden fossile Brennstoffe als nicht erneuerbare Energiequellen bezeichnet.

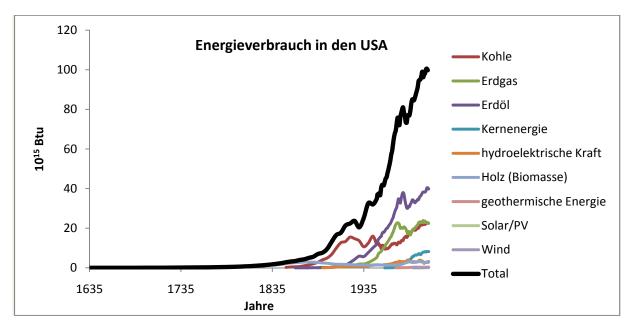


Abbildung 7-9, Energieverbrauch der USA in Btu²9, eigene Darstellung Daten: EIA, Estimated Primary Energy Consumption in the United States, Selected Years, 1635-1945 Internet: http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/pdf/pages/sec13\_e\_1.pdf, Stand: 23. April 2008

25

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Jürgen PAEGER, Eine kleine Geschichte des menschlichen Energieverbrauchs, online

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup>INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *World energy outlook*, OECD Paris, 2007, Seite 74, Eigene Berechnungen

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Btu = British Thermal Unit; 1 Btu = 1055 Joule

Abbildung 7-9 zeigt den explodierenden Energieverbauch in den USA. Der Großteil der Energie wird durch fossile Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle gedeckt. Durch den Produktionsrückgang von Erdöl auf nationalem Gebiet seit den Siebzigerjahren und die gleichzeitige Weiterverwendung von fossilen Energieträgern als Energiebasis, ist die Abhängigkeit des amerikanischen Energiehaushaltes von ausländischen Gebieten leicht erklärbar.

Der amerikanische Geologe und Geophysiker Marion King Hubbert beschäftigte sich mit der Analyse dieser endlichen Ressourcenkapazität anhand von Erdöl und Erdgas. Auf einem Treffen des American Petroleum Institute 1956 in San Antonio in Texas machte Hubbert die Vorhersage, dass die Erdölförderung der USA in den späten 1960er bzw. frühen 1970er das Fördermaximum erreichen würde. Er sollte im Jahr 1970 Recht behalten<sup>30</sup>.

# 7.7 DIE HUBBERT-KURVE ALS AUSGANGSTHEORIE FÜR DIE BERECHNUNG DER PRODUKTIONSRATE

Die Idee beruht auf der Annahme, dass der Zusammenhang zwischen  $\frac{Erd\"{o}lf\"{o}rderungsrate}{kumulativer\ Erd\"{o}lf\"{o}rderung}$  und kumulativer Erd\"{o}lf\"{o}rderung linear ist.

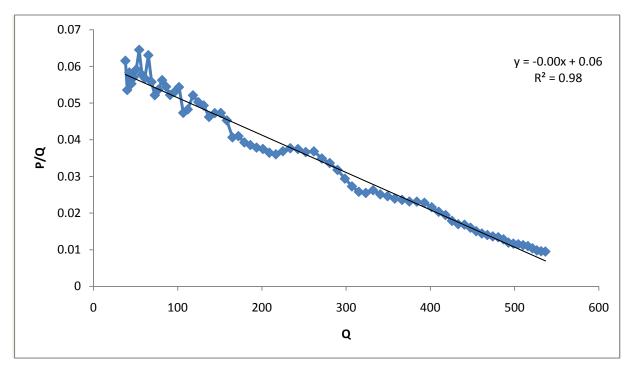


Abbildung 7-10, Zusammenhang zwischen Erdölförderungsrate und kumulativer Erdölförderung in den USA (P...Förderungsrate, Q...kumulative Fördermenge), eigene Darstellung Daten: EIA, U.S. Crude Oil Field Production (Thousand Barrels per Day) Internet: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/mcrfpus2a.htm Stand: 23. März 2008

<sup>30</sup>M. K. HUBBERT, *Nuclear Energy and Fossil Fuels*, Houston, 1956, Seite 24 und nationale Erdölförderungdaten der USA, online

rdölförderungdaten der USA, online

26

Aus Abbildung 7-10 lässt sich leicht die kumulative Fördermenge Q extrapolieren, bei welcher das Verhältnis P/Q gleich 0 ist.

$$\frac{P}{O} = kQ + d \tag{7.5}$$

$$\frac{P}{O}(bei\ Q=Q_{\max})=0 \tag{7.6}$$

$$Q_{\text{max}} = \frac{-d}{k} = \frac{-6,1645E - 02}{-1,0190E - 04} = 604,96$$
(7.7)

$$\frac{P}{O} = -d\frac{Q}{O_{\text{max}}} + d \tag{7.8}$$

$$P = d\left(1 - \frac{Q}{Q_{\text{max}}}\right)Q\tag{7.9}$$

k,d ...... Konstante (Geradengleichung)

Der Ausdruck  $\left(1-\frac{\varrho}{\varrho_{\text{max}}}\right)$  ist der Anteil vom gesamten Erdöl welcher noch für die Förderung verfügbar ist. Die Förderungsrate P welche zu einem gewissen Zeitpunkt gefördert wird, hängt linear von der noch verfügbaren Menge an Erdöl ab $^{31}$ .

Für die USA erhält man folgende angenäherte Hubbert Kurve:

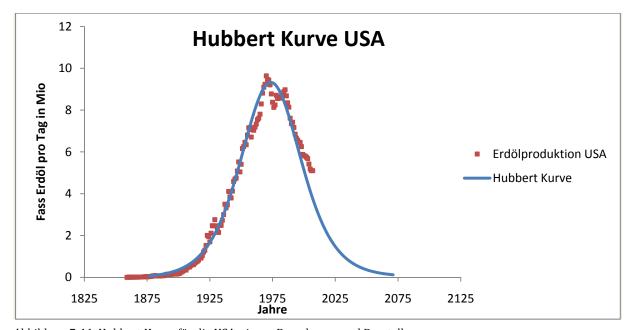


Abbildung 7-11, Hubbert Kurve für die USA, eigene Berechnung und Darstellung

Daten: EIA

Internet: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/mcrfpus2a.htm, Stand: 23. März 2008

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Luís DE SOUSA, *Hubbert's peak mathematics*, online

Aus Abbildung 7-11 erkennt man das US-Erdölförderungsmaximum ("Peak-Oil") im Jahr 1970. Aber nicht nur die USA haben den Zeitpunkt des Förderungsmaximums überschritten. Auch die Nordsee dürfte das Fördermaximum schon hinter sich haben, wie Förderungsdaten von Norwegen zeigen. Die norwegische Regierung hat zuletzt die Schätzungen über die Erdölreserven in der Barentssee um 11% gesenkt.<sup>32</sup>

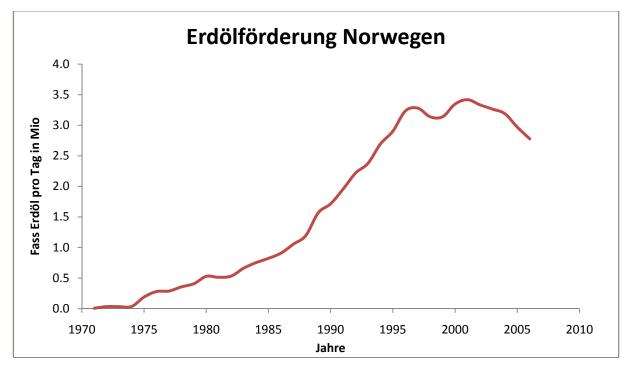


Abbildung 7-12, Erdölförderung Norwegen, eigene Darstellung

Daten: BP, Statistical Review 2008

Internet:

 $http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and\_publications/statistical\_energy_review_2008/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_review_2008.pdf, and a liveage of the large of th$ 

Stand: 29. Juli 2008

Während eine wachsende Gemeinschaft von Experten von einem Maximum der Erdölförderung in den nächsten Jahren ausgeht<sup>33</sup>, sind andere Experten der Ansicht, dass die Erdölressourcen weit größer als gedacht sind und der resultierende "Peak-Oil" Zeitpunkt erst in ein paar Jahrzehnten eintritt. <sup>34</sup>, <sup>35</sup>

Die Association for the Study of Peak Oil and Gas (ASPO) ist ein Netzwerk von Wissenschaftlern aus allen Teilen der Welt, welche das gemeinsame Interesse haben über Peak Oil und dessen

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> ASPO, Mikael HÖÖK, Norway reduced the Barent Sea resource estimate, 2009, online

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Russell GOLD und Ann DAVIS, *Oil Officials see limit looming in production,* The Wall Street Journal, 10.November 2007

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> CERA, Peak *Oil Theory - World Running Out of Oil Soon is Faulty*, CERA (Cambridge Energy Research Associates), Cambridge, USA, 14. November 2006

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> vgl. ASPO, Colin J. CAMPBELL, *Peak Oil: A turning for Mankind*, Hubbert Center Newsletter # 2001/2-1, 2001, Seite 3

Konsequenzen zu forschen. ASPO wurde von Colin Campbell im Jahr 2000 gegründet und hat mittlerweile Niederlassungen in 36 Ländern. Die Homepage von ASPO dient als Plattform für Diskussionen, Beiträge und Evaluierungen von Beiträgen aus diversen Journalen. Es werden monatlich Newsletters zum Thema "Peak-Oil" veröffentlicht.<sup>36</sup>

Aus der Sensitivitätsanalyse für die Produktionsrate von Erdöl aus Kapitel 16.2 wird ersichtlich, dass eine langsame Abnahme wahrscheinlicher ist, als eine schnelle Abnahme der Produktionsrate. Dies würde zu einer langen Plateauphase bei einer ungefähr gleichen jährlichen Erdölproduktion führen. Der tatsächliche "Peak-Oil" Zeitpunkt könnte erst nach Jahren genau eruiert werden.

Dies ändert jedoch nichts an der Tatsache, dass die Untersuchungen und Prognosen von Hubbert in Hinsicht auf die Glockenform der Produktionskurve richtig sein dürften. Diese Glockenform wurde auch in diesem Modell als Modellierungsanforderung für die Berechnung der Produktionsraten gestellt.

Um den Meinungsunterschieden der Experten im Modell Rechnung tragen zu können, werden in den Szenarien unterschiedliche Gesamtpotentiale von Erdöl als Randbedingung implementiert.

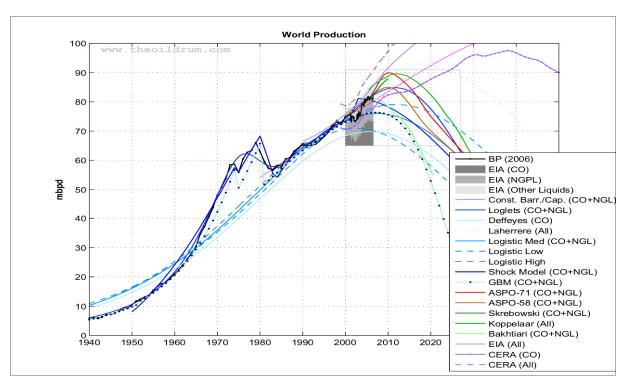


Abbildung 7-13, Vorhersagen der weltweiten Erdölproduktion in mbpd (million barrels per day)
Quelle: THE OIL DRUM, Peak Oil Update - November 2006: Production Forecasts and EIA Oil Production Numbers
Internet: http://www.theoildrum.com/story/2006/11/13/225447/79, Stand: 12. Dezember 2007

\_

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> siehe Internet: http://www.peakoil.net

## 7.8 Erdől – Das schwarze Gold

Erdöl ist der wichtigste Primärenergieträger und Rohstoff der Petrochemie. Es bildet sich unter dem Eigendruck der Lagerstätte in anaeroben Verhältnissen aus abgestorbenen tierischen und pflanzlichem Plankton über Jahrmillionen hinweg. Diese Erdöllager werden mit geologischen und geophysikalischen Methoden erschlossen.

### 7.8.1 DIE FÖRDERUNG

Die Förderung erfolgt über eine der drei Gewinnungsmethoden:

- Primärverfahren: Hier wird der natürliche Lagerdruck, der vor allem durch Gase erzeugt wird, genutzt. Der Ausbeutegrad der Lagerstätte (=Entölungsgrad) liegt bei 10 bis 30%.
- Sekundärverfahren: Durch Injektion von Wasser oder Erdgas wird der Lagerstättendruck aufrechterhalten. Der Entölungsgrad kann dadurch auf 30 bis 40% erhöht werden.
- Tertiärverfahren: Dabei wird bis zu 340°C heißer Dampf unter einem Druck bis zu 150 bar in die Lagerstätte gepumpt. Diese Druck- und Temperaturerhöhung verbessern die Fließfähigkeit des Öls.

Zur Aufbereitung werden niedrigsiedende Kohlenwasserstoffe und Feststoffe durch thermische, mechanische und physikalische Behandlung abgetrennt. <sup>37</sup>

## 7.8.2 DIE DESTILLATION

In Raffinerien wird das aufbereitete Erdöl durch Destillation in seine Anteile zerlegt. Die Fraktionen werden nach bestimmten Siedebereichen unterteilt. Die hochsiedenden Destillate werden anschließend durch Cracken weiter aufgespalten. Unter Cracken versteht man das Aufspalten der Kohlenwasserstoffmoleküle unter hoher Temperatur oder durch zusätzliche Anwendung mit Katalysatoren. 38

Im Modell wird unter dem Begriff *Produktion* die Förderung und Destillation von Erdöl zusammengefasst.

#### 7.8.3 Konventionelles und unkonventionelles Erdöl

Unter konventionellem Erdöl versteht man flüssige Kohlenwasserstoffe von geringer bis mittlerer Dichte und Viskosität. Falls die Förderung von Erdöl fortgeschrittene Technologien

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> MEYERS LEXIKONVERLAG, *Erdöl*, online

<sup>38</sup> MEYERS LEXIKONVERLAG, Cracken, online

benötigt, so spricht man von unkonventionellem Erdöl. Unkonventionelle Erdöle beinhalten Öle mit einer größeren Dichte als Wasser (z.B. Schweröl), einer Viskosität höher als 10.000 cP<sup>39</sup> (z.B. Ölsande), oder mit einer festen Formation (z.B. Ölschiefer). <sup>40.41</sup>

### 7.8.4 Erdölvorkommen

#### **7.8.4.1** RESERVEN

Damit Erdölvorkommen als Reserve eingestuft werden, müssen sie folgende drei Bedingungen erfüllen:

- Das Vorkommen muss durch Bohrungen bestätigt sein
- Mit heutiger Technik sind die Vorkommen erschließbar
- Bei heutigen Preisen sind die Vorkommen wirtschaftlich förderbar

Reserven stellen nur einen Teil des vorhandenen Potenzials dar. Die genauen Definitionen können jedoch sehr unterschiedlich sein.  $^{42}$ ,  $^{43}$ 

### 7.8.4.2 Ressourcen

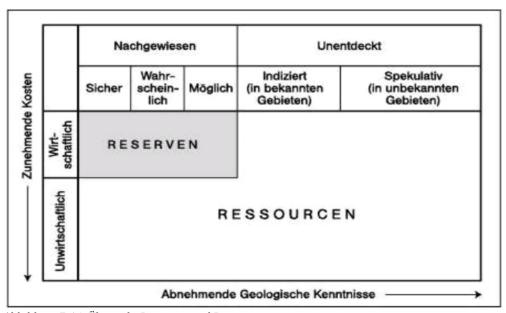


Abbildung 7-14, Übersicht Reserven und Ressourcen

Daten: GETHMANN et al., Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung, Walter de Gruyter Verlag, 2005, Seite 59, © 2005 Walter de Gruyter GmbH & Co. KG

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> cP...Centipoise (1cP=10<sup>-3</sup> kg/ms)

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup>ASPO, Jean LAHERRERE, Estimates of Oil Reserves, EMF/IEA/IEW Konferenz, Laxenburg, 19. Juni 2001

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Janet L. HOPSON David L. GREENE, Jia LI, *Running out of and into oil: Analyzing global oil depletion and transitition through 2050*, Knoxville, 2003, Seite 7ff

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> siehe auch WEG, *Reserven und Ressourcen – Potenziale für die zukünftige Erdgas- und Erdölversorgung,* Hannover, 2008, Seite 2ff

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> GETHMANN C. F., STREFFER Ch., HEINLOTH K., WITT A. (2005). *Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung*, Walter de Gruyter, Berlin, Seite 57, 58

Diejenigen Mengen eines Energierohstoffes, die nachgewiesen, aber derzeit nicht wirtschaftlich gewinnbar sind oder auf Basis geologischer Indikatoren noch erwartet und mittels Exploration nachgewiesen werden können, nennt man Ressourcen. Aus den Definitionen für Reserven und Ressourcen wird ersichtlich, dass die Höhe der Reserven preisabhängig ist. "Neue technische Innovationen bzw. der steigende Ölpreis haben in der Vergangenheit immer wieder dazu geführt, dass unrentable Vorkommen in die Gruppe der Reserven aufstiegen. Typische Beispiele sind das Nordseeöl und die kanadischen Ölsande, die erst durch steigende Preise während der Ölkrisen – vor allem in den siebziger Jahren – abbauwürdig und somit als Reserven eingestuft wurden".<sup>42, 44</sup> Erdölvorkommen, welche als *sichere Reserven* eingestuft werden, können mit einer Wahrscheinlichkeit von größer als 90% gefördert werden. Während *wahrscheinliche Reserven* eine Wahrscheinlichkeit zwischen 50 und 90% haben, weisen *mögliche Reserven* eine Ausbeutungswahrscheinlichkeit von maximal 50% auf.<sup>45</sup>

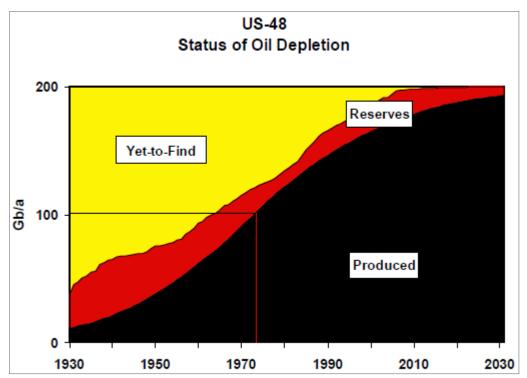


Abbildung 7-15, Zusammenhang zwischen Ressourcen, Reserven und produziertes Erdöl für die USA Quelle: ASPO, Newsletter #95, November 2008, Seite 4

Internet: http://www.aspo-ireland.org/contentFiles/newsletterPDFs/newsletter95\_200811.pdf, Stand: 09. September 2009

\_

 $<sup>^{44}</sup>$  vgl. ASPO, Colin J. CAMPBELL, Jean LAHERRERE, *The end of cheap oil*, Scientific American, 1998, Seite 80ff

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup>ASPO, Mikael HÖÖK, *Depletion and Decline Curve Analysis in Crude Oil Production*, Global Energy Systems Department for Physics and Astronomy, Uppsala University, 2009, Seite 24

## 7.8.4.3 GESAMTRESSOURCEN (VERBLEIBENDES POTENZIAL BEI KOHLENWASSERSTOFFEN)

Unter Gesamtressourcen eines Energierohstoffes versteht man Reserven plus Ressourcen. "Während die Schätzungen der Reserven dem Einfluss des Marktpreises unterliegen, beruhen die Schätzungen über die Gesamtressourcen ausschließlich auf geologischen Daten". <sup>46</sup>

# 7.8.4.4 GESAMTPOTENTIAL (ESTIMATED ULTIMATE RECOVERY EUR)

Das Gesamtpotential einer Ressource fasst den Umfang einer Ressource vor Eingriff des Menschen zusammen. Es umfasst somit die bisherig kumulierte Förderung, die Reserven und die Ressourcen mit ein. <sup>46</sup>

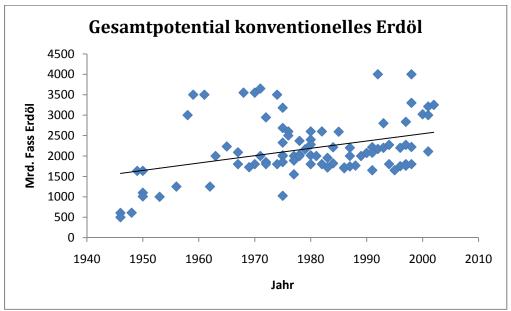


Abbildung 7-16, Schätzungen verschiedener Studien für das Gesamtpotential konventionellem Erdöls, (Estimated Ultimate Recovery – EUR), eigene Darstellung

Daten: SALVADOR, A., 2005, *Energy: A historical perspective and 21st century forecast*: AAPG Studies in Geology 54, Seiten 33-121. Tabelle 8

Aktuellste Analysen des Gesamtpotentials von konventionellem Erdöl gehen von ca. 2500 bis 4500 Milliarden Fass Erdöl aus. Analysen für das Gesamtpotential von unkonventionellem und konventionellem Erdöl reichen bis 7000 Milliarden Fass Erdöl. 47

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Carl Friedrich GETHMANN, Christian STREFFER, Klaus HEINLOTH, Andreas WITT, *Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung*, Berlin, 2005, Seite 58, 59

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, World energy outlook 2004, Paris, 2004, Seite 94, 96

# 7.8.5 Steigende Preise am Erdölmarkt – Ein Resultat aus knappem Angebot und Hoher Nachfrage

Die Internationale Energieagentur (IEA) rechnet in den kommenden fünf Jahren nicht mit fallenden Erdölpreisen. Das sind die Ergebnisse einer Fünfjahresprognose, die am 1. Juli 2008 in Madrid präsentiert wurde. Der Chef der Energieagentur, Nobuo Tanaka, sagte beim Welt-Erdöl-Kongress, dass die Menschheit sich ganz klar im dritten Ölpreis-Schock befindet. Während die Nachfrage aus den Industrieländern sinke, steigt sie in China und in den Schwellenländern, bedingt durch den Wirtschaftsboom. Tanaka führte auch den Ölpreis nicht auf Spekulationen zurück, sondern auf die vorliegende Marktsituation von knappen Angebot und hoher Nachfrage.

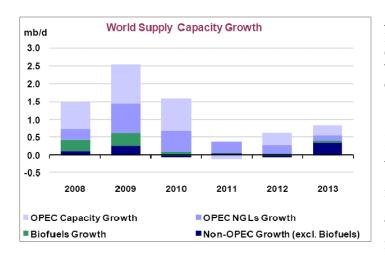


Abbildung 7-17, Weltweites Erdölversorgungswachstum Quelle: IEA, *Medium-Term Oil Market Report*, World Petrolem Congress am 1. Juli 2008, online, Seite 22, © 2008 *OECD/IEA* 

Die IEA geht von marginalen Versorgungszuwächsen in den nächsten fünf Jahren aus, was der angespannten Lage am Erdölmarkt noch zusetzen dürfte.

Der Internationale Währungsfonds (IMF) sieht ebenfalls die knappen Förderkapazitäten als Hauptgrund für den Ölpreisanstieg. Es herrsche weiter ein Konsens, dass die Produktions- und Vertriebskapazitäten nur langsam wachsen werden. Gleichzeitig sind die Investitionskosten für die Erschließung neuer Lagerstätten, durch technische, geologische und politische Probleme, extrem gestiegen. Die steigenden Erdölpreise werden auch große Auswirkungen auf Länder mit niedrigen und mittleren Durchschnittseinkommen haben. Die gleichzeitig steigenden Nahrungsmittelpreise erschweren es den importabhängigen Nationen die Armut zu bekämpfen und die Bevölkerung mit Lebensmitteln zu versorgen.

Steigende Rohölpreise machen auch der chinesischen Wirtschaft zu schaffen. Hohe Energiekosten und dadurch höhere Produktionskosten sind dafür verantwortlich, dass bisher billige Waren aus China zunehmend im Preis steigen werden. 48

-

<sup>48</sup> WELT-ONLINE, Erdölnachfrage steigt schneller als das Angebot, 2. Juli 2008. online

# 8 System Dynamics

#### 8.1 ALLGEMEINES

Unter System Dynamics oder auch Systemdynamik versteht man ein von Jay W. Forrester am Massachusetts Institute of Technology entwickeltes Konzept zur Abbildung von komplexen und dynamischen Systemen. Aus der Analyse von Problemstrukturen wird versucht grundsätzliche allgemein gültige Zusammenhänge aus verschiedensten Bereichen der Wissenschaften zu gewinnen und diese in mathematische Beziehung zu setzen.

Entscheidungsträgern soll auf diesem Weg ein Instrument in die Hand gelegt werden, um komplexe Systeme aus der Soziologie, Technik oder Ökologie, besser durchleuchten- und vor allem langfristige Effekte abschätzen zu können. Entscheidungen, welche kurzfristig Erfolg versprechen mögen, können auf der langfristigen Ebene durch sogenannte Rückkoppelungen unerwünschte Langzeitwirkungen mit sich bringen.

## 8.2 OFFENE UND GESCHLOSSENE SYSTEME IN DER SYSTEMTHEORIE

Ein offenes System ist charakterisiert durch einen Output-Strom, welcher keinen Einfluss auf den Inputstrom hat. Vorangegangene Aktionen haben keinen Einfluss auf zukünftige Aktionen, d.h. ein offenes System hat weder die Funktion einer Beobachtung, noch reagiert es auf seine Outputgrößen. Ein Beispiel für ein offenes System wäre in diesem Zusammenhang eine Uhr. Eine Uhr beobachtet nicht ihre eigene Ungenauigkeit und kann sich nicht selbst regulieren.

Ein geschlossenes System bzw. ein Rückkopplungssytem wird durch sein eigenes Verhalten in der Vergangenheit beeinflusst. Man spricht auch von einem "Feedback-System". Ein solches System zeichnet sich durch eine geschlossene Schleife aus, in welcher die Ergebnisse vorangegangener Handlungen als Information für zukünftige Aktionen dienen. Bei Rückkopplungssystem werden zwei Arten unterschieden: <sup>49</sup>

### 8.2.1 Positive Rückkopplungssysteme

Positive Rückkopplungsprozesse zeichnen sich durch ein geschlossenes System aus, in welchem, vorangegangene Aktionen weitere Aktionen mit noch größerer Wirkung auslösen. Bakterien haben die grundsätzliche Eigenschaft eines positiven Rückkopplungsprozesses. Je mehr

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> Jay. W. FORRESTER, Grundzüge einer Systemtheorie (Principles of Systems), Wiesbaden, 1972, Seite 15ff

Bakterien innerhalb einer Systemgrenze vorhanden sind, desto größer ist die Wachstumsrate, die das Erzeugen neuer Bakterien repräsentiert. <sup>49</sup> Ein weiteres Beispiel für ein positives Rückkopplungssystem wäre das Zinssystem einer Bank. Je größer das Guthaben auf einer Bank ist, desto größer sind auch die abgeworfenen Zinsen. Werden die Zinsen dem Guthaben gutgeschriebenen, wächst das Guthaben exponentiell an.

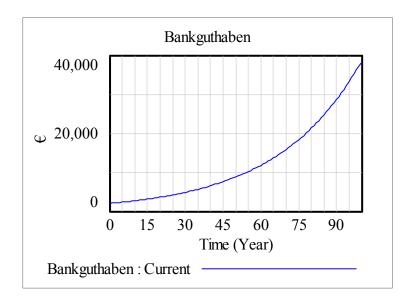


Abbildung 8-1, Exponentielles Wachstum bei positiven Rückkopplungsprozessen, eigene Darstellung

Abbildung 8-1 zeigt das Wachstum eines Bankguthabens bei konstanten Zinsen. Die Kurve ist durch den Zinseszinseffekt von exponentiellem Wachstum geprägt.

**Zinseszinsformel:** 

$$K_n = K_0 * \left(1 + \frac{p}{100}\right)^n \tag{8.1}$$

K <sub>n</sub>	Endkapital
K <sub>0</sub>	Anfangskapital
<i>p</i>	Zinssatz
n	Anzahl der lahre

### 8.2.2 Negative Rückkopplungssysteme

Ein negatives Rückkopplungssystem ist zielsuchend. Es reagiert auf Zielabweichungen. 49

Beispiel für eine negative Rückkopplung ist der radioaktive Zerfall. Der Zerfall einer radioaktiven Substanz folgt einer negativen Exponentialfunktion. Ausgangpunkt für die Berechnung ist die Halbwertszeit. Die Halbwertszeit ist jene Zeit, in der sich die Menge eines bestimmten radioaktiven Nuklids durch Umwandlung in andere Atome halbiert hat. Die Zielfunktion ist in diesem Beispiel der Wert null. Das bedeutet, dass sich die Radioaktivität einer Substanz asymptotisch dem Wert null nähert. Die Halbwertszeit ist für jedes Nuklid konstant.

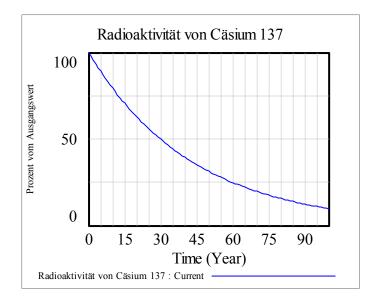


Abbildung 8-2, Radioaktive Zerfall von Cäsium 137 bei einer Halbwertszeit von 30,2 Jahren, eigene Darstellung

Abbildung 8-2 zeigt den radioaktiven Zerfall von Cäsium 137 mit einer Halbwertszeit von 30,2 Jahren. 50 Man erkennt, dass zum Zeitpunkt t=30,2 Jahre, 50% der strahlenden Nuklide schon zerfallen sind.

#### Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N_0 * e^{-\lambda * t} \tag{8.2}$$

N(t).....Zahl der strahlenden Nuklide zum Zeitpunkt t  $N_0$ ......Zahl der stahlenden Nuklide zum Zeitpunkt t=0 

## 8.3 DIE SYSTEMGRENZE

Das Verhalten eines dynamischen Systems hängt von den kausalen Zusammenhängen der jeweiligen Komponenten ab. Diese Komponenten haben die Eigenschaft, dass sie innerhalb der Systemgrenze liegen. Eine Systemgrenze beschreibt die Abgrenzung des Modells von der Umwelt, innerhalb welcher das zu untersuchende dynamische Verhalten erzeugt wird. Die festgelegte Systemgrenze stellt ein Hindernis dar, durch welches im besten Fall nichts fließen kann. Ausnahmen können Störgrößen sein, die dazu dienen, die Reaktion des Systems auf Zufallseinflüsse zu beobachten. 51

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup>MEYERS LEXIKONVERLAG, Halbwertszeit, online

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup>Jay. W. FORRESTER, Grundzüge einer Systemtheorie (Principles of Systems), Wiesbaden, 1972, Seite 88 vgl. auch Systemgrenze in der Thermodynamik, Günter CERBE, Hans-Joachim HOFFMANN, Einführung in die Thermodynamik – Von den Grundlagen zur technischen Anwendung, Wien, 1999, Seite 34

## 8.4 BESTANDSGRÖßEN UND FLUSSGRÖßEN

Bestandsgrößen (oder auch Zustandsgrößen, stocks, levels) sind Größen, deren Quantität zu jedem Zeitpunkt gemessen werden kann. Beispiele für Zustandsgrößen können sein: Kapital, Bevölkerung, Temperatur, Fahrzeuge, etc.

Flussgrößen (oder auch Bewegungsgrößen, Stromgrößen, flows, rates) sind immer die erste Ableitung einer Bestandsgröße nach der Zeit, d.h. die zeitliche Änderung der Bestandsgröße pro Zeiteinheit. Die Einheit einer Flussgröße ist immer pro Zeit, also z.B.  $\frac{km}{h}$ ,  $\frac{Euro}{Iahr}$ ,  $\frac{Liter}{Woche}$ . 52

#### 8.5 Causal Loop Diagramme – Kybernetik

Unter Kybernetik versteht man die Wissenschaft, welche sich mit der Untersuchung von Steuerungs- und Regelungsvorgängen in natürlichen und technischen System befasst.<sup>53</sup> Als "Sprache", welche Ursache-Wirkungsbeziehungen definiert, wurden die leicht verständlichen "Causal Loop Diagramme" (kurz CLD) entwickelt. Ein CLD ist ein System, dessen Entitäten aus Größen bestehen, wobei deren Wechselwirkungen durch Pfeile dargestellt werden. Es beschreibt die Wirkung von Änderungen einer Größe auf die Änderungen einer oder mehrerer anderer Größen in qualitativer Form.

Man betrachtet stets zwei Größen isoliert und unterstellt entsprechend der ceteris-paribus Annahme, dass alle anderen Größen konstant bleiben. Bewirkt eine Änderung einer der beiden Größen eine gleichgerichtete Veränderung der zweiten, abhängigen Größe, so wird die

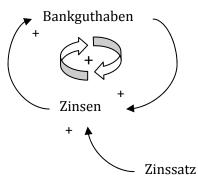


Abbildung 8-3, CLD Positive Rückkopplung, eigene Darstellung

Beziehung als "positiv" bezeichnet. Die Pfeile im CLD erhalten nun den entsprechenden Index "+". Bewirkt hingegen die Änderung einer Größe eine entgegengesetzte Änderung bei der abhängigen zweiten Größe, so bezeichnet man die Beziehung als "negativ". Die Pfeile im Wirkungsdiagramm bekommen wieder den entsprechenden Index "-". 54

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> Rainer SCHWARTZ, Controlling Systeme – Eine Einführung in Grundlagen, Komponenten und Methoden des Controlling, Wiesbaden, 2002, Seite 148, 149

<sup>53</sup> MEYERS LEXIKONVERLAG, Kybernetik, online

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Rainer SCHWARTZ, Controlling Systeme – Eine Einführung in Grundlagen, Komponenten und Methoden des Controlling, Wiesbaden, 2002, Seite 155

Abbildung 8-3 zeigt die positive Rückkopplung zwischen Zinsen und Bankguthaben. Steigt das Bankguthaben an, steigen auch die Zinsen bei konstantem Zinssatz. Die Zinsen werden auf dem Bankkonto belassen und deswegen erhöht sich wiederum das Bankguthaben (vgl. Kapitel 8.2.1).

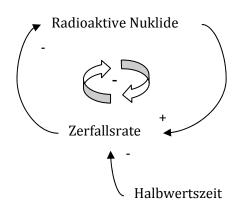


Abbildung 8-4, CLD Negative Rückkopplung, eigene Darstellung

Abbildung 8-4 zeigt die negative Rückkopplung zwischen der Radioaktivität einer Substanz bzw. der Anzahl radioaktiver Nuklide unter der Zerfallsrate. Sinkt die Anzahl der radioaktiven Nuklide, sinkt auch die Zerfallsrate. Es besteht hier also ein positiver Zusammenhang. Steigt jedoch die Zerfallsrate einer Substanz, dann sinkt die Anzahl der noch

übrigbleibenden radioaktiven Nuklide, und der Pfeil erhält ein negatives Vorzeichen. Der Gesamtprozess ist somit negativ rückgekoppelt (vgl. Kapitel 8.2.2).

## 8.6 Software für System Dynamics

Um derartige einfache bzw. auch komplexere Systemzusammenhänge mit mehreren positiven oder negativen Rückkopplungen zu berechnen, werden Softwarepakete wie CONSIDEO, iThink/STELLA, DYNAMO, POWERSIM oder VENSIM verwendet. Für die Bearbeitung des Modells wurde ausschließlich die Software VENSIM verwendet.

# 8.7 DAS LOTKA-VOLTERRA-MODELL ALS ANWENDUNGSBEISPIEL FÜR SYSTEMDYNAMIK

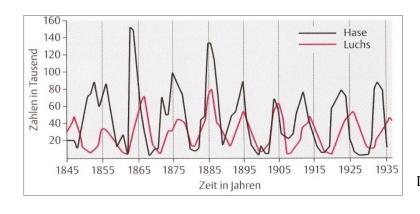


Abbildung 8-5, Fellzahlen von Schneeschuhhasen und Luchsen, welche bei der Hudson's Bay Company zwischen 1850 und 1900 abgegeben worden sind, Quelle: ODUM E. P., Ökologie – Grundlagen, Standorte, Anwendung, Stuttgart, 1999, Seite 219

Das Lotka-Volterra-Modell ist

eines der ersten mathematischen Modelle biologischer Systeme (ca. 1920). Es erfasst die Oszillation als wesentliche Eigenschaft von Räuber-Beute-Systemen, wobei das Räubermaximum dem Beutemaximum mit einer gewissen zeitlichen Verspätung folgt.

Seit ca. 1800 hat die Hudson Bay Company of Canada die alljährlich gefangenen Pelztiere registriert. Abbildung 8-5 zeigt, dass der Luchs während dieses langen Zeitraumes einen Populationspeak alle 9-10 Jahre, im Durchschnitt alle 9,6 Jahre erreicht. Auf Abundanzhöhepunkte folgen häufig Zusammenbrüche oder schnelle Rückgänge. Der Luchs wird für mehrere Jahre außerordentlich selten. Die Schneeschuhhasen folgen demselben Zyklus, wobei der Abundanzhöhepunkt dem des Luchses um ca. ein Jahr vorausgeht. Da der Luchs weitgehend vom Schneeschuhhasen als Nahrung abhängt, stehen die Zyklen des Räubers und des Beutetieres in Beziehung. 55

Vito Volterra und Alfred James Lotka stellten unabhängig voneinander in den Jahren 1925 und 1926 folgende Differentialgleichungen auf: <sup>56</sup>

$$\frac{dN_1}{dt} = N_1 * (\epsilon_1 - \gamma_1 * N_2) \tag{8.3}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 * (\epsilon_2 - \gamma_2 * N_1)$$
(8.4)

N <sub>1</sub>	Anzahl der Beute
ε <sub>1</sub>	Reproduktionsrate der Beute
N <sub>2</sub>	Anzahl der Räuber
ε2	Sterberate der Räuber bei Nichtvorhandensein von Beute
γ1	Fressrate der Räuber pro Beute=Sterberate der Beute pro Räuber
γ2	Reproduktionsrate der Räuber pro Beute
<i>t</i>	Zeit

### 8.7.1 CLD DER RÄUBER-BEUTE-BEZIEHUNG

Mit der Hilfe der Systemdynamik lässt sich diese Räuber-Beute-Beziehung, zunächst anschaulich über ein Causal-Loop-Diagramm darstellen.

Das CLD zeigt insgesamt fünf Regelkreise, mit zwei positiven und drei negativen Rückkopplungen. Wird die Population der Beute, oder die Population der Räuber größer, wird auch die Anzahl der Geburten jeweils größer werden.

<sup>56</sup> Vito VOLTERRA, *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la Vie,* Paris, 1931, Seite 14

<sup>55</sup> Eugene. P. ODUM, Ökologie: Grundlagen, Standorte, Anwendung, Stuttgart, 1999, Seite 219ff

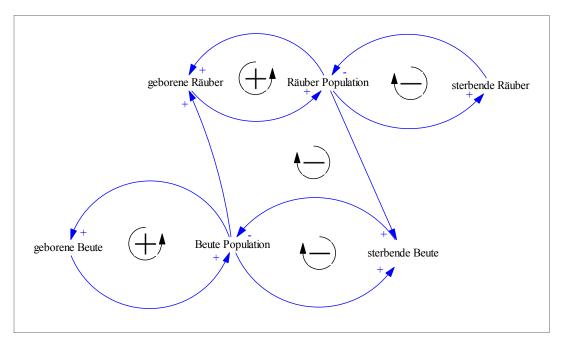


Abbildung 8-6, CLD der Räuber-Beute-Beziehung, eigene Darstellung

Es bestehen also zwei gleichgerichtete Zusammenhänge und daher zwei positive Rückkopplungen. Demgegenüber stehen zwei negative Rückkopplungen, welche die beiden ersten positiven Rückkopplungen stabilisieren. Wird die Population der Beute, oder die Population der Räuber größer, wird auch die Anzahl der sterbenden Räuber bzw. Beute größer werden. Gibt es jedoch mehr Sterbefälle wird die Anzahl der Populationen sinken. Zwei negative Rückkopplungen halten das System im Gleichgewicht.

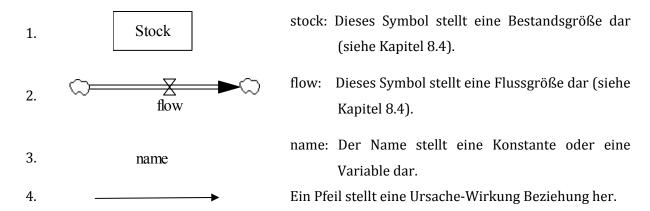
Die zwei Populationen werden nun durch einen fünften Regelkreis in Beziehung gesetzt. Wird die Anzahl der Beute größer, wird es mehr Futter für die Räuber geben und daher auch eine steigende Geburtenrate bei den Räubern. Wird jedoch die Anzahl der Räuber größer, wird die Sterberate der Beute auch höher, da mehr Räuber Nahrung benötigen. <sup>57</sup>

#### 8.7.2 DIE UMSETZUNG DES QUALITATIVEN IN EIN QUANTITATIVES MODELL

Nachdem die Ursache-Wirkungsbeziehungen im CLD analysiert worden sind, wird das Modell nun in eine Simulationsumgebung transferiert. Die Simulationsumgebung kann nun durch Verwendung von Computern eine quantitative Berechnung des Modells durchführen.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> A. FORD, F.A. FORD, Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental systems, Washington DC, USA, 1999, Seite 225ff

Mit der Software VENSIM wird dieses qualitative Modell nun quantifiziert. In VENSIM werden verschiedene Symbole verwendet, deren Bedeutung nun kurz erläutert wird:



Folgende Abbildung zeigt nun die Umsetzung des CLD in die Simulationsumgebung VENSIM.

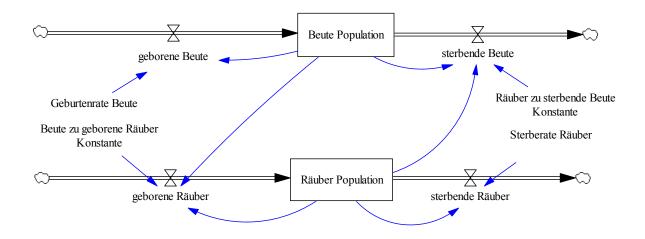


Abbildung 8-7, Räuber-Beute Modell in VENSIM, eigene Darstellung

## 8.7.3 SIMULATION

Nachdem das Modell in VENSIM implementiert wurde, können nun verschiedene Simulationen durchgeführt werden, indem Parameter einfach verändert werden. In Abbildung 8-8 wird die typische Lotka-Volterra Charakteristik nachgebildet. Man erkennt die zwei Zyklen mit einer Phasenverschiebung von ungefähr einem Jahr. In Abbildung 8-9 wird durch Veränderung der Parameter ein ganz anderes Verhalten dargestellt. In dieser Simulation ist die Reproduktionsrate der Beute so gering, dass sich ein Niedergangsverhalten im selben Zeitraum einstellt.

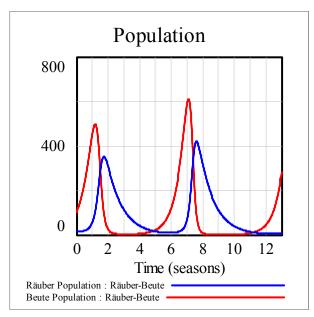


Abbildung 8-8, Räuber-Beute-Simulation 1 in VENSIM, Oszillationsverhalten, eigene Darstellung

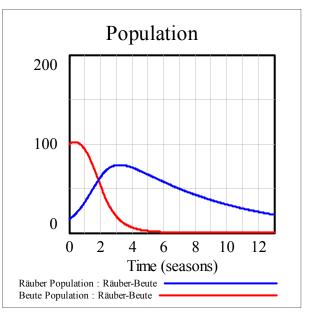


Abbildung 8-9, Räuber-Beute-Simulation 2 in VENSIM, Niedergangsverhalten, eigene Darstellung

# 9 System Dynamics – Teilmodell Erdöl

# 9.1 CAUSAL-LOOP-DIAGRAMM (CLD)

Das Teilmodell Erdöl basiert auf einem Artikel von William W. Behrensvon der System Dynamics Group vom Massachusetts Institute of Technology<sup>58</sup> und dem Modell von Paulo Gonçalves<sup>59</sup>. Behrens beschäftigte sich mit den kausalen Zusammenhängen von natürlichen Ressourcen und zeigte anhand von drei Regelkreisen, im Folgenden auch Loops genannt, die grundsätzlichen Zusammenhänge auf. Gonçalves modellierte diese allgemein für nicht-erneuerbare Ressourcen.

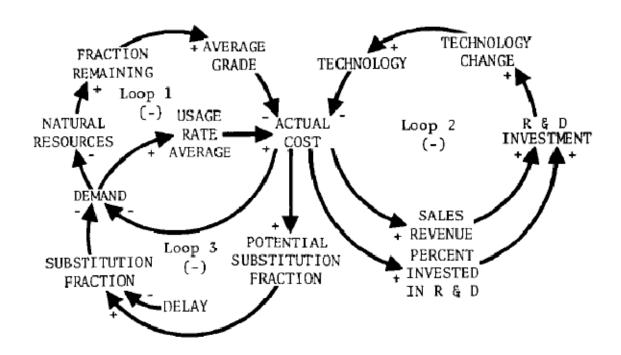


Abbildung 9-1, BEHRENS W. W., *The dynamics of natural resource utilization*, System Dynamics Group, Massachusetts Institute of Technology ,Cambridge, 1972, Seite 93, © 1972 *Simulation Councils Inc.* 

BEHRENS beschreibt, dass es grundsätzlich folgende 3 Loops gibt:

- 1. Resource reserves and actual cost
- 2. Extraction technology
- 3. Substitution technology

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> William W. BEHRENS, *The dynamics of natural resource utilization*, System Dynamics Group, Massachusetts Institute of Technology ,Cambridge, 1972

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> Paulo GONCALVES, The dynamics of natural resource utilization, online

Das obengenannte CLD wurde an die Ressource Erdöl angepasst und in ein systemdynamisches Modell transformiert.

Es ergibt sich folgendes CLD:

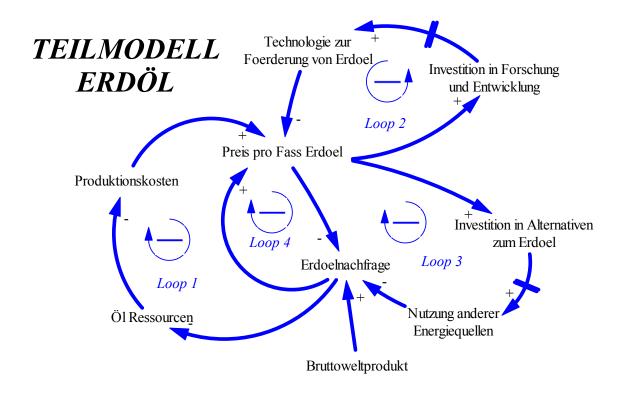


Abbildung 9-2, CLD Teilmodell Erdöl, eigene Darstellung

Loop1 (Ressourcenloop) zeigt wieder den Regelkreis über schwindende Ressourcen. Werden die bekannten Ressourcen weniger, wird es immer teurer Erdöl zu fördern. Die Ressourcen liegen tiefer oder sind schwerer zugänglich (z.B.: Erdöl unter dem Meer).

*Loop2 (Technologieloop)* behandelt den Regelkreis über technologischen Vorsprung. Die technologische Entwicklung ist gekennzeichnet durch folgenden logistischen Zusammenhang:

- Einführungsphase
- Wachstumsphase
- Sättigungsphase

Die technologische Entwicklung ist in der Wachstumsphase am stärksten und erreicht in der Sättigungsphase ihr Maximum. Ab diesem Zeitpunkt werden keine großen technologischen Fortschritte mehr erzielt. Loop3 (Substitutionsloop) stellt den Regelkreis der Substitution dar. Durch den hohen Ölpreis werden andere Energieträger wirtschaftlich lukrativ und ein Substitutionsprozess zu eben diesem Energieträger beginnt. Erdöl wird als Energieträger langsam durch einen anderen ersetzt. Das könnte in diesem Zusammenhang Erdgas, Atomenergie, aber auch erneuerbare Energieträger sein. Der Substitutionsprozess ist wieder durch ein logistisches Wachstum gekennzeichnet.

*Loop4 (Angebot-Nachfrage-Loop)* zeigt den einfachen ökonomischen Zusammenhang der Nachfrage und des Preises nach einem Gut am Markt: Steigt die Nachfrage nach einem Gut, steigt auch der Preis. Realisiert wurde dieser Aspekt mit einer Nachfragefunktion (siehe Kapitel 9.2.1.4).<sup>58</sup>

## 9.2 System-Dynamics Implementierung

Das Basismodell zur Systemimplementierung ist ein einfaches Stock-Flow Modell nach Dennis Meadows.

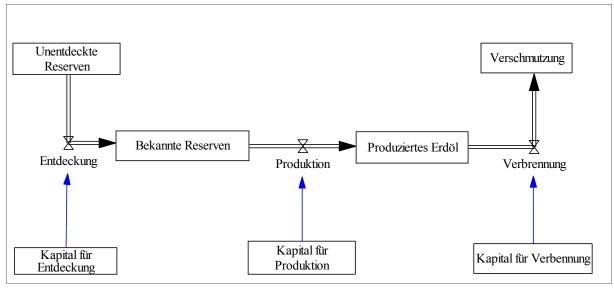


Abbildung 9-3, Stock - Flow Diagramm, Dennis L. MEADOWS, *Limits to Growth - The 30-Year Update*, White River Junction, 2004, Seite 90, Eigene Darstellung

Der Prozess der Entdeckung verbraucht Kapital (Bohrinseln, Flugzeuge, Satelliten,...). Die "Unentdeckten Reserven" werden – bei gleichzeitigem Anwachsen der "Bekannten Reserven" – reduziert. Die Produktion fördert unter Einsatz von Kapital (Abbau, Förderung, Raffinieren, Transport,...) das Erdöl ans Tageslicht und transportiert es zu den Raffinerien. Das Kapital zur

Verbrennung (Hochöfen, Fahrzeuge, Elektrizitätsgeneratoren,...) verbrennt das produzierte Erdöl zu nutzbarer Hitze.

Solange die Entdeckungsrate höher als die Produktionsrate ist, wachsen die "Bekannten Reserven" an. Da jedoch die "Unentdeckten Reserven" nicht rasch genug zunehmen werden und in diesem geringen Zeitraum als konstant betrachtet werden können, wird die Entdeckungsrate mit der Zeit zurückgehen und in weiterer Folge auch die Produktionsrate. <sup>60</sup>

Die systemdynamischen Grundzusammenhänge wie sie in Abbildung 9-3 dargestellt sind, werden auch in einem systemdynamischen Modell, welches von Wissenschaftlern der Universität von Valladolid erstellt worden ist, eins zu eins angewendet.

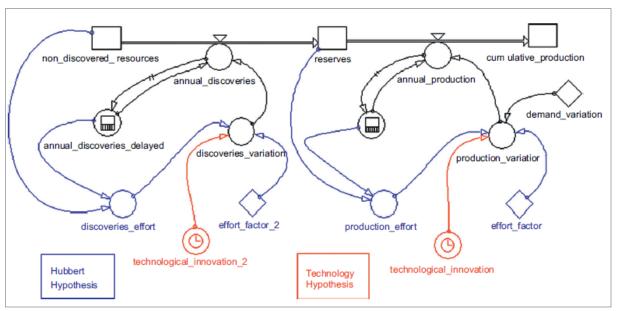


Abbildung 9-4, DE CASTRO C., MIGUEL L. J., MEDIAVILLA M. - The role of non conventional oil in the attenuation of peakoil, Energy Policy (2009), Seite 1827, © 2009 Elsevier Ltd.

Bei der Simulation des obenerwähnten Basismodells (Unentdeckte Reserven - Bekannte Reserven - Produziertes Erdöl) erkennt man, die gute Übereinstimmung des Modells mit

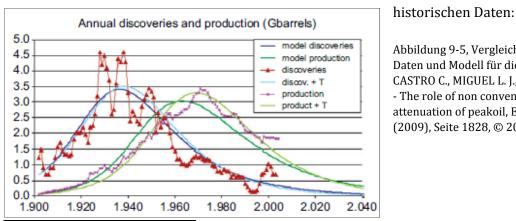


Abbildung 9-5, Vergleich historischer Daten und Modell für die USA, DE CASTRO C., MIGUEL L. J., MEDIAVILLA M.

- The role of non conventional oil in the attenuation of peakoil, Energy Policy (2009), Seite 1828, © 2009 Elsevier Ltd.

<sup>&</sup>lt;sup>60</sup> Dennis L. MEADOWS, Limits to Growth - The 30-Year Update, White River Junction, 2004, Seite 90ff

Als Startzeitpunkt für das Modell des Autors wurde das Jahr 1900 gewählt, da bis zu diesem Jahr Produktions- und Entdeckungsdaten von Erdöl vorliegen und vor diesem Zeitpunkt es nur möglich gewesen wäre Daten zu schätzen.

# 9.2.1 LOOP 1 (DER RESSOURCENLOOP UND DER ANGEBOT-NACHFRAGE-LOOP)

Abbildung 9-6 zeigt den *Ressourcen*- und den *Angebot-Nachfrage-Loop*. Mit den Konstanten "*Gesamtpotential"* und "*Reserven ANFANG"* definiert man die jeweiligen Bestandsgrößen zum Zeitpunkt des Jahres 1900. Die Größe "*Ressourcen"* fasst im Modell alle unentdeckten (indizierte und spekulative) Vorkommen, sowie bereits entdeckte, aber nicht wirtschaftlich förderbare Vorkommen zusammen (siehe Abbildung 7-14).

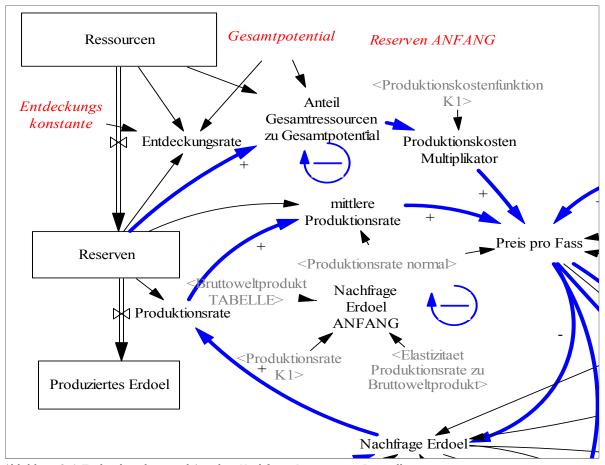
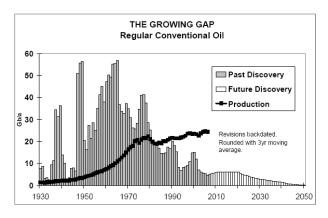


Abbildung 9-6, Technologieloop und Angebot-Nachfrage-Loop, eigene Darstellung siehe auch GONCALVES P. (2007), http://www.metasd.com/models/Library/Environment/NaturalResources/, Stand: 12. Juni 2008

## 9.2.1.1 ENTDECKUNGSRATE

Abdallah S. Jum'ah, CEO von Aramco, berichtet am Kongress des World Energy Councils in Rom im November 2007, dass die Menschheit bis jetzt 1,1 Billionen Erdöl gefördert hat und das nur 7 bis 9% des existierenden Erdölvorkommen sind. Man habe die Fähigkeiten der Menschheit unterschätzt nach neuen Reserven zu suchen, die einst unzugänglich waren. 61 Das US Department of Interior berichtet in einem US Geological Survey (USGS) von Vorkommen in der Arktis in der Höhe von 90 Milliarden Fass unentdecktem Erdöl, von 1,67 Billiarden Kubikfuß Erdgas und 44 Milliarden Fass von flüssigen Erdgas. 62 Beide Referenzen machen deutlich wohin der Weg der Erdölförderung gehen wird. Durch die fortschreitende Klimaerwärmung wird in den nächsten Jahren der Nordpol zum ersten Mal eisfrei sein. Die fossilen Ressourcen welche in der Arktis liegen, sind so immens, dass die umliegenden Nationen Russland, USA, Kanada, Norwegen und Dänemark beginnen Besitzansprüche zu stellen. 63

Stark steigende Erdölpreise führen zu einer Attraktivierung von unkonventionellen Förder- und Produktionsmethoden. Ölsande auf der einen Seite und Lagerstätten in den Tiefen der Ozeane werden für Unternehmen lukrativ, und eben dieser Wettlauf hat nun auch in Richtung Arktis begonnen. <sup>64</sup>



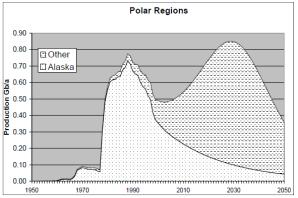


Abbildung 9-8, Erdölentdeckungen in Mrd. Fass Erdöl pro Jahr

Quelle: ASPO, Newsletter #91, Juli 2008 Internet:

http://www.aspo-

ireland.org/contentFiles/newsletterPDFs/newsletter91

\_200807.pdf, Stand: 29. Juli 2008

Abbildung 9-7, geschätzte Produktionsraten von Erdöl in den Polargebieten

Quelle: ASPO, Newsletter #99, März 2009, Seite 4. Internet:

http://www.aspo-

ireland.org/contentFiles/newsletterPDFs/news letter99\_200903.pdf, Stand: 11. September 2009

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup> Peter GLOVER, *Aramco Chief Debunks Peak Oil*, Energy Tribune, Houston, 17. Jänner 2008, online

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> USGS, 90 Billion Barrels of Oil and 1,670 Trillion Cubic Feet of Natural Gas Assessed in the Arctic, 23. Juli 2008, Internet: http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=1980, Stand: 28. Juli 2008

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Vsevolod GUNITSKIY, *On the Thin Ice: Water Rights and Disputes in the Arctic Ocean*, Journal of International Affairs, Volume 61(2),2008 ,Seiten 261-272

<sup>&</sup>lt;sup>64</sup> Barney GIMBEL, The *Hunt for Oil at the Top of the World. Fortune: Special Issue / Fortune 500*,Volume 157(9), 2008, Seite 96

Zur qualitativen Beschreibung der bisherigen Erdölentdeckungen eignet sich eine Glockenkurve. Daten von ASPO zeigen, dass der Großteil der Erdölentdeckungen in den Fünfziger- und Sechzigerjahren gemacht wurden und seitdem die Entdeckungsraten kontinuierlich gesunken sind.

$$Entdeckungsrate = \frac{Ressourcen * Reserven * Entdeckungskonstante}{Gesamtpotential}$$
(9.1)

Als Ergebnis für die Entdeckungsrate erhält man eine Glockenkurve. 65 Diese Kurve hat ihren Maximalförderungswert um das Jahr 1965 und nähert sich links und rechts der Spitze dem

Entdeckungsrate 60 Mrd Fass Erdoel 30 0 1960 1990 1900 1930 2020 2050 Time (year) Entdeckungsrate: URR 7000Gb Entdeckungsrate: URR 3500Gb a Entdeckungsrate: URR 3500Gb b Entdeckungsrate: URR 4500Gb a Entdeckungsrate: URR 4500Gb b Entdeckungsrate: Solar Entdeckungsrate: Olduvai

Abbildung 9-9, Variable Entdeckungsrate, eigene Darstellung

Vergleicht man die Variable *Entdeckungsrate* mit Abbildung 9-8 sieht man eine im Durchschnitt gute Annäherung.

Nullwert an.

Mit der Variable Anteil
Gesamtressourcen zu
Gesamtpotential wird der Anteil
der Gesamtressourcen im
Verhältnis zum
Gesamtpotential berechnet.

$$Anteil Ges. ress. zu Ges. potential = \frac{(Ressourcen + Reserven)}{Gesamt potential}$$
(9.2)

Anteil Ges,Res zu Ges.potential ......Anteil Gesamtressourcen zu Gesamtpotential

\_

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup> <u>Hinweis:</u> An dieser Stelle wird hingewiesen, dass die Variable "Entdeckungsrate" im Modell auch den Erschließungsprozess von nachgewiesenen, jedoch nicht wirtschaftlich förderbaren Vorkommen zu Reserven beinhaltet (vgl. Abbildung 7-14).

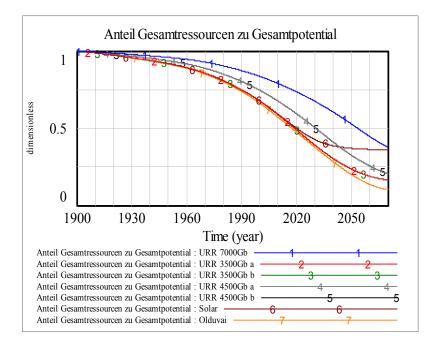


Abbildung 9-10, Variable *Anteil Gesamtressourcen zu Gesamtpotential,* eigene Darstellung

Man erkennt, dass um das Jahr 2010 bei den meisten Szenarien 60% noch des etwa Gesamtpotentials bestehen bleiben und eine Abflachung um das Jahr 2030 eintritt. Zu diesem Zeitpunkt wird der **Erdölpreis** eine deutliche Reduzierung der Nachfrage nach sich ziehen.

#### 9.2.1.2 Produktionskostenfunktion

Drei Hauptfaktoren beeinflussen die Produktionskosten von Erdöl:

- Entdeckungskosten
- Förderkosten
- Aufbereitungskosten

Das Auffinden und der Zugang zu Erdöl werden mit abnehmenden Gesamtressourcen immer aufwendiger. Die Lagerstätten, welche zur Erdölförderung genutzt werden, liegen mit fortschreitendem Abbau immer tiefer. Somit steigen die Entdeckungs- und Förderkosten (z.B. Lagerstätten in der Mitte der Arktis (vgl. Kapitel 9.2.1.1)). Gleichzeitig werden aber auch die Aufbereitungskosten mit abnehmenden Gesamtressourcen höher, da unkonventionelle Ölressourcen, wie Ölsande oder Ölschiefer einen aufwendigeren Produktionsprozess durchlaufen (vgl. Kapitel 7.8.3). Dieser Zusammenhang zwischen Gesamtressourcen und Produktionskosten wird im Kapitel 9.2.1.2 behandelt.

Den oben genannten Produktionskosten steht der technologische Fortschritt im gesamten Produktionsprozess von Erdöl gegenüber. Dieser Zusammenhang zwischen technologischem Fortschritt und Produktionskosten wird in Kapitel 9.2.2 behandelt. 66

Die Produktionskostenfunktion soll den Zusammenhang zwischen Erdölgesamtressourcen und Produktionskosten darstellen. Abnehmende Gesamtressourcen bei nichterneuerbaren Energieträgern bedeuten steigende Produktionskosten bei gleichbleibender Technologie, da der Energieträger in tieferen Lagen der Erde liegt und dadurch schwerer zugänglich ist. Ein Blick auf die Förderung von Steinkohle in den USA zeigt diesen Konnex. Im 19. und 20. Jahrhundert wurden große Mengen an Steinkohle in einem relativ kleinen Gebiet im Osten von Pennsylvania gefördert.<sup>67</sup> Mit fortschreitendem Abbau der Steinkohlereserven, wurde die Förderung von Steinkohle aus immer tieferen Lagen notwendig und die Dicke der Flözschicht nahm ab. Die Förderungsproduktivität sank und die Förderkosten stiegen. <sup>68,69</sup>

Tabelle 9-1, Abbau von Steinkohle in den USA, eigene Darstellung Quelle: DALE L. L., *The Pace of Mineral Depletion in the United States*, Land Economics, Vol. 60, No. 3, 1984, Seite 259

Jahr	Kumulative Förderungsmenge	Durchschnittliche Flözdicke	Durchschnittliche Fördertiefe (Fuß)
	(Millionen Tonnen)	(Fuß)	
1872	132	13,2	235
1882	401	10,8	310
1892	838	9,0	360
1902	1389	7,8	390
1912	2195	7,0	400
1922	3075	6,6	415
1930	3701	6,3	420
1980	5400	3,5	NA

Die Länder des Nahen Ostens haben nicht nur die größten Vorräte an Erdöl, sondern gleichzeitig auch die weitaus niedrigsten Produktionskosten.<sup>70</sup> Berechnungen von HOPSON, GREENE und LI (2003) zeigen, dass die Produktionskosten für konventionelles Erdöl vom Ausbeutungsgrad der

 $^{66}$  Janet L. HOPSON David L. GREENE, Jia LI, Running out of and into oil: Analyzing global oil depletion and transitition through 2050, Seite 21

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> vgl. Mikael HÖÖK, Kjell ALEKLETT (ASPO), *Historical trends in American coal production and a possible future outlook*, International Journal of Coal Geology 78 (2009) 201–216, Seite 207ff

<sup>&</sup>lt;sup>68</sup> Robert S. PINDYCK, *The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources*, The Journal of Political Economy, Seite 843

<sup>&</sup>lt;sup>69</sup> Larry L. DALE, *The Pace of Mineral Depletion in the United States*, Land Economics, 1984, Seite 259ff

<sup>70</sup> KRAMER, STREBEL, KAYSER (Hrsg.), Internationale Umweltmanagement, Gabler Verlag, 2003, S. 144

Stätte abhängen. Je geringer die verbleibende Menge der nicht erneuerbaren Ressource ist, desto höher werden die Produktionskosten. <sup>71</sup>

Um diesen entscheidenden Sachverhalt wiederzugeben, wird die Produktionskostenfunktion im Modell eingeführt.

Die Produktionskostenfunktion stellt einen Zusammenhang zwischen dem verbleibenden Anteil von Erdöl an den gesamten Erdölvorkommen und einem *Produktionskostenmultiplikator* her. Dieser Multiplikator wird die Kostenfunktion in Kapitel 9.2.1.3 heben oder senken. Als Basis für diese Funktion dient eine exponentielle Funktion, die beim Nullwert (also keine Gesamtressourcen vorhanden) den Wert *Pkfunktion K1* annimmt.

Mit dem Ausdruck  $ln\left(\frac{1}{PKfunktion\ K1}\right)$  erreicht man, dass die Funktion durch den Punkt 1 bei einem Anteil von 1 geht.

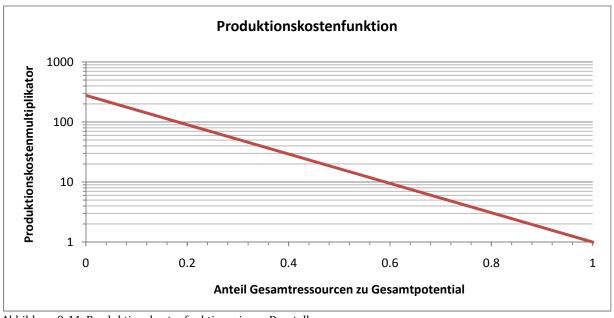
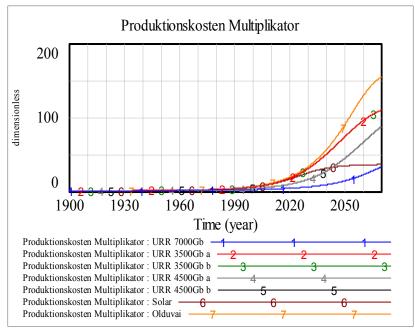


Abbildung 9-11, Produktionskostenfunktion, eigene Darstellung x-Achse: Anteil Gesamtressourcen zu Gesamtpotential, Y-Achse: Produktionskostenmultiplikator, semilogarithmische Darstellung

53

 $<sup>^{71}</sup>$  Janet L. HOPSON David L. GREENE, Jia LI, Running out of and into oil: Analyzing global oil depletion and transitition through 2050, 2003, Seite A-16



konstantem technologischen Knowhow aus dem Jahr 1900.

Für den Produktionskosten-Multiplikator ergibt sich folgender Verlauf über die Zeit:

Abbildung 9-12, Variable Produktions*kosten Multiplikator,* eigene Darstellung

Abbildung 9-12 zeigt, dass im Jahr 2070 die Produktion von einem Fass Erdöl ca. 40 bis 150 mal so teuer sein würde wie im Jahr 1900 bei

#### 9.2.1.3 Kostenfunktion

Mit Hilfe der Kostenfunktion werden die Durchschnittskosten für die Erdölproduktion bei bestimmter produzierter Menge berechnet. Durchschnittskosten, auch Stückkosten genannt, sind der Quotient aus Gesamtkosten (Fixe und variable Kosten) und Gesamtoutput (in diesem Fall die erzeugten Fass Erdöl).

Ist die Produktionsrate unter der erwarteten Produktionsrate – also nicht ausgelastet – machen die Fixkosten einen großen Teil der Kosten aus. Mit steigendem Output werden die durchschnittlichen Fixkosten aber immer unbedeutender und konvertieren gegen Null. Wird andererseits knapp an die Kapazitätsgrenzen produziert, steigen die Kosten überproportional an, da um eine weitere Einheit zu produzieren immer größere Mengen an variablen Inputfaktoren notwendig sind (Gesetz des abnehmenden Grenzprodukts). Dies führt zu einem typischen U-förmigen Verlauf der Kostenfunktion. Zuerst nehmen die Durchschnittskosten aufgrund der Fixkostendegression ab. Ab einem bestimmten Outputniveau dominiert aber der Effekt des abnehmenden Grenzprodukts, sodass die Durchschnittskosten wieder ansteigen. 72

<sup>&</sup>lt;sup>72</sup> Paul A. SAMUELSON, William D. NORDHAUS, Volkswirtschaftslehre, Frankfurt/Wien,1998, Seite 150, 151

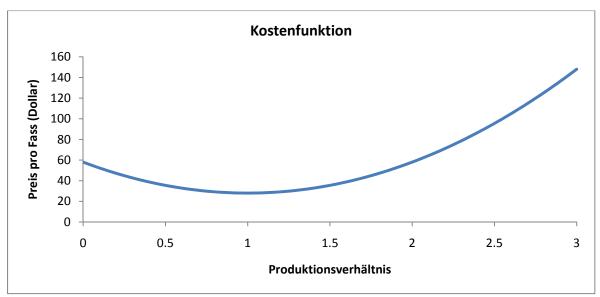


Abbildung 9-13, Kostenfunktion, eigene Darstellung

x-Achse: Produktionsrate/erwartete Produktionsrate, Y-Achse: Kosten pro Fass Erdöl in 2006 US\$

Im Modell wird zur Kalibrierung vereinfacht angenommen, dass im Jahr 1900 die Stückkosten pro Fass Erdöl gleichzeitig auch der Preis pro Fass Erdöl am Markt sind. Für einen Monopolisten bedeutet dies, dass fixe und variable Kosten mit dem erzielten Preis am Markt gerade noch gedeckt sind und dadurch Eintritte neuer Unternehmen am Markt erschwert werden.<sup>73</sup>

Dies stellt eine signifikante Einschränkung der Preisschätzung des Modells dar, da die Produktionskosten je nach Ölfeld weit unter dem gehandelten Preis am Weltmarkt liegen. Laut der US-amerikanischen Energiebehörde liegen die Produktionskosten pro Fass bei ca. 10US\$ im Mittleren Osten und bis zu 70\$ für US-amerikanisches Offshore-Erdöl im Jahr 2006, Tendenz stark steigend. Für die langfristige Entwicklung des Erdölpreises stellt diese Einschränkung jedoch nur in der Höhe des Erdölpreises eine Unschärfe dar, nicht aber in der generellen langfristigen Charakteristik steigender Preise. Für die genaue Modellierung des Preises, falls dies überhaupt machbar ist, würde man sehr schnell in komplexe ökonomische Zusammenhänge vorstoßen, die jedoch nicht Gegenstand dieser Dissertation sein sollen.

Es wird zur Kalibrierung des Modells vereinfacht angenommen, dass im Jahr 1900 das Minimum der Kostenfunktion den gleichen Wert wie der gehandelte Ölpreis hat (bei 28 2006US\$).

<sup>&</sup>lt;sup>73</sup> Anmerkung: Der gewinnmaximierende Preis eines Monopolisten liegt beim sog. Cournot'schen Punkt. Hier sind Grenzkosten und Grenzerlöse ident. Um seine Marktposition langfristig abzusichern, kann der Monopolist sein Angebot am Markt soweit erhöhen bis der Preis am Markt gleich den Durchschnittskosten ist.

<sup>&</sup>lt;sup>74</sup> EIA. *Crude Oil Production*, online, Stand: 23. Mai 2008

Preis pro Fass = 
$$KF_{K1} + KF_{K2} * \left(\frac{mittlere\ Produktionsrate}{Produktionsrate\ normal} - KF_{K3}\right)^{2}$$
 (9.4)

KF<sub>K1, K2, K3</sub> ...... Kostenfunktion K<sub>1, 2, 3</sub> (Konstante)

Zusammenfassend kann man sagen, dass in diesem Schritt der Preis pro Fass aus dem Produktionsverhältnis (oder auch Nachfrageverhältnis (siehe Kapitel 9.2.1.4)) gebildet werden.

#### 9.2.1.3.1 WIRTSCHAFTSWACHSTUM UND ERDÖLNACHFRAGE

Der Kauf von Gütern und Dienstleistungen, führt zu einem Prozess bei dem diese auch verbraucht werden. Sie können sofort verbraucht werden, wie z.B. der Einkauf von Treibstoff an der Tankstelle, oder in der Zukunft verbraucht werden, wie der Einkauf von Lebensmitteln im Supermarkt. Das Maß des Bruttoinlandproduktes (BIP) gibt Auskunft, wie viel eine Nation in einem bestimmten Zeitraum produziert. Steigt der Verbrauch von Gütern und Dienstleistungen, so steigt auch die Nachfrage und in Folge auch die Produktion von diesen. Das BIP wird steigen. Historisch betrachtet gibt es einen engen Zusammenhang zwischen Erdölverbrauch und dem BIP. Eine Erhöhung oder Verringerung des BIP, neigte auch den Erdölverbrauch zu beeinflussen. Je mehr Güter und Dienstleistungen in Anspruch genommen wurden, desto mehr Erdöl wurde benötigt um diese zu produzieren. Erdöl wird benötigt um Produkte oder Menschen zu transportieren, um mehr Elektrizität zu erzeugen und um Produkte aus Erdöl wie Plastik, Chemikalien, Kosmetikartikel, Medikamente usw. herzustellen. Wurde jedoch weniger von diesen Gütern und Dienstleistungen in Anspruch genommen, führte das auch zu einem Rückgang des BIPs und der Erdölnachfrage.<sup>75</sup>

Der enge systemdynamische Zusammenhang zwischen BIP und Erdölproduktion wird auch in Arbeiten der Universität von Valladolid bestätigt.<sup>76</sup> Wie stark Wirtschaftswachstum und die Nachfrage nach Erdöl gekoppelt ist, sieht man deutlich an den Mengen von Erdöl, welche in den letzten zwei Jahrzehnten in China exponentiell zugenommen hat.

<sup>75</sup> Ronald R. COOKE, *Oil, Jihad and Destiny: Will Declining Oil Production Plunge Our Planet into a Depression?*, Saskatoon, 2004, Seite 49

<sup>76</sup> Vgl. Carlos DE CASTRO, Luis Javier MIGUEL, Margarita MEDIAVILLA - The role of non conventional oil in the attenuation of peakoil, Energy Policy (2009), Seite 1828, © 2009 Elsevier Ltd.

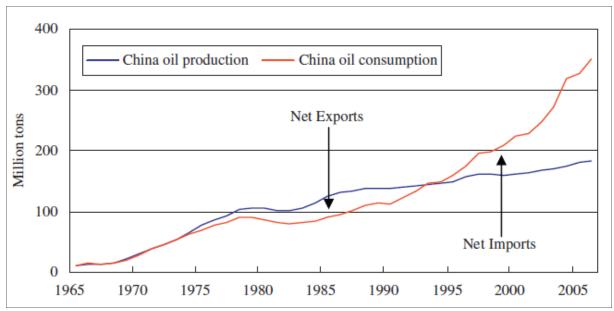


Abbildung 9-14, Netto Import- und Exportmengen von Erdöl in China, ASPO, Lianyong FENG, Junchen LI, Xiongqi PANG, *China's oil reserve forecast and analysis based on peak oil models*, Energy Policy 36 (2008) 4149–4153, Seite 4150

Das Bruttoweltprodukt (BWP) – also alle auf der Welt in einem Jahr produzierten Dienstleistungen, Waren, etc – stellt eine exogene Größe im Teilmodell Erdöl dar (vgl. Abbildung 9-2).

Der erwartete Produktionswert (*Produktionsrate normal*) wird aus dem wachsenden Bruttoweltprodukt errechnet. Um das Modell zu vereinfachen, wurden Erdölverbrauch und Erdölproduktion gleichgesetzt. Das bedeutet, dass der zu erwartende Produktionswert auch gleichzeitig der zu erwartende Nachfragewert ist.

$$erwartete\ Nach frage = Produktions rate\ normal$$
 (9.5)

Abbildung 9-15 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Bruttoweltproduktwachstum und dem Erdölnachfragewachstum der letzten drei Jahrzehnte.

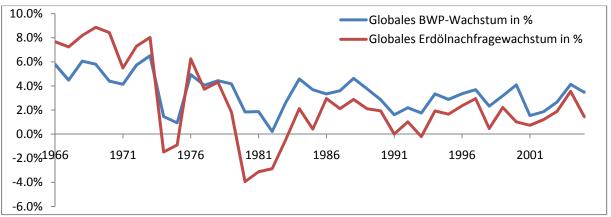


Abbildung 9-15, Globales BWP-Wachstum und Ölnachfragewachstum in %, eigene Darstellung Daten: BP, Statistical Review of World Energy 2008 und WORLD BANK, Development Data Group. *2007, World Development Indicators Online*. Washington DC

Internet:

 $http://www.bp.com/liveassets/bp\_internet/globalbp/globalbp\_uk\_english/reports\_and\_publications/statistical\_energy\_review\_2008/STAGING/local\_assets/downloads/pdf/statistical\_review\_of\_world\_energy\_full\_review\_2008.pdf, Stand: 20. August 2008$ 

http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/DATASTATISTICS/0,,contentMDK:20535285~menuPK:1192694~ppageP:64133150~piPK:64133175~theSitePK:239419,00.html, Stand: 20. August 2008

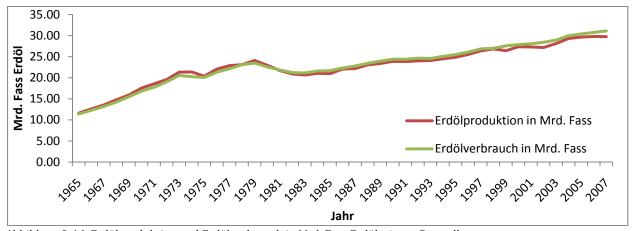


Abbildung 9-16, Erdölproduktion und Erdölverbrauch in Mrd. Fass Erdöl, eigene Darstellung Daten: BP, Statistical Review of World Energy 2008

Internet:

http://www.bp.com/liveassets/bp\_internet/globalbp/globalbp\_uk\_english/reports\_and\_publications/statistical\_ener gy\_review\_2008/STAGING/local\_assets/downloads/pdf/statistical\_review\_of\_world\_energy\_full\_review\_2008.pdf, Stand: 20. August 2008

Für die nächsten Jahrzehnte wird ein konstanter Prozentsatz für das Wachstum des BWP angenommen, der je nach Szenarium variiert (von 1% bis 2%). Die Annahme eines konstanten Wachstums des BWP über den Berechnungszeitraum ist jedoch seit dem Bericht von Dennis Meadows über die *Grenzen des Wachstums* kritisch zu hinterfragen. Eine steigende Weltbevölkerung stellt in Bezug auf die Erdölnachfrage einen wichtigen Parameter dar, welcher in der Entität BWP bereits integriert wurde. Ein BWP-Wachstum von 1 bis 2% ist in Hinblick auf die Prognosen der Weltbevölkerungszunahmen (siehe Abbildung 7-4) als vorsichtig zu bewerten.

Formel (9.6) setzt die erwartete Produktionsrate in Verhältnis zum Bruttoweltprodukt.

Produktionsrate normal	= Produktionsrate K1 * BWP <sup>Elastizitaet Produktionsrate zu BWP</sup>	(9.6)
BWP	. Bruttoweltprodukt	
Produktionsrate K1	. Konstante	
Elastizität Produktionsrate zu BWP	. Konstante	

#### 9.2.1.4 Nachfragefunktion

Wurde bislang die Angebotsseite diskutiert, soll in diesem Kapitel die Nachfrageseite nach Erdöl beleuchtet werden.

Modelliert wird die Nachfrage über eine lineare Nachfragefunktion (steigt der Preis pro Fass Erdöl, sinkt die Nachfrage nach einem Fass Erdöl). Der Einfachheit wegen wurde festgelegt, dass die Kosten pro Fass auch gleichzeitig der Preis pro Fass Erdöl am Markt sind.

Die unabhängige Variable ist der Ausdruck  $\frac{Preis\ pro\ Fass}{Preis\ pro\ Fass\ ANFANG^{77}}$ , welcher aus der Kostenfunktion (siehe Kapitel 9.2.1.3, Formel (9.4)) errechnet wurde. Die abhängige Variable ist das Nachfrageverhältnis, also die Variable  $\frac{tatsächliche\ Nachfrage}{erwartete\ Nachfrage}$ . Es wird also in diesem Schritt das Nachfrageverhältnis aus dem Preisverhältnis gebildet.

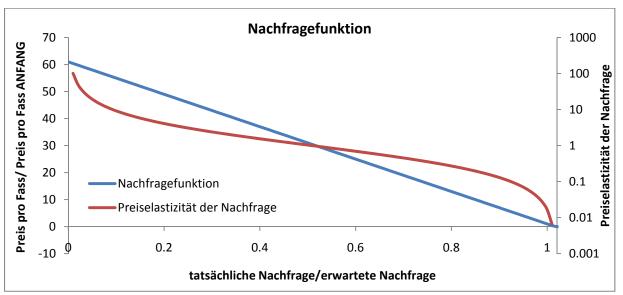


Abbildung 9-17, Nachfragefunktion und Preiselastizität der Nachfrage, eigene Darstellung

59

<sup>77</sup> Preis pro Fass ANFANG ist gleich dem realen Preis pro Fass Erdöl im Jahr 1900 (Konstante)

## **Geradengleichung:**

$$p = k * q + d \tag{9.7}$$

$$\frac{PpF}{PpF_{ANF}} = k * \frac{tatNF}{erwNF} + d \tag{9.8}$$

# Herleitung der Preiselastizität aus der Nachfragefunktion: siehe Appendix, Kapitel 20.1

Ausgangspunkt für die Nachfragefunktion ist der Punkt (1/1). Das bedeutet, dass bei einem Preisverhältnis von 1, auch das Nachfrageverhältnis 1 ist. Dies dient der Kalibrierung des Verhältnisses zwischen Preis und Nachfrage.

$$tats \ddot{a} chliche \ Nach frage = erwartete \ Nach frage$$
 (9.9)

$$\frac{PpF}{PpF_{ANF}} \left( \frac{tatNF}{erwNF} = 1 \right) = 1 \tag{9.10}$$

$$1 = k + d \tag{9.11}$$

$$\frac{tatNF}{erwNF} = \frac{\frac{PpF}{PpF_{ANF}} - 1 + k}{k} = \frac{PpF - PpF_{ANF} + PpF_{ANF} * k}{PpF_{ANF} * k}$$

$$(9.12)$$

$$Nachfrage\ Erd\ddot{o}l = tatNF = \frac{PpF - PpF_{ANF} + PpF_{ANF} * k}{PpF_{ANF} * k} * erwNF$$

$$(9.13)$$

Steigt der Preis pro Fass Erdöl, sinkt das Nachfrageverhältnis auf einen Faktor zwischen 0 und 1. Dieser Faktor wird mit der *Produktionsrate normal* von oben multipliziert und man erhält die Nachfrage an Fässern Erdöl.

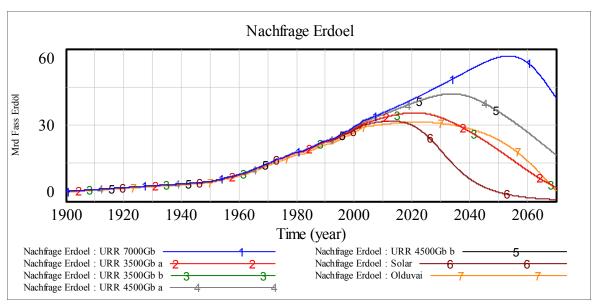


Abbildung 9-18, Variable Nachfrage Erdöl, eigene Darstellung

#### 9.2.1.5 DIE PREISELASTIZITÄT DER NACHFRAGE

Nachdem im vorigen Kapitel die Nachfragefunktion im Allgemeinen besprochen wurde, wird nun näher auf den Anstieg dieser Nachfragefunktion eingegangen. Der Anstieg einer Geraden bestimmt das Ausmaß der Nachfrageänderung auf Preisänderungen. Je steiler eine Nachfragefunktion ist, desto geringer ist die Reaktion der Nachfrage auf Änderungen des Preises. Eine flache Nachfragefunktion bedeutet eine starke Sensibilität der Nachfrage auf Preisänderungen. Da der Anstieg der Geraden jedoch von den Einheiten abhängt, wird die sogenannte Elastizität eingeführt, mit welcher Relationen und somit einheitenunabhängige Änderungen verglichen werden können. <sup>78</sup>

## Bogenelastizität:



Eine Preiselastizität von -0,3 bedeutet also; durch eine 10 prozentige Erhöhung des Preises eines Gutes, sinkt die Nachfrage um 3 Prozent.

<sup>78</sup> Paul A. SAMUELSON, William D. NORDHAUS, *Volkswirtschaftslehre*, Frankfurt/Wien,1998, Seite 88ff

Werden die Preisänderungen, und die daraus resultierenden Nachfrageänderungen infinitesimal klein, spricht man von der Punktelastizität.

#### Punktelastizität:

$$\eta = \frac{\frac{dq}{q}}{\frac{dp}{p}} \tag{9.15}$$

Da der Anstieg der Nachfragefunktion negativ ist, wird auch die Punktelastizität einen negativen Wert ergeben. Ist die Preiselastizität betragsmäßig kleiner als 1, so spricht man von einer unelastischen Nachfrage. Das bedeutet, dass die Reaktion der Nachfrage sehr schwach auf Preisänderungen reagiert. Dies zeigt sich besonders bei lebensnotwendigen Gütern, wie Nahrungsmittel, aber auch Benzin oder Diesel, welche schlecht substituiert werden können. Ist die Preiselastizität gleich 1, so spricht man von einer Einheitselastizität, d.h. Nachfrage und Preis ändern sich im gleichen Verhältnis. Bei einer Preiselastizität betragsmäßig größer als 1 spricht man von einer elastischen Nachfrage. Das bedeutet, dass eine Preisänderung einen starken Einfluss auf die Nachfrage nach sich zieht. Bei Gütern, mit einer großen Auswahl an Substituten, oder bei Luxusgütern, wie Autos, Kaviar usw. zeigt sich ein elastisches Verhalten.<sup>78,79</sup>

Für Österreich errechnete die OPEC eine durchschnittliche Preiselastizität der Erdölnachfrage in den Jahren 1970 bis 2000 von -0,059 bis -0,092 (kurz- und langfristige Elastizität). 80 Eine kurzfristige Elastizität bedeutet eine Reaktion der Nachfrage auf Preisänderungen in einem kurzen Zeitraum (1 bis 2 Jahre). Wird der Umstellungszeitraum jedoch länger gewählt, so kann sich der Verbraucher auf Preisänderungen besser einstellen (z.B. Umstieg auf alternative Produkte) und die Preiselastizität wird elastischer (langfristige Preiselastizität).

Eine Preiselastizität von -0,059 bis -0,092 legt den Schluss nahe, dass in den letzten drei Jahrzehnten Erdöl aufgrund von mangelnden Alternativen ein hochgradig unelastisches Gut war und in gewisser Weise ein lebensnotwendiges Gut darstellt(e). Die steigenden Treibstoffpreise

<sup>&</sup>lt;sup>79</sup> Rainer OLBRICH, *Marketing – Eine Einführung in die marktorientierte Unternehmensführung,* Berlin/Heidelberg, 2006, Seite 149ff

<sup>80</sup> John C.B. COOPER, Price elasticity of demand for crude oil: estimates for 23 countries, OPEC, 2003, Seite 4

werden jedoch einen Impuls in Richtung Forschung und Entwicklung von alternativen Energieträgern in Zukunft geben müssen, um die unelastische Charakteristik von Erdöl zu beenden.

## 9.2.1.6 DIE PRODUKTIONSRATE, RESSOURCEN, RESERVEN UND PRODUZIERTES ERDÖL

Die Produktionsrate wird einfach der Nachfrage von Erdöl gleichgesetzt (vgl. Abbildung 9-16).

$$Produktionsrate = Nachfrage\ von\ Erd\"{o}l$$
 (9.16)

$$Ressourcen = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} -Entdeckungsrate_i$$
 (9.17)

$$Reserven = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Entdeckungsrate_i - Produktionsrate_i \qquad (9.18)$$
 
$$Produziertes \ Erd\"{o}l = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Produktionsrate_i \qquad (9.19)$$

$$Produziertes \ Erd\"{o}l = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Produktionsrate_i \tag{9.19}$$

# 9.2.2 LOOP 2 (DER TECHNOLOGIELOOP)

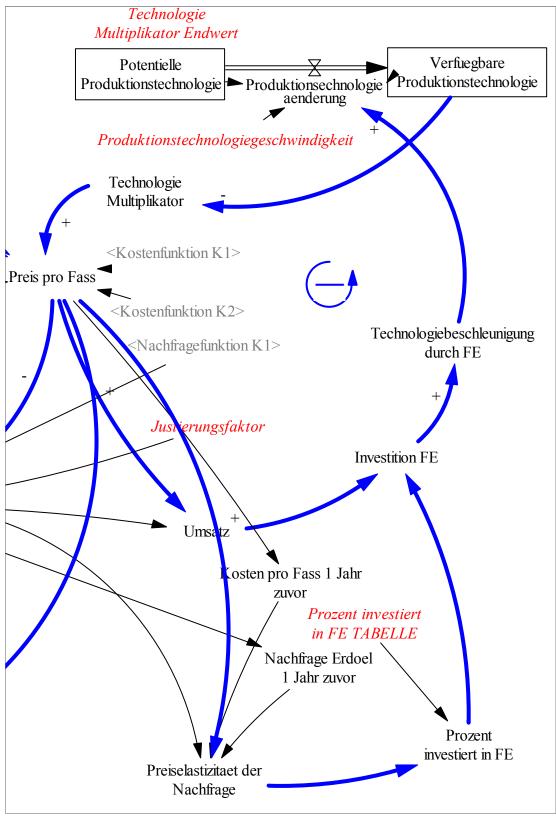


Abbildung 9-19, Loop 2 (Der Technologieloop), eigene Darstellung siehe auch GONCALVES P. (2007) http://www.metasd.com/models/Library/Environment/NaturalResources/, Stand: 12. Juni 2008

# 9.2.2.1 DIE PREISELASTIZITÄT ALS MAß FÜR F&E INVESTITIONEN

Loop 2 beschäftigt sich mit dem technologischen Fortschritt bei der Produktion von Erdöl. Die Technologie wird in Folge von Investitionen immer effizienter und führt zu einem Sinken der Produktionskosten. Technologischer Fortschritt ist schwer quantifizierbar. Als Maß für die Investitionsbereitschaft soll die Preiselastizität der Nachfrage dienen. Die Preiselastizität setzt die prozentuelle Änderung der Nachfrage in Verhältnis zur prozentuellen Änderung des Preises.

Ist eine Industrie der Auffassung, dass durch eine Senkung der Herstellungskosten eines Produktes (bei konstanter Gewinnmarge) ein überproportionaler Anstieg in der abgesetzten Menge erzielt werden kann, wird in Forschung und Entwicklung investiert werden.

Ein einfaches Beispiel soll zeigen, wie man hier das Maß der Preiselastizität der Nachfrage anwenden kann:

# 9.2.2.2 BEISPIEL:

a) Ein Unternehmen verkauft 400 Fass Rohöl um 30\$ das Fass. Die Preiselastizität der Nachfrage beträgt -0,5. Wie wirkt sich eine Reduzierung des Preises pro Fass Rohöl um 3\$ auf die Umsatzsituation des Unternehmens aus?

$$q1 = 400E$$

$$p1 = 30$$$

$$\Delta p = -3$$$

$$p2 = 27$$$

$$U1 = q1 * p1 = 12.000$$$

$$\eta = \frac{\Delta q}{\frac{\Delta p}{p}}$$

$$\Delta q = \frac{\eta * \Delta p * q}{p} = 20E$$

$$q2 = q1 + \Delta q = 420E$$

$$U2 = q2 * p2 = 11.340$$$

Eine Preisreduzierung bei einer Elastizität zwischen 0 und 1 wirkt sich negativ auf das Unternehmen aus und es wird daher wenig in Forschung und Entwicklung investieren um den Preis zu senken.

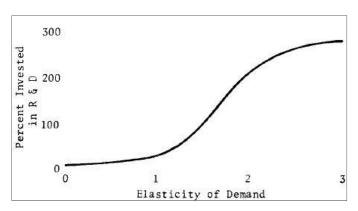
b) Gleiches Beispiel wie oben, jedoch Preiselastizität bei -2

$$\Delta q = \frac{\eta * \Delta p * q}{p} = 80E$$

$$q2 = q1 + \Delta q = 480E$$

$$U2 = q2 * p2 = 12.960$$

Bei einer Preiselastizität betragsmäßig über 1 (elastischer Bereich) wirkt sich eine Senkung der Herstellungskosten (bei konstanter Gewinnmarge) positiv auf das Unternehmen aus und es wird daher bereit sein einen großen Anteil in Forschung und Entwicklung zu investieren. Die Investitionsbereitschaft ist daher bei elastischen Preisen um einiges größer und kann in neuen



Märkten über 100% betragen, wo die Umsätze anfänglich noch gering sind. 81

Abbildung 9-20, Preiselastizität der Nachfrage und Prozent investiert in Forschung u. Entwicklung

Quelle: BEHRENS W. W., *The dynamics of natural resource utilization*, System Dynamics Group, Massachusetts Institute of Technology ,Cambridge, 1972, Seite 95, © 1972 *Simulation Councils Inc.* 

Diese Funktion wurde unter dem Namen *Prozent investiert in FE Tabelle* in VENSIM als *Tabelle* definiert.

Investition 
$$FE = Umsatz * Prozent$$
 investiert in  $FE$  (9.20)
$$Umsatz = Preis pro Fass * Nachfrage Erdoel$$
 (9.21)

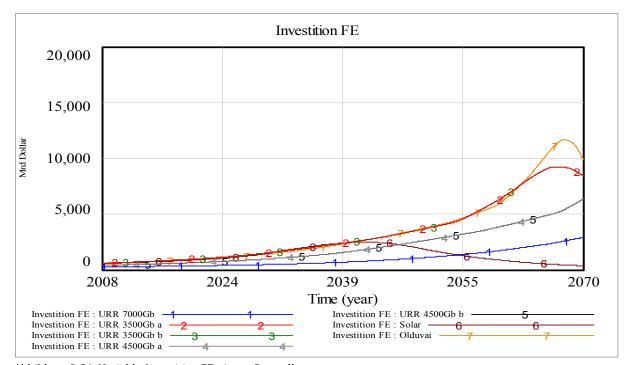


Abbildung 9-21, Variable Investition FE, eigene Darstellung

<sup>&</sup>lt;sup>81</sup> Nancy L. SCHWARTZ, Morton I. KAMIEN, Market Structure, Elasticity of Demand and Incentive to Invent, Journal of Law and Economics, 1970, Seite 245

Man erkennt deutlich, dass das Szenarium Solar einen sehr frühen bzw. niedrigen Investitionspeak hat. Dies ist einerseits begründet durch den geringen Umsatz im Szenarium Solar und durch das frühzeitige Erreichen der maximalen Investitionsbereitschaft. Im Szenarium URR 7000Gb ist unter allen Szenarien das Investitionsvolumen am Anfang am niedrigsten. Durch das große vorhandene Gesamtpotential an Erdölvorkommen ist der Preis pro Fass Erdöl sehr Folge auch niedrig, was in zu einem geringen (Preis pro Fass \* produzierte Fässer) im Untersuchungszeitraum führt. Im Gegensatz zu allen anderen Szenarien kann jedoch bei URR 7000Gb jenseits des Jahres 2070 mit hohen Umsätzen gerechnet werden.

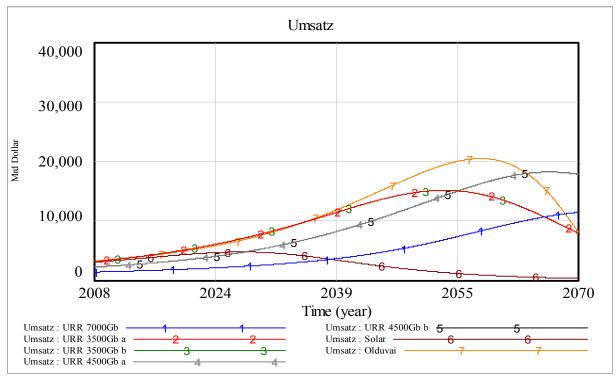


Abbildung 9-22, Variable Umsatz, eigene Darstellung

# 9.2.2.3 DIE GRENZEN TECHNOLOGISCHEN FORTSCHRITTS – DER IRRGLAUBE EXPONENTIELLEM WACHSTUMS

## 9.2.2.3.1 DAS MOORE'SCHE GESETZ

Das Moore'sche Gesetz, welches nach dem Mitgründer von Intel Gordon Moore benannt ist, beruft sich auf einen exponentiellen Anstieg in der Leistungsfähigkeit von Computer. Es besagt, dass alle zwei Jahre, die Mikroprozessorgeschwindigkeit sich verdoppelt. Vier Jahrzehnte lang, konnte die Mikroprozessorentwicklung schon diesem Gesetz folgen und wird es auch in naher

Zukunft tun. Rechenleistung hängt heute von der Anzahl der Transistoren auf einem integrierten Schaltkreis ab, also von der Transistorenanzahl pro Flächeneinheit.

Als Moore 1965 sein Gesetz in der Zeitschrift Electronics beschrieb, enthielten die besten Schaltkreise etwa 64 Transistoren. Heute enthält ein Titaniumchip von Intel 1,7 Milliarden Schaltelemente. Würde die Entwicklung der Mikroprozessoren weiterhin diesem Gesetz folgen, so müssten um das Jahr 2020 die Transistoren nur mehr aus wenigen Molekülen bestehen, oder sogar von einem einzigen. Die Grenzen der Siliziumchiptechnologie könnten in einem Jahrzehnt erreicht worden sein, nämlich dann, wenn sie an die Grenzen der Natur stößt.

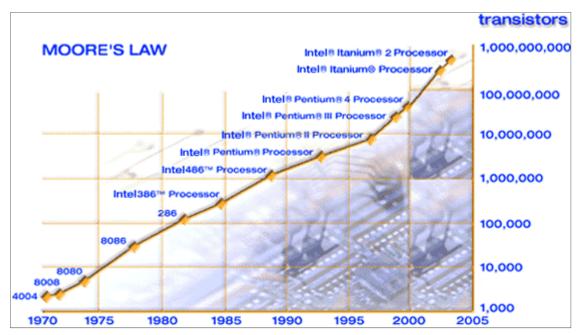


Abbildung 9-23, Anzahl der Transistoren eines Mikroprozessors

Quelle: INTEL, Moore's law

Internet: http://www.intel.com/cd/corporate/techtrends/emea/eng/209727.htm, Stand: 3. August 2008

Gordon Moore selbst spricht in einem Artikel einer Zeitung vom Ende seines eigenen Gesetzes:

"In terms of size [of transistor] you can see that we're approaching the size of atoms which is a fundamental barrier, but it'll be two or three generations before we get that far - but that's as far out as we've ever been able to see. We have another 10 to 20 years before we reach a fundamental limit."82

Doch es gibt auch viele andere Beispiele von technischen Entwicklungen, welche eine Zeitlang von exponentiellem Wachstum geprägt waren, die im Laufe der Zeit jedoch an eine Grenze stießen.

<sup>82</sup> Manek DUBASH, Moore's Law is dead, says Gordon Moore, in Techworld, London, 13 April 2005

Als am 14. Oktober 1947 der amerikanische Testpilot Charles Elwood "Chuck" Yeager die Schallmauer mit einem Flugzeug durchbrach, glaubten viele an den Siegeszug der supersonischen Flugzeuge. <sup>84</sup> 60 Jahre später wurde das letzte der beiden einzigen, je realisierten supersonischen Passagierflugzeuge (Concorde bzw. TU-144) aus Kostengründen eingestellt.

Die Schallmauer verursacht durch die Kompressibilität der Luft Stoßwellen, welche den aerodynamischen Widerstand erheblich ansteigen lässt. Obwohl der Widerstand nach dem Durchstoßen der Schallmauer wieder leicht abnimmt, sind die Treibstoffkosten für herkömmliche Triebwerke einfach zu hoch um einen gewinnbringenden Passagiertransport zu verwirklichen. Nur das Prestige und das Zeichen von technischer Macht, welches mit diesen Flugzeugen verbunden war, hielten die Flugzeugprojekte am Leben.

Die Schallmauer erwies sich als natürliche Grenze für konventionelle Strahltriebwerke. Mit konventioneller Technik scheint ein wirtschaftlicher Passagiertransport im Flugzeug jenseits der Schallmauer nicht möglich. Auch Boeing stellte im Dezember des Jahres 2002 das Sonic Cruiser Projekt aus mangelndem Interesse ein. 85

### 9.2.2.3.3 DIE TECHNOLOGISCHE GRENZE FÜR AUTOS

Ein Auto, müsste nach exponentiellem Gesetz heute eine Spitzengeschwindigkeit von Mach 700 aufweisen, bzw. in 24 Jahren die Lichtgeschwindigkeit durchbrechen. <sup>86</sup> In Kapitel 10.2.3 sehen wir jedoch, dass der Verkehrsaufwand pro PKW eine Konstante ist, was wiederum bedeutet, dass bei konstantem Reisebudget und konstantem Besetzungsgrad auch die Geschwindigkeit eine Konstante sein muss. Die Infrastruktur, welche einem logistischem und keinem exponentiellem Wachstum folgt (siehe Abbildung 7-8) und Naturgesetze, welche ein ewiges Ansteigen der Geschwindigkeit für den konventionellen Passagiertransport unmöglich machen, bilden eine Grenze des Wachstums:

<sup>83</sup> Hinweis: Supersonisch; über der Schallgeschwindigkeit

<sup>&</sup>lt;sup>84</sup> Robert JACKSON, Martin W. BOWMAN, Ewan PARTRIDGE, Flugzeuge – Die internationale Enzyklopädie, Stuttgart, 2006, Seite 67

<sup>85 &</sup>lt;u>Hinweis:</u> Der Sonic Cruiser war für Geschwindigkeiten nahe der Schallmauer ausgelegt (ca. Mach 0,97)

<sup>&</sup>lt;sup>86</sup>Robert B. SEIDENSTICKER, Future Hype: the myths of technological change, San Francisco, 2006, Seite 1

"Wir schließen daraus, dass in der Relativitätstheorie die Geschwindigkeit c die Rolle einer Grenzgeschwindigkeit spielt, die durch keinen wirklichen Körper erreicht oder gar überschritten werden könnte."87

## 9.2.2.3.4 DIE WELTBEVÖLKERUNG

Als in den Sechziger- und Siebzigerjahren Experten vor einem exponentiellen Ansteigen der Bevölkerung und vor katastrophalen Auswirkungen warnten, zeigen heutige Studien, dass sich die Weltbevölkerung abflacht (vgl. Abbildung 7-4) und sogar abnehmen könnte. Schon heute ist in vielen Ländern Europas das Bevölkerungswachstum negativ.

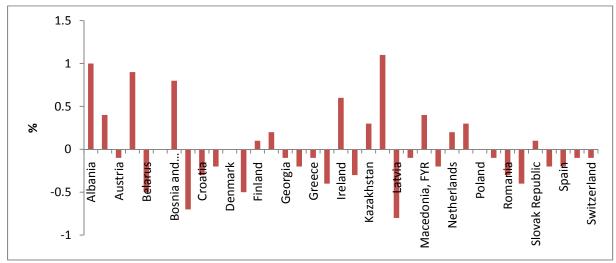


Abbildung 9-24, jährliches Bevölkerungswachstum in Europa in % (Zeitraum 1998-2015), eigene Darstellung Daten: WORLD BANK, Development Education Team

Internet: http://www.worldbank.org/depweb/english/modules/social/pgr/datanot.html, Stand: 28. August 2008

Die Grenze des Wachstums stellt unser Planet selbst da, mit seinen begrenzten Ressourcen und seiner limitierten Kapazität.

# 9.2.2.4 REALISIERUNG IM MODELL

Der technologische Fortschritt wurde als logistische Funktion definiert, mit einem Sättigungswert, ab welchem die Technologie für die Erdölförderung und Erdölproduktion nicht mehr verbessert und der Technologiemultiplikator nicht mehr weiter gesenkt werden kann (vgl. Abbildung 9-26).

<sup>87</sup>Albert EINSTEIN, Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Braunschweig, 1917, Seite 24

Die Variable *Technologie Multiplikator Endwert* definiert den Endwert der prozentuellen Ersparnis der Produktionskosten. Ein Wert von 0,25 bedeutet, dass die Produktionskosten um 75% niedriger sind als im Jahr 1900 bei gleichbleibendem *Produktionskosten Multiplikator.* Dieser Wert bedeutet die maximale Ersparnis durch technologischen Fortschritt. Die *Produktionstechnologieänderung* mit welcher dieser Wert erreicht wird, hängt von der Investitionsbereitschaft – in diesem Fall von der Variable *Technologiebeschleunigung durch FE*, welche einfach eine zeitliche Verzögerung der Variable *Investitionsbereitschaft FE* darstellt, ab. Die zeitliche Verzögerung stellt einfach die Dauer dar, bis sich ein technologischer Fortschritt nach geleisteter Investition, einstellt.

$$PT$$
änderung =  $Verf$ ügbare  $PT * Potentielle PT * PTgeschwindigkeit * TB durch FE$  (9.22)

PTänderung	. Produktionstechnologieänderung
Verfügbare PT	. Verfügbare Produktionstechnologie
Potentielle PT	. Potentielle Produktionstechnologie
PTgeschwindigkeit	. Produktionstechnologiegeschwindigkeit
TB durch FE	. Technologiebeschleunigung durch FE

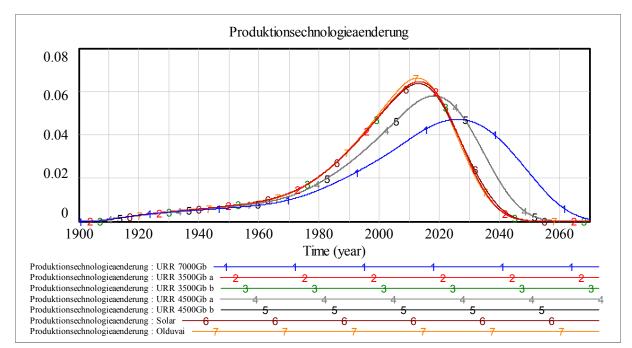


Abbildung 9-25, Variable Produktionstechnologieänderung, eigene Darstellung

$$Verf\ddot{\mathbf{u}}gbare\ Produktionstechnologie = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Produktionstechnologie\ddot{\mathbf{a}}nderung_i \tag{9.23}$$

Die Variable *Technologie Multiplikator* ist einfach der Kehrwert der "Verfügbaren Produktionstechnologie".

$$Technologie multiplikator = \frac{1}{Verf \ddot{u}gbare\ Produktion stechnologie}$$
(9.24)

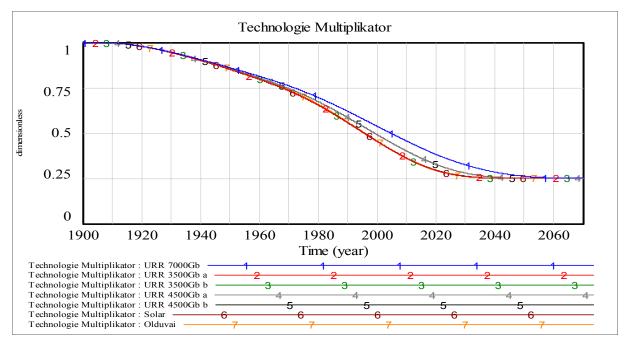


Abbildung 9-26, Variable Technologie Multiplikator, eigene Darstellung

Die Variablen *Produktionskosten Multiplikator* und *Technologie Multiplikator* verschieben die Kostenfunktion in vertikaler Richtung – der Produktions*kosten Multiplikator* nach oben und der *Technologie Multiplikator* nach unten (vgl. Kapitel 9.2.1.3).

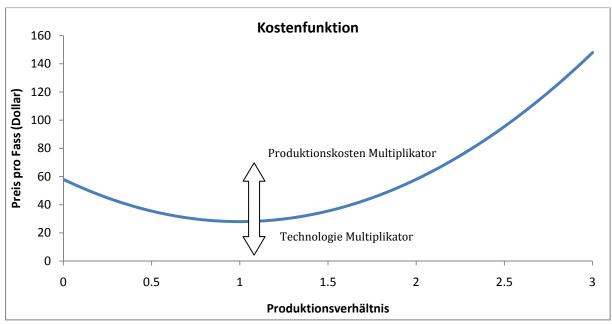


Abbildung 9-27, Kostenfunktion mit Multiplikatoren, eigene Darstellung

# 9.2.3 LOOP 3 (DER SUBSTITUTIONSLOOP)

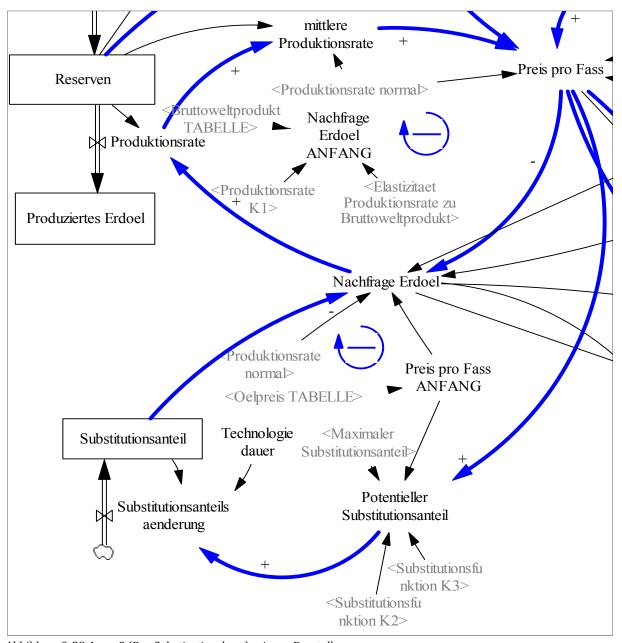


Abbildung 9-28, Loop 3 (Der Substitutionsloop), eigene Darstellung siehe auch GONCALVES P. (2007), http://www.metasd.com/models/Library/Environment/NaturalResources/, Stand: 12. Juni 2008

Durch den steigenden Erdölpreis werden Investitionen in alternative Energieträger attraktiver. Diese Energieträger könnten Erdgas, Kohle, Uran, aber auch regenerative Energieträger wie Sonne, Wind und Wasser sein.

Mit der Variable *Maximaler Substitutionsanteil* wird der Maximalanteil der Erdölnachfrage, der substituiert werden kann, definiert. Der Wert von 1 bedeutet, dass die Erdölnachfrage zu 100% durch einen anderen Energieträger ersetzt werden kann. Dieser Wert bleibt für alle Szenarien

gleich. Mit den Variablen *Substitutionsfunktion K2* und *K3* verändert man die Charakteristik der Substitutionskurve.

# 9.2.3.1 DIE SUBSTITUTIONSFUNKTION

#### 9.2.3.1.1 ALLGEMEINES

Die Substitutionsfunktion soll Auskunft darüber geben, wie viel Prozent des Erdölbedarfs durch eine alternative Energieform gedeckt werden kann. Auf die Art des Energieträgers wird nicht weiter eingegangen.

Analysen der Primärenergieträgeranteile und deren Substitutionsmechanismen zeigen eine große Genauigkeit der errechneten Funktionen. Der Anteil von Kohle hatte seinen Spitzenwert um das Jahr 1910 und nahm seit dem kontinuierlich ab. Vergleicht man die Jahre der einzelnen Anteilspitzen, so ist eine Substitution zwischen Kohle und den Energieträgern Erdöl und Erdgas erkennbar.

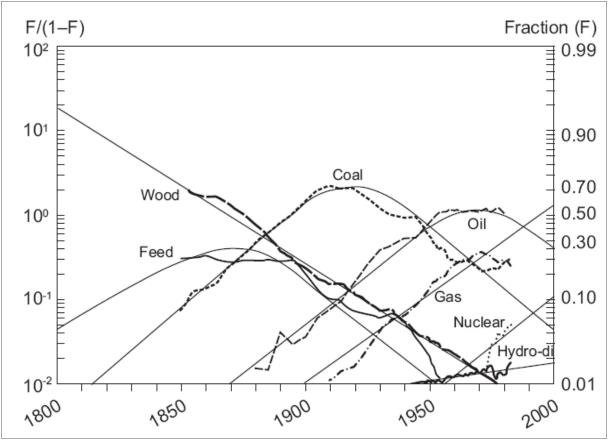


Abbildung 9-29, Anteil der einzelnen weltweiten Primärenergieträger Quelle: NAKICENOVIC N., GRÜBLER A., NORDHAUS W. D., *Technological change and the environment*, Resources for Future, Washington DC, 2002, Seite 167, © 2002 *Resources for the Future* 

Die Substitutionsfunktion gibt nun Auskunft wie viel Prozent der potentiellen Erdölnachfrage, welche sich aus der Nachfragefunktion ergibt, durch einen anderen Energieträger ersetzt werden kann. Steigen die Kosten für eine Ressource, steigt auch das Potential für Substitution, da es aus ökonomischer Sicht nun Sinn macht, einen Teil der Nachfrage durch eine andere Ressource zu ersetzen. 88 Der Begriff der "Backstop" Technologie stellt eine neue Technologie dar, welche ein nahes Substitut zu einer nicht erneuerbaren Ressource herstellen kann. Sobald der Preis der nicht erneuerbaren Ressource höher als die Durchschnittskosten des neuen Substitutes ist, wird die Nachfrage zur nicht erneuerbaren Ressource zurückgehen. So könnte Solarenergie eine "Backstop" Technologie zu Erdöl, Erdgas und Kohle sein. Das neue Substitut kann dadurch auch die Extraktion der nicht erneuerbaren Ressource beschleunigen. Das Angebot der nicht erneuerbaren Ressource ist dadurch größer und der Preis niedriger als der Preis des Substituts. 89

Die Substituierbarkeit eines Primärenergieträgers ist jedoch im Allgemeinen nicht nur vom Preis, sondern auch von vielen anderen Aspekten, wie physikalischen, technischen und auch sozialen Aspekten abhängig.

#### 9.2.3.1.2 REALISIERUNG IM MODELL

Der potentielle Anteil der Substitution wird über das Verhältnis von Preis pro Fass zu Preis pro Fass ANFANG definiert – also um den Faktor um welchen der Erdölpreis seit dem Jahr 1900 gestiegen ist.

Die Substitutionsfunktion ist als Gompertz-Funktion definiert.

$$y(t) = a * e^{b * e^{C * t}}$$
 (9.25)

-

<sup>&</sup>lt;sup>88</sup> William W. BEHRENS, *The dynamics of natural resource utilization*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1972, Seite 96

<sup>&</sup>lt;sup>89</sup> Amnon LEVY, *From Hotelling to Backstop Technology*, University of Wollongong, Wollongong, 2000, Seite 1



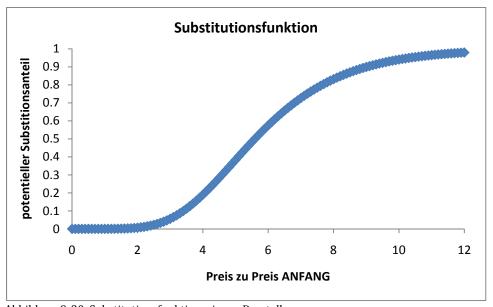


Abbildung 9-30, Substitutionsfunktion, eigene Darstellung x-Achse: Preis pro Fass/Preis pro Fass ANFANG, y-Achse: Potentieller Substitutionsanteil

Abbildung 9-31 zeigt, dass der potentielle Substitutionsanteil gegen 1 geht und der realisierte Substitutionsanteil zeitlich versetzt folgt.

Mit der Variable *Technologiedauer* wird die Zeit definiert bis der *Potentielle Substitutionsanteil* realisiert werden kann. Sie variiert je nach Szenarium von 10 bis 200 Jahren.

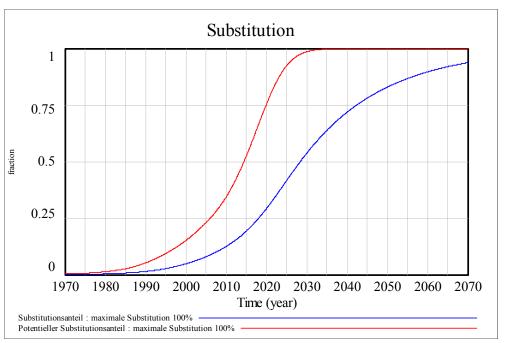


Abbildung 9-31, Variablen Substitutionsanteil, Potentieller Substitutionsanteil, eigene Darstellung

$$Substitutions anteils "anderung" = \frac{Potentieller\ Substitutions anteil - Substitutions anteil}{Technologie dauer} \tag{9.27}$$

$$Substitutions anteil = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Substitutions anteils "anderung"_i$$
 (9.28)

Je kürzer die Variable *Technologiedauer* gewählt wird, desto schneller schmiegt sich die blaue Kurve der roten Kurve an. Das bedeutet, dass das Substitut schneller zur Verfügung steht und Erdöl ersetzen kann.

Dieser Substitutionsanteil wird dann einfach in die Variable *Nachfrage Erdöl* mit dem Faktor (1-Substitutionsanteil) implementiert. Mit dem *Justierungsfaktor*, welcher einfach eine Konstante ist, wird das Modell kalibriert um den Verlauf der Kurven möglichst nahe bis zum heutigen Datum beschreiben zu können.

$$Nach frage \ Erd\"{o}l = \frac{PpF - PpF_{ANF} + PpF_{ANF} * k}{PpF_{ANF} * k} * erwNF * (1 - Substanteil) * JF$$
 (9.29)

Die Formel (9.13) wird nun einfach um die Erweiterung des Substitutionsanteils und den Justierungsfaktor ergänzt.

k	in Folge: Nachfragefunktion K1 (negative Konstante)
<i>PpF</i>	Preis pro Fass
PpF <sub>ANF</sub>	Preis pro Fass ANFANG
erwNF	erwartete Nachfrage
Substanteil	Substitutionsanteil
IF	Justierungsfaktor

# 10 System Dynamics - Teilmodell Systemgeschwindigkeit

# 10.1 CAUSAL-LOOP DIAGRAMM (CLD)

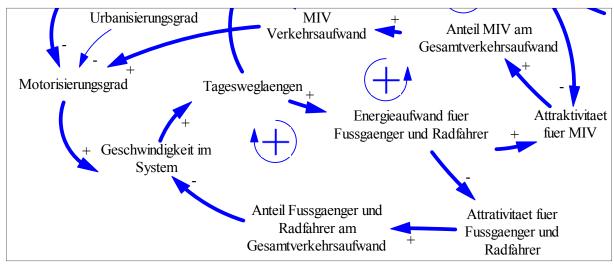


Abbildung 10-1, CLD Systemgeschwindigkeit, eigene Darstellung

Zwei selbstverstärkende Regelkreise, die die Geschwindigkeit im System erhöhen, kennzeichnen dieses Teilmodell. Ein weiterer Regelkreis, welcher aber negativ gekoppelt ist, wird später vorgestellt werden und verbindet die einzelnen Teilmodelle.<sup>90</sup>

# 10.1.1 Konstantes Reisezeitbudget

Voraussetzung für die Analysen der Geschwindigkeiten im System ist der Begriff des *konstanten Reisezeitbudgets*. Aus Untersuchungen von Szalai 1972, Zahavi 1974 und 1979<sup>91</sup> und Tanner 1981 hat sich der Begriff des konstanten "*Travel Time Budget*" manifestiert.

Untersuchungen von D.G. Victor und A. Schafer im Jahr 2000 haben ergeben, dass es ein konstantes Reisezeitbudget auf dieser Welt gibt, dessen Mittel bei 1,1 Stunden pro Einwohner und Tag liegt, unabhängig vom Einkommen, geographischer Lage oder Siedlungsdichte.

Während das Reisezeitbudget im Durchschnitt weltweit betrachtet ungefähr konstant ist, gibt es in kleineren Untersuchungsgruppen viele Schwankungen. In dicht bebauten Gebieten ist das Reisezeitbudget höher. In London ist es um 30% höher als im dünn besiedelten Schottland. Je größer eine Stadt ist, desto größer ist auch das Reisezeitbudget. In Städten variiert das

<sup>&</sup>lt;sup>90</sup> <u>Hinweis:</u> Um die Übersicht der Abbildung 10-1 nicht zu sehr zu strapazieren, wurde der Regelkreis für die Eisenbahn hier weggelassen und Fußgänger und Radfahrer zusammengefasst.

<sup>91</sup> Yacov ZAHAVI, The UMOT Project, Bethesda, 1979, Seite 61ff

Reisezeitbudget stärker als in länderweiten Untersuchungen. Es gibt nicht nur Unterschiede der Stadtgröße betreffend, sondern auch soziodemographische Unterschiede. Studenten und Beamte neigen ein höheres Reisezeitbudget zu haben, wogegen Pensionisten ein niedrigeres Reisezeitbudget aufweisen. 92

Für das Modell wurde das Reisezeitbudget als konstant angenommen, und gilt als wichtige Voraussetzung für die Berechnungen.

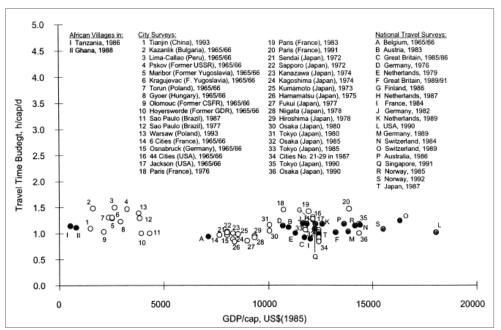


Abbildung 10-2, Reisezeitbudget

Quelle: VICTOR D. G., SCHAFER A., *The future mobility of the world population*, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 34, Issue 3, April 2000, Seiten 171-205, Seite 175, © 2000 *Elsevier Science Ltd.* 

# 10.1.2 Konstante Wegeanzahl pro Tag

Auch die Anzahl der Wege bleibt bei Betrachtung unterschiedlicher Studien in etwa konstant. So schwankt die Anzahl der Wege pro Tag von Bundesland zu Bundesland zwischen 2,8 und 3,4 in Österreich im Jahr 1995. 93 Die Studie *Mobilität in Deutschland 2002* zeigt die Entwicklung der Anzahl der Wege über die letzten 3 Jahrzehnte. 1976 betrug sie 3,4; im Jahr 1982 3,7; im Jahr 1989 3,2 und im Jahr 2002 3,3.

92 David G. VICTOR, Andreas SCHAFER, *The future mobility of the world population*, Transportation Research Part A: Policy and Practice 2000, Seite 174

<sup>93</sup> BMVIT, Verkehr in Zahlen 2007, online, Seite 91, Abbildung 55

Tabelle 10-1, Anzahl der Wege pro Tag in Deutschland, eigene Darstellung Daten: BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN, Mobilität in Deutschland Ergebnisbericht 2002. Seite 57

Jahr	1976	1982	1989	2002
Wegeanzahl	3,4	3,7	3,2	3,3

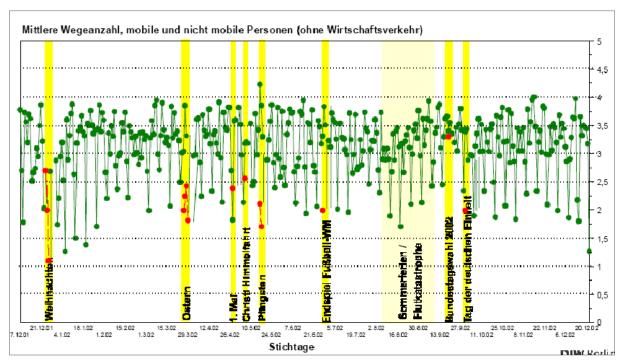


Abbildung 10-3, Mittlere Wegeanzahl in Deutschland, Studie über 1 Jahr Quelle: BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN, *Mobilität in Deutschland Ergebnisbericht*, 2002, Seite 54

Abbildung 10-3 zeigt den Wegeanzahlverlauf über ein ganzes Jahr. Deutlich erkennt man die niedrige Wegeanzahl an Wochenenden und Feiertagen. Im Jahr 2002 betrug sie in Deutschland an Samstagen 3,0 und am Sonntag 2,2<sup>94</sup>.

Die Anzahl der Wege wurde im Modell über die Jahre als konstant angenommen.

# 10.1.3 Steigende Weglänge Pro Tag

Die durchschnittliche Tagesweglänge je Person betrug an einem Werktag im Jahr 1995 in Österreich fast 29 Kilometer. In Niederösterreich ist die Tagesweglänge von 35 Kilometer im

-

<sup>&</sup>lt;sup>94</sup> BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN, *Mobilität in Deutschland – Ergebnisbericht*, 2002, Seite 56

Jahr 1995 auf 43 Kilometer im Jahr 2004 gestiegen. Auch in Mobilitätserhebungen in Vorarlberg ist ein Ansteigen der Tagesweglängen zu erkennen. 95

Die Annahme vom konstanten Reisezeitbudget, von der konstanten Wegeanzahl und von der steigenden Weglänge pro Tag führt zu dem logischen Schluss, dass die Geschwindigkeit im Mobilitätsraum in den letzten Jahrzehnten angewachsen sein muss.

$$Weg = Geschwindigkeit \cdot Zeit (bei Zeit = const.)$$
 (10.1)

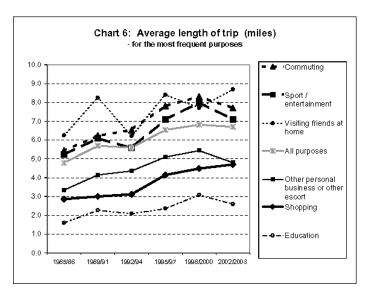


Abbildung 10-4, Durchschnittliche Weglänge in Meilen

Quelle: THE SCOTTISH GOVERNMENT, Travel by Scottish Residents, 19. April 2005

Internet:

http://www.scotland.gov.uk/Publications/2005/04/1894658/46593, Stand: 5. August 2008, © *Crown* 

Den Raum, welchen das Individuum täglich benützt um seine Daseinsgrundfunktionen ausüben zu können, ist aber ab der Mitte des letzten Jahrhunderts erheblich angewachsen.

Die Systemgeschwindigkeit hat sich durch die Massenproduktion des Automobiles und des Flugzeuges erhöht. Der Greißler von neben an, ist dem Einkaufszentrum auf der Wiese gewichen, der Urlaub am Land ist dem Pauschalurlaub in Thailand und die Wohnung in der Stadt ist dem Haus mit Garten am Rande der Stadt gewichen. Verbunden werden diese vergrößerten Strukturen durch ein dichtes Netz von Straßen. Jahrzehntelang war Mobilität durch niedrige Treibstoffpreise geprägt, und es haben sich offene, weite Siedlungsstrukturen in diesen Jahrzehnten gebildet. Diese Siedlungsstrukturen führten zu immer größeren Weglängen. Mit steigenden Treibstoffpreisen stellen aber diese Strukturen für einen immer größeren Teil der Bevölkerung ein Finanzierungsproblem dar - auch aufgrund von mangelnden Alternativen zu öffentlichen Verkehrsmitteln.

<sup>95</sup> BMVIT, Verkehr in Zahlen 2007, online, Seite 92

# 10.2 System Dynamics - Teilmodell Systemgeschwindigkeit

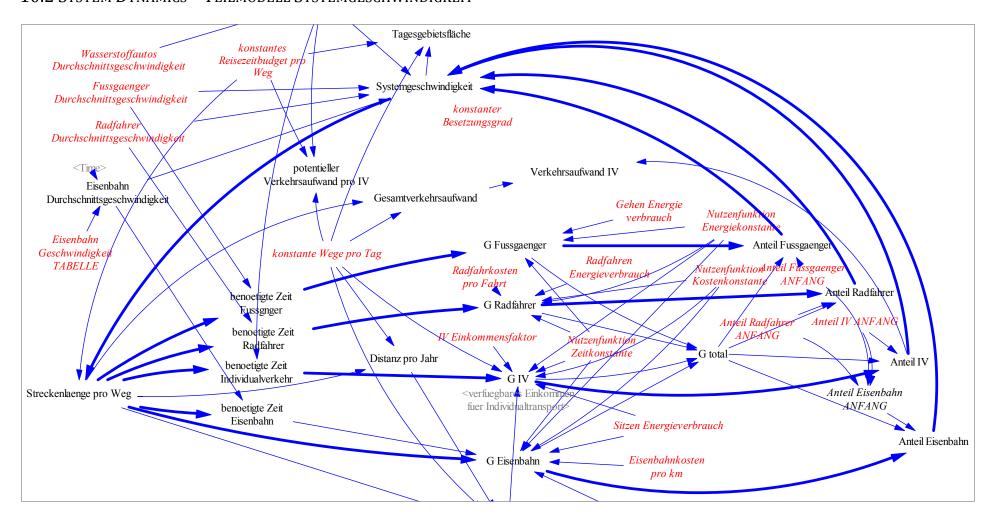


Abbildung 10-5, SD Teilmodell: Systemgeschwindigkeit, eigene Darstellung

## 10.2.1 Beschreibung des Teilmodells

Die durchschnittliche Wegdauer im werktäglichen Personen-Normalverkehr lag 1995 in Österreich bei durchschnittlich 23 Minuten pro Weg und 3 Wegen pro Tag. <sup>96</sup> Mit diesen Werten werden folgende Konstanten festgelegt:

Konstantes Reisezeitbudget pro 
$$Weg = \frac{23}{60} = 0,3833$$
 (in Stunden) (10.2)  
konstante Wege pro  $Tag = 3$  (10.3)

Unter dem *Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand* (siehe Kapitel 10.2.2) versteht man die relative Verteilung des Transportaufkommens auf die einzelnen Verkehrsmittel.

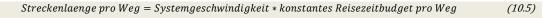
Im Modell werden als Bezugsgröße für den Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand (Abk. im Folgenden oft nur mit *Anteil*) ausschließlich die Personenkilometer herangezogen. Dieser Wert gibt den Anteil an Personenkilometern des jeweiligen Modes an den gesamten zurückgelegten Personenkilometern wieder. Ein Anteil für den motorisierten Individualverkehr (MIV) von 0,7 bedeutet, dass 70% der gesamten zurückgelegten Personenkilometer in einem Jahr vom MIV erbracht worden sind. Die Personenkilometer sind die zurückgelegten Wege pro Person multipliziert mit der Einwohnerzahl.

Die Systemgeschwindigkeit errechnet sich anteilsmäßig aus der jeweiligen Geschwindigkeit des Verkehrsmittels. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten für Fußgänger und Radfahrer werden über den gesamten Zeitraum als konstant angenommen. Die Geschwindigkeit für den Individualverkehr setzt sich aus den gewichteten Geschwindigkeiten von Fuhrwerken, konventionellen Fahrzeugen, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen zusammen. Die Geschwindigkeit der Eisenbahn wird als logistische Funktion der Zeit definiert.

	$S = Anteil\_F * V\_Fu\$ + Anteil\_R * V\_Rad + Anteil\_IV * V\_IV + Anteil\_Bahn * V\_Bahn$	(10.4)
C		
S	Systemgeschwindigkeit	
Anteil_F	Anteil Fußgänger	
Anteil_R	Anteil Radfahrer	
Anteil_IV	Anteil Individualverkehr	
Anteil_Bahn	Anteil Eisenbahn	
V_Fuß	Durchschnittsgeschwindigkeit Fußgänger (Konstante)	
V_Rad	Durchschnittsgeschwindigkeit Radfahrer (Konstante)	
<i>V_IV</i>	Durchschnittsgeschwindigkeit Individualverkehr (Berechnung: siehe Kapite	1
11.3.3)		
V_Bahn	Durchschnittsgeschwindigkeit Eisenbahn (Funktion der Zeit)	

<sup>96</sup> BMVIT, Verkehr in Zahlen 2007, online, Seite 91

Mit der Systemgeschwindigkeit errechnet sich nun die Streckenlänge pro Weg nach Formel (10.1) wie folgt:



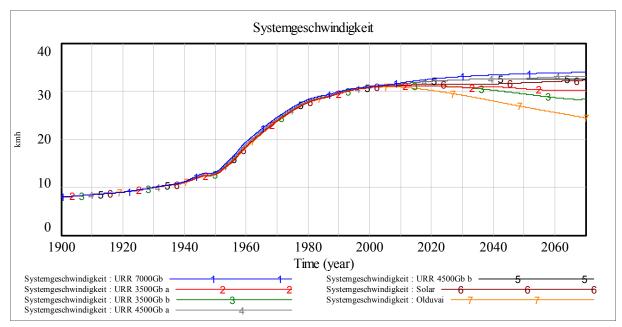


Abbildung 10-6, Variable Systemgeschwindigkeit, eigene Darstellung

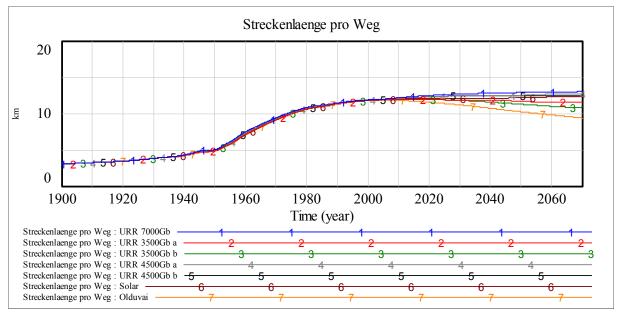


Abbildung 10-7, Variable Streckenlänge pro Weg, eigene Darstellung

### 10.2.2.1 Die Theorie der vernünftigen Entscheidungen – Rational Choice Modell

Als Grundlage zur Berechnung des Verkehrsmittelanteils am Gesamtverkehrsaufwand dient die Theorie der vernünftigen Entscheidungen, auch Rational Choice Theory genannt. Die klassische nationalökonomische Theorie basiert auf dem Konzept des homo oeconomicus. Der homo oeconomicus ist ein "ausschließlich nach wirtschaftlichen Zweckmäßigkeitserwägungen handelnder Mensch". 97 Er "verfügt über ein vollständiges, widerspruchfreies Zielsystem, handelt rational, wobei das Eigeninteresse im Sinne des Strebens nach größtmöglichen Nutzen (privater Haushalt) oder größtmöglicher Gewinn (privates Unternehmen) handlungsbestimmend ist, und kennt bei seinen Entscheidungen alle Alternativen und deren Konsequenzen". 97

Bei der Theorie der vernünftigen Entscheidungen, steht der Nutzen für ein Individuum im Vordergrund. Die Wahl des Verkehrsmittels liegt im Bestreben den Nutzen zu maximieren. Das geschieht indem das Individuum verschiedene Kriterien jeder Alternative überprüft und sich für die Alternative entscheidet, die den größten Nutzwert hat. Der Gesamtnutzen einer Alternative ergibt sich aus der Summe der Produkte der einzelnen Kriterien und der jeweiligen Gewichtung. "Der Rational Choice Ansatz geht davon aus, dass sich die Rationalität stets nur auf die Mittel, d.h. die Handlungsalternativen, bezieht, nicht aber auf die Ziele".98 "Die Wahl der Mittel ist dann rational, wenn das gewählte Mittel im Vergleich zu allen anderen am geeignetsten erscheint…".98

Das Konzept des homo oeconomicus, welcher strikt seine Entscheidungen einer reinen Kosten-Nutzen-Analyse unterwirft, ist sehr umstritten. Das tatsächliche menschliche Verhalten ist viel komplexer und lässt sich nicht durch eine reine Kosten-Nutzen-Analyse herunterbrechen.<sup>99</sup>

Bei der Wahl des Verkehrsmittels ist neben der monetären Bewertungsgrundlage, vor allem eine Bewertung des Energieaufwandes des Menschen absolut notwendig.<sup>100</sup>

Kriterien für diese Entscheidungen sind diesem Zusammenhang vorallem Zeit, Geld und Energieaufwand. Das Konzept der Nutzenmaximierung erlaubt es eine Wahrscheinlichkeitsaussage über die Wahl einer Alternative. Brüderl und Preisendörfer weisen

<sup>97</sup> MEYERS LEXIKONVERLAG, Homo oeconomicus, online

<sup>&</sup>lt;sup>98</sup> Sebastian BAMBERG, Harald GUMBL, Peter SCHMIDT, *Rational Choice und theoriegeleitete Evaluationsforschung - Am Beispiel der "Verhaltenswirksamkeit verkehrspolitischer Maßnahmen"*, Opladen, 2000, Seite 70

<sup>&</sup>lt;sup>99</sup> siehe auch Christian SCHEIER, Dirk HELD, *Wie Werbung wirkt: Erkenntnisse des Neuromarketings*, Haufe Verlag DE, 2006, Seite 53

<sup>&</sup>lt;sup>100</sup> siehe auch Hermann KNOFLACHER, *Grundlagen der Siedlungs- und Verkehrsplanung: Verkehrsplanung,* Böhlau Verlag, 2007, S.230ff

auf die drei Kriterien Zeit, Geld und Bequemlichkeitskosten hin. Praschl, Scholl-Kuhn und Risser bestätigen in den Assoziationen zu den öffentlichen Verkehrsmitteln auch die drei obengenannten Kriterien. 101,102

Während Rational Choice Modelle das Verhalten einer Gruppe gut vorhersagen können, können sie das Verhalten von Einzelpersonen deutlich schlechter abbilden. Menschen entscheiden oft nicht nach rationalen Aspekten bzw. können nicht alle Entscheidungskriterien im Modell berücksichtigt werden.

Zur Abschätzung des Anteils wird für jedes Verkehrsmittel eine Nutzenfunktion definiert und mit Faktoren gewichtet. Der Term mit *Einkommensfaktor* und *Einkommen* soll beim Individualverkehr die Nutzenfunktion heben, da ein Ansteigen des Einkommens auch zu einer Attraktivierung des motorisierten Individualverkehrs beiträgt. Die Konstante *Infrastrukturkonstante* soll die Nutzenfunktion bei der Eisenbahn heruntersetzen um einen Wettbewerbsnachteil im Bereich der Infrastruktur zu simulieren.

allg. Nutzenfunktion $G = \frac{1}{Kostenkonst * Kosten + Zeitkonst \cdot Zeit + Energiekonst * Energie}$	(10.6)
$Einkommen = \frac{verf "ugbares" Einkommen" f"u" IT}{365*konstante" Wege pro Tag}$	(10.7)
$verf\ddot{u}gbares~Einkommen~f\ddot{u}r~IT=Bruttoeinkommen~p~Pers~AUT*Anteil~v~Einkommen~f~IT$	(10.8)
$Nutzenfunktion \ G\ (IV) = IV\ Einkommensfaktor*Einkommen*allg. Nutzenfunktion \ G$	(10.9)
Nutzenfunktion G (Eisenbahn) = Infrastrukturkonstante * allg.Nutzenfunktion G	(10.10)

IV Einkommensfaktor	Konstante
Infrastrukturkonstante	Konstante
Kostenkonst	Kostenkonstante
Zeitkonst	Zeitkonstante
Energiekonst	Energiekonstante
Einkommen	. Variable
Kosten	.Variable
Zeit	. Variable
Energie	. Variable
verfügbares Einkommen für IT	verfügbares Einkommen für Individualtransport
Bruttoeinkommen p Pers AUT	reales Bruttoeinkommen pro Person in Österreich
Anteil v Einkommen f IT	Anteil vom Einkommen für Individualtransport
IV	Individualverkehr

<sup>&</sup>lt;sup>101</sup>Josef BRÜDERL, Peter PREISENDÖRFER, *Der Weg zum Arbeitsplatz: Eine empirische Untersuchung zur Verkehrsmittelwahl* in Andreas DIEKMANN, Axel FRANZEN, *Kooperatives Umwelthandeln - Modelle, Erfahrungen, Maßnahmen*, Zürich, 1995, Seite 72

<sup>&</sup>lt;sup>102</sup> Ch. SCHOLL-KUHN, M. PRASCHL, R. RISSER, *Gute Vorsätze und Realität: Die Diskrepanz zwischen Wissen und Handeln am Beispiel Verkehrsmittelwahl*, Wien, 1994, Seite 93

# 10.2.2.2 DER EINKOMMENSFAKTOR

Weltweit korreliert das Einkommen sehr stark mit dem Motorisierungsgrad. Der Motorisierungsgrad ist definiert als Automobile pro 1000 Einwohner. Dieser starke Zusammenhang zwischen Einkommen und Auto beschreibt das Streben zum bequemen motorisierten Individualtransport, wenn nicht andere Aspekte diesen behindern (wie z.B. Zeitaspekte durch vermehrte Staus oder Kostenaspekte durch steigende Treibstoffpreise). Das verfügbare Einkommen für den Individualtransport wird mit der Einkommenskonstante multipliziert und erhöht den Nutzen des Individualverkehrs.

Abbildung 10-8 zeigt den Motorisierungsgrad von Ländern in Abhängigkeit des Bruttoinlandproduktes pro Kopf.  $^{103}$ 

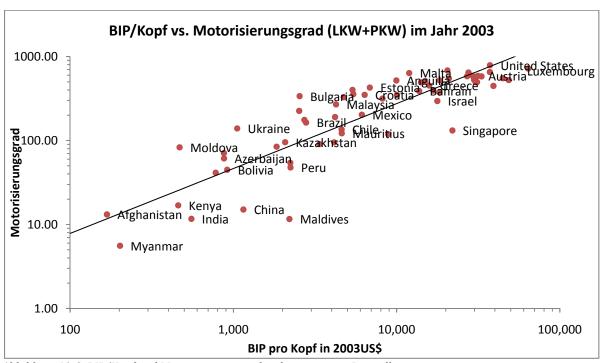


Abbildung 10-8, BIP/Kopf und Motorisierungsgrad weltweit, eigene Darstellung Daten: INTERNATIONAL ROAD FEDERATION *World Road Statistics* 2006 - Data 1999 to 2004, Genf, 2006, Seiten 8-13,

139-142

<sup>&</sup>lt;sup>103</sup> Bemerkung: Die Abbildung zeigt einen Motorisierungsgrad für Indien und China von 10 bis 20. Der starke wirtschaftliche Aufschwung und der Wunsch nach mobiler Freiheit führen zu einem erheblichen Ansteigen der Motorisierungsgrade dieser beiden Länder. Angesichts der Tatsache, dass jeder dritte Mensch auf diesem Planeten ein Inder oder Chinese ist, bedeutet dies ein überproportionales Ansteigen der Treibstoffnachfrage auf dem Weltmarkt seitens Indiens und Chinas.

# 10.2.2.3 DIE INFRASTRUKTURKONSTANTE

Ohne Straßen können keine Autos fahren und ohne Schienen auch keine Züge. Schaut man sich Abbildung 10-11 an, so könnte man auch meinen, mit nur wenigen Straßen kommen viele Autos aus. Mit nur fünf Meter Straße pro Einwohner werden Motorisierungsgrade von 600 erreicht wie z.B. in Malta. Ab fünf Meter Straße pro Einwohner wächst der Motorisierungsgrad kaum mehr an.

Grundlage für den Motorisierungsgrad (≙Daten) ist aber immer eine bestehende Straßeninfrastruktur (≙Struktur).

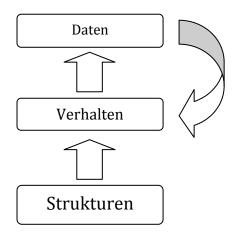


Abbildung 10-9, Beziehung von Strukturen, Verhalten und Daten, KNOFLACHER H., Grundlagen der Verkehrsund Siedlungsplanung: Verkehrsplanung, 2007, S. 47, Eigene Darstellung

"Daten sind ein durch eine bestimmte Methode gewonnenes Bild des Verhaltens." Man kann eine Gesellschaft durch deren Motorisierungsgrad zum Beispiel beschreiben.

"Das Verhalten ist immer das Ergebnis von Strukturen. Als Strukturen sind alle Elemente zu verstehen, die ein Verhalten bedingen oder beeinflussen." In den letzten Jahrzehnten ist es gelungen diese fundamentale Wechselbeziehung zwischen den Strukturen auf der einen Seite und dem Verhalten des Menschen auf der anderen Seite zu entdecken. 104

Das wiederum bedeutet, dass ein Siedlungsraum, welcher als Planungseinheit das Auto und nicht den Menschen hat, automatisch ein autolastiges Verhalten induziert. Stößt der Motorisierungsgrad in Form von Staus an seine strukturellen Grenzen und man beginnt durch Verbreiterung existierender Straßen oder durch den Neubau von Straßen das Verkehrsproblem zu lösen, wird man in absehbarer Zeit wieder vor dem gleichen Problem stehen.

Es besteht eine positive Rückkopplung zwischen dem Motorisierungsgrad und der Straßendichte.

<sup>104</sup> Hermann KNOFLACHER, Grundlagen der Siedlungs- und Verkehrsplanung: Verkehrsplanung, Böhlau Verlag, 2007, S.44ff

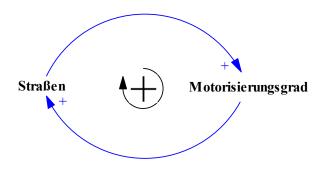


Abbildung 10-10, Positive Rückkopplung zwischen Straßen und Motorisierungsgrad, Eigene Darstellung

Ist eine Schienendichte von 20 Metern pro km² vorhanden, steigen die Personenkilometer pro Einwohner auf 500 und mehr.

Es existiert jedoch ein großer Wettbewerbsnachteil zwischen dem Verkehrsträger Straße und Schiene. Das Straßennetz ist so dicht, dass fast jedes Haus heutzutage an einer Straße liegt. Die nächste Schiene bzw. der nächste Bahnhof kann jedoch kilometerweit weg sein.

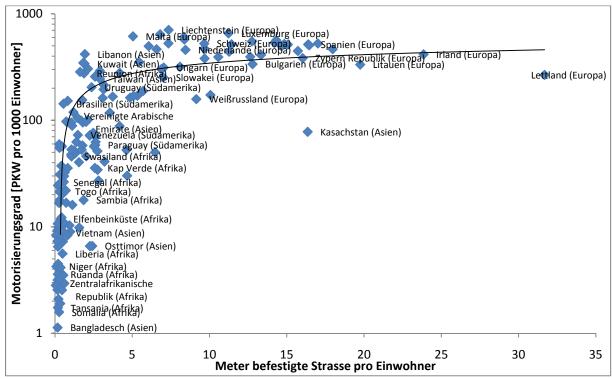


Abbildung 10-11, Straßenlänge pro Einwohner zu Motorisierungsgrad, eigene Darstellung Daten Welt-in-Zahlen.de,

Internet: http://www.welt-in-zahlen.de/laendervergleich.phtml, Stand: 12. August 2008

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Schienendichte:

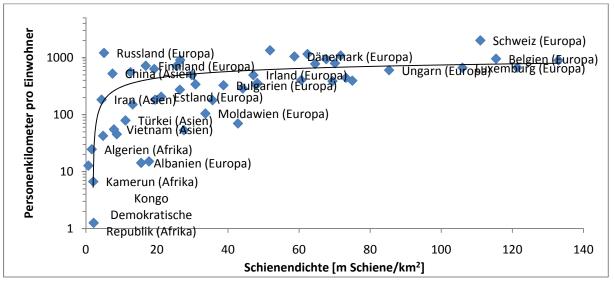


Abbildung 10-12, Schienendichte zu Personenkilometer pro Einwohner im Schienenverkehr, eigene Darstellung Daten: UIC, Welt-in-Zahlen.de

Internet: http://www.uic.asso.fr/download.php/stats/4trim2007\_op.xls, Stand: 12. August 2008 http://www.welt-in-zahlen.de/laendervergleich.phtml, Stand: 12. August 2008

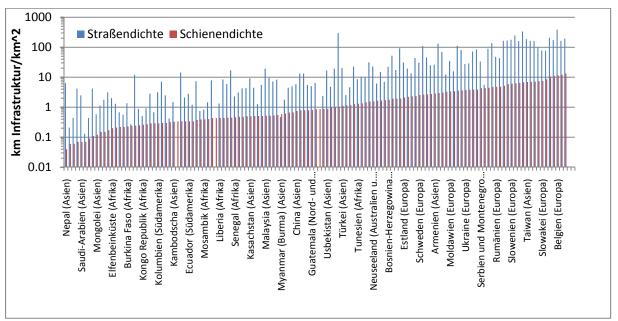


Abbildung 10-13, Straßendichte zu Schienendichte, eigene Darstellung

Daten: Welt-in-Zahlen.de

Internet: http://www.welt-in-zahlen.de/laendervergleich.phtml, Stand: 12. August 2008

In Abbildung 10-13 sind die Straßen- und Schienendichten diverser Länder in km Infrastruktur pro km² Fläche aufgetragen. Man sieht deutlich das viel kleinere Schienennetz in allen Ländern (logarithmische Ordinate!). Um diesen Wettbewerbsnachteil der Eisenbahn im Modell darzustellen, wird eine Eisenbahninfrastrukturkonstante eingeführt, mit der die Nutzenfunktion der Eisenbahn multipliziert wird.

# 10.2.2.4 DIE KOSTENKONSTANTE

Kosten sind bei der Wahl des Verkehrsmittels ein wichtigstes Entscheidungskriterium.

Mit der Kostenkonstante werden die Kosten der einzelnen Verkehrsmittel gewichtet. Fußgängern werden beim Zurücklegen der Streckenlänge keine Kosten zugeschrieben (die Variable *Kosten* wird beim Fußgänger auf 0 gesetzt). Für Radfahrer werden konstante Kosten pro Fahrt vorab definiert. Die Kosten der Eisenbahn werden als konstante Kosten pro Kilometer festgesetzt. Für die Kosten des Individualverkehrs wird in Kapitel 11.3.1 noch genauer darauf eingegangen.

# 10.2.2.5 DIE ENERGIEKONSTANTE

Der Mensch ist ein energiesensibles Wesen. Bei der Fortbewegung wählt er vorzugsweise den Weg des geringsten Widerstandes um den Energieverbrauch so gering wie möglich zu halten. Sitzt ein Mensch im Auto, dann kann er gegenüber dem Fußgeher seine Körperenergie pro Zeiteinheit auf  $^1/_4$  bis  $^1/_6$  reduzieren. Gleichzeitig ist er aber 10- bis 40-mal schneller als der Fußgeher.  $^{105}$ 

Daher ist es notwendig den Energieverbrauch pro gewähltes Verkehrsmittel miteinzubeziehen und mit einer Konstante zu gewichten. Der spezifische Energieverbrauch pro Zeit wird mit der benötigten Zeit für den Transport und mit der Energiekonstante multipliziert und verkleinert die Nutzenfunktion.

Tabelle 10-2, Durchschnittswerte des Energieverbrauchs unterschiedlicher Aktivitäten, eigene Darstellung Quelle: HELBING D., KÖLBL R., *Energy laws in human travel behaviour*, New Journal of Physics, 2003, Seite 48.4 Internet: http://www.iop.org/EJ/article/1367-2630/5/1/348/nj3148.pdf, Stand: 29. August 2008

Aktivität	Geschwindigkeit (km/h)	Energieverbrauch (kJ/min)
Im Sessel sitzend		1,5
Stehen		2,6
Gehen	4	14,1
Gehen	5	18
Radfahren	12	14,7
Autofahren		4,2

Die einzelnen Nutzenfunktionen werden durch die Gesamtsumme der Nutzenfunktionen dividiert und man erhält den Anteil jeder Nutzenfunktion an der Gesamtnutzenfunktionen, welche den Anteil nach zurückgelegten Personenkilometern darstellt.

105 Hermann KNOFLACHER, Stehzeuge - der Stau ist kein Verkehrsproblem, Wien, 2001, Seite 142

$$G \ total = G \ Fußgänger + G \ Radfahrer + G \ IV + G \ Eisenbahn$$
 (10.11) 
$$Anteil \ Fußgänger = \frac{G \ Fußgänger}{G \ total}$$
 (10.12)

G total	. Gesamtnutzenfunktion
G Fußgänger	. Nutzenfunktion Fußgänger
G Radfahrer	. Nutzenfunktion Radfahrer
G IV	. Nutzenfunktion Individualverkehr
G Eisenbahn	. Nutzenfunktion Eisenbahn
Anteil Fußgänger	Verkehrsmittelanteil für Fußgänger am Gesamtverkehrsaufwand

Die Berechnung des Anteils für die anderen Verkehrsteilnehmer folgt analog der Berechnung des Anteils für die Fußgänger (Formel (10.12)).

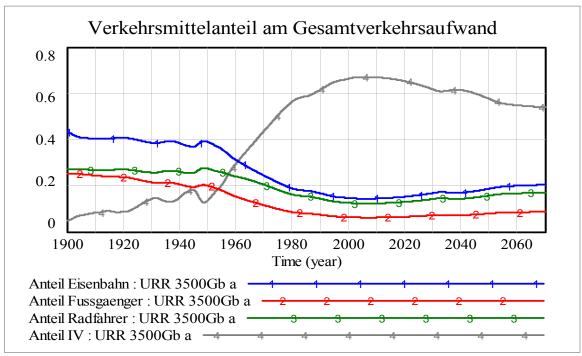


Abbildung 10-14, Anteile der einzelnen Verkehrsmittel im Szenarium URR 3500Gb a, eigene Darstellung

10.2.2.6 Ergebnisse aus der Kalibrierung des Modells für die Konstanten: Zeit, Kosten und Energie

Bei der Kalibrierung des Modells wurden die Konstanten für Zeit, Kosten und Energie wie folgt geschätzt (vgl. auch Konstantenmatrix: *Nutzenfunktion Energie-, Kosten, und Zeitkonstante,* Appendix, Kapitel 20.2):

• Zeit: 1

• Kosten: 2

Energie: 4

Das bedeutet, dass im Rational Choice Modell die Kriterien *Energie, Kosten* und *Zeit* im Verhältnis von 4 zu 2 zu 1 stehen. Der Energiefaktor hat demnach den mit Abstand größten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl, gefolgt von den Faktoren Kosten und Zeit. Dies deckt sich mit empirischen Daten, welche das Kriterium *Bequemlichkeit* als das ausschlaggebendste bei der Verkehrsmittelwahl bewerten. <sup>106</sup>

# 10.2.2.7 DER GESAMT (PERSONEN) VERKEHRSAUFWAND

Der Verkehrsaufwand ergibt sich aus der Multiplikation des Verkehrsaufkommens mit den jeweils zurückgelegten Entfernungen und wird im Personenverkehr in Personenkilometern (Abkürzung Pkm) ausgedrückt. Er gibt an wie viel Kilometer die Personen im Untersuchungsgebiet in einem bestimmten Zeitabschnitt zusammen zurücklegen.

Legen 10 Personen beispielsweise pro Tag jeweils 30km zurück, ergibt das einen Verkehrsaufwand von 300 Pkm pro Tag. Der Verkehrsaufwand dient zur quantitativen Beschreibung. Er kann nur ein allgemeines Verkehrsvolumen abbilden und sagt wenig über den tatsächlichen Verkehrsprozess aus. So könnten im obengenannten Beispiel, bei gleichbleibendem Verkehrsaufwand von 300 Pkm pro Tag, auch 9 Personen sich überhaupt nicht bewegen und eine einzige Person 300 Kilometer zurücklegen. Der wahrlich ablaufende Prozess ist nicht sichtbar.

Ab den 60er Jahren ist die Entwicklung des Personenverkehrs in Österreich von einer privaten Massenmotorisierung gekennzeichnet. Im Jahr 1995 betrug der Verkehrsaufwand im Personenverkehr 109 Mrd. Pkm (vgl. Abbildung 13-8). Dabei wurden im motorisierten

<sup>&</sup>lt;sup>106</sup>Josef BRÜDERL, Peter PREISENDÖRFER, *Der Weg zum Arbeitsplatz: Eine empirische Untersuchung zur Verkehrsmittelwahl* in Andreas DIEKMANN, Axel FRANZEN, *Kooperatives Umwelthandeln - Modelle, Erfahrungen, Maßnahmen*, Zürich, 1995, Seite 82

Individualverkehr rund 67 Mrd. Pkm zurückgelegt (vgl. Abbildung 13-10). Anhand dieser beiden Abbildungen können in der Entwicklung des Personenverkehrs Trendbrüche deutlich herausgelesen werden. So können gebremste Zunahmen des Autoverkehrs während der Phasen hoher Treibstoffpreise (1973-74 und zu Beginn der 80er Jahre) und ebenso deutliche Zunahmen des Autoverkehrs während Phasen niedriger Treibstoffpreise (Ende der 80er Jahre) festgestellt werden. <sup>107</sup>

Um den Gesamtverkehrsaufwand in Österreich in jedem Jahr zu berechnen, wird einfach die Streckenlänge pro Weg mit den konstanten Wegen pro Tag, mit der Bevölkerungsanzahl und mit 365 Tagen multipliziert.

$$Ge samt verkehrs auf wand = Streckenl\"{a}nge\ pro\ Weg*konstante\ Wege\ pro\ Tag*Bev\"{o}lkerung*365 \qquad (10.13)$$

Bevölkerung ...... Bevölkerung Österreich

Die Bevölkerung Österreichs wurde mittels einer Tabelle in VENSIM integriert und mit Prognosedaten der Statistik Austria bis in das Jahr 2070 ergänzt. 108,109

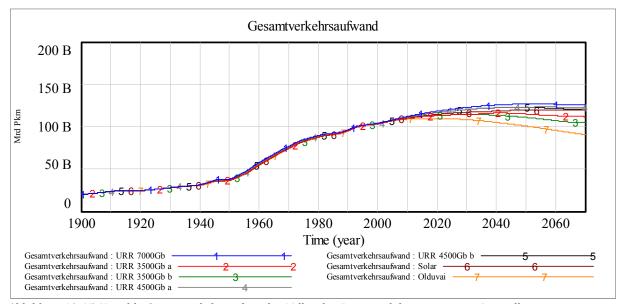


Abbildung 10-15, Variable Gesamtverkehrsaufwand in Milliarden Personenkilometer, eigene Darstellung

<sup>107</sup> BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, *Umweltbilanz Verkehr - Zahlenspiegel, Österreich 1950-1996*, 1997, Seite 10

<sup>108</sup>STATISTIK AUSTRIA, Bevölkerung seit 1869 nach Politischen Bezirken (einschl. Veränderung 1991 bis 2001 nach Komponenten), online

<sup>109</sup>STATISTIK AUSTRIA, Ergebnisse im Überblick: Vorausberechnete Bevölkerungsstruktur für Österreich 2006-2075 laut Hauptszenario, online

Wird der Gesamtverkehrsaufwand nun mit dem Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand des Individualverkehrs multipliziert, erhält man den Verkehrsaufwand im Individualverkehr:

$$Verkehrsaufwand\ IV = Gesamtverkehrsaufwand*Anteil\ IV$$
 (10.14)

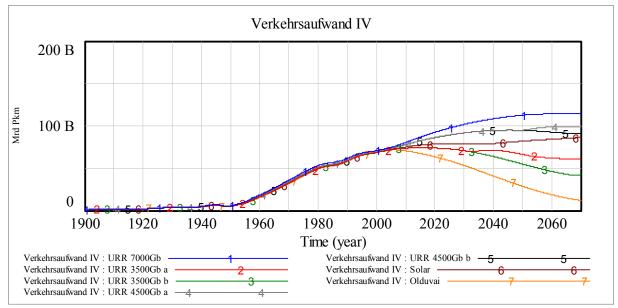


Abbildung 10-16, Variable Verkehrsaufwand IV in Milliarden Personenkilometer, eigene Darstellung

# 10.2.3 DIE BERECHNUNG DES MOTORISIERUNGSGRADES

# 10.2.3.1 DER KONSTANTE BESETZUNGSGRAD

Im Modell wird mit einem konstanten Besetzungsgrad gerechnet. Der Besetzungsgrad errechnet sich aus dem Verhältnis von Personenkilometer pro Jahr zu Fahrzeugkilometer pro Jahr.

$$Be setzung sgrad = \frac{Personenkilometer\ pro\ Jahr}{Fahrzeugkilometer\ pro\ Jahr} \tag{10.15}$$

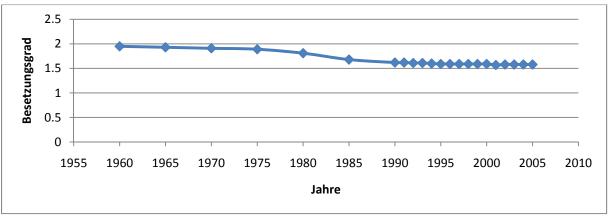


Abbildung 10-17, Besetzungsgrad auf US-Highways, eigene Berechnung und Darstellung

 ${\tt Daten: US\ DEPARTMENT\ OF\ TRANSPORTATION, Bureau\ of\ Transportation\ Statistics}$ 

US Passenger car vehicle miles:

http://www.bts.gov/publications/national\_transportation\_statistics/html/table\_01\_32.html, Stand: 29. August 2008 US Passenger car passenger miles:

http://www.bts.gov/publications/national\_transportation\_statistics/html/table\_01\_37.html, Stand: 29. August 2008

Der Besetzungsgrad wurde im Modell für Österreich nach Schätzung des Autors bei 1,2 angenommen.

# 10.2.3.2 DER KONSTANTE PERSONENVERKEHRSAUFWAND PRO PKW

Betrachtet man den Personenverkehrsaufwand pro PKW über die letzten 3 Jahrzehnte in Österreich, so kann man in Abbildung 10-18 ab dem Jahr 1980 einen in etwa konstanten Personenverkehrsaufwand feststellen. Die Abnahme zwischen dem Jahr 1970 und dem Jahr 1980 lässt sich durch das Inkrafttreten des Tempolimits auf Autobahnen und Bundesstraßen erklären. Der resultierende Rückgang der Durchschnittsgeschwindigkeit bewirkt, dass das Auto nicht mehr so viel Verkehrsaufwand aufnehmen kann (siehe Formel (10.16)) und dieser zwangshalber sinken muss.

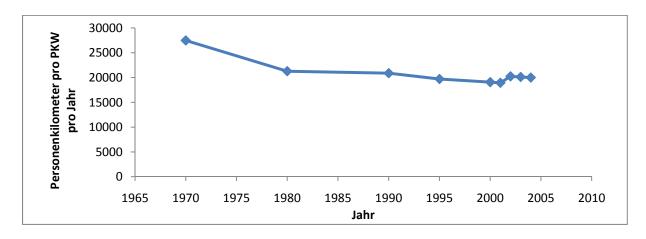


Abbildung 10-18, Personenverkehrsaufwand pro PKW in Österreich, eigene Berechnung und Darstellung Daten: PKW Anzahl: EUROSTAT, *Statistical pocket book 2007*, Personenverkehrsaufwand: BMVIT Österreich, Verkehr in Zahlen 2007, Seite 146

Internet:

 $http://ec.europa.eu/dgs/energy\_transport/figures/pocketbook/doc/2007/dn\_3\_6\_means\_of\_transport\_2007.xls, Stand: 29. August 2008$ 

Internet: http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz07gesamt.pdf, Stand: 29. August 2008

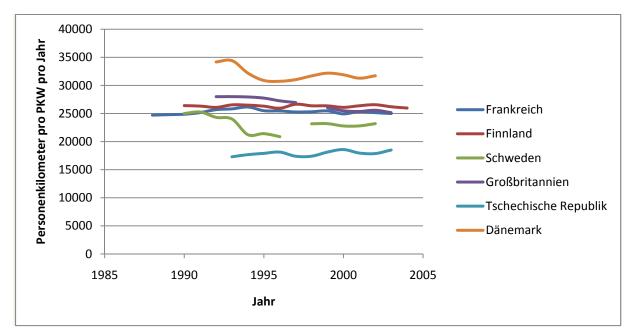


Abbildung 10-19, Personenverkehrsaufwand pro PKW im Europavergleich, eigene Berechnung und Darstellung Daten: PKW Anzahl und Personenverkehrsaufwand: EUROSTAT, *Statistical pocket book 2007*Internet:

http://ec.europa.eu/dgs/energy\_transport/figures/pocketbook/doc/2007/dn\_3\_6\_means\_of\_transport\_2007.xls, Stand: 29. August 2008

Im Europavergleich ergibt sich ein ähnliches Bild. Der Verkehrsaufwand pro PKW bleibt konstant, da die Geschwindigkeit des PKWs auch konstant bleibt.

Der Motorisierungsgrad gibt die Anzahl der PKW bezogen auf 1000 Einwohner wieder. In Österreich betrug der Motorisierungsgrad im Jahre 2005 507 PKW pro 1000 Einwohner. <sup>110</sup> Um den Motorisierungsgrad bestimmen zu können, berechnet man zuerst den *potentiellen Verkehrsaufwand pro Fahrzeug*. Unter dem *potentiellen Verkehrsaufwand pro Fahrzeug* versteht man im Modell den Verkehrsaufwand, den ein Fahrzeug bei gegebener konstanter Geschwindigkeit pro Jahr aufnehmen kann. Da im Laufe des 20. Jahrhunderts die langsamen Fuhrwerke durch die schnelleren Autos substituiert wurden, steigt auch die Durchschnittsgeschwindigkeit im Individualverkehr solange an, bis alle Fuhrwerke ersetzt wurden (siehe Kapitel 11.3.3).

<sup>&</sup>lt;sup>110</sup> BMVIT, Verkehr in Zahlen 2007, Seite 80

Der *potentielle Verkehrsaufwand pro PKW* wird durch eine Multiplikation der Durchschnittsgeschwindigkeit des Individualverkehrs mit dem konstanten Reisebudget, den konstanten Wegen pro Tag und 365 Tagen im Jahr, berechnet.

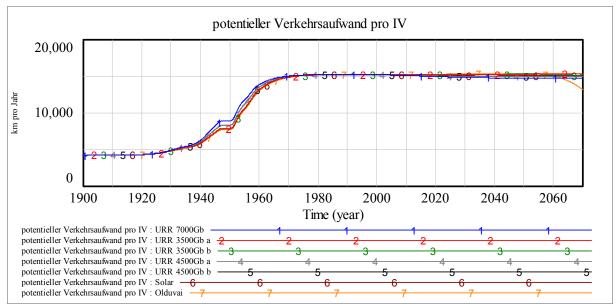


Abbildung 10-20, Variable Potentieller Verkehrsaufwand pro IV, eigene Darstellung

Im Modell erkennt man, dass sich auch hier ein konstanter potentieller Verkehrsaufwand pro PKW ab dem Jahr 1980 einstellt. Für die Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge wurde die gleiche Geschwindigkeit wie für konventionelle Fahrzeuge gewählt.

# 10.2.3.3 DER URBANISIERUNGSGRAD

Der Urbanisierungsgrad gibt den Anteil der Stadtbevölkerung an der Gesamtbevölkerung wieder. Als Indikator für den Urbanisierungsgrad kann die Gemeindegröße, die Bevölkerungsdichte bzw. andere Kenngrößen herangezogen werden. Die genaue Definition für den Urbanisierungsgrad ist von Land zu Land unterschiedlich.

Daten aus der Vergangenheit zeigen, dass der Urbanisierungsgrad in Österreich im letzten Jahrhundert kontinuierlich zugenommen hat. Prognosen der UNO gehen von einer Zunahme des Urbanisierungsgrades in Österreich von ca. 6% zwischen den Jahren 2007 und 2030 aus. <sup>111</sup>

Der steigenden Urbanisierung in Österreich steht gleichzeitig eine steigende Suburbanisierung der Städte gegenüber. Unter Suburbanisierung versteht man eine Abwanderung der Bevölkerung aus der Kernstadt in das angrenzende Umland einer Stadt (vgl. *Tagesgebietsfläche* – Kapitel 10.2.4).

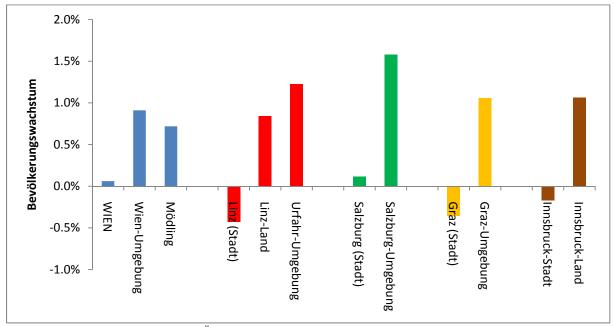


Abbildung 10-21, Suburbanisierung in Österreich – Bevölkerungswachstum der Städte und deren umliegenden Bezirke in Österreich, Daten: STATISTIK AUSTRIA - Volkszählung 2001 – Wohnbevölkerung nach Gemeinden (mit der Bevölkerungsentwicklung seit 1869), Eigene Berechnung und Darstellung

-

<sup>&</sup>lt;sup>111</sup> The UNITED NATIONS World Population Prospects – The 2006 Revision Internet: http://data.un.org/Default.aspx, Stand 23. 3. 2009

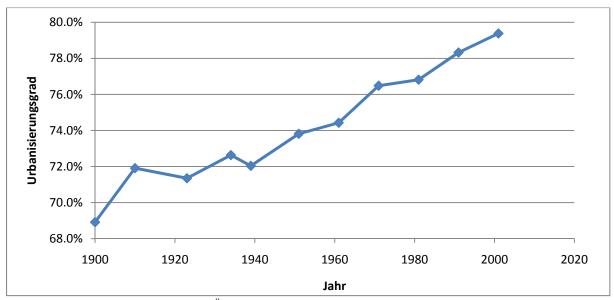


Abbildung 10-22, Urbanisierungsgrad in Österreich, Daten: STATISTIK AUSTRIA - Volkszählung 2001 – Wohnbevölkerung nach Gemeinden (mit der Bevölkerungsentwicklung seit 1869), Eigene Berechnung und Darstellung

Ein steigender Urbanisierungsgrad führt zu einer zunehmenden Verstädterung des Untersuchungsgebietes. Ein dichtes öffentliches Verkehrsmittelnetz bzw. kompakte städtische Siedlungsstrukturen wirken sich auf Attraktivität negativ die des motorisierten Individualverkehrs Empirische Siedlungen aus. Daten zeigen, dass in hoher Bevölkerungsdichten bzw. hoher Urbanisierungsgrade der Motorisierungsgrad deutlich niedriger liegt.

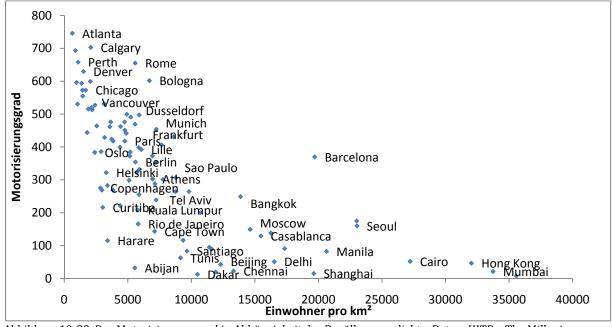


Abbildung 10-23, Der Motorisierungsgrad in Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte, Daten: UITP – The Millenium Cities Database for Sustainable Mobility (2001), Eigene Darstellung

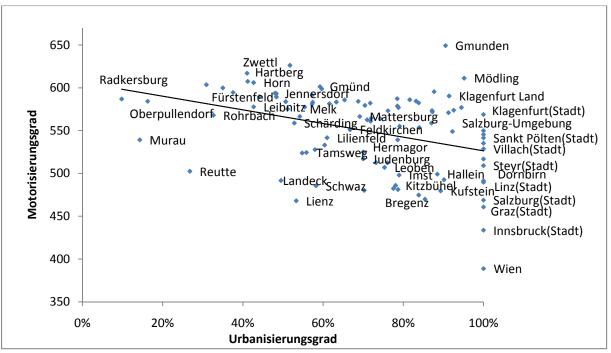


Abbildung 10-24, Der Motorisierungsgrad in Abhängigkeit des Urbanisierungsgrades für die österreichischen Bezirke bzw. Städte, Daten: STATISTIK AUSTRIA – KFZ Bestand 2008, Tabelle 7 & Berechnung des vorläufigen Bevölkerungsstandes 31.10.2008 nach Gemeinden, Eigene Berechnung und Darstellung

Im Modell wurden die Annahmen des steigenden Urbanisierungsgrades für Österreich mit Hilfe des Urbanisierungsfaktors implementiert. Dieser soll in Abhängigkeit des Urbanisierungsgrades den Motorisierungsgrad im Modell verkleinern.

Mit einem angenommenen Besetzungsgrad von 1,2 pro PKW wird nun wie folgt der Motorisierungsgrad berechnet:

$$MG = \frac{Verkehrsaufwand\ IV}{potent. Verkehrsaufwand\ p.\ PKW*Bev\"{o}lk.*konst.\ Besetzungsgrad}*Urban.\ faktor*1000 \tag{10.17}$$

<i>MG</i>	. Motorisierungsgrad
potent. Verkehrsaufwand p. PKW	. Potentieller Verkehrsaufwand pro PKW
Bevölk	. Bevölkerung Österreich
konst. Besetzungsgrad	. konstanter Besetzungsgrad
Urban.faktor	. Urbanisierungsfaktor

Der Motorisierungsgrad ist der Verkehrsaufwand im Individualverkehr dividiert durch die spezifische Kapazität eines PKWs und durch den Besetzungsgrad, in Bezug auf die Bevölkerung. Da er in PKW pro 1000 Einwohner angegeben wird, erfolgt am Schluss noch eine Multiplikation mit 1000. Mit dem Urbanisierungsfaktor wird die zunehmende Urbanisierung berücksichtigt.

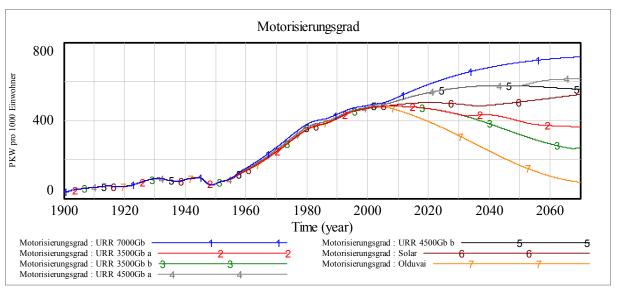
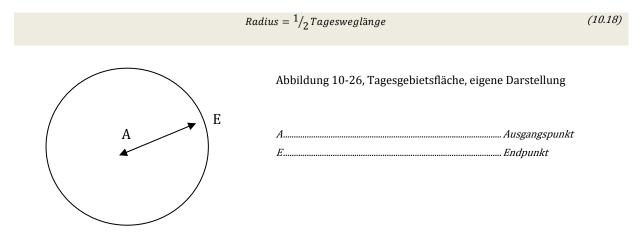


Abbildung 10-25, Variable Motorisierungsgrad, eigene Darstellung

## 10.2.4 DIE TAGESGEBIETSFLÄCHE

Darunter versteht man im Modell die potentielle Fläche um einen Ausgangspunkt, die eine Person, innerhalb der Tagesweglänge benützen kann. Ausgangspunkt ist auch gleichzeitig wieder Endpunkt (man geht davon aus, dass eine Person von zu Hause startet und am Ende des Tages wieder nach Hause zurückkommt). Als Fläche um den Ausgangspunkt nimmt man eine Kreisfläche an, innerhalb welcher die Person seinen Weg zurücklegt. Die maximale oder potentielle Fläche ergibt sich dadurch, dass man von folgender Annahme ausgeht:

Eine Person verlässt seinen Ausgangspunkt in radialer Richtung, solange bis die Hälfte der Tagesweglänge aufgebraucht ist. An diesem Punkt dreht sie um und geht in radialer Richtung wieder zum Ausgangspunkt zurück.



Für die Tagesgebietsfläche ergibt sich daher folgende Formel:

$$TGF = \left(\frac{1}{2} * konst. Reisezeitbudget \ pro \ Weg * konst. Wege \ pro \ Tag * Systemgeschwindigkeit\right)^{2} * \pi \tag{10.19}$$

TGF......Tagesgebietsfläche

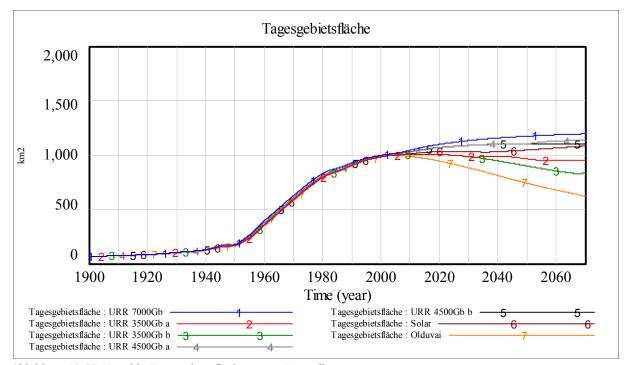


Abbildung 10-27, Variable Tagesgebietsfläche, eigene Darstellung

Der Verlauf der Tagesgebietsfläche zeigt, dass sie sich im Laufe des Jahrhunderts um den Faktor 15 vergrößert hat. Diese massive Zunahme kann man auch als den sogenannten "Speckgürtel" einer Stadt deuten, der mit der steigenden Motorisierung größer wird. Steigendes Einkommen und das Auto als Erschließungsinstrument zu Einfamilienhäusern fernab von Zentren, hat zu einem unkontrollierten Wachstum von Siedlungsbereichen in vielen Teilen dieser Welt geführt.

Die Folgen dieser Zersiedelung sind mannigfaltig. Durch den massiven Bau von Einfamilienhäusern ist auch das Straßennetz mitgewachsen, welches diese ja erschließt. Öffentliche Verkehrsmittel sind nicht oder nur schwierig zu erreichen bzw. sind einfach unrentabel, weil die notwendige Bevölkerungsdichte in diesen Gebieten einfach zu niedrig ist. Die Folgen sind durch die hohe tägliche Pendlerquote Staus in den Radialstraßen zum Stadtzentrum in der Früh und am Abend aus dem Stadtzentrum heraus. Doch es gibt nicht nur Verkehrsprobleme, sondern auch sehr große soziale Probleme. Gewachsene historische Straßen waren nicht nur ein Transportweg, sondern auch ein Ort der Kommunikation und des Zusammenlebens. Die Straßen der Zersiedlungsgebiete fungieren nur mehr als reine

Transportadern und ein sozialer Austausch von Bürgern ist in diesen Gebieten nicht mehr möglich, da die Einwohner untertags die Gebiete verlassen um zu arbeiten und am Abend wiederkommen um zu schlafen.

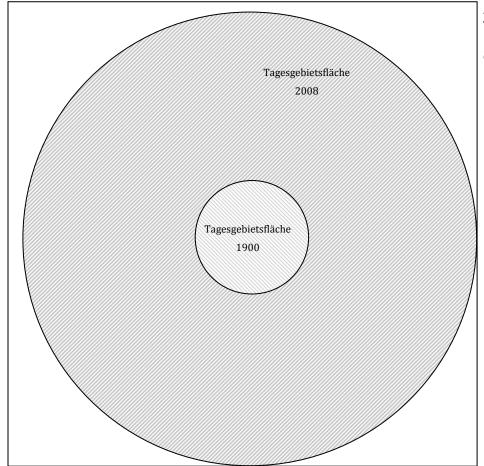


Abbildung 10-28, Tagesgebietsfläche im Jahr 1900 und im Jahr 2008, eigene Darstellung

# 11 System Dynamics - Teilmodell Individualverkehr

## 11.1 CAUSAL LOOP DIAGRAMM

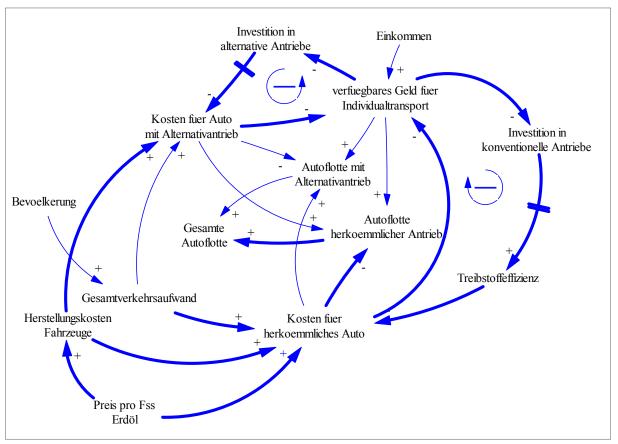


Abbildung 11-1, CLD Teilmodell Individualverkehr, eigene Darstellung

Das Teilmodell Individualverkehr basiert auf Kostenvergleiche einzelner Fahrzeugtypen. Die Kosten hängen von der Entwicklung der Fahrzeugtechnologie ab. Da jedoch der Fortschritt einer Technologie an Grenzen stoßen wird und dadurch die Kosten nicht mehr gesenkt werden können, wird Forschung und Entwicklung in eine neue Technologie, die bisher zu teuer war, forciert werden.

### 11.1.1 DER TECHNOLOGISCHE FORTSCHRITT

Wie man in Abbildung 11-1 sehen kann, besteht das Teilmodell aus 2 negativen Regelkreisen, welche auf technologischen Fortschritt basieren.

Steigen die Kosten für eine Antriebsart, z.B. durch höhere Treibstoffkosten, wird die Autoindustrie gewillt sein, mehr in Forschung zu investieren um den Treibstoffverbrauch zu senken. Ist die technologische Weiterentwicklung jedoch langsamer als die Erhöhung der

Treibstoffpreise, gibt es einen zusätzlichen Anreiz eine teilweise- oder gänzlich neue Technologie zu entwickeln.

Technologische Weiterentwicklung und Forschung führen dazu, dass immer leistungsstärkere und treibstoffeffizientere Motoren gebaut werden können. Vor allem die größere Effizienz führt zu einer Verringerung des benötigten Treibstoffes für die gleiche Strecke und senkt dadurch die variablen Kosten für den Autofahrer.

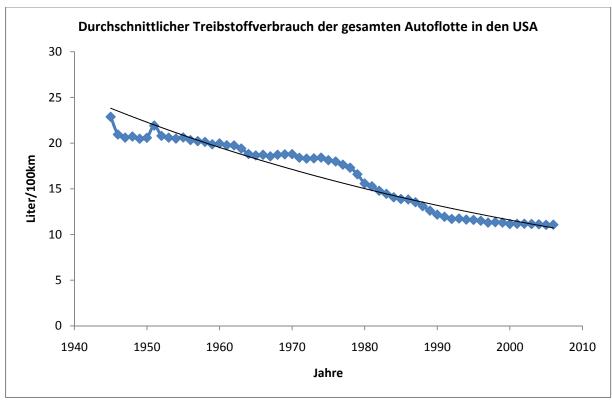


Abbildung 11-2, Treibstoffverbrauch in den USA, Eigene Berechnung und Darstellung

Daten: EIA U.S. Finished Motor Gasoline Product Supplied und FHWA Annual vehicle distance traveled in miles

Internet: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/mgfupus1a.htm, Stand: 23. Juli 2008 Internet: http://www.fhwa.dot.gov/ohim/summary95/vm201.pdf, Stand 23. Juli 2008

Anders als in Europa wird der Treibstoffverbrauch in Amerika als "Miles per gallon" definiert. Je treibstoffeffizienter ein Fahrzeug ist, desto mehr Meilen kann man mit einer Gallone zurücklegen. Vielleicht sollten sich europäische Autohersteller diesen psychologischen Marketingtrick der Amerikaner abschauen und auch in Europa forcieren – frei nach dem Motto "mehr ist besser" (siehe auch Kapitel 11.3.1.1.2).

Der technologische Fortschritt spiegelt sich auch in den Herstellungskosten eines neuen Produktes wieder.

### 11.1.1.1 DIE ERFAHRUNGSKURVE

Das Konzept der Erfahrungskurve kommt ursprünglich aus der Psychologie und wurde erstmals vom amerikanischen Psychologen und Ingenieur Louis Leon Thurstone in seinem Artikel The learning curve im Journal Psychological Monographs im Jahr 1919 definiert. Im Jahr 1930 veröffentlichte er weitere Untersuchungen in denen er Erfahrungskurven beschreibt, welche die Form einer S-Kurve haben. 112

Theodor Paul Wright, ein amerikanischer Luftfahrtingenieur, wandte die Erkenntnisse der Lernkurven in der Luftfahrtindustrie an und veröffentlichte 1936 im Journal of Aeronautical Science einen Artikel, in dem er die grundsätzliche Theorie der abnehmenden Herstellungskosten mit zunehmender Produktionsreife beschrieb. 113 Wright definierte die Erfahrungskurve wie folgt:

$Y = a * X^b$	(11.1)	
Ykumulative Durchschnittszeit	pro Einheit oder Durchschnittskosten	
aZeit oder Kosten die notwendig waren um die erste Einheit zu produzieren		
bGefälle der Funktion		
Xkumulative Anzahl der produ	zierten Einheiten	

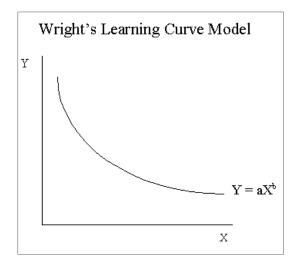


Abbildung 11-3, Die Erfahrungskurve nach T.P. Wright, Quelle: MARTIN J. R., The Learning Curve Internet: http://maaw.info/LearningCurveSummary.htm, Stand: 7.August 2008

Wird ein Produkt also in großer Zahl produziert, wobei der Automatisationsanteil immer größer wird, nehmen die Herstellungskosten exponentiell mit der kumulierten Produktionsmenge ab, bis sie sich asymptotisch einer unteren Grenze annähern.

<sup>114</sup>Wayne J. MORSE, Reporting Production Costs That Follow the Learning Curve Phenomenon, The Accounting Review, Vol. 47, No. 4, 1972, Seite 756

<sup>&</sup>lt;sup>112</sup>]. P. GUILFORD, Louis Leon Thurstone 1887-1955 - A Biographical Memoir, Washington DC, 1957, Seite

<sup>&</sup>lt;sup>113</sup>NASA, *The Learning Curve Calculator*, online

Durch Verbesserungen im Produktionsprozess werden also am Anfang des Prozesses die Produktionskosten gesenkt und bleiben dann in etwa konstant. Dieser Umstand wurde im Modell in Kapitel 11.3.1.2 implementiert.

## 11.2 DER SUBSTITUTIONSPROZESS BEI FAHRZEUGEN

Da das Modell den Zeitraum vom Jahr 1900 bis 2070 abdeckt und sich die Art des PKWs über diese lange Zeit ändert, werden folgende Variablen eingeführt:

- Fuhrwerke
- Automobil mit konventionellem Antrieb
- Hybridfahrzeuge
- Brennstoffzellenfahrzeuge

Durch steigende Treibstoffpreise werden viele unterschiedliche Fahrzeugtechnologien entwickelt. Neben Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen, werden auch reine Elektrofahrzeuge, Erdgasfahrzeuge oder auch Druckluftfahrzeuge konzipiert. Welche Technologien sich in Zukunft als massentauglich erweisen und sich durchsetzen werden, ist nur schwer abschätzbar. Die Auswahl für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge zur Implementierung im Modell, beruht auf einer Annahme des Autors. Aktuelle Tendenzen deuten daraufhin, dass das Elektroauto und das Hybridauto, das herkömmliche Auto schon bald ablösen werden (siehe Kapitel 11.2.1.4).

Durch nur zwei neue Technologien kann das Modell relativ kompakt gehalten werden, da nur sechs Kostenvergleiche bei insgesamt vier Fahrzeugtypen durchgeführt werden müssen. Bei fünf unterschiedlichen Fahrzeugtypen wären schon zehn Kostenvergleiche notwendig. Die Auswahl der Hybrid- und Brennstoffzellentechnologie geschah auch nach dem Gesichtspunkt der unterschiedlichen Technologiegeschwindigkeit. Da die Hybridtechnologie voraussichtlich früher als die Brennstoffzellentechnologie massentauglich sein wird, kann ein hintereinandergeschalteter Substitutionsprozess simuliert werden.

### 11.2.1.1 Fuhrwerke

Am Anfang des 20. Jahrhunderts waren Pferdefuhrwerke noch das einzige individuelle Verkehrsmittel ohne Kraftaufwand. Doch die Entwicklung von Verbrennungsmotoren und die bequemere Art zu reisen, führten bald zu einem Substitutionsprozess von Pferdefuhrwerken zu Automobilen (vgl. Abbildung 7-6 und Abbildung 11-4).

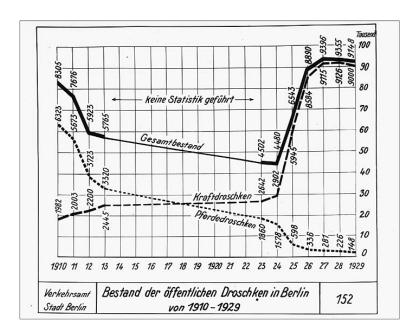


Abbildung 11-4, Bestand der öffentlichen Droschken in Berlin Quelle: VERKEHRSWERKSTATT.de, Bestand an Berliner Droschken von 1910 – 1929, Internet: http://ods.schule.de/bics/son/verkehr/pferdefu/geschich/gesch35.htm, Stand: 3. September 2008, © 2000 Verkehrswerkstatt.de Dr. Helmut Meschenmoser

### 11.2.1.2 Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge sind Fahrzeuge mit zwei eingebauten Energiewandlern und zwei Energiespeicher. Meistens werden ein Elektromotor und ein Verbrennungsmotor als Energiewandler und ein Kraftstofftank und mehrere Akkumulatoren als Energiespeicher verwendet. In momentanen Hybridfahrzeugen wird die Batterie nur durch regeneratives Bremsen des Fahrzeuges und durch den Verbrennungsmotor geladen. Ein Aufladen des Hybridfahrzeuges durch ein Ladegerät per Stecker ("plug-in hybrids") über ein elektrisches Netz könnte in Zukunft eine Option sein, würde jedoch eine größere Batterie und vielleicht einen größeren Motor brauchen. Hybridfahrzeuge sparen Energie durch folgende Eigenschaften:

- Abschalten des Verbrennungsmotors bei Stillstand, möglicherweise beim Bremsen und Auslaufen
- Bremsen durch den Elektromotor, und Aufladen der Batterie durch die gewonnene Energie
- Der Elektromotor wird beim Beschleunigen zugeschalten. Dadurch können die Verbrennungsmotoren kleiner dimensioniert werden.
- Der Elektromotor wird bei geringer Belastung verwendet, um die Unwirtschaftlichkeit des Verbrennungsmotors bei geringen Geschwindigkeiten zu vermeiden.

• Servolenkung und andere Einrichtungen werden durch den effizienteren Elektromotor geschalten. 115

Seit der Einführung des Toyota Prius in den japanischen Markt im Jahr 1998, wurde die Hybridtechnologie enorm weiterentwickelt. Der Prius spart bis zu 50% des Treibstoffverbrauches bzw. über 50% bei Vergleichen mit amerikanischen Automobilen. Die Verkaufszahlen der Hybride steigen markant an. In den USA wurden 7800 Hybridfahrzeuge im Jahr 2000 und 207.000 Hybridfahrzeuge im Jahr 2005 verkauft. Weltweit waren die Verkaufszahlen im Jahr 2006 bei 880.000 Hybriden. <sup>116</sup> Während in Österreich, Belgien, Dänemark und den Niederlanden der Anteil von Hybridfahrzeugen unter 1% liegt, ist der Anteil in den USA bereits bei 2,2%. Der globale Markt für Hybridfahrzeuge könnte sich bis ins Jahr 2012 verdreifachen. <sup>117</sup> Die technologische Weiterentwicklung seit der Einführung des Prius ist bemerkenswert. Die Energiedichte der Nickel Metall Hybrid Batterien verbesserte sich von 600 W/kg im Jahr 1998 auf 1250 W/kg im Jahr 2004.

Trotz der immensen Verbesserungspotentiale die ein Hybridfahrzeug gegenüber einem konventionellen Fahrzeug hat, bleibt auch der Hybrid im Endeffekt vom Erdöl als Energieträger abhängig, da der Verbrennungsmotor weiterhin mit Benzin oder Diesel betrieben wird.

### 11.2.1.3 Brennstoffzellenfahrzeuge

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCV – Fuel Cell Vehicles) sind Fahrzeuge mit Elektroantrieb, wobei die benötigte elektrische Energie aus dem Energieträger Wasserstoff durch eine Brennstoffzelle erzeugt wird. Während der letzten Jahrzehntes stieg das Interesse in FCVs und der daraus erlangte technologische Fortschritt ist auch hier signifikant. Die treibenden Kräfte hinter der Entwicklung von Brennstoffzellen sind die globale Erwärmung, die Luftqualität, und Energiereserven.

Obwohl das Potential der FCVs für die Verringerung der Treibhausgase sehr groß ist, gilt es momentan noch viele Hürden zu nehmen, bevor ein kommerzieller Start dieser Technologie denkbar ist. Diese sind:

• Entwicklung von standhaften, sicheren und umweltfreundlichen Brennstoffzellensystemen und Wasserstoffspeichersystem

<sup>&</sup>lt;sup>115</sup>Suzana KAHN RIBEIRO, Shigeki KOBAYASHI, et al., *Transport and its infrastructure*. in *Climate Change* 2007 - *Mitigation*, Cambridge, New York, 2007, Seite 339, 340

<sup>&</sup>lt;sup>116</sup>INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), *Annual Report 2006: Hybrid and electric vehicles - The electric drive takes off*, 2007, online, Seite 79

<sup>&</sup>lt;sup>117</sup>INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), Outlook for hybrid and electric vehicles, 2008, online, Seite 6

- Reduzierung der Kosten der Brennstoffzellen und des Speichersystems um mit konventionellen Antriebssystemen konkurrieren zu können
- Entwicklung der Infrastruktur zur Bereitstellung von Wasserstoff für FCVs
- starke Reduzierung der Wasserstoffproduktionskosten aus erneuerbaren Energiequellen oder die Sequestrierung von CO<sub>2</sub>, als Nebenprodukt bei der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Energiequellen

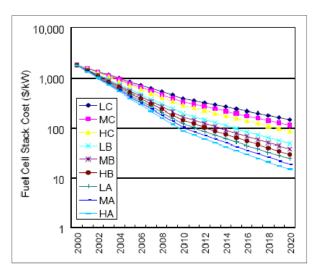


Abbildung 11-5, verschiedene Erfahrungskurven für die Brennstoffzellentechnologie

Quelle: TSUCHIYA H., KOBAYASHI O., Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, 2004, Seite 988 © 2003 International Association for Hydrogen Energy

Während auf der einen Seite eine öffentliche Akzeptanz dieser Technologie aufrechterhalten werden muss, ist es noch zu früh um eine flächendeckende Infrastruktur für die Bereitstellung von

Wasserstoff aufzubauen. Einige technische Schlüsselfragen, wie die Brennstoffzellenbetriebsbedingungen oder Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug müssen vorher noch beantwortet werden, da diese erhebliche Auswirkungen auf die Konzeptionierung der Infrastruktur haben werden. <sup>118</sup>

Die Kosten für FCVs werden am Anfang um vieles höher sein, als die Betriebskosten eines herkömmlichen Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor. Die Kosten für Brennstoffzellen in Personenfahrzeugen müssten von derzeit mehr als \$2000/kW auf weniger als \$100/kW sinken um konkurrenzfähig zu sein.<sup>119</sup>

Die Herstellungskosten dieser Fahrzeuge und des Wasserstoffs werden mit Beginn der Massenproduktion und dem Einsetzen von "learning-effects" sinken. Eine genauere Prognose vom heutigen Standpunkt aus, ist sehr ungewiss.

<sup>119</sup> Michael BALL, Martin WIETSCHEL - *The future of hydrogen – opportunities and challenges*, International Journal Of Hydrogen Energy 34 (2009), Seite 620

<sup>&</sup>lt;sup>118</sup>Suzana KAHN RIBEIRO, Shigeki KOBAYASHI, et al., *Transport and its infrastructure.* in *Climate Change* 2007 - *Mitigation*, Cambridge, New York, 2007, Seite 354ff

### 11.2.1.4 AKTUELLE TENDENZEN

"Dem Elektroauto gehört die Zukunft". 120

Die Berichte und Anzeichen der letzten Jahre und Monate mehren sich, dass die Tendenz, für das Auto von morgen, in Richtung Elektroauto geht. Das Hybridfahrzeug wird demnach eine Übergangslösung bis zum ausgereiften Elektroauto darstellen. Denkbar wären demnach Elektroautos, welche einen kleinen Verbrennungsmotor an Bord haben und gegebenenfalls als Generator fungieren um die Batterien wieder aufzuladen. Der Verbrennungsmotor würde so konstant im optimalen Drehzahlbereich laufen und dadurch den Kraftstoffverbrauch sehr niedrig halten. Bis die Leistungsdichte der Akkumulatoren groß genug ist um auch längere Strecken zurückzulegen, könnten Tankstellen neue Akkus im Gegenzug zu den leeren Akkus bei gleichzeitiger Auswechslung vor Ort anbieten. 121

Der Vorteil bei der Infrastruktur für Elektrofahrzeuge ist das vorhandene Stromnetz bei den Tankstellen, welches man bei der Implementierung von Aufladestationen verwenden könnte. Elektrofahrzeuge stellen die energieeffizienteste Lösung im Individualverkehr dar und sind den Brennstoffzellenfahrzeugen in wirtschaftlichen und technologischen Aspekten derzeit weit voraus. 122

Das Potential für die Weiterentwicklung von Elektrofahrzeugen ist nicht nur bei den Akkumulatoren, sondern auch bei der Reduzierung des Wagengewichtes bzw. bei der Aerodynamik groß, und so könnte es sein, dass nach 150 Jahren Elektrofahrzeuge wieder in Mode kommen.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>120</sup> Hubert BERGER, *Dem Elektroauto gehört die Zukunft*, Pressemeldung der FH-Joanneum Kapfenberg, 20. November 2007, online

<sup>&</sup>lt;sup>121</sup>Bill VLASIC, *Detroit Goes for Electric Cars, but Will Drivers?*, New York Times, 10. Jänner 2009, online <sup>122</sup> Michael BALL, Martin WIETSCHEL - *The future of hydrogen – opportunities and challenges*, International Journal Of Hydrogen Energy 34 (2009), Seite 618

## 11.3 System Dynamics – Teilmodell Individualverkehr

Ausgangspunkt für die Berechnung der Kapazität des jeweiligen Fahrzeugtyps sind die Gesamtkapazität der individuellen Verkehrsmittel nach Formel (11.22), die Distanz pro Jahr und die Gesamtkosten der einzelnen Fahrzeugtypen.

## 11.3.1 DAS KOSTENMODELL

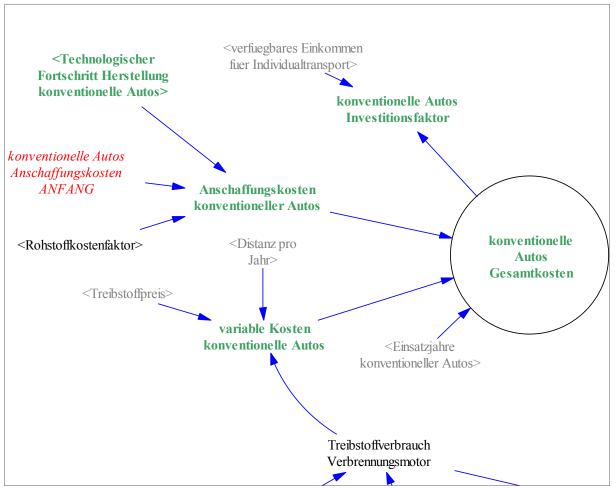


Abbildung 11-6, Das Kostenmodell, eigene Darstellung

Die Gesamtkosten pro Jahr werden nach Fixkosten und variablen Kosten aufgeteilt. Als Fixkosten werden die Anschaffungskosten (=Herstellungskosten) auf die Einsatzdauer, in welcher das Fahrzeug in Betrieb ist, bezogen. Der Endwert eines Fahrzeuges nach der vollendeten Einsatzdauer wird nicht berücksichtigt. Als Vorstellungsbeispiel für die Kalkulation eines Fahrzeugtyps wurde im Folgenden der Typ des konventionellen PKWs gewählt.

### 11.3.1.1 DIE VARIABLEN KOSTEN

Die variablen Kosten setzten sich aus dem Preis pro Liter Treibstoff, dem Treibstoffverbrauch und der Distanz pro Jahr zusammen.

$$variable\ Kosten\ konv.\ Autos = Treibstoff preise* \frac{Treibstoff verbrauch}{100}* \textit{Distanz}\ pro\ Jahr \tag{11.2}$$

variable Kosten konv. Autos.....variable Kosten konventionelle Autos

Anmerkung: Um den Substitutionsprozess von Fuhrwerken zu motorisierten Fahrzeugen zu simulieren, wurden für die Fuhrwerke variable Kosten gewählt, die überproportional mit der Distanz pro Jahr anwachsen. Diese steigenden variablen Kosten sollen den Mehraufwand im Wandel der Zeit darstellen, der sich mit der Haltung von Zugtieren wie z.B. Bestallung, Futter, Pflege, Tierarzt, etc. einstellt und stellen eine Schätzung des Autors dar.

#### 11.3.1.1.1 DER TREIBSTOFFPREIS

Der Treibstoffpreis wird in Abhängigkeit vom Rohölpreis berechnet. In diesem Modell wird die Variable *Treibstoffpreis* aus der Variable *Preis pro Fass* (vgl. Kapitel: 9.2.1.3) berechnet.

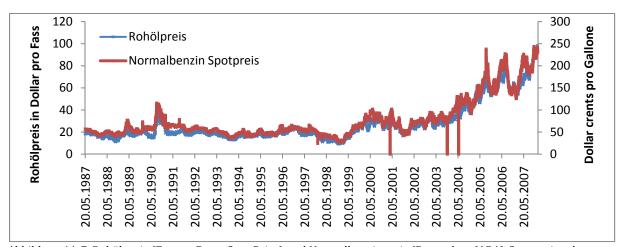


Abbildung 11-7, Rohölpreis (Europe Brent Spot Price) und Normalbenzinpreis (Rotterdam (ARA) Conventional Gasoline Regular Spot Price) im Vergleich, eigene Darstellung

Daten: ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION

Internet: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet\_pri\_spt\_s1\_d.htm), Stand: 9. Jänner 2008

Abbildung 11-7 zeigt die deutliche Abhängigkeit des Normalbenzinpreises vom Rohölpreis. In folgender Formel werden der Treibstoffpreis und der Rohölpreis in Beziehung gesetzt:

Treibstoffpreis K1 .......Konstante

Elastizität Treibstoffpreis zu Rohölpreis ......Konstante

Im Modell wird ein einheitlicher Treibstoffpreis für alle Treibstoffsorten verwendet.

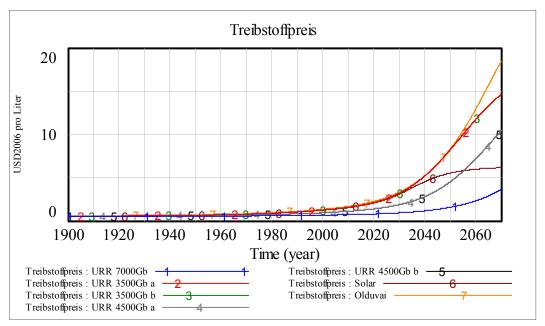


Abbildung 11-8, Variable Treibstoffpreis, eigene Darstellung

## 11.3.1.1.2 DIE TREIBSTOFFEFFIZIENZ

Unter Treibstoffeffizienz wird der Treibstoffverbrauch pro 100 Kilometer Wegstrecke definiert. In Abbildung 11-2 wurde gezeigt, dass der Treibstoffverbrauch durch Weiterentwicklung des Motors gesenkt werden kann. Zur Modellierung des Treibstoffverbrauchs wird als Grundlage ein einfaches Technologieentwicklungsmodell wie schon bei der technologischen Weiterentwicklung der Erdölproduktion verwendet (vgl. Formel (9.22)).

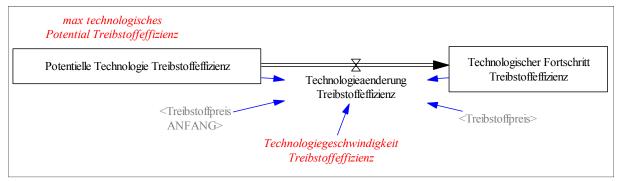


Abbildung 11-9, Technologiereifeprozess Treibstoffverbrauch, eigene Darstellung

$$Tech. \ "ander". = Pot. \ "Tech". \ "Treibeff". \ "Treibeff". \ "Treibeff". \ "Treib". \ "Treib".$$

$$Tech. Fort. Treibstoff eff. = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Tech. "anderung"_i$$
 (11.5)

Tech.änderung	. Technologieänderung Treibstoffeffizienz
Pot.Tech.Treibeff	. Potentielle Technologie Treibstoffeffizienz
Tech.Fort.Treibeff	. Technologischer Fortschritt Treibstoffeffizienz
Tech.geschw	. Technologiegeschwindigkeit Treibstoffeffizienz (Konstante)
Treib.preis	. Triebstoffpreis
Treib.preis ANF	. Treibstoffpreis im Jahr 1900

Je größer das Verhältnis von  $\frac{Treib.preis}{Treib.preis\,ANF}$  ist, desto größer ist die Geschwindigkeit der technologischen Weiterentwicklung. Der höhere Treibstoffpreis ist die treibende Kraft hinter der technologischen Entwicklung.

Ein Wert von 0,6 bei der Variable *Technologischer Fortschritt Treibstoffeffizienz* bedeutet, dass der Treibstoffverbrauch verglichen mit dem Treibstoffverbrauch im Jahr 1900 um 60% reduziert werden konnte.

Die Variable *Treibstoffverbrauch Verbrennungsmotor* gibt den Treibstoffverbrauch in Liter pro 100 Kilometer an.

$$Treibstoffverbrauch = (1 - Tech.Fort.Treibeff.) * Treibstoffverbrauch ANFANG$$
 (11.6)

Treibstoffverbrauch ANFANG......Treibstoffverbrauch im Jahr 1900

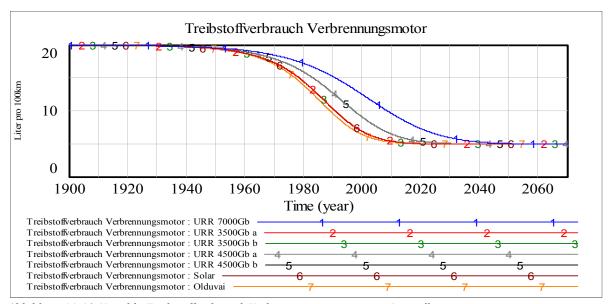


Abbildung 11-10, Variable Treibstoffverbrauch Verbrennungsmotor, eigene Darstellung

### 11.3.1.1.3 DISTANZ PRO JAHR

Die Variable *Distanz pro Jahr* gibt einfach die zurückzulegende Distanz pro Jahr an und berechnet sich wie folgt:

### 11.3.1.2 DIE FIXKOSTEN

Als Fixkosten werden in diesem Modell die Herstellungskosten des Fahrzeuges gesehen. Die Herstellungskosten sinken einerseits sobald ein Fahrzeug in Serienfertigung erzeugt wird (siehe Kapitel 11.1.1.1), steigen jedoch bei wachsenden Kosten für Rohstoffe, welche für die Fertigung benötigt werden.

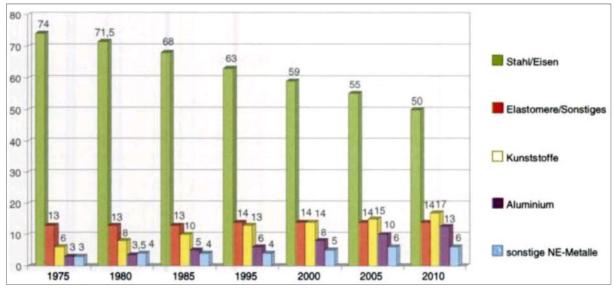


Abbildung 11-11, Werkstoffanteile [%] im PKW, Quelle: BRAESS H.-H., SEIFFERT U., *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Wiesbaden, 2007, Seite 735, © Friedr. Vieweg & Sohn Verlag

Abbildung 11-11 zeigt, dass sich die prozentuellen Anteile der verwendeten Materialien in den letzten 30 Jahren stark verschoben haben. Der Anteil von Stahl bzw. Eisen ging stark zurück, währenddessen die Anteile von Aluminium und Kunststoffen zulegten. Durch die Beschlüsse des Kyoto-Protokolls und weiter zu erwartender verschärfter Emissionsgrenzwerte, werden leichte Materialien weiter forciert werden um das Gewicht bzw. den Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge

zu verringern. In naher Zukunft wird Stahl aufgrund mangelnder Alternativen zusätzlich bei der Karosserie weiterhin als dominierender Werkstoff bestehen bleiben.<sup>123</sup>

Durch die starke Nachfrage an Rohstoffen in den Jahren 2004 bis 2008 ist jedoch der Preis für eben genau diese Schlüsselwerkstoffe erheblich gestiegen. Analog zum Erdölpreis stiegen die Preise für Eisenerz und Aluminium in diesem Zeitfenster stark an. Es besteht eine Korrelation zwischen Rohstoffpreisen untereinander.



Abbildung 11-12, Preise für Eisenerz mit 67.55% Eisengehalt, FOB Ponta da Madeira, (DTMU...dry metric ton unit) und Aluminium mit 99.5% Reinheit, LME Spotpreis, CIF UK ports

Daten: Internet: http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=iron-ore&months=240 und http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=aluminum&months=240, Stand 26.3.2009

Bei weiterer Verwendung von Stahl, Aluminium und Kunststoffen für die Produktion von Fahrzeugen muss daher mit steigenden Rohstoffkosten für Fahrzeuge gerechnet werden.

Dieser Umstand wird im Modell durch eine Elastizität zum Erdölpreis implementiert (siehe Formel (11.11)).

Der Lerneffekt bei der Produktion von Fahrzeugen führt zu einem gleichzeitigen Absinken der Herstellungskosten und wird von der Charakteristik her wie bei der Treibstoffeffizienz (siehe Kapitel 11.3.1.1.2) modelliert.

\_

 $<sup>^{123}\,</sup>BRAESS\,H.-H.,\,SEIFFERT\,U.,\,Vieweg-Handbuch\,\textit{Kraftfahrzeugtechnik},\,Wiesbaden,\,2007,\,Seite\,734-736\,Wiesbaden,\,2007,$ 

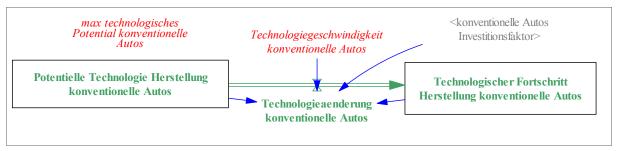


Abbildung 11-13, Technologiereifeprozess: Anschaffungskosten konventioneller Fahrzeuge, eigene Darstellung

$$Tech. \ "anderung" \ konv. = Potential. \ "konv.* \ Fortsch. \ "konv.* \ Tech. \ "Geschw. \ "konv.* \ Invest \ "konv." \ (11.8)$$

$$Fortsch. konv. = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Tech. "anderung konv."_i$$
 (11.9)

$$Anschaffungskosten\ konv.\ Autos = (1-Fortsch.\ konv)*konv.\ Anschaffungskosten\ ANF*RSKF \eqno(11.10)$$

$$RSKF = RS\_Konstante * Preis pro Fass^{Elastizität RSKF}$$
 (11.11)

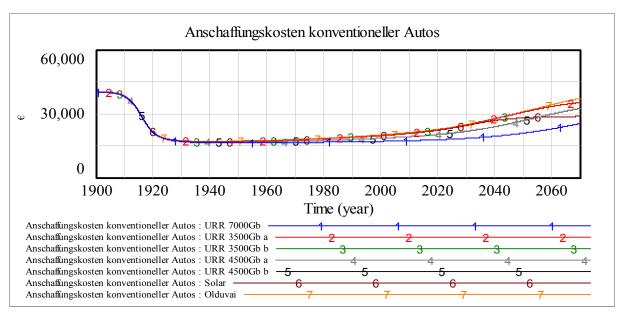


Abbildung 11-14, Variable Anschaffungskosten konventioneller Autos, eigene Darstellung

## 11.3.1.3 DIE GESAMTKOSTEN PRO FAHRZEUG UND JAHR

Aus variablen Kosten und Fixkosten werden nun die Gesamtkosten pro Fahrzeugtyp zusammengefasst.

$$Ge samt kosten = Fixkosten + variable Kosten (11.12)$$

$$konv. Autos \ GK = \frac{Anschaffungskosten \ konv. Autos}{Einsatzjahre \ konv. Autos} + vrb \ Kosten \ konv. Autos$$
 (11.13)

konv. Autos GK........konventionelle Autos Gesamtkosten

Anschaffungskosten konv. Autos......siehe Formel (11.10)

Einsatzjahre konv. Autos.....Einsatzjahre konventionelle Autos (Konstante)

vrb Kosten konv. Autos......variable Kosten konventioneller Autos (siehe Kapitel 11.3.1.1)

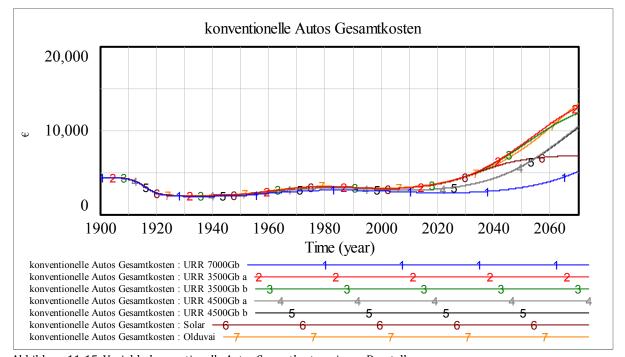


Abbildung 11-15, Variable  $konventionelle\ Autos\ Gesamtkosten$ , eigene Darstellung

In Abbildung 11-15 erkennt man deutlich die steigenden Gesamtkosten für das konventionelle Fahrzeug ab dem Jahr 2020.

### 11.3.1.4 DER INVESTITIONSFAKTOR

Der Investitionsfaktor, wie in Formel (11.8) beschrieben, beschleunigt die Investitionen in eine Technologie. Unterschieden wird beim Investitionsfaktor der Fahrzeugtyp.

Beim konventionellen Fahrzeug gilt als Maß für die Geschwindigkeit das verfügbare Einkommen in Relation zu den vorherrschenden Gesamtkosten. Ist das verfügbare Einkommen für den Individualtransport kleiner als die Kosten, wird mehr in die Technologie investiert werden, um den Markt für eine breitere Menge zu öffnen.

$$konv. Autos\ Investions faktor = \frac{konv. Autos\ Gesamtkosten}{verf\"{u}gbares\ Einkommen\ f\"{u}r\ IT}$$

konv. Autos Investitionsfaktor......konventionelle Autos Investitionsfaktor
konv. Autos Gesamtkosten.....konventionelle Autos Gesamtkosten
verfügbares Einkommen für IT......verfügbares Einkommen für Individualtransport

Die Entwicklung des Treibstoffpreises gilt als Maß für den Investitionsfaktor bei Hybrid- und Wasserstofffahrzeugen. Steigt der Treibstoffpreis werden die Investitionen in die Hybrid- und Wasserstofftechnologie größer.

$$Investitions faktor_{Hybrid} = Investitions faktor_{Wasserstoff} = \frac{Treibstoffpreis}{Treibstoffpreis \, ANFANG} \tag{11.15}$$

$$Tech. \ddot{a}nderung_{Hyb} = Pot. Tech_{Hyb} * Tech. Fortschr_{Hyb} * Tech. geschwind_{Hyb} * Inv. Fakt_{Hyb} \tag{11.16}$$

$$Tech. \ddot{a}nderung_{H2} = Pot. Tech_{H2} * Tech. Fortschr_{H2} * Tech. geschwind_{H2} * Inv. Fakt_{H2} \tag{11.17}$$

$$Tech. Fortschrt_{Hyb} = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Tech. \ddot{a}nderung_{Hyb}_i \tag{11.18}$$

$$Tech. Fortschrt_{H2} = \sum_{i=ANFANG}^{ENDE} Tech. \ddot{a}nderung_{H2}_i \tag{11.19}$$

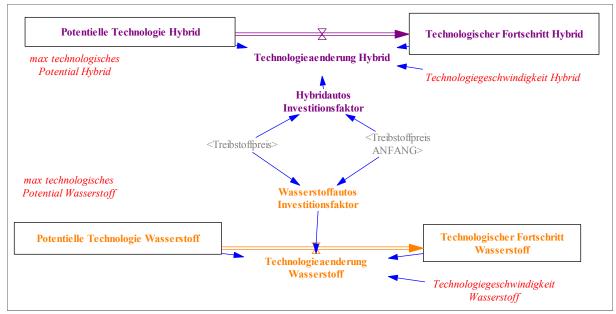


Abbildung 11-16, Technologiereifeprozess von Hybrid- und Wasserstofftechnologie, eigene Darstellung

Beim Fahrzeugtyp "Fuhrwerk" gibt es keinen Investitionsfaktor. Die Technologiegeschwindigkeit von Wasserstofffahrzeugen wurde in allen Szenarien niedriger gewählt als die der Hybridfahrzeuge um den zu erwartenden langsameren technologischen Fortschritt von Wasserstofffahrzeugen zu simulieren.

## 11.3.2 DAS IV-SUBSTITUTIONSMODELL

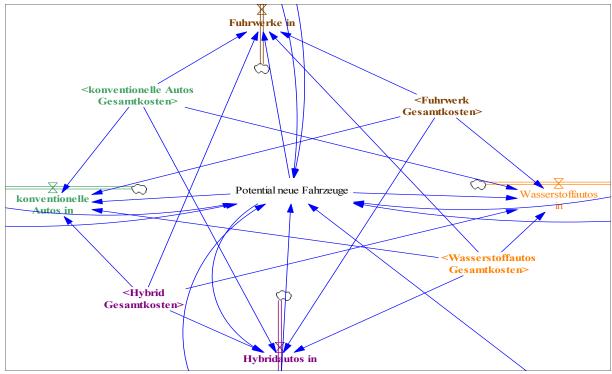


Abbildung 11-17, Das Substitutionsmodell, eigene Darstellung

Das IV-Substitutionsmodell hat die Aufgabe den Substitutionsprozess zwischen den einzelnen Fahrzeugtypen zu gewichten. Die Gewichtung erfolgt ausschließlich durch Vergleich der einzelnen Gesamtkosten.

Ausgangspunkt für die Berechnung ist folgender Modellaufbau jedes einzelnen Fahrzeugtyps:

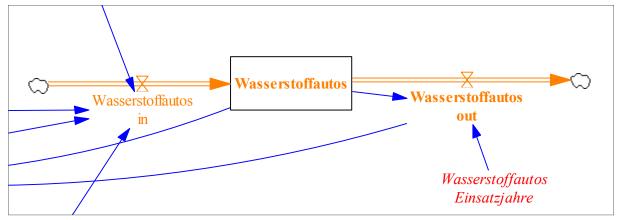


Abbildung 11-18, Modellaufbau Fahrzeugtyp, eigene Darstellung

## 11.3.2.1 DIE ABFLUSSVARIABLE

Die Anzahl der Fahrzeuge eines Fahrzeugtyps ist einerseits geprägt von einem Zufluss an neuen Fahrzeugen und von einem Abfluss an alten Fahrzeugen, die außer Betrieb gehen. Die Variable *Wasserstoffautos* gibt zum Beispiel die momentane Anzahl von Wasserstofffahrzeugen an.

$$Wasserstoffautos \ out = \frac{Wasserstoffautos}{Wasserstoffautos \ Einsatzjahre} \tag{11.20}$$

### 11.3.2.2 DIE ZUFLUSSVARIABLE

Der Zufluss eines Fahrzeugtyps hängt von der Kapazitätsdifferenz und dem Kostenverhältnis der einzelnen Fahrzeugtypen ab.

Die Kapazitätsdifferenz ist einfach die Differenz aus der Kapazität, welche aus dem Motorisierungsgrad errechnet wird und der vorhandenen Anzahl an Fahrzeugen – sozusagen das Potential für neue Fahrzeuge.

$$PFZ_{neu} = Kap - Hyb - Konv - H2 - Fwerke + Hyb_{out} + konv_{out} + Fwerke_{out} + H2_{out}$$
 (11.21)

Hyb	Hybridautos
Konv	konventionelle Autos
Н2	Wasserstoffautos
Fwerke	Fuhrwerke
Hyb <sub>out</sub>	Hybridautos out
konv <sub>out</sub>	konventionelle Autos out
Fwerke <sub>out</sub>	Fuhrwerke out
H2 <sub>out</sub>	Wasserstoffautos out (siehe Formel (11.20))

### 11.3.2.2.1 DIE KAPAZITÄT NEUER FAHRZEUGE

Nachdem im Teilmodell Systemgeschwindigkeit der Motorisierungsgrad errechnet worden ist, wird nun die *Kapazität Fahrzeuge* wie folgt definiert:

$$Kapazit \ddot{a}t \ Fahrzeuge = \frac{Motorisierungsgrad}{1000} *Bevölkerung \ \ddot{o}sterreich$$
 (11.22)

Die Variable *Kapazität Fahrzeuge* ist also nichts anderes als die Anzahl der PKW in Österreich zu jedem Zeitpunkt.

### 11.3.2.2.2 DIE IV-SUBSTITUTIONSFUNKTION

Die Substitutionsfunktion gibt an, mit welcher Geschwindigkeit der Substitutionsprozess zwischen den Fahrzeugtypen stattfindet. Es werden die einzelnen Kostenverhältnisse zwischen jedem Fahrzeugtyp gebildet und nach einer Funktion gewichtet.

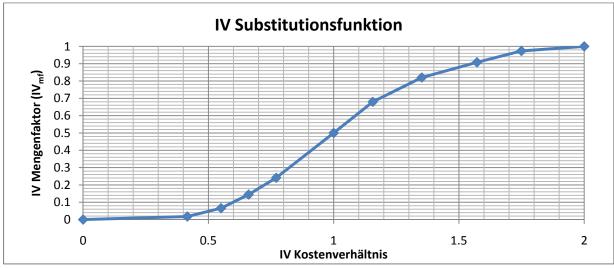


Abbildung 11-19, IV Substitutionsfunktion, eigene Darstellung

Der erste Schritt ist die Berechnung des IV Mengenfaktors (IVmf) jedes einzelnen Kostenverhältnisses. Ist das IV Kostenverhältnis grösser als der Faktor 2, wird für den IVmf ein Wert von 1 festgelegt (vgl. Abbildung 11-19).

$$konventionelle\ Autos\ in = P\ FZ_{neu}*IVmf\left(\frac{GK_F}{GK_{Auto}}\right)*IVmf\left(\frac{GK_{Hyb}}{GK_{Auto}}\right)*IVmf\left(\frac{GK_{H2}}{GK_{Auto}}\right) \tag{11.23}$$

### Beispiel:

Zwecks besserer Darstellung wurden in diesem Beispiel auf Brennstoffzellenfahrzeuge verzichtet.

 $Kapazität\ Fahrzeuge=1000$   $Summe\ Fahrzeuge=800$   $Potential\ für\ neue\ Fahrzeuge=1000-800=200$   $Fuhrwerke\ Gesamtkosten\ (GK_F)=1000$   $konventionelle\ Fahrzeuge\ Gesamtkosten\ (GK_{Auto})=1300$   $Hybridf\ ahrzeuge\ Gesamtkosten\ (GK_{Hyb})=3000$ 

$$\begin{split} \frac{GK_F}{GK_{Auto}} &= \frac{1000}{1300} = 0,77 \ (\rightarrow IV_{Mf} \sim 0,24) \\ \frac{GK_{Auto}}{GK_F} &= \frac{1300}{1000} = 1,3 \ (\rightarrow IV_{Mf} \sim 0,78) \\ \frac{GK_F}{GK_{Hyb}} &= \frac{1000}{3000} = 0,33 \ (\rightarrow IV_{Mf} \sim 0,01) \\ \frac{GK_{Hyb}}{GK_F} &= \frac{3000}{1000} = 3 \ (\rightarrow IV_{Mf} \sim 1) \\ \frac{GK_{Auto}}{GK_{Hyb}} &= \frac{1300}{3000} = 0,43 \ (\rightarrow IV_{Mf} \sim 0,02) \\ \frac{GK_{Hyb}}{GK_{Auto}} &= \frac{3000}{1300} = 2,3 \ (\rightarrow IV_{Mf} \sim 1) \end{split}$$

Fuhrwerke in = 
$$200 * 0.78 * 1 = 156$$
  
konv. Autos in =  $200 * 0.24 * 1 = 48$   
Hybrid Fahrzeuge in =  $200 * 0.01 * 0.02 = 0.04$ 

Ausgehend von einem Potential für neue Fahrzeuge von 200 wird es 156 neue Fahrzeuge bei den Fuhrwerken, 48 neue Fahrzeuge bei den konventionellen Autos und 0,04 neue Fahrzeuge bei den Hybridfahrzeugen geben. Insgesamt werden 204,04 neue Fahrzeuge bei einem Potential von 200 Fahrzeugen hinzukommen.

Da es in diesem dynamischen System vorkommen kann, dass das Potential neuer Fahrzeuge auch negativ ist (zu viele Fahrzeuge sind laut Motorisierungsgrad auf der Straße), wird mit der VENSIM Funktion "MAX" festgelegt, dass der Zufluss niemals negativ sein kann. Als Dämpfer im dynamischen System wird die VENSIM Funktion "SMOOTH" eingebaut. Das ist notwendig um eine Überempfindlichkeit im System zu verhindern. Eine Überempfindlichkeit würde ein Oszillieren der Fahrzeugfunktionen um die Kapazitätslinie bedeuten.

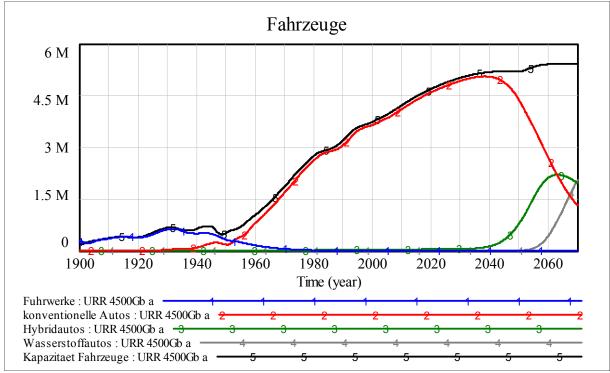


Abbildung 11-20, Variablen Fuhrwerke, konventionelle Autos, Hybridautos, Wasserstoffautos, Kapazität Fahrzeuge im Szenarium URR 4500Gb a, eigene Darstellung

### 11.3.3 DIE DURCHSCHNITTSGESCHWINDIGKEIT IM INDIVIDUALVERKEHR

In Kapitel 10.2.1 wurde in der Formel (10.4) die Variable *Durchschnittsgeschwindigkeit Individualverkehr* verwendet. Mit den Kenntnissen aus dem vorigen Kapitel folgt nun die Erklärung für diese Variable. Es werden für die einzelnen Fahrzeugtypen charakteristische Geschwindigkeiten festgelegt und anhand der Anzahl der einzelnen Typen gewichtet.

DO	$G_{IV} = \frac{DG_{Fwerke} * Fwerke + DG_{kA} * kA + DG_{Hyb} * Hyb + DG_{H2} * H2}{Fwerke + kA + Hyb + H2} * Verkehrsflussfaktor$	(11.24)
DG <sub>IV</sub>	Durchschnittsgeschwindigkeit IV	
DG <sub>Fwerke</sub>	Durchschnittsgeschwindigkeit Fuhrwerke	
Fwerke	Fuhrwerke	
DG <sub>kA</sub>	konventionelle Autos Durchschnittsgeschwindigkeit	
kA	konventionelle Autos	

DG <sub>Hyb</sub>	Durchschnittsgeschwindigkeit Hybridfahrzeuge
Hyb	Hybridfahrzeuge
DG <sub>H2</sub>	Durchschnittsgeschwindigkeit Brennstoffzellenfahrzeuge
H2	Brennstoffzellenfahrzeuge
Verkehrsflussfaktor	

### 11.3.3.1 DER LEVEL OF SERVICE

Der *Level of Service* ist aufgrund von limitierten Straßenkapazitäten ein Stufenmaß für die Verkehrsgeschwindigkeit im Individualverkehr. Sind zu viele Fahrzeuge auf der Straße unterwegs, ist ein freier Verkehrsfluss nicht mehr möglich und die Verkehrsgeschwindigkeit sinkt. Eine kleine Störung in diesem metastabilen Zustand, wie z.B. ein zu starkes Bremsen eines einzelnen Autos kann Stoßwellen im nachfolgenden Verkehr verursachen und ein Kollabieren des Systems bis hin zum Stau verursachen. <sup>124</sup> Der *Level of Service* soll die Durchschnittsgeschwindigkeit des Individualverkehrs, bei einer Überschreitung der maximalen Fahrzeugdichte im Modell, senken.

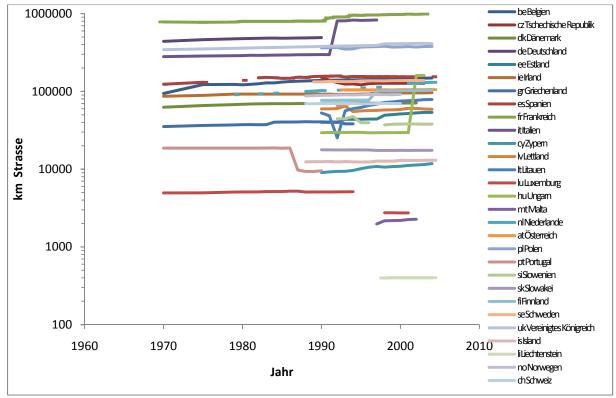


Abbildung 11-21, Gesamtlänge des nationalen Straßennetzes in Europa, eigene Darstellung Daten: EUROSTAT, Verkehr/Straßenverkehr/Länge der übrigen Straßen nach Straßenkategorien Internet: http://ec.europa.eu/eurostat, Stand: 12. Juli 2008

<sup>&</sup>lt;sup>124</sup> Philip BALL, *critical mass – how one thing leads to another*, London, 2005, Seite 197ff

Ausgangspunkt für die Berechnung der Auslastung ist das Straßennetz in Österreich. Wie alle Infrastrukturwege erreicht auch das Straßennetz einmal seine Sättigungsphase (vgl. Abbildung 7-8). In Europa hat das Straßennetz schon längst seine Sättigungsphase erreicht, wie Abbildung 11-21 deutlich macht. Die Straßenlänge blieb in den letzten drei Jahrzehnten in etwa konstant.

Das Straßennetz wird über eine logistische Funktion definiert. Siehe auch Kapitel 20.3.3 für eine Anmerkung des Autors zu den hierzu verwendeten Daten.

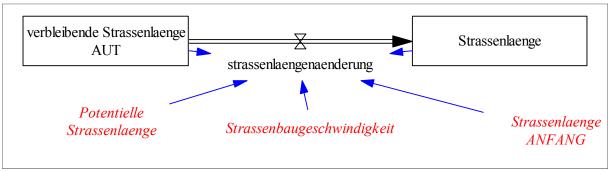


Abbildung 11-22, Modellaufbau Straßenlänge, eigene Darstellung

$$SL_{ar{a}nderung} = rac{verbleibende\ SL*Baugeschw*SL}{Potentielle\ SL - SL\ ANFANG}$$
 (11.25)
$$Straßenl\"{a}nge = \sum_{ENDE}^{ENDE} SL_{ar{a}nderung}_{i}$$
 (11.26)

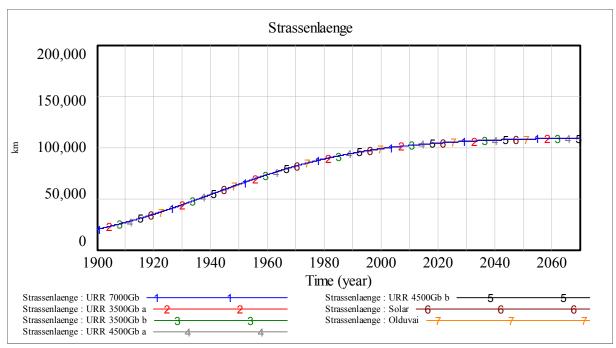


Abbildung 11-23, Variable Straßenlänge, eigene Darstellung

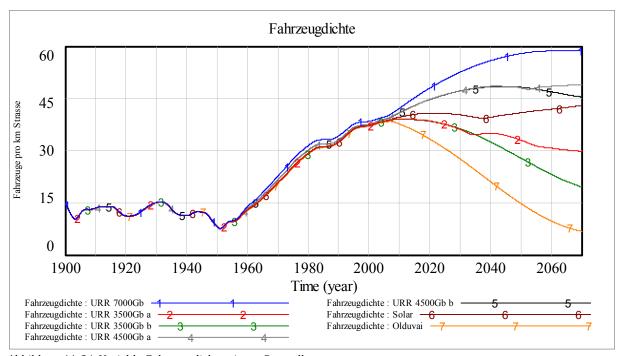


Abbildung 11-24, Variable Fahrzeugdichte, eigene Darstellung

Zwischen den Jahren 1900 und 1960 bleibt die Fahrzeugdichte in Österreich in etwa konstant. Gründe dafür sind einerseits die kontinuierliche Straßennetzerweiterung und das leichte Ansteigen der Fahrzeugflotte in diesem Zeitraum (vgl. Abbildung 11-20 und Abbildung 11-23). Ab den sechziger Jahren führt die steigende Motorisierung zu einem Ansteigen der Fahrzeugdichte auf den Straßen. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen wird der

Verkehrsflussfaktor definiert. Der Verkehrsflussfaktor gibt in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte den Anteil der potentiellen Durchschnittsgeschwindigkeit an. <sup>125</sup>

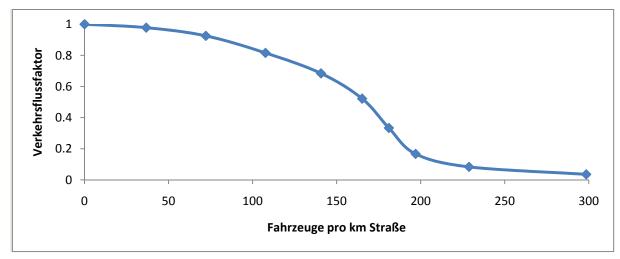


Abbildung 11-25, Die Staufunktion, eigene Darstellung

Im Jahr 2004 betrug das nationale Straßennetz rund 105.000km. <sup>126</sup> Bei einem Motorisierungsgrad von 507 PKW pro 1000 Einwohner und 8,2 Millionen Einwohner sind das rund 40 Fahrzeuge pro Kilometer Straße. Das heißt, dass der Verkehrsflussfaktor in allen Szenarien die durchschnittliche Geschwindigkeit nur marginal reduziert (vgl. auch Formel (11.24)).

<sup>-</sup>

 $<sup>^{125}</sup>$ siehe auch Dieter LOHSE, Werner SCHNABEL, Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Straßenverkehrsplanung, Berlin, 1980, Seite 75, 76

<sup>&</sup>lt;sup>126</sup>EUROSTAT, Daten, online

<sup>&</sup>lt;sup>127</sup> BMVIT, Verkehr in Zahlen 2007, Seite 80

<sup>&</sup>lt;sup>128</sup>STATISTIK AUSTRIA, Bevölkerungsstand 2007, online, Seite 17

# 12 System Dynamics - Das Gesamtmodell

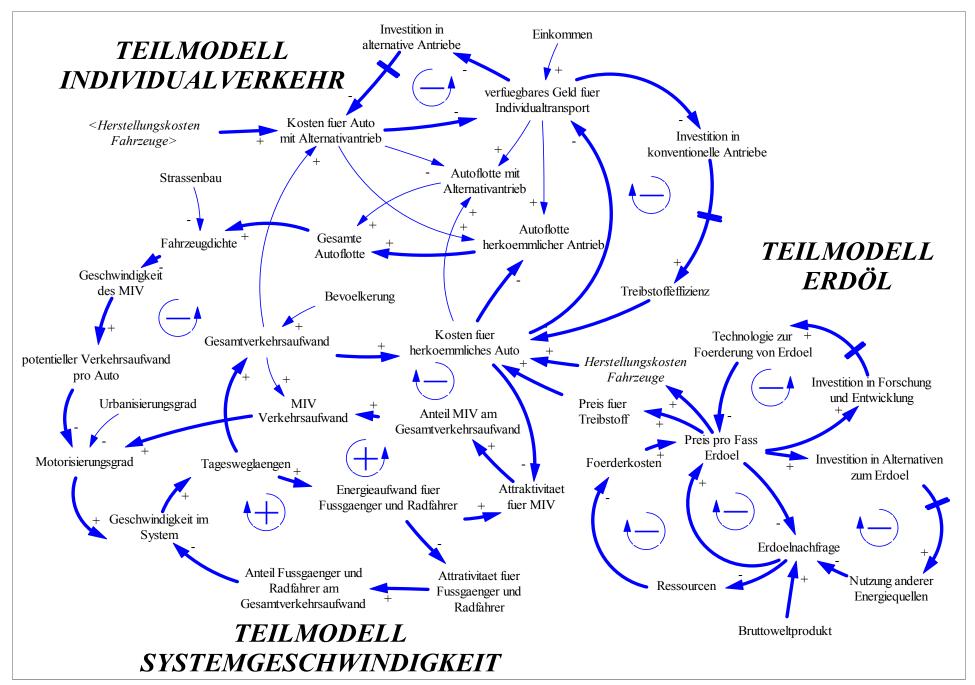
### 12.1 Causal Loop Diagramm Gesamtmodell

Die einzelnen Teilmodelle werden über folgende Entitäten in Bezug gebracht:

Das Teilmodell Erdöl wird mit dem Teilmodell Individualverkehr über die Entitäten "Preis für Treibstoff" und "Herstellungskosten Fahrzeuge" verbunden. Wird der Preis für ein Fass Erdöl höher, werden auch die Treibstoffpreise so wie die dadurch verursachten variablen Kosten für Autos steigen. Ein Ansteigen der Rohstoffkosten von Stahl, Aluminium und Kunststoffen führt zu größeren Herstellungskosten für Fahrzeuge, welche der Einfachheit halber in Abhängigkeit zum Preis pro Fass Erdöl gesetzt wurden. Diese zwei Teilmodelle sind nicht rückgekoppelt. Es besteht nur ein Zusammenhang in Richtung Teilmodell Individualverkehr und daher stellt diese Verbindung zwischen den Teilmodellen ein *offenes System* dar (vgl. Kapitel 8.2).

Zwischen den Teilmodellen Systemgeschwindigkeit und Individualverkehr bestehen folgende Rückkoppelungen: Werden die Kosten für den Individualverkehr höher, führt das zu einem Sinken der Attraktivität des Individualverkehrs. Steigt auf der anderen Seite der Gesamtverkehrsaufwand, steigt einerseits der Verkehrsaufwand des Individualverkehrs und andererseits steigen die variablen Kosten für Autos, weil längere Tagesweglängen zurückgelegt werden müssen.

Wird die gesamte Fahrzeugflotte im System größer, steigt dadurch die Fahrzeugdichte. Das Ansteigen der Fahrzeugdichte führt zu einer Abnahme der potentiellen Geschwindigkeit im Individualverkehr, was zu einer gleichzeitigen Abnahme des potentiellen Verkehrsaufwands pro Fahrzeug führt. Dieser Umstand führt dazu, dass der Motorisierungsgrad steigen wird.



# 13 VERGLEICH MODELL MIT EMPIRISCHEN DATEN

In diesem Kapitel sollen die Ausgangswerte des Modells mit empirischen Daten verglichen und damit festgestellt werden, ob das Modell in der Vergangenheit die Realität gut genug abbildet. Dabei soll aus Sicht der Systemdynamik die qualitative Charakteristik der einzelnen Funktionen den Vorrang bekommen. Ziel war es, das System Erdöl-Verkehr durch Vereinfachung, Reduzierung und Abstraktion in einen Ursache-Wirkungs-Prozess überzuführen. Durch eine größere Anzahl von Konstanten über die gesamte Zeitdauer vom Jahr 1900 bis 2070, (z.B. konstantes Reisezeitbudget, konstanter Anteil vom Einkommen für Verkehr, konstanter Verkehrsaufwand pro PKW, konstante Geschwindigkeiten der einzelnen Verkehrsmittel, wie auch konstante Entscheidungskriterien bei Einkommen, Infrastruktur, Kosten und Energie) kann das Modell unmöglich die genaue Realität abbilden. Grundidee der Systemdynamik ist die Reduzierung komplexer Sachverhalte auf qualitative Ursache-Wirkungsprozesse und auf Basis dieser, sollen die unten angeführten Vergleiche betrachtet werden.

Da die Zeitpunkte der ersten Datenerhebungen, sehr unterschiedlich von Prüfgröße zu Prüfgröße sind bzw. die Zeitpunkte noch nicht so weit in der Vergangenheit liegen, kann die Überprüfung eben nur in einem gewissen Zeitfenster passieren.

Um die Übereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Werten zu überprüfen, wird eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die Regressionsanalyse ist eine Minimierungsaufgabe unter folgender Bedingung: 129

$$\sum_{i=1}^{n} (ME_i - MT_i)^2 \to Minimum$$
(13.1)

In diesem Beispiel soll der Motorisierungsgrad einer berechneten Funktion mit statistisch erhobenen Daten verglichen werden.

$ME_i$	. statistisch erhobene Motorisierungskennzi	iffer in Fz/1000 Ew
$MT_i$	. mit der Trendkurve ermittelte Motorisieru	ngskennziffer in Fz/1000 Ew
<i>i</i>	. laufende Nummerierung der erhobenen M	otorisierungskennziffern von i bis n
	$MT_i = a + b * x_i$	(13.2)
X <sub>i</sub>	. Bezugszeit, Index i für Jahre	

Eine gute Anpassung zwischen Beobachtung und Modell ist bei folgenden Parametern gegeben: 130

135

<sup>&</sup>lt;sup>129</sup> Dieter LOHSE, Werner SCHNABEL, *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Straßenverkehrsplanung*, Berlin, 1980, Seite 593

- a ~0
- b~1
- R<sup>2</sup>~1

Folgende Parameter werden des Weiteren ausgewiesen um die Leistungsfähigkeit des Modells abzuschätzen: 131

- Summe der Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Werten (Formel (13.3))
- Summe der absoluten Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Werten (Formel (13.4))
- Summe der relativen Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Werten (Formel (13.5))
- Standardabweichung der oben genannten Parameter
- Maximalabweichung

## Summe der Abweichungen:

$$\sum_{i} (O_{i} - P_{i})$$

$$= beobachtete Werte$$

$$P_{i} berechnete Werte$$
(13.3)

Summe der absoluten Abweichungen:

$$\sum_{i} |O_i - P_i| \tag{13.4}$$

Summe der relativen Abweichungen:

$$\sum_{i} \left( 1 - \frac{P_i}{O_i} \right) \tag{13.5}$$

<sup>&</sup>lt;sup>130</sup> Dieter LOHSE, Werner SCHNABEL, *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung,* Band 2: Verkehrsplanung, Berlin, 1997, Seite 229

<sup>&</sup>lt;sup>131</sup> Werner BALZ, Helmut FRIK, *Teil II: Modellkalibrierung und –bewertung* in *Entwicklung von Verfahren* zur großräumigen Prognose der Verkehrsentwicklung und Folgerungen für den Datenaustausch von Verkehrsrechnerzentralen, Bonn-Bad Godesberg, 1997, Seite 123

#### 13.1 Produktionsrate Erdöl

Die Produktionsrate von Erdöl wurde im Modell anhand des Bruttoweltproduktes errechnet.

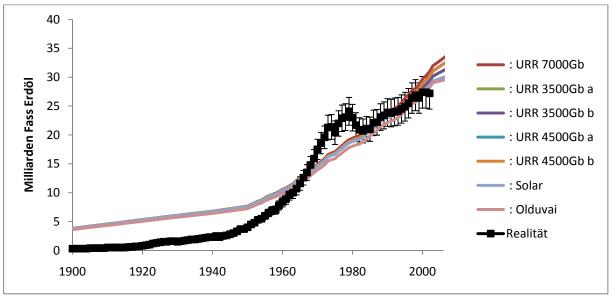


Abbildung 13-1, Modellevaluierung: Produktionsrate Erdöl, eigene Darstellung

Daten (1880-1984): MOORE D. S., McCABE G. P. (1989). *Introduction to the Practice of Statistics*. New York, Seite 109 Daten (1984-2006): BP (2008). *Statistical Review 2008*, Internet:

http://www.bp.com/liveassets/bp\_internet/globalbp/globalbp\_uk\_english/reports\_and\_publications/statistical\_ener gy\_review\_2008/STAGING/local\_assets/downloads/pdf/statistical\_review\_of\_world\_energy\_full\_review\_2008.pdf, Stand: 29. Juli 2008

Das Modell kann die anfänglichen Produktionsraten von Erdöl nur schlecht abbilden. Der Produktionsanstieg ab dem Jahr 1950 kann qualitativ gut abgebildet werden, wobei die Jahre zwischen erster Ölkrise 1973 und der zweiten Ölkrise 1979 nur zum Teil gut simuliert werden. Die Jahre von 1982 bis zur Gegenwart können innerhalb der 10%-Fehlertoleranzgrenze dargestellt werden.

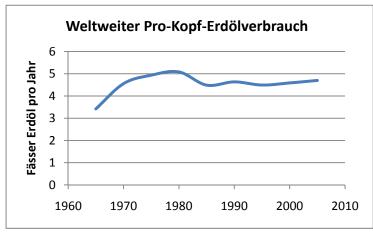


Abbildung 13-2, weltweiter Pro-Kopf-Erdölverbrauch in Fässer pro Jahr, Daten: BP, Statistical Review 2008

http://www.bp.com/liveassets/bp\_internet/globalbp/globalbp\_uk\_eng lish/reports\_and\_publications/statistical\_energy\_review\_2008/STAGIN G/local\_assets/downloads/pdf/statistical\_review\_of\_world\_energy\_full \_review\_2008.pdf, Stand: 29. Juli 2008

Man erkennt hier deutlich, dass exogene Faktoren, welche nicht im Modell implementiert sind, für die Abweichung verantwortlich sein müssen. Die Krisen in den 70er und 80er Jahren führten nach Jahren kontinuierlicher Zuwachsraten, zu einem konstanten Erdölverbrauch

pro Kopf. Diese Tatsache erklärt die mangelnde Abbildungsqualität im Modell.

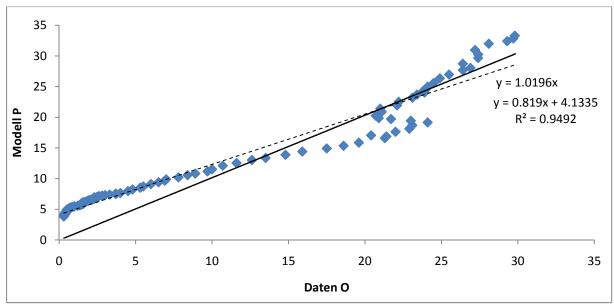


Abbildung 13-3, Vergleich beobachtete und errechnete Werte für den Zeitraum von 1900 bis 2006, *Produktionsrate Erdöl*, eigene Darstellung und Berechnung

Tabelle 13-1, Parameter für Produktionsrate Erdöl, eigene Darstellung und Berechnung

Indikator	Abweichung	absolute Abweichung	relative Abweichung
Summe	-238.97	339.83	-271.20
Standardabweichung	2.71	1.48	3.65
Median	-3.52	3.78	-0.61
Maximum	4.93	4.93	0.22

## 13.2 DER PREIS PRO FASS ERDÖL

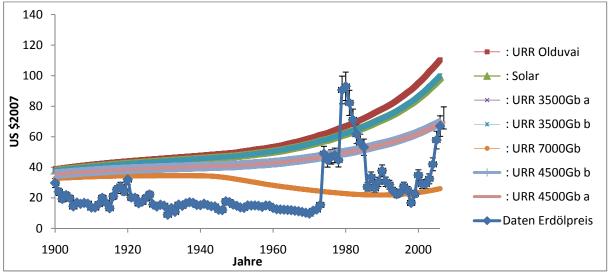


Abbildung 13-4, Vergleich Modell mit empirischen Daten, realer Preis pro Fass Erdöl, eigene Darstellung Daten: BP, Statistical Review 2008

Internet:

 $http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and\_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_review_2008.pdf, Stand: 31. August 2008$ 

Die Kosten bzw. der Preis pro Fass Erdöl können vom Modell nur sehr schlecht abgebildet werden. Die große Sensibilität des Preises von Erdöl gegenüber Produktionsregulierungen, Raffinationsengpässen, Kriegen etc. machen eine Modellierung anhand nur weniger Parameter im kurzfristigen Kontext nicht möglich. Das Modell geht von idealen Parametern, wie einer kontinuierlichen Produktion, keinen Anschlägen oder Kriege und ausreichenden Kapazitäten bei der Raffination von Erdöl aus. Insofern kann das Modell hier keine präzisen, kurzfristigen Preisinformationen liefern, aber sehr wohl den langfristigen Trend der Preisfunktion einer nicht erneuerbaren Ressource.

Zur Parameterbestimmung wurden die Best-Case (URR 7000Gb) und Worst-Case (Olduvai) Modelldaten herangezogen.

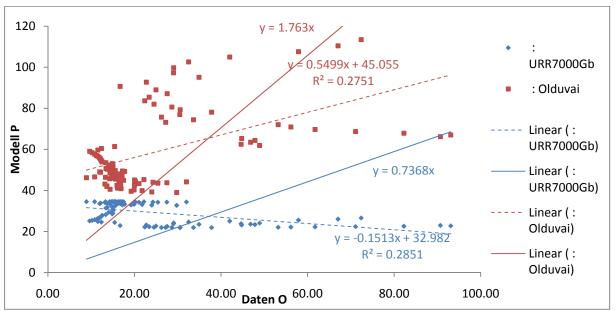


Abbildung 13-5, Vergleich beobachtete und errechnete Werte für den Zeitraum von 1900 bis 2006, Preis pro Fass Erdöl, eigene Darstellung und Berechnung

Tabelle 13-2, Parameter für Preis pro Fass Erdöl, blau: URR 7000Gb, rot: Olduvai, eigene Darstellung und Berechnung

	=		
Indikator	Abweichung	absolute Abweichung	relative Abweichung
Summe	-488.32/-3664,15	1895.02/3798.83	-69.11/-210.89
Standardabweichung	20.70/17.60	11.76/14.92	0.79/1.16
Median	-14.59/-33.07	15.80/33.07	-0.95/-1.94
Maximum	70.32/26.08	70.32 <b>/</b> 74.01	0.76/0.28

#### 13.3 DER MOTORISIERUNGSGRAD

Der Motorisierungsgrad ist laut Definition das Verhältnis von PKW zu 1000 Einwohnern. Im Modell wurde der Motorisierungsgrad für das Verhältnis von allen Fahrzeugen (also auch Fuhrwerke, Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge) zu 1000 Einwohnern verwendet. Um die Werte vergleichen zu können, wurden in Abbildung 13-6 nur die konventionellen Fahrzeuge herangezogen.

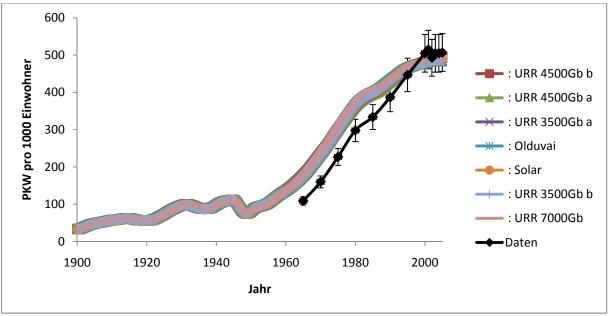


Abbildung 13-6, Vergleich Modell mit empirischen Daten, Motorisierungsgrad, , eigene Darstellung Daten: BMVIT Österreich, Verkehr in Zahlen 2007 Internet: http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz07gesamt.pdf, Stand: 29. August

2008, Seite 81

Die Vergleichsdaten für den Motorisierungsgrad gehen bis in das Jahr 1965 zurück. Es zeigt sich, dass das Modell die Werte um den heutigen Tag am besten approximiert, wenngleich die Motorisierungsgrade in den Jahren von 1965 bis 1990 zu hoch berechnet werden. Die qualitative Gestalt der Daten, welche von einem relativ konstanten Motorisierungsgrad in den Jahren von 2000 bis 2005 gekennzeichnet ist, kann durch ein Abflachen der Szenarienfunktionen in diesen Jahren gut dargestellt werden.

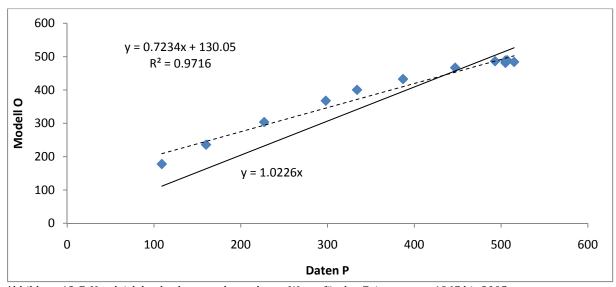


Abbildung 13-7, Vergleich beobachtete und errechnete Werte für den Zeitraum von 1965 bis 2005, *Motorisierungsgrad*, eigene Darstellung und Berechnung

Tabelle 13-3, Parameter für Motorisierungsgrad, eigene Darstellung und Berechnung

<u> </u>		, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
Indikator	Abweichung	absolute Abweichung	relative Abweichung
Summe	-309.60	535.93	-1.81
Standardabweichung	43.95	26.55	0.22
Median	-19.77	30.86	-0.04
Maximum	30.86	76.72	0.06

## 13.4 GESAMTVERKEHRSAUFWAND

Der Gesamtverkehrsaufwand berechnet sich im Modell durch die Ausgangsgröße der Streckenlänge pro Weg. Mit der Multiplikation der konstanten Wege pro Tag, der Anzahl der Tage pro Jahr und der Bevölkerung Österreichs ergibt sich der Gesamtverkehrsaufwand pro Jahr. Er fasst alle Verkehrsmittel im Modell zusammen und dient als Überprüfungsgröße für die Parameterwahl.

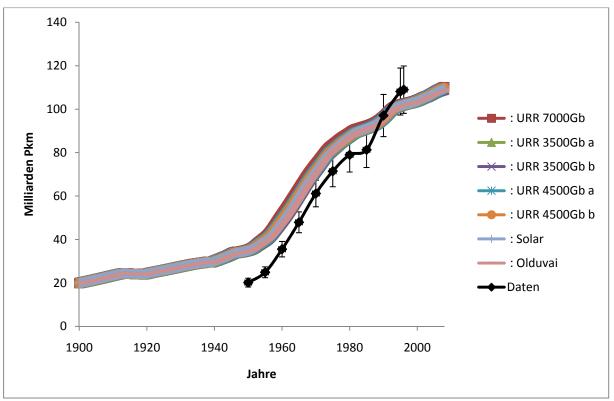


Abbildung 13-8, Vergleich Modell mit empirischen Daten, Gesamtverkehrsaufwand, eigene Darstellung Daten (von 1950-1996): BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, Umweltbilanz Verkehr - Zahlenspiegel, Österreich 1950-1996, 1997, Seite 20, 21

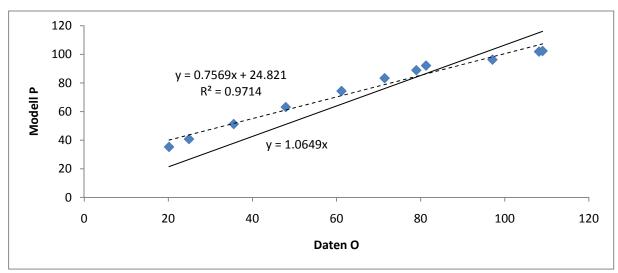


Abbildung 13-9, Vergleich beobachtete und errechnete Werte für den Zeitraum von 1950 bis 1996, *Gesamtverkehrsaufwand*, eigene Darstellung und Berechnung

Tabelle 13-4, Parameter für Gesamtverkehrsaufwand, eigene Darstellung und Berechnung

	1		
Indikator	Abweichung	absolute Abweichung	relative Abweichung
Summe	-94.19	121.35	-2.66
Standardabweichung	8.75	4.83	0.27
Median	-11.92	11.92	-0.17
Maximum	6.61	15.83	0.06

## 13.5 VERKEHRSAUFWAND PKW

Die Entwicklung des Personenverkehrs ist gekennzeichnet durch den enormen Anstieg des Autoverkehrs ab den sechziger Jahren, worin sich einerseits die private Massenmotorisierung und die parallel dazu stark autoorientierte Verkehrspolitik dieser Zeit widerspiegeln.

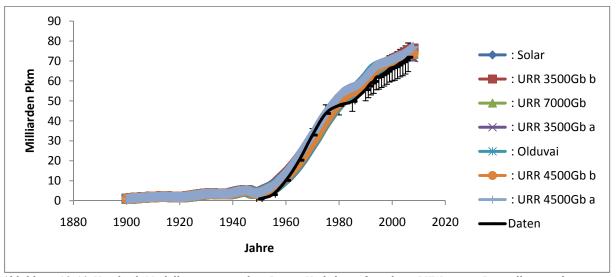


Abbildung 13-10, Vergleich Modell mit empirischen Daten, *Verkehrsaufwand von PKW*, eigene Darstellung und Berechnung

Daten (von 1950-1985): BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE,  $Umweltbilanz\ Verkehr$  - Zahlenspiegel,  $Österreich\ 1950-1996$ , 1997, Seite 20, 21

Daten (1990-2006): EUROSTAT, Energy and Transport in Fugures 2007, Part 3: Transport Internet: http://ec.europa.eu/dgs/energy\_transport/figures/pocketbook/doc/2006/2006\_transport\_en.xls, Stand: 14. August 2008

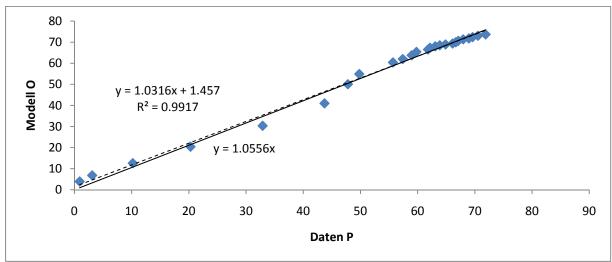


Abbildung 13-11, Vergleich beobachtete und errechnete Werte für den Zeitraum von 1950 bis 2006, *Verkehrsaufwand PKW*, eigene Darstellung und Berechnung

Tabelle 13-5, Parameter für Verkehrsaufwand PKW, eigene Darstellung und Berechnung

Indikator	Abweichung	absolute Abweichung	relative Abweichung
Summe	-77.68	88.31	-5.83
Standardabweichung	2.15	1.29	0.69
Median	-3.35	3.35	-0.06
Maximum	2.74	5.57	0.08

#### 13.6 DER VERKEHRSMITTELANTEIL AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND

Der Verkehrsmittelanteil der einzelnen Verkehrsteilnehmer am Gesamtverkehrsaufwand zeigt den Paradigmenwechsel der gesamten Verkehrspolitik ab Mitte des 20. Jahrhunderts. Während die klassischen Verkehrsteilnehmer wie Fußgeher, Radfahrer und die Eisenbahn im Jahr 1950 noch mehr Anteile hatten als der PKW, gingen diese sprunghaft in den sechziger Jahren zurück. Innerhalb von 20 Jahren wurde die gesamte Verkehrsstruktur auf den Kopf gestellt und der PKW konnte seit den siebziger Jahren seinen Anteil von rund 73% halten, während alle anderen Verkehrsteilnehmer bei 14% (Eisenbahn+ÖV) bzw. um die 8% (Fußgeher+Radfahrer) seitdem liegen. Der Vergleich mit dem Modell zeigt, dass dieser Strukturwandel der sechziger Jahre von der Qualität her gut abgebildet werden kann. Es kann jedoch nicht mit der Geschwindigkeit mithalten, mit welcher dieser Anteilswechsel stattgefunden hat. Weiters ist zu erkennen, dass im Modell der Anteil der Fußgeher und Radfahrer um eine Spur höher liegt, als der der Eisenbahn, obwohl in der Realität dieses Verhältnis genau anders herum ist.

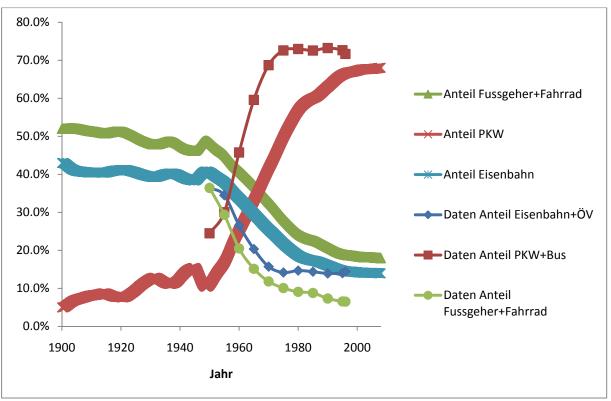


Abbildung 13-12, Vergleich Modell mit empirischen Daten, *Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer*, Eigene Berechnung und Darstellung Daten: BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, *Umweltbilanz Verkehr - Zahlenspiegel, Österreich* 

Daten: BUNDESMINISTERIUM FUR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, *Umweltbilanz Verkehr - Zahlenspiegel, Osterreich* 1950-1996, 1997, Seite 20, 21

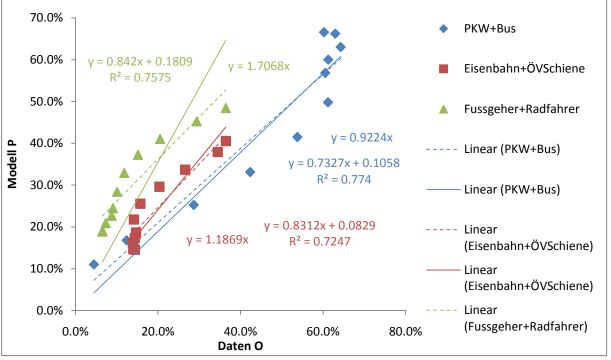


Abbildung 13-13, Vergleich beobachtete und errechnete Werte für den Zeitraum von 1950 bis 1996, Verkehrsmittelanteil nach Gesamtverkehrsaufwand, eigene Darstellung und Berechnung

#### 13.7 ZUSAMMENFASSUNG

Das Modell kann die wichtigsten Verkehrsparameter für Österreich gut darstellen. Für den Motorisierungsgrad, den Gesamtverkehrsaufwand und den Verkehrsaufwand PKW kann ein R<sup>2</sup>>0,97 erzielt werden. Beim Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand "hinkt" das Modell den empirischen Daten hinterher, wobei der generelle Trend – der Wechsel zu einer autolastigen Verkehrsstruktur in den sechziger und siebziger Jahren, ersichtlich ist.

Die Produktionsfunktion kann anhand des Bruttoweltproduktes gut dargestellt werden (R<sup>2</sup>>0,95). Die Preisfunktion für ein Fass Erdöl kann nur im langfristigen Trend wiedergegeben werden. Für kurzfristige Analysen ist das Modell nicht geeignet und bedarf es eines komplexeren, ergänzt mit ökonomischen Regelkreisen basierenden Modells.

## 14 Kritische Betrachtung des Modells

Wie jedes Modell, versucht auch dieses Modell die Realität mit ihren systemdynamischen Zusammenhängen abzubilden. Um das Modell kompakt zu halten wird auf externe Einflussgrößen größtmöglich verzichtet. Es soll dadurch möglich sein, die Stärken der Systemdynamik mit ihren verschiedenen Rückkopplungen innerhalb der Systemgrenzen auszunützen und das Modell "arbeiten" zu lassen.

Die Tatsache, dass sich die gesamte Realität nicht abbilden lässt, führt zu einer Abstraktion in der Modellierungsphase. Elemente, welche für das Modell nicht wesentlich sind, werden einfach weggelassen. Das führt zwangshalber zu Einschränkungen in der Aussagekraft eines Modells. Durch die Zielsetzung des Autors, ein Modell zu entwickeln, welches einen langfristigen Trend oder eine qualitative Richtung abbilden kann, ist es wichtig resultierende Ergebnisse auch unter eben diesem Gesichtspunkt zu interpretieren.

Im Folgenden werden die einzelnen Teilmodelle und deren Annahmen kritisch betrachtet und auf Abstraktionen und Einschränkungen eingegangen.

#### 14.1 TEILMODELL ERDÖL

Das Teilmodell Erdöl basiert auf drei Regelkreisen, welche unter anderem den Preis pro Fass Erdöl bestimmen. Der Preis setzt sich im Modell aus der Nachfrage, dem technologischen Fortschritt und der Erschöpfung der Ressource zusammen. Dieser soll einen langfristigen Trend abbilden und keine genauen Preisauskünfte zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft geben können. Aus diesem Grund werden Instrumente, welche im kurzfristigen Kontext starken Einfluss auf den Erdölpreis haben können, abstrahiert. Auf Aspekte, wie kurzfristige Produktionsstopps aufgrund von Krisen oder Kriegen, Überlegungen bezüglich der Produktionsquoten innerhalb von Kartellen (vgl. Gefangenendilemma), oder auch Spekulationsgeschäfte mit Erdöl, wird in diesem Modell nicht eingegangen, da sie keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf den langfristigen Trend haben.

Österreich ist auf dem Erdölmarkt durch seine Möglichkeiten zur Einflussnahme nur ein Preisnehmer. Das bedeutet, es kann Erdöl auf dem Markt nur zu vorgegebenen Preisen einkaufen und diesen nicht beeinflussen. Andere Staaten oder Vereinigungen wie die OPEC haben genug Marktstärke um den Preis durch Angebotsbeschränkungen zu beeinflussen. Aus diesem Grund wurden unmittelbare Einflüsse Österreichs auf die Erdölverfügbarkeit außer Acht gelassen und nicht im Modell implementiert.

Es wird in den Berechnungen von einem konstanten Wachstum des Bruttoweltproduktes von 1 bis 2% bis in das Jahr 2070 ausgegangen (vgl. Kapitel 9.2.1.3.1). Abbildung 9-15 zeigt, dass das mittlere BWP-Wachstum ab Mitte der 80er Jahre bei ca. 2-3% liegt. In den Jahren der Ölkrisen, bricht das BWP-Wachstum bis knapp über 0% zusammen. Die Abbildung macht weiterhin deutlich, dass die Verläufe der Kurven sehr volatil sind und auf externe Ereignisse, wie Kriege oder Terroranschläge sehr sensibel reagieren.

Mit einer BWP-Wachstumsrate von 1% im Szenarium OLDUVAI bzw. 2% in allen anderen Szenarien wird das BWP-Wachstum und somit das Erdölnachfragewachstum als sehr moderat angenommen. Auch unter dem Aspekt einer steigenden Weltbevölkerung mit Wachstumsraten zwischen 0,36 und 1,17% ist die weltweite Erdölnachfrage sehr konservativ modelliert worden.

Tabelle 14-1, Bevölkerungswachstum weltweit

Daten: UNITED NATIONS COMMON DATABASE (UNCDB), Population growth rate, medium variant

 $Internet: http://unstats.un.org/unsd/cdb\_discontinued.asp, Stand: 11.\ Dezember\ 2008$ 

Jahre	2005-	2010-	2015-	2020-	2025-	2030-	2035-	2040-	2045-
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Jährliche Wachstumsraten	1,17%	1,1%	1,0%	0,88%	0,75%	0,64%	0,54%	0,45%	0,36%

Angesichts der Grenzen des Wachstums, die sich in Tabelle 14-1, wie auch in den rückgehenden Bevölkerungswachstumsraten widerspiegeln, darf auch bezweifelt werden, ob das BWP weiterhin exponentiell steigen kann. Dies soll jedoch die Ökonomen an dieser Stelle beschäftigen und nicht Gegenstand dieser Dissertation sein.<sup>132</sup>

#### 14.1.1 DIE FINANZKRISE 2007/2008

Die jüngste Finanzkrise und die daraus resultierende Wirtschaftskrise, zeigen wie unsicher es ist über einen so langen Zeitraum eine konstante Wachstumsrate festzulegen. Im Modell wird das BWP als Maß für die Erdölnachfrage verwendet. Die Erdölnachfrage ist aber nicht zuletzt aufgrund mangelnder existierender Alternativen und steigender Weltbevölkerungszahlen für die nächsten zwei Jahrzehnte als steigend anzunehmen. Die fallende Nachfrage nach Erdöl kann sehr gut durch ein Absinken des Bruttoweltproduktes dargestellt werden. Als Konsequenz im Modell ergäbe sich eine zeitliche Verschiebung der zu erwartenden Produktionsspitze.

Die kurzfristigen Preisänderungen können jedoch nicht dargestellt werden und würden eine Entkopplung von Nachfrage und Produktion notwendig machen. So könnte man einerseits die Ölkrise in den 70er Jahren mit steigenden Ölpreisen und andererseits die sinkenden Ölpreise,

-

<sup>132</sup> vgl. Dennis L. MEADOWS, Limits to Growth - The 30-Year Update, White River Junction, 2004

ausgelöst durch die momentane Wirtschaftskrise, modellieren. Der Drosselung der Fördermengen in den 70er Jahren durch die OPEC stand eine stark gestiegene Nachfrage nach Erdöl aus den 60er und Anfang der 70er Jahre gegenüber. Notwendige Konsequenz war der rapide Anstieg des Erdölpreises.

Bei der momentanen Wirtschaftskrise könnte man die Situation genau gleich modellieren. Durch die starken Wirtschaftsjahre vor der Krise und der daraus stark angestiegenen Erdölnachfrage, kletterte der Erdölpreis bei ziemlich gleichgebliebener Erdölproduktion kontinuierlich hinauf. Die Wirtschaftskrise ließ nun die Erdölnachfrage rasch sinken. Die OPEC ist seitdem bemüht durch Produktionsdrosslungen den Preis zu stabilisieren.

Diese Entkopplung von Produktion und Nachfrage wäre der nächste Schritt bei der Erweiterung des Modells. So könnten auch kurzfristige Preisänderungen dargestellt werden.

Durch die Implementierung eines Substitutionsenergieträgers im Modell, welcher je nach Szenarium einen gewissen Anteil auffangen kann, wird die Nachfrage nach Erdöl vom BWP schrittweise losgelöst. Dies muss auch langfristig passieren um ein steigendes Wirtschaftswachstum bei schwindenden Erdölreserven aufrecht halten zu können.

#### 14.2 TEILMODELL SYSTEMGESCHWINDIGKEIT

Im Teilmodell Systemgeschwindigkeit werden viele konstante Größen eingeführt. Das Reisezeitbudget ist im globalen Kontext, mit geringen vereinzelten Schwankungen, in etwa konstant. Mit der weiteren Zuhilfenahme der konstanten Wegeanzahl, des konstanten Besetzungsgrades und des konstanten Verkehrsaufwands pro PKW kann der Motorisierungsgrad sehr kompakt und einfach berechnet werden. Der Vergleich mit empirischen Daten zeigt, dass die Abbildung des Motorisierungsgrades (siehe Abbildung 13-6) sehr gut gelungen ist, trotz eines hohen Abstraktionsgrades.

Die Kalibrierung der einzelnen zeitlichen Konstanten erfolgte mit Blick auf das Mobilitätsverhalten und den Personenverkehr in Österreich. Da die einzelnen Konstanten zwar zeitlich für das gewählte Untersuchungsgebiet ein sehr stabiles Verhalten aufweisen, jedoch von Land zu Land im Querschnitt verändert werden müssen, ist das Modell vorab für jedes Untersuchungsgebiet gesondert zu kalibrieren (siehe z.B. Abbildung 10-19).

Bei der Wahl des Verkehrsmittels wurde auf ein Rational-Choice-Modell zurückgegriffen. Die Faktoren Einkommen, Infrastruktur, Kosten, Energie und Zeit bestimmen die Wahl des geeigneten Verkehrsmittels. Der Ansatz eines Rational-Choice-Modells, geht von vernünftigen Entscheidungsträgern aus. Trotz der Tatsache, dass der einzelne Mensch oft von irrationalem und sehr schwer durch Modelle darzustellendem Verhalten geprägt ist, konnte eine gute Abbildung mit wenigen Entscheidungsfaktoren realisiert werden. Abbildung 13-12 zeigt, dass das Modell den Daten zeitlich etwas hinterher hinkt, aber das generelle Verhalten von langsamen zu schnellen Verkehrsmitteln gut dargestellt werden konnte.

#### 14.3 Teilmodell Individualverkehr

Durch den Umstand, dass das Modell einen Zeitraum vom Jahr 1900 bis zum Jahr 2070 abbildet und sich die Art des Individualverkehrs in der Vergangenheit und sehr wahrscheinlich in der Zukunft auch ändern wird, ist ein eigenes Teilmodell für den Individualverkehr notwendig. Die steigenden Benzin- und Dieselpreise der letzten Jahre sind wie ein Motor für Erfindungen und Weiterentwicklungen im Bereich des Automobilbereiches. Viele Automobilhersteller erkennen das Potential für neue Technologien, andere hingegen verschlafen doch regelrecht die Chancen am Automobilsektor. Viele Weiterentwicklungen und Technologien werden derzeit verfolgt und es ist nicht vorab zu erkennen, welche Technologien sich schlussendlich am Markt durchsetzen werden. Erfindungen, welche vor hundert Jahren oder noch früher gemacht wurden, wie Elektromotoren oder Stirlingmotoren, erleben zurzeit einen zweiten Frühling.

Viele Automobilhersteller setzen auf die Weiterentwicklung von Hybridmotoren und Brennstoffzellen. In dieser Dissertation wurden eben jene beiden Technologien gewählt, da sie einerseits viel Potential aufweisen und auch, ihrer Marktreife betreffend, zeitlich versetzt sein dürften.

Aus modelltechnischen Gründen wurde eben nur auf die zwei erwähnten Technologien Bezug genommen. Durch die Implementierung von drei oder vier neuen Technologien wäre das Modell um einiges aufwendiger geworden ohne einen wirklich zusätzlichen Informationsgehalt.

Mit zwei Technologien erkennt man deutlich den typischen Kurvenverlauf eines Substitutionsprozesses, wie in Kapitel 7.5 beschrieben. Die Zeit wird zeigen, ob der Autor mit der Wahl von Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen richtig gelegen ist, oder ob andere Technologien aufkommen werden.

Die Tatsache, dass das Automobil mit konventionellem Verbrennungsmotor, steigenden Treibstoffpreisen und der Einführung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten vom Markt mittelfristig verschwinden wird, ist jedoch aus Sicht des Verfassers unbestritten.

# 15 SZENARIENENTWICKLUNG

Ziel des Modelles ist, einen Ausblick in die Zukunft zu geben anhand verschiedener Szenarien. Während das Modell einerseits die Vergangenheit abbilden soll und mit Werten aus der Vergangenheit kalibriert worden ist, soll es andererseits ein Bild von zukünftigen relevanten Verkehrsparametern in Österreich wiedergeben.

### 15.1 SZENARIUM URR 7000 GB

Szenarium *URR 7000 Gb* soll einen Blick in die Zukunft werfen, unter der Annahme sehr großer Erdölressourcen und einer starken Einkommensentwicklung in Österreich. "URR" steht dabei für "Ultimate Recoverable Reserves", also das Gesamtpotential, und die Abkürzung "Gb" steht für "Gigabarrels", also "Milliarden Fass".

Durch die Tatsache, dass das Potential von unkonventionellem Erdöl sehr schwer abschätzbar ist, sollen in diesem Szenarium die Auswirkungen auf Verkehrsparameter in Österreich bei ausreichendem Erdölangebot für die nächsten Jahrzehnte untersucht werden. Als Motor für den Erdölverbrauch wird ein starkes Wachstum des Bruttoweltproduktes angenommen. Für Österreich wird ein realer Bruttoeinkommenszuwachs von drei Prozent angenommen.

Der technologische Fortschritt bei der Produktion von Erdöl führt zu einem Anwachsen der Erdölreserven. Die Produktionskosten können so gering gehalten werden, auch wenn die Lagerstätten tiefer in der Erde liegen. Verbesserte Produktionsmethoden machen den Abbau von unkonventionellem Erdöl wie Ölsande wirtschaftlich attraktiv und Nationen wie Venezuela und Kanada beginnen im großen Maß diese Lagerstätten zu erschließen. Gleichzeitig bewirkt das Ansteigen der Welttemperatur eine Erschließung von Lagerstätten, die bis jetzt nicht zugänglich waren. Die Erwärmung der Polregionen, führt zu einem Wettlauf der umliegenden Nationen. Dänemark, Kanada, die USA, Russland und Norwegen erheben territorialen Anspruch in der Arktis und mit einer angespannten politischen Situation ist zu rechnen.

Das Wirtschaftswachstum auf der Welt wird vor allem durch Nationen wie Indien und China hochgehalten. Die Öffnung Chinas gegenüber den westlichen Nationen führt zu einem massiven Anstieg von ausländischen Investitionen. Das geringe Lohnniveau, keine oder nur wenige Umweltauflagen und das in Überfluss vorhandene Humankapital bewirken eine Auslagerung von Produktionsstätten in Richtung China. Die Flucht westlicher Unternehmen in das Reich der Mitte, bedeutet für China gleichzeitig auch die Akquisition geistigen Kapitals. Die Chinesen werden nun ihr erlangtes Wissen umsetzen und selber in Industriebereiche vorstoßen, die ihnen

bis jetzt vorenthalten gewesen waren. Die Luftfahrtindustrie, Automobilindustrie, oder auch die Weltraumfahrt werden in China von nationalem Interesse werden. Es wird nicht lange dauern bis chinesische Flugzeuge und Automobile den internationalen Markt mitbestimmen werden.

Das Gesamtpotential von Erdöl beträgt 7000 Milliarden Fass. Bis zum heutigen Datum wurden erst 1500 Milliarden Fass Erdöl produziert. Die Nachfrage nach Erdöl steigt seit den Sechzigerjahren kontinuierlich an und beträgt im Jahr 2007 33,5 Milliarden Fass. Durch das angenommene starke Wirtschaftswachstum und den großen zur Verfügung stehenden Reserven wird sich auch die Erdölnachfrage kontinuierlich bis auf 57,2 Milliarden Fass pro Jahr steigern. Es wird erst mit einem Erdölproduktionsmaximum um das Jahr 2053 gerechnet. Der Preis für das Fass Erdöl bleibt bis ins Jahr 2048 unter 100 \$2006 und wird erst mit dem Erreichen der Produktionsspitze ansteigen. Die Investitionstätigkeit in neue Produktionstechnologien ist angesichts der großen und damit auch leicht zugänglichen Reserven – verglichen mit allen Szenarien – mit Abstand am niedrigsten und auch für lange Zeit nicht notwendig.

Das Überangebot von Erdöl als primären Energieträger hemmt auch den wirtschaftlichen Anreiz in neue Technologien zu investieren. Der Substitutionsanteil einer neuen Energiequelle bleibt für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts unter zehn Prozent und wird bis ins Jahr 2070 erst auf 41% anwachsen. Der schwach steigende Treibstoffpreis verlangsamt auch drastisch die Investitionen in die Hybrid- und Brennstoffzellentechnologie, sowie auch die Investitionen in treibstoffsparende Verbrennungsmotoren. Aus diesem Grund bleiben Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge viel zu teuer und sind für die Bevölkerung nicht interessant, solange die Treibstoffpreise so niedrig bleiben.

Auch wenn der technologische Fortschritt bei Hybrid- bzw. Brennstoffzellenfahrzeugen im Modell verändert wird, zeigen sich in beiden Fällen die gleichen Ergebnisse. Der Anreiz für eine Entwicklung von alternativen Antriebsformen ist nicht gegeben und das konventionelle Automobil bleibt der einzige Fahrzeugtyp über die nächsten Jahrzehnte. Erst ab dem Zeitpunkt der Produktionsspitze, kann man ein leichtes Ansteigen der Hybridfahrzeuge feststellen.

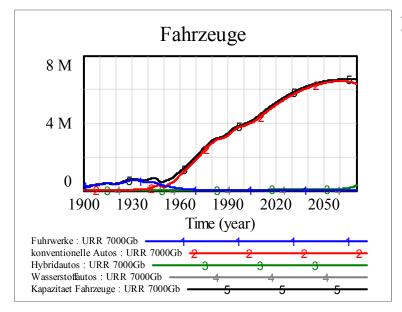


Abbildung 15-1, Szenarium *URR 7000 Gb*, eigene Darstellung

Da der Treibstoffpreis für lange Zeit ziemlich konstant bleibt, ist auch von Seiten der Autofahrer kein Grund gegeben einen Wechsel Hybridoder zu Brennstoffzellenfahrzeugen zu unternehmen. Das starke Wachsen des Einkommens führt einem kontinuierlichen

Anstieg des Motorisierungsgrades. Der Motorisierungsgrad wird ab dem Jahr 2006 verglichen mit den Jahren zwischen 1995 und 2005 rasanter zunehmen. Da in den Jahren von 1998 bis 2008 das reale Bruttoeinkommen in Österreich nur marginal gestiegen ist und in diesem Szenarium ab dem Jahr 2008 von einem dreiprozentigem Wachstum ausgegangen wird, befindet sich um das Jahr 2010 ein leichter Knick der Motorisierungskurve nach oben. Im Laufe der nächsten Jahrzehnte flacht der Motorisierungsgrad nur langsam ab und wird im Jahr 2070 bei 725 PKW pro 1000 Einwohner liegen. Bei der STATISTIK-AUSTRIA-Annahme von 8,8 Millionen Menschen in Österreich im Jahr 2070, sind das 6,38 Millionen PKW in Österreich im Jahr 2070.

Die Kombination von einerseits stark steigenden Einkommen und andererseits billigen Transportkosten führt auch zu einem weiteren Anstieg des PKW-Anteils am Gesamtverkehrsaufwand. Der Anteil an PKW wird, nach einer nur leichten Zunahme bis in das Jahr 2005, wieder Wachstumswerte aus den Jahren 1980 bis 2000 annehmen. Er setzt sich in diesem Szenarium wie folgt zusammen:

Tabelle 15-1, Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer im Jahr 2070 in Österreich im Szenarium *URR 7000 Gb*, eigene Darstellung

Anteil PKW	91%
Anteil Eisenbahn	4%
Anteil Radfahrer	3%
Anteil Fußgänger	2%

Dieser massive Anstieg des PKW-Anteils liegt nur zu einem geringen Teil an der gleichzeitigen Zunahme der Tagesweglängen. Nicht nur ist der Treibstoff im Vergleich zum Einkommen billiger geworden, sondern auch die Tagesweglänge hat sich mit steigender Motorisierung leicht erhöht. Die Steigerung fällt allerdings relativ minimal aus, da eine Zunahme des Motorisierungsgrades

einen Einfluss auf dichteren Verkehr bedeutet, unter der Annahme, dass die Straßenlänge in Österreich in den nächsten Jahrzehnten nur leicht wächst. Die Streckenweglänge erreicht in 2070 einen Wert von 13km, im Vergleich zu 12km im Jahr 2008. Das bedeutet, dass trotz der Steigerungen bei PKW-Anteil und Motorisierung, die Tagesweglängen nicht mehr allzu viel ansteigen werden. Weitere technologische Fortschritte werden nahezu keinen Einfluss auf eine Geschwindigkeitserhöhung bei Automobilen mit sich bringen. Das ist einerseits, durch die zunehmende Fahrzeugdichte auf Österreichs Straßen begründet, andererseits liegt es an der technologischen und logistischen Machbarkeit im Straßenverkehr allgemein. Die Infrastruktur oder Technologie "Straße" an sich wird keine Erhöhung der Geschwindigkeit mehr erlauben. Straßeneinrichtungen wie Geschwindigkeitsbegrenzungen, Kreuzungen, Ampeln, Zebrastreifen für Fußgänger, Radfahrwege, Stopptafeln etc. sind notwendige Einrichtungen für das Funktionieren eines geregelten Verkehrs. Doch gerade diese Einrichtungen machen es aus technischer Sicht nicht möglich die Geschwindigkeit weiter zu erhöhen.

Die Tagesgebietsfläche, wächst von rund 1000km² im Jahr 2008 auf rund 1200km² im Jahr 2070 an.

#### 15.2 Szenarium URR 3500 GB

Szenarium URR 3500 Gb soll die Zusammenhänge analysieren, welche auf einem geringeren Gesamtpotential aufbauen, als im vorigen Szenarium. Die erwarteten Erdölvorkommen unter der Arktis sind nur ein Bruchteil von dem, was man sich ursprünglich ausgerechnet hat. Desweiterem könnten teure Umweltauflagen eine Förderung in den Gewässern der Arktis wirtschaftlich nicht rentabel machen oder machtpolitische Entscheidungen der involvierten Länder zu keiner Einigung über die Förderrechte führen. Auch die großen Ölsandvorkommen in Kanada werden aufgrund technischer Grenzen nicht gefördert. Das Weltwirtschaftswachstum wird in diesem Szenarium niedriger festgesetzt. Die begrenzten Erdölreserven und damit die begrenzte Erdölproduktion verlangsamen das Wirtschaftswachstum, da der Großteil der heutigen Unternehmen und Industrien auf billige Transportkosten setzt. Auch in Österreich wird das Einkommen durch die verlangsamte globale Wirtschaftsentwicklung nicht so rasch steigen wie im vorigen Szenario. Die Erdölproduktion, welche sich für etwa zehn Jahre auf einem Plateau bewegen wird, bedeutet jedoch einen Investitionsschub in Forschung und Entwicklung um neue Energiequellen sicherzustellen. Der rasch steigende Erdölpreis bewirkt, dass andere Technologien früher als im Szenarium URR 7000 Gb entwickelt werden und die Abhängigkeit von Erdöl schneller zurückgehen wird. Über die Art der neuen Energiequelle, gibt das Modell keine Auskunft. Ein steigender Erdölpreis, könnte sowohl die Atomenergie als Energieform der Zukunft attraktiver machen, wie auch das Interesse in erneuerbare Energieträger wie Sonne, Wind oder Biomasse wecken. Die Entscheidung, welche Energieform im Endeffekt in die Fußstapfen des Erdöls tritt, wird wahrscheinlich eine politische Entscheidung sein und einen Machtkampf der verschiedenen Interessenvertreter mit sich führen.

Das Gesamtpotential von Erdöl beträgt in diesem Szenario 3.500 Milliarden Fass Erdöl. Gleichzeitig wird das durchschnittliche Wirtschaftswachstum auf zwei Prozent festgelegt. Mit diesen Ausgangswerten wird sich die Produktionsspitze von Erdöl um das Jahr 2020 befinden. Die Spitze ist jedoch um einiges flacher als im vorigen Szenarium. Die Produktionsspitze wird einen Wert von 34,9 Milliarden Fass haben. Bei einer Erdölproduktion von 32,0 Milliarden Fass Erdöl im Jahr 2007, sieht man, dass die Produktionsquote nicht mehr wirklich erhöht werden kann. Nachdem das Produktionsmaximum im Jahr 2021 durchschritten wird, wird die Produktionsquote im Jahr 2032 den Wert von 2007 wieder erreicht haben, also 32,0 Milliarden Fass Erdöl. Es wird ersichtlich, dass sich eine nahezu konstante Produktionsquote über die nächsten fünfzehn Jahre einstellen wird, bevor diese deutlich zu sinken beginnen wird.

Der Preis pro Fass Erdöl wird im Jahr 2021 bei ca. 156 \$2006 liegen und dann aufgrund mangelnder Energiealternativen auf bis zu 737 \$2006 im Jahr 2050 ansteigen. Das Szenarium

zeigt, dass der Substitutionsanteil um fünfzig Jahre früher beginnt zu steigen, als im Szenarium *URR 7000 Gb*. Der hohe Erdölpreis macht Investitionen in andere Technologien lukrativ und allmählich beginnt sich eine Substitution zu einer anderen Energieform einzustellen.

Für die Situation in Österreich wird das Szenarium nun in zwei Unterkapiteln geteilt. Im ersten Unterkapitel, werden die Auswirkungen auf den Verkehr in Österreich, mit einer raschen Substitution von konventionellen Fahrzeugen zu Hybrid- bzw. Brennstoffzellenfahrzeugen, untersucht. Im zweiten Unterkapitel werden die Auswirkungen auf den Verkehr in Österreich untersucht, mit der Annahme, dass die Technologien der Hybridfahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge für Jahrzehnte lang nicht serienreif bleiben.

In diesem Szenarium wird von keinem realen Einkommenszuwachs ausgegangen. Durch die stark anziehenden Treibstoffpreise und somit auch Lebensmittelpreise, wird es eine hohe Inflation über einen längeren Zeitraum geben. In diesem Szenarium wird davon ausgegangen, dass das Einkommen genauso schnell wächst wie die Inflation und somit das reale Bruttoeinkommenswachstum bei null Prozent liegt.

#### 15.2.1 Substitution zu alternativen Antriebsformen (URR 3500Gb A)

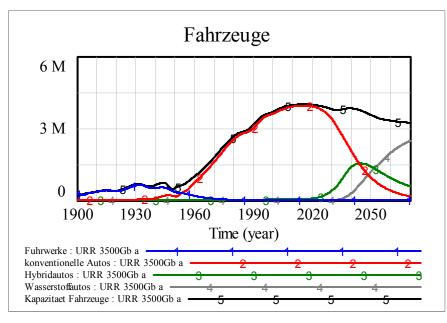


Abbildung 15-2 - Szenarium URR 3500 Gb a mit Substitution, eigene Darstellung

Der technologische Fortschritt in der Hybrid- und Brennstoffzellentechnologie ist groß genug, um konkurrenzfähige Modelle auf den Markt zu bringen.

Die steigenden Treibstoffpreise sind einerseits ein Impuls für die Weiterentwicklung neuer Technologien, andererseits auch ein Wettbewerbsvorteil für diese. Während die variablen Kosten für konventionelle Fahrzeuge erheblich steigen, werden die variablen Kosten beim Hybrid und bei der Brennstoffzelle nur zu einem gewissen Teil anwachsen. Die Modellergebnisse zeigen, dass die Anzahl der konventionellen Fahrzeuge im Jahr 2015 ihren

Spitzenwert bei 3,95 Millionen Fahrzeugen in Österreich haben wird. Gleichzeitig wird die Anzahl der Hybridfahrzeuge bei 57.000 liegen - Tendenz stark steigend. Die technischen Entwicklungen beim Brennstoffzellenfahrzeug brauchen länger um mit Hybriden konkurrieren zu können. Ab dem Jahr 2030 werden die Verkaufszahlen für Brennstoffzellenfahrzeuge rasant steigen, und einen Maximalwert bei Hybriden im Jahr 2044 bewirken. Danach werden Hybridfahrzeuge durch Brennstoffzellenfahrzeuge substituiert werden. Man erkennt in Abbildung 15-2, dass die absolute Anzahl an Fahrzeugen ab dem Jahr 2015 bis ins Jahr 2070 fallend ist. Gleichzeitig hat die Motorisierungsrate um das Jahr 2008 seinen Maximalwert bei 473 PKW pro 1000 Einwohner erreicht und nimmt kontinuierlich auf einen Wert von 367 bis in das Jahr 2070 ab. Der Anteil für PKW hat im Jahr 2007 seinen Maximalwert bei 67% erreicht und sinkt bis ins Jahr 2070 auf 54%.

Tabelle 15-2, Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer im Jahr 2070 in Österreich im Szenarium *URR 3500 Gb a*, eigene Darstellung

Anteil PKW	54%
Anteil Eisenbahn	20%
Anteil Radfahrer	17%
Anteil Fußgänger	9%

Die Systemgeschwindigkeit bzw. die Tagesgebietsfläche liegen niedriger als im Szenarium *URR* 7000 Gb.

### 15.2.2 KEINE SUBSTITUTION ZU ALTERNATIVEN ANTRIEBSFORMEN (URR 3500GB B)

In diesem Unterszenarium soll nun das Verhalten bei identen Parametern wie in Kapitel 15.2.1 untersucht werden, doch mit einer stark verringerten Technologiegeschwindigkeit bei Hybridund Brennstoffzellenfahrzeugen. Dieses Szenarium soll deutlich machen, wie die Auswirkungen, mit stark gedämpften Substitutionsalternativen zu anderen Technologien auf den Verkehr in Österreich sind. Durch die fehlenden Alternativen, wird der Maximalwert an Fahrzeugen erst später auftreten, als im Fall mit Substitutionsmöglichkeiten.

Der Maximalwert bei konventionellen Fahrzeugen wird im Jahr 2016 sein, wobei die Kurve generell flacher abnimmt, als im vorigen Unterszenarium. Weder Hybridfahrzeuge, noch Brennstoffzellenfahrzeuge können diesen "Fahrzeugverlust" kompensieren. Erst ab dem Jahr 2055 werden alternativen Fahrzeugtypen Anteile zurückgewinnen können. Die Anzahl der Fahrzeuge in Österreich nimmt in diesem Szenarium beträchtlich ab. Der Maximalwert an Fahrzeugen befindet sich im Jahr 2015 bei knapp über 4 Millionen Fahrzeugen. Der Wert nimmt

danach bis ins Jahr 2067 auf 2,3 Millionen Fahrzeuge ab. Das bedeutet für den Motorisierungsgrad einen Maximalwert von 473 Fahrzeugen im Jahr 2008, mit einer starken Abnahme bis 255 im Jahr 2067. Der Anteil für PKW fällt auch beträchtlich, während die anderen Verkehrsmittel Anteile zurückgewinnen können.

Tabelle 15-3, Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer im Jahr 2070 in Österreich im Szenarium *URR 3500 Gb b*, eigene Darstellung

	8
Anteil PKW	41%
Anteil Eisenbahn	26%
Anteil Radfahrer	22%
Anteil Fußgänger	11%

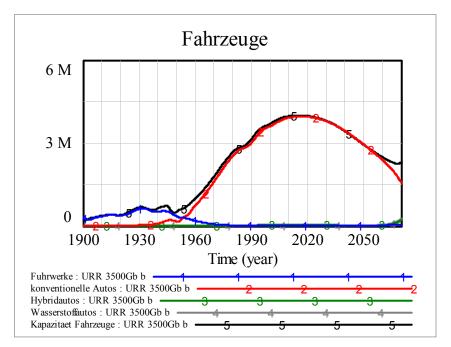


Abbildung 15-3, Szenarium URR 3500 Gb b ohne Substitution, eigene Darstellung

Auch die Systemgeschwindigkeit und damit auch die Streckenlänge pro Weg, werden eine Trendwende erfahren. Die Streckenlänge pro Weg wird ihren Maximalwert um das Jahr 2016 bei 11,9km haben und dann bis in das Jahr 2067 auf 10,8km absinken.

#### 15.3 Szenarium URR 4500 GB

Im Szenarium *URR 4500 Gb* sollen nun die Auswirkungen untersucht werden, welche sich bei einem Erdölproduktionsmaximum im Jahr 2033 einstellen würden. Dieses Szenario kann als Simulation zwischen den beiden anderen Szenarien verstanden werden. Da das Gesamtpotential des Erdöls nur begrenzt abschätzbar ist, und Angaben seitens der erdölfördernden Unternehmen teils fragwürdig sind, wurden mehrere Szenarien für den Zeitpunkt der Produktionsspitze gerechnet.

Bei diesem Szenarium wurde mit einem mittleren Gesamtpotential von 4.500 Milliarden Fass Erdöl gerechnet. Das Weltwirtschaftswachstum wird mit durchschnittlichen zwei Prozent pro Jahr angenommen. Für die Produktionsraten stellt sich in den nächsten Jahren ein annähernd ähnliches Szenarium ein, wie beim Szenarium *URR 7000 Gb*. Die Produktionsraten halten anfänglich mit der Erdölnachfrage, welche sich aus dem Weltwirtschaftswachstum ergibt, mit. Um das Jahr 2025 beginnt sich jedoch die Produktionskurve im Szenarium allmählich abzuflachen und erreicht um das Jahr 2033 seine Produktionsspitze mit 42,3 Milliarden Fass Erdöl. Danach nimmt die Produktion mit einem ähnlichen Rückgang wie im Szenarium *URR 3500 Gb* ab und steht im Jahr 2070 bei 18,3 Milliarden Fass Erdöl.

Die Kostenkurve steigt nur leicht bis in das Jahr 2020 an und hat im Jahr 2033 den Wert 150 \$2006. Ab dann steigen die Kosten stark exponentiell bis in das Jahr 2070 an. Die Substitution zu einer anderen Energiequelle wird ab dem Jahr der Produktionsspitze massiv zunehmen und beschreibt dann einen ähnlichen Verlauf wie in den vorangegangenen Szenarien.

Der reale Bruttoeinkommenszuwachs wird in diesem Szenarium zwei Prozent betragen. Es wird von einer allgemein guten wirtschaftlichen Lage über den Beobachtungszeitraum ausgegangen.

#### 15.3.1 Substitution zu alternativen Antriebsformen (URR 4500Gb a)

Durch das größere Gesamtpotential an Erdöl und dem damit verbundenen niedrigeren Erdölpreis, ist auch die technologische Substitution zu alternativen Antriebsformen gehemmt. Erst um das Jahr 2030 werden Hybridfahrzeuge an die breite Masse verkauft werden und das Wachstum für konventionelle Fahrzeuge verlangsamt sich. Im Jahr 2038 werden die konventionellen Fahrzeuge ihre Maximalanzahl von 5,1 Millionen erreicht haben. Hybridfahrzeuge werden im Jahr 2063 ihre Maximalanzahl von 2,2 Millionen erreichen. Ab dem Jahr 2050 beginnen die Brennstoffzellenfahrzeuge den Markt zu erobern und werden im Jahr 2070 mit der Anzahl der Hybridfahrzeuge in Österreich gleichziehen.

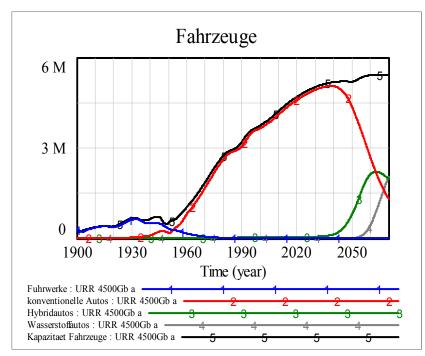


Abbildung 15-4, Szenarium *URR* 4500 Gba mit Substitution, eigene Darstellung

In Abbildung 15-4 erkennt man den verspäteten Start der Substitutionsprozesse. Im Gegensatz zu Abbildung 15-2 werden hier einzelnen Fahrzeugtypen einen späteren Maximalwert aufweisen. Der Motorisierungsgrad legt kontinuierlich zu und

erreicht im Jahr 2070 einen Wert von 613 PKW pro 1000 Einwohner, wobei der Anteil an konventionellen Fahrzeugen nur mehr 24 Prozent beträgt.

Der Anteil für PKW wird auf Kosten aller anderen Verkehrsmittelanteile hinzugewinnen:

Tabelle 15-4, Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer im Jahr 2070 in Österreich im Szenarium *URR 4500 Gb a*, eigene Darstellung

Anteil PKW	81%
Anteil Eisenbahn	9%
Anteil Radfahrer	7%
Anteil Fußgänger	3%

## 15.3.2 Keine Substitution zu alternativen Antriebsformen (URR 4500Gb b)

Es wird nun wieder die Geschwindigkeit technologischen Fortschritts bei Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen ceteris paribus reduziert. In diesem Szenarium ist der Peak der

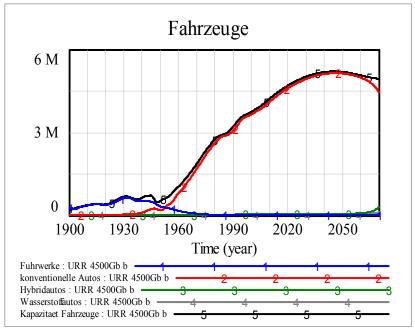


Abbildung 15-5, Szenarium URR 4500 Gbb ohne Substitution, eigene Darstellung

konventionellen Fahrzeuge um ca. acht Jahre versetzt. Der für lange Zeit relativ geringe Erdölpreis und das konstante Anwachsen des Einkommens führen zu einem stetigen Ansteigen der konventionellen Autoflotte. Mangelnde Alternativen nach dem Peak lassen jedoch die Anzahl der konventionellen Fahrzeuge

allmählich sinken und auch der, bis dorthin stetig

steigende Anteil von PKW, sinkt ab diesem Zeitpunkt leicht. Der Motorisierungsgrad erreicht im Jahr 2044 sein Maximum bei 580 PKW pro 1000 Einwohner und sinkt danach leicht auf 560 im Jahr 2070. Die Streckenlängen pro Weg sind bei beiden Szenarien fast ident und betragen im Jahr 2070 ca. 12,55km. Das liegt daran, dass die Systemgeschwindigkeit im selben Zeitraum weder markant zunehmen noch abnehmen wird. Da Hybrid- bzw. Brennstoffzellenfahrzeuge nicht schneller fahren werden können, weil sie die gleiche Infrastruktureinrichtung wie konventionelle Fahrzeuge benutzen – nämlich Straßen – wird sich auch die Geschwindigkeit im Untersuchungszeitraum nicht mehr viel erhöhen.

Tabelle 15-5, Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer im Jahr 2070 in Österreich im Szenarium *URR 4500 Gb b*, eigene Darstellung

Anteil PKW	75%
Anteil Eisenbahn	11%
Anteil Radfahrer	9%
Anteil Fußgänger	5%

#### 15.4 Szenarium SOLAR

Dieses Szenarium soll den grundsätzlichen Ausstieg aus fossilen Energieträgern beschreiben. Realisiert wird dieser Zustand im Modell mit einem Substitutionsanteil von nahezu 100% im Jahr 2070. War in den bisherigen Szenarien der Substitutionsanteil nie größer als 60%, soll dieses Szenarium die Auswirkungen auf den Verkehr in Österreich unter einem vollkommenen Umstieg auf regenerative Energiequellen, untersuchen. Weiterhin soll in diesem Szenarium angenommen werden, dass der technologische Fortschritt der Brennstoffzelle sehr schnell voranschreitet und die Herstellung von Wasserstoff als sekundärer Energieträger gänzlich aus regenerativen Energiequellen geschieht.

Ausgangspunkt aller Berechnungen ist wieder das Gesamtpotential von Erdöl. Es wird in diesem Szenarium mit 3500 Milliarden Fass Erdöl festgelegt. Die Produktionsrate erreicht im Jahr 2013 ihre Produktionsspitze bei knapp über 31 Milliarden Fass Erdöl pro Jahr. Gleichzeitig wächst der Substitutionsanteil zunächst exponentiell an und erreicht im Jahr 2030 einen Wert von fünfzig Prozent. Der Substitutionsanteil flacht daraufhin allmählich ab und erreicht im Jahr 2070 einen Wert von 99%. Die Produktionsrate nimmt ab dem Jahr 2020 relativ stark ab und nähert sich ab dem Jahr 2045 asymptotisch dem Nullwert an. Im Jahr 2070 beträgt die Produktionsrate von Erdöl gerademal 0,65 Milliarden Fass Erdöl.

Der Preis für ein Fass Erdöl steigt zunächst ähnlich stark an wie im Szenarium *URR 3500 Gb*, da ja auch vom selben Gesamtpotential in der Höhe von 3500 Milliarden Fass Erdöl ausgegangen wird. Der Preis beginnt sich jedoch ab dem Jahr 2035 abzuflachen und beträgt im Jahr 2070 510 \$2006. Das bedeutet, dass die Nachfrage immer weiter verringert wird und gleichzeitig die Preiselastizität der Nachfrage stark steigt (vgl. Abbildung 9-17). <sup>133</sup>

Für den Substitutionsprozess von Fahrzeugen in Österreich ergibt sich unter der Annahme eines realen Bruttoeinkommenswachstums von einem Prozent ein ungefähr zeitgleicher Peak von Hybrid- und konventionellen Fahrzeugen im Jahr 2020. Aus Abbildung 15-6 erkennt man jedoch, dass Hybridfahrzeuge auch schon im Jahr 2008 nach dieser Simulation im Ausmaß von 123.000 Fahrzeugen in Österreich vorhanden sein müssten, es aber im Jahr 2006 gerademal um die 500 Hybridfahrzeuge gab. <sup>134</sup>

<sup>133</sup> Harold HOTELLING, The Economics of Exhaustible Resources, 1931, Seite 141, 142

<sup>134</sup> INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), Outlook for hybrid and electric vehicles, 2008, online, Seite 7

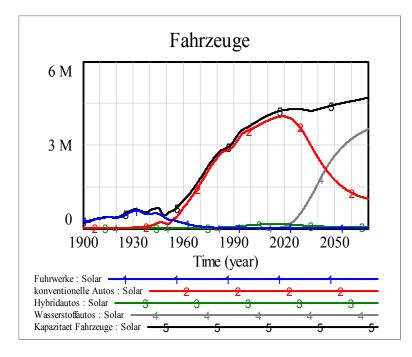


Abbildung 15-6, Szenarium Solar, eigene Darstellung

Der Substitutionsprozess zu
Brennstoffzellenfahrzeugen
geschieht dann ab dem Jahr
2020 ziemlich schnell. Während
die konventionelle
Fahrzeugflotte kontinuierlich
abbaut, wächst die Flotte der
Brennstoffzellenfahrzeuge
zunächst rasant an und flacht
dann ins Jahr 2070 ab.

Im Jahr 2070 gibt es dann 3,6 Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge und noch ca. 1,1 Millionen konventionelle Fahrzeuge. Die Motorisierung flacht zuerst etwas ab und steigt ab dem Jahr 2036 bis auf 533 PKW pro 1000 Einwohner im Jahr 2070.

Die Systemgeschwindigkeit bleibt im Zeitraum von 2008 bis ins Jahr 2070 in etwa konstant und erreicht im Jahr 2070 den Wert 32km/h.

Tabelle 15-6, Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer im Jahr 2070 in Österreich im Szenarium *Solar*, eigene Darstellung

ini ozenaram botar, eigene barstenar	in szenarum solar, elgene barstenang		
Anteil PKW	72%		
Anteil Eisenbahn	12%		
Anteil Radfahrer	10%		
Anteil Fußgänger	6%		

Die Berechnungen des Modells können nicht mit den Werten aus der Gegenwart, wie z.B. bei der Anzahl der Hybridfahrzeuge in Österreich mithalten. Desweiteren ist der Substitutionsprozess zwischen konventionellen Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahr 2070 noch nicht abgeschlossen, sodass ein Umstieg zu einer komplett "erdölfreien" Zukunft bis ins Jahr 2070 zu bezweifeln ist.

#### 15.5 Szenarium OLDUVAI

In diesem Szenarium sollen die Auswirkungen auf den Verkehr in Österreich untersucht werden, mit der Annahme, dass der Primärenergieträger Erdöl nur zu einem geringen Anteil im Jahre 2070 ersetzbar ist und das Gesamtpotential an Erdöl gering ist. Der Name dieses "Worst Case"-Szenariums ist an die Olduvai-Theorie angelehnt, welche 1989 von Richard C. Duncan definiert worden ist. Diese Theorie besagt, dass die Lebenserwartung der industriellen Zivilisation, gemessen am Pro-Kopf Energieverbrauch ungefähr hundert Jahre beträgt und zwar von 1930 bis 2030. <sup>135</sup> Der Name "Olduvai" geht auf die Olduvai Schlucht zurück, welche im Norden von Tansania liegt und als *Wiege der Menschheit* gilt.

Dieses Szenario soll nicht die Einhaltung eines Pro-Kopf Energieverbrauchs im Jahr 2030 abbilden, noch die Olduvai-Theorie bestätigen oder ablehnen. Der Name "Olduvai" ist jedoch gleichzeitig ein Sinnbild einer umstrittenen Theorie und der Menschheit an sich. Ein gleichzeitiges Ansteigen der Weltbevölkerung, gepaart mit ansteigendem Energieverbauch und einem Nichtausstieg aus fossilen Energieträgern bei limitierten Erdölreserven, ist einfach nicht möglich und würde die Menschheit vor sehr großen, nicht lösbaren Problemen stellen. Um dieses "Worst Case" Szenarium, mit allen Begleiterscheinungen wie Kriege, Hungersnöte etc. abzubilden, wurde der Name Olduvai gewählt.

Für Österreich würde dieses Szenarium einen massiven Erdölengpass bedeuten. Länder, mit starkem politischem und militärischem Einfluss würden sich die Erdölreserven sichern und anderen Staaten den Zugang zum Markt blockieren. Dieser Umstand lässt sich in diesem Modell nicht abbilden.

Ausgangspunkt ist ein Gesamtpotential an Erdöl von 3200 Milliarden Fass Erdöl, also etwas weniger als im Szenarium *URR 3500 Gb*. Der Substitutionsanteil von Erdöl beträgt im Jahr 2070 jedoch nur 23 Prozent. Das Wachstum des Bruttoweltproduktes wurde auf einem Prozentpunkt festgelegt. Die Produktionskurve von Erdöl beschreibt einen sehr flachen Verlauf im Maximalbereich. Das Maximum der Produktionskurve liegt bei 31,2 Milliarden Fass Erdöl im Jahr 2022, und die Produktionsrate von Erdöl wird erst im Jahr 2034 wieder unter die 30 Milliarden-Fass-Erdöl-Schwelle fallen. Die Kurve beschreibt im späteren Verlauf keine Abflachungserscheinungen und tendiert mit großem Produktionsrückgang sich dem Nullwert zu nähern. Die Kostenkurve pro Fass Erdöl scheint im Gegensatz zu allen anderen Kostenkurven in den Szenarien keine logistische Wachstumsfunktion, sondern eine exponentielle

-

<sup>&</sup>lt;sup>135</sup> Richard. C. DUNCAN, The Olduvai Theory – Energy, Population, and Industrial Civilization, 2006, Seite 1

Wachstumsfunktion zu beschreiben. Die Kosten befinden sich im Jahr 2030 zwar noch im Bereich zweier anderer Szenarien, doch steigt die Kurve ab dann sehr stark an.

Die reale Bruttoeinkommensentwicklung wurde im Gegensatz zu allen anderen Szenarien mit einer negativen Wachstumsrate fixiert – d.h. die realen Bruttoeinkommen werden im Untersuchungszeitraum nach 2008, durch eine stark anhaltende Inflation abnehmen. Die Geschwindigkeit technologischen Fortschritts bei der Hybrid- und Brennstoffzellentechnologie wurde fast Null gesetzt, um hier auch ein "Worst-Case" Szenarium zu simulieren.

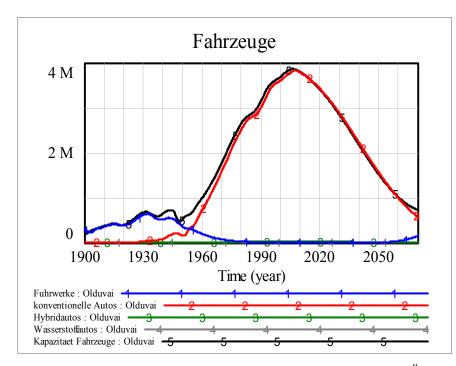


Abbildung 15-7, Szenarium Olduvai, eigene Darstellung

Abbildung 15-7 zeigt,
dass die Anzahl der
konventionellen
Fahrzeuge im Jahr 2007
ihr Maximum bei 3,8
Millionen erreicht haben
und dann markant
abnimmt. Im Jahr 2070
werden noch 575.000
konventionelle
Fahrzeuge aus Mangel

an Alternativen zu Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen in Österreich anzutreffen sein. Sogar Fuhrwerke dürften am Ende des Untersuchungszeitraumes wieder interessant werden. Der Motorisierungsgrad hatte sein Maximum bei 468 PKW pro 1000 Einwohner im Jahr 2004 und pendelt sich ab dem Jahr 2060 bei 83 PKW pro 1000 Einwohner ein. Der Grund für den unterschiedlichen Zeitpunkt von maximalem Motorisierungsgrad und maximalen konventionellen Fahrzeugen liegt an einem relativ starken Anstieg der Bevölkerungsprognosen der STATISTIK AUSTRIA in diesem Zeitraum. Auch der Anteil für PKW beschreibt eine Glockenkurve mit einem Maximalanteil von 67% im Jahr 2004. Danach gibt der Anteil für PKW beträchtlich nach und erreicht im Jahr 2070 mit einem Anteil von 13% einen geringeren Wert als der Anteil für Eisenbahn, Radfahrer und Fußgänger.

Tabelle 15-7, Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehrsaufwand nach Personenkilometer im Jahr 2070 in Österreich im Szenarium *Olduvai*, eigene Darstellung

Anteil PKW	13%
Anteil Eisenbahn	39%
Anteil Radfahrer	31%
Anteil Fußgänger	17%

Die Systemgeschwindigkeit nimmt ab dem Jahr 2005 kontinuierlich ab und wird im Jahr 2070 nur mehr 24 km/h betragen. Dadurch nimmt auch die Streckenlänge pro Weg ab und hat im Jahr 2070 nur mehr eine Länge von 9,4km. Das sind die niedrigsten Werte in allen gerechneten Szenarien.

# 16 DIE SENSITIVITÄTSANALYSE FÜR DIE PRODUKTIONSKURVE VON ERDÖL

Um eine Aussage über die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Produktionskurven tätigen zu können, wird nun eine Sensitivitätsanalyse für die Produktionskurve von Erdöl durchgeführt. Durch Veränderungen der wichtigsten Einflussfaktoren werden eine Vielzahl von Produktionskurven berechnet und statistisch aufbereitet.

Die folgenden drei Parameter werden verändert:

- Gesamtpotential
- Bruttoweltproduktrate
- Technologiedauer

Die Sensitivitätsanalyse wird in VENSIM unter Berücksichtigung der veränderlichen Parameter und der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsverteilung durchgeführt. Nach 200 Simulationen werden die Ergebnisse im 50, 75, 95 und 100% Konfidenzintervall zusammengefasst.

#### 16.1 GESAMTPOTENTIAL

Aktuelle Daten für das Gesamtpotential von Erdöl zu finden ist schwer, abzuschätzen wie seriös die wenig vorhandenen sind, fast unmöglich.<sup>136,137</sup> In einem Artikel des Energy Policy Journals werden mehrere Daten über das Gesamtpotential von Erdöl zusammengefasst. Untersuchungen der OECD/IEA ergeben ein Gesamtpotential für konventionelles Erdöl von 3500Gb. Das Gesamtpotential für unkonventionelles Erdöl wird auf 6500Gb bis 9000Gb geschätzt. <sup>138</sup>

In Kapitel 7.8.4.4 erkennt man, dass die letzten Schätzungen von SALVADOR aus dem Jahr 2002 stammen und bei 2100 bis 4000 Mrd. Fass Erdöl liegen. Um an aktuellere Daten zu gelangen wurden Diagramme, welche auf der Internetseite von *Trendline Research* zugänglich sind,

<sup>136</sup> vgl. Colin J. CAMPBELL, Jean LAHERRERE - The end of cheap oil, Scientific American, 1998, Seite 79

<sup>&</sup>lt;sup>137</sup> vgl. ASPO, Werner ZITTEL, Jörg SCHINDLER, *Future world oil* supply, International Summer School on the politics and economics of renewable energy, Salzburg, 2002, Seite 24ff

<sup>&</sup>lt;sup>138</sup> G. MAGGIO, G.CACCIOLA - A variant of the Hubbert curve for world oil production forecasts, Energy Policy (2009), online, Seite 2

verwendet. Auf dieser Internetseite werden Gesamtpotentiale von 21 unterschiedlichen Instituten zusammengefasst. <sup>139</sup> Diese Daten sind zu einem Großteil leider nicht verifizierbar, doch beim Vergleich mit den Daten von Amos SALVADOR (Abbildung 7-16) durchaus plausibel. Wegen der großen Bandbreite an Schätzungen (von 2000 bis 10.300 Mrd. Fass Erdöl) wurde der Mittelwert und die Standardabweichung dieser Schätzungen berechnet und in VENSIM als Normalverteilung integriert.

-

<sup>&</sup>lt;sup>139</sup>Trendline Research, 21-Model URR Estimate 2008, online

 $Tabelle\ 16\text{-}1\text{-}Sensitivit\"{a}ts analyse: Parameter werte\ f\"{u}r\ das\ Gesamt potential$ 

Mittelwert:	4052 Mrd. Fass
Standardabweichung:	2075 Mrd. Fass
Minimalwert:	2000 Mrd. Fass
Maximalwert:	10.300 Mrd. Fass

# 16.2 Bruttoweltproduktrate

Für die BWP-Rate wurden gleichverteilte Werte zwischen 0 und 3% angenommen.

## 16.3 Technologiedauer

Die Variable Technologiedauer wurde gleichverteilt zwischen 10 und 200 Jahren angenommen.

# 16.4 ERGEBNISSE

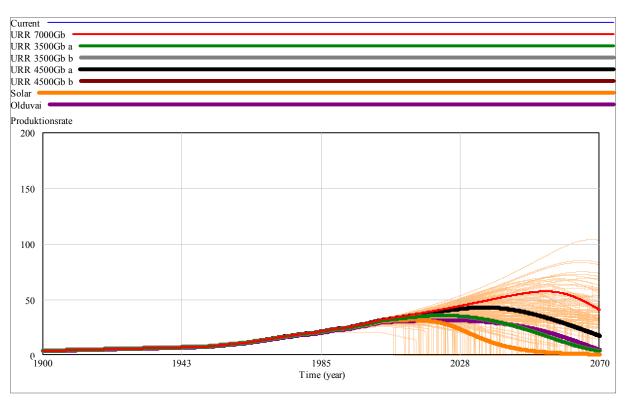


Abbildung 16-1, Sensitivitätsanalyse; Plot der einzelnen Simulationen

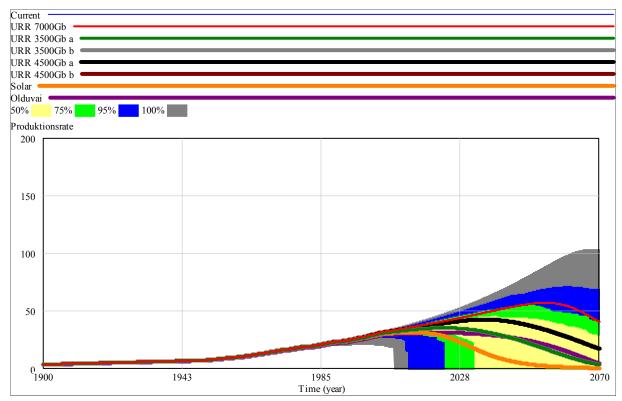


Abbildung 16-2, Sensitivitätsanalyse; Plot der Simulationen, in Konfidenzintervalle zusammengefasst

Aus Abbildung 16-2 erkennt man, dass die Produktionskurven der Szenarien URR 3500Gb, URR 4500Gb und OLDUVAI innerhalb des 50% Konfidenzintervalles liegen und somit am wahrscheinlichsten den Produktionskurvenverlauf wiedergeben. Die Produktionskurven der Szenarien SOLAR und 7000Gb liegen teilweise nur mehr im 95% Konfidenzintervallbereich und gelten eher als unwahrscheinlich.

Für die Annahme eines Gesamtpotentials von 3000Gb ergibt die Sensitivitätsanalyse des Szenarios 3500Gb deckungsgleiche Ergebnisse wie die Berechnungen des ITAE (Istituto Tecnologie Avanzate per l'Energia). Die Produktion von Erdöl wird im Jahr 2020 bzw. 2021 ihren Maximalwert erreichen. 140

<sup>140</sup> G. MAGGIO, G.CACCIOLA - *A variant of the Hubbert curve for world oil production forecasts*, Energy Policy (2009), online, Seite 1

-

# 17 Ergebnisse der Szenarienentwicklung

In allen fünf Szenarien wird das Produktionsmaximum von Erdöl vor dem Jahr 2070, also vor dem Ende des Untersuchungszeitraumes des Modells eintreten. Die einflussreichste Konstante im Modell ist das Gesamtpotential von Erdöl auf diesem Planeten. Auch mit Annahmen von sehr großen noch zu erschließenden Erdölquellen und dem Vorhandensein von großen Mengen an unkonventionellem Erdöl wird der Peak spätestens um das Jahr 2055 eintreten.

Wann jedoch dieser genau eintreten wird, ist schwer abschätzbar, da man keine objektiven Daten diesbezüglich bekommen kann und auf Daten angewiesen ist, welche erdölfördernde Unternehmen der breiten Öffentlichkeit zugänglich machen (z.B. BP Statistical Review). An den qualitativen Eigenschaften eines Produktionsmaximums wird sich jedoch nichts ändern. Das zeigen ja zu guter Letzt auch die Substitutionsprozesse vergangener Energieträger.

#### 17.1.1 Erdölreserven

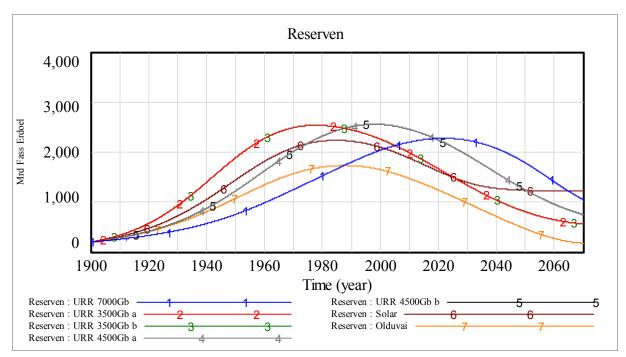


Abbildung 17-1, Szenarienübersicht: Reserven, eigene Darstellung

Die Reserven steigen vom Startwert von 200 Milliarden Fass Erdöl im Jahr 1900 zunächst an und flachen dann ab den 60er und 70er Jahren wieder ab. Auffallend ist, dass im Szenarium *Solar* der Reservenbestand ab den Jahr 2040 kaum mehr abnimmt. Das liegt daran, dass zu diesem Zeitpunkt der *Substitutionsanteil* schon bei fast hundert Prozent liegt.

Die Reserven nähern sich alle – abhängig vom Substitutionsanteil und einer logistischen Niedergangsfunktion folgend – einem Grenzwert an, wobei die Reserven bei *OLDUVAI* am schnellsten abnehmen. Knapp 176 Milliarden Fass Erdöl betragen die Reserven in diesem Szenarium im Jahr 2070.

#### 17.1.2 DER SUBSTITUTIONSANTEIL

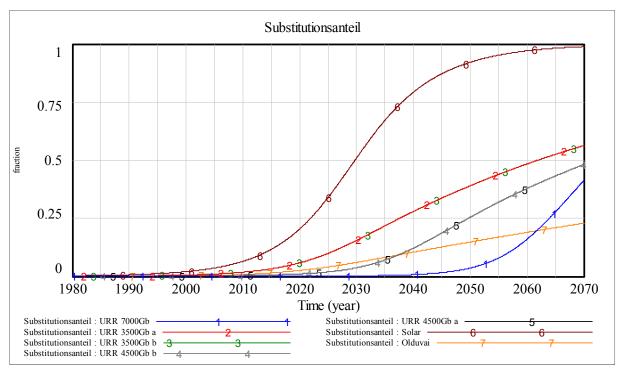


Abbildung 17-2, Szenarienübersicht, Substitutionsanteil, eigene Darstellung

Alle fünf Szenarien gehen davon aus, dass die Nachfrage der Menschheit nach einem anderen Energieträger mit steigenden Erdölpreisen steigen wird. Dieser Zusammenhang wurde anhand des Substitutionsanteils im Modell implementiert. Der maximale Substitutionsanteil beträgt immer 100%, jedoch mit unterschiedlicher Technologiedauer je Szenarium. Man erkennt, dass nur das Szenarium *Solar* eine vollkommene Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern erreicht, währenddessen die anderen Szenarien zwischen zwanzig und sechzig Prozent Substitutionsanteil im Jahr 2070 haben. Am unteren Ende der Skala befindet sich das Szenarium *Olduva*i, mit einem Substitutionsanteil von nur 23 Prozent, wogegen am oberen Ende das Szenarium *Solar* mit einem Anteil von fast hundert Prozent liegt.

#### 17.1.3 DIE PRODUKTIONSRATE

Die Funktionen der jährlichen Erdölproduktion haben alle die Gemeinsamkeit einer Glockenkurve, jedoch abhängig vom gewählten Gesamtpotential, mit unterschiedlichen Maximalwerten bei unterschiedlichen Zeitpunkten. Während die Produktionsfunktion *Solar* relativ bald in die Niedergangsphase übergeht, sind die Szenarien *URR 7000Gb* und *URR 4500Gb* noch für Jahrzehnte in der Wachstumsphase. Die Art des Niedergangs ist bei *OLDUVAI* atypisch. Während die restlichen Funktionen ein asymptotisches Verhalten zeigen, bleibt der Produktionsrückgang bei *OLDUVAI*, durch mangelnde Alternativen, auch gegen Ende der Simulation sehr hoch.

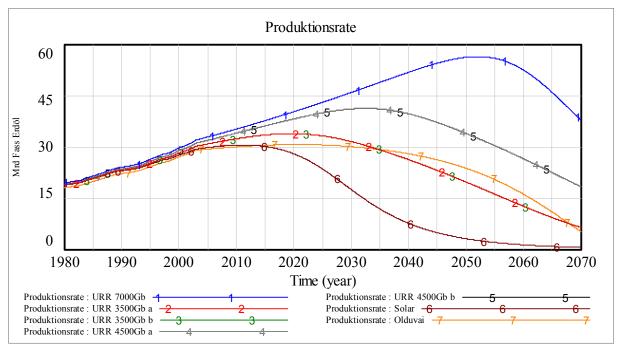


Abbildung 17-3, Szenarienübersicht: Produktionsrate, eigene Darstellung

#### 17.1.4 DER PREIS PRO FASS

Das Modell simuliert den Preis pro Fass Erdöl zu konstanten Preisen im Jahr 2006. Gleichzeitig wird im Modell davon ausgegangen, dass die Kosten pro Fass Erdöl auch gleichzeitig die Preise pro Fass Erdöl am Markt sind. Das Modell wurde ausgelegt um langfristige Kostenszenarien, unter der Voraussetzung einer kontinuierlichen Erdölproduktion abzubilden. Kurzfristige Preise am Markt, wie bei einer Produktionsregulierung oder einem Produktionsstopp kann das Modell nicht errechnen. Wie die Entwicklung der Erdölversorgung und der Erdölpreise in den Siebzigerjahren jedoch zeigt, können gerade derartige Produktionskürzungen zu enormen

Preisanstiegen führen. Auch die Sensibilität des Erdölpreises gegenüber kriegerischen Handlungen ist sehr hoch. Die Invasion Iraks in Kuwait, der Golfkrieg Anfang der Neunziger Jahre oder eine einfache Produktionsdrosselung seitens der OPEC, führen zu einem sprunghaften Anstieg des Erdölpreises. Diese Sensibilität des Preises gegenüber politischen Ereignissen zeigt auch die Volatilität der Rohölpreiskurve (siehe Abbildung 11-7). Eine relativ konstante Preisentwicklung, wie sie im Modell abgebildet ist, wird sich mit der Realität nicht decken und zeigt die Grenzen des Modells im kurzfristigen Bereich einer Preisprognose auf. Im langfristigen Bereich kann das Modell jedoch einen Trend oder eine Tendenz der einzelnen Szenarien geben, je nachdem wie die Charakteristik des einzelnen Szenariums ist.

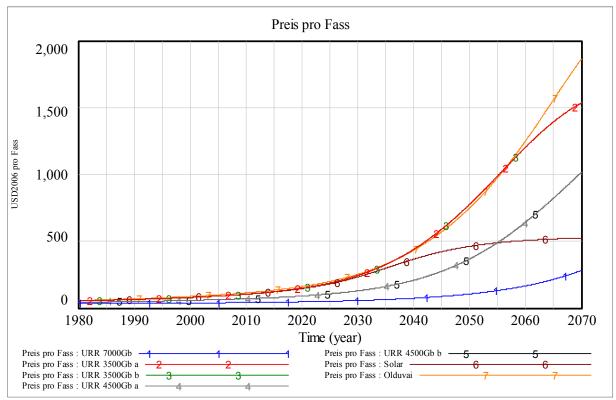


Abbildung 17-4, Szenarienübersicht, Preis pro Fass Erdöl, eigene Darstellung

Die Szenarienübersicht zeigt recht deutlich, dass die Preisprognosen über die einzelnen Szenarien sehr schwanken. Im Szenarium mit dem höchsten Gesamtpotential ist auch die Preiskurve am niedrigsten und beginnt erst Mitte des 21. Jahrhunderts zu steigen. Die Preiskurve im Szenarium *SOLAR* zeigt einen logistischen Verlauf mit einem, verglichen mit den anderen Szenarien, niedrigen Preis im Jahr 2070. Die Preiskurven mit den am niedrigsten angenommenen Gesamtpotentialen und Substitutionsanteilen sind mit Abstand am höchsten und zeigen in diesem Zeitfenster keinen bzw. nur einen sehr flachen logistischen Verlauf.

#### 17.1.5 DER MOTORISIERUNGSGRAD

Der Motorisierungsgrad reagiert sehr stark auf die veränderlichen Parameter in den einzelnen Szenarien. Im Szenarium *OLDUVAI* verringert sich der Motorisierungsgrad auf 83 PKW pro 1000 Einwohner im Jahr. Am deutlichsten steigt der Motorisierungsgrad im Szenarium *URR 7000Gb*. Er wird im Jahr 2070 den Wert 725 PKW pro 1000 Einwohner betragen.

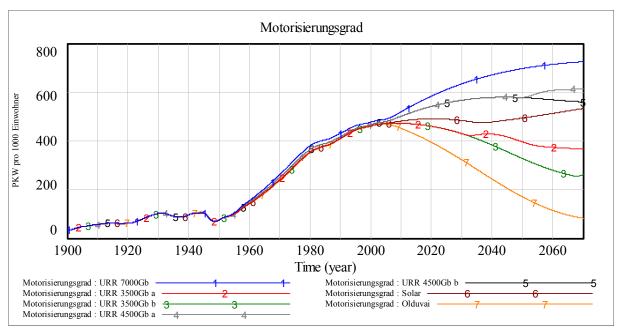


Abbildung 17-5, Szenarienübersicht, Motorisierungsgrad, eigene Darstellung

#### 17.1.6 DER VERKEHRSMITTELANTEIL AM GESAMTVERKEHRSAUFWAND

Analog zum Motorisierungsgrad beschreibt der Verkehrsmittelanteil von PKW einen ähnlichen Szenarienverlauf.

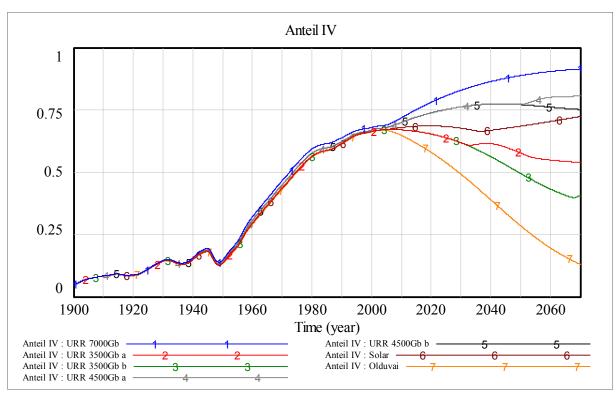


Abbildung 17-6, Szenarienübersicht, Verkehrsmittelanteile von PKW am Gesamtverkehrsaufwand, eigene Darstellung

Während der Anteil von PKW beim Szenarium *URR 7000Gb* im Jahr 2070 einen Wert von beinahe 92% erreicht, fällt er im Szenarium *OLDUVAI* auf 13%.

#### 17.1.7 Streckenlänge pro Weg

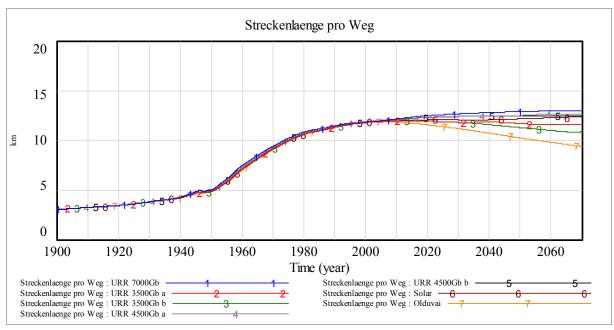
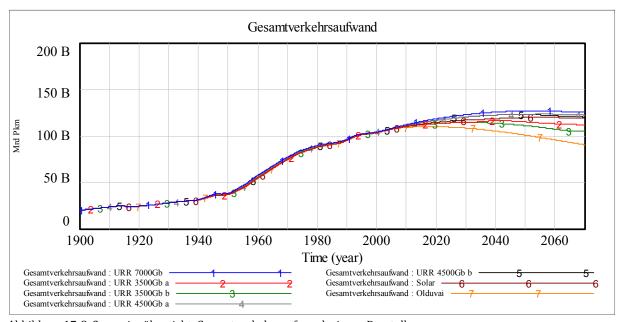


Abbildung 17-7, Szenarienübersicht, Streckenlänge, eigene Darstellung

Der Verlauf der Streckenlänge pro Weg zeigt in den meisten Szenarien einen konstanten Verlauf ab dem Jahr 2010 bis in das Jahr 2070. Das liegt daran, dass sowohl das Hybrid-, wie auch das Brennstoffzellenfahrzeug keine Geschwindigkeitssteigerungen des Systems erlauben werden. Die Szenarien *OLDUVAI* bzw. *URR 3500Gb b* zeigen, dass die Streckenlänge bei einem Rückgang des PKW-Anteils auch leicht sinken wird.

#### 17.1.8 DER GESAMTVERKEHRSAUFWAND



 $Abbildung\ 17\text{-}8, Szenarien \"{u}bersicht, Gesamtverkehrsaufwand, eigene\ Darstellung$ 

## 18 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSWORT

Mit Hilfe der Systemdynamik wurden insgesamt drei Teilmodelle entwickelt:

- 1. Teilmodell Erdöl
- 2. Teilmodell Systemgeschwindigkeit
- 3. Teilmodell *Individualverkehr*

Betrachtet man das Teilmodell Erdöl (Kapitel 9), so wird aus folgenden Überlegungen ersichtlich, dass der Preis für die Ressource *Erdöl* langfristig nur steigen kann. Mit schwindenden Ressourcen sinkt einerseits die Qualität der zu fördernden Ressource (z.B. Ölsande) und andererseits steigen auch die Förderkosten, da die Ressource schwerer zugänglich wird (vgl. Kapitel 9.2.1.2). Den steigenden Produktionskosten steht auf der anderen Seite der technologische Fortschritt der Produktionsmethoden gegenüber. Da nach Überlegungen aus Kapitel 9.2.2.3 und 11.1.1.1 jeder technologische Fortschritt irgendwann an seine Grenzen stoßen wird, ist irgendwann das Einsparungspotential durch neue Produktionsmethoden erschöpft und der Preis pro Fass Erdöl wird anwachsen. Zur Quantifizierung des technologischen Fortschritts wurde das Maß der Preiselastizität der Nachfrage herangezogen und die Variable *Technologiedauer* (vgl. Kapitel 9.2.1.5).

Die Charakteristik der Kostenkurve pro Fass Erdöl hängt vor allem auch vom Substitutionspotential von anderen Energieträgern ab (vgl. Kapitel 9.2.3). Sind andere Energieträger vorhanden, wie z.B. erneuerbare Energieträger, aber auch nicht-erneuerbare Energieträger wie Kohle, Erdgas oder Uran und können diese Energieträger Erdöl als primären Energieträger auf unserer Welt rasch ersetzen, dürfte der Preisanstieg von Erdöl nur begrenzt sein. Nach Erreichen seiner vollen Substituierbarkeit bleibt der Erdölpreis in etwa konstant (vgl. Szenarium *Solar*, Kapitel 15.4).

Für die Berechnung der Produktionsraten von Erdöl wurde die Theorie von HUBBERT aufgegriffen (vgl. Kapitel 7.7). In den unterschiedlichen Szenarien wurde je nach *Gesamtpotential* eine andere Glockenkurve generiert. Da das tatsächlich vorhandene Gesamtpotential nur erahnt werden kann, ist die Streuung der Produktionsraten recht groß (vgl. Kapitel 7.8.4.4). Die Produktionsraten der einzelnen Szenarien erreichen ihr Maximum zwischen den Jahren 2010 und 2052 – je nachdem, wie viel Erdöl auf unserem Planeten vorhanden ist.

Als Motor für das Nachfragewachstum nach Erdöl wurde das Bruttoweltprodukt (BWP) herangezogen. Durch die hohe Abhängigkeit unseres gesamten Wirtschaftstreibens vom Erdöl, ergibt sich eine hohe Korrelation zwischen dem BWP-Wachstum und dem

Erdölnachfragewachstum (vgl. Kapitel 9.2.1.3.1). Im Szenarium *Olduvai* wurde als Wachstum 1% angenommen, in den restlichen Szenarien ein Wert von 2%.

Das Teilmodell *Erdöl* ist ein mit dem Teilmodell *Systemgeschwindigkeit* u.a. über den Treibstoffpreis verbunden. Der Treibstoffpreis an den Tankstellen wurde einheitlich für alle Treibstoffsorten modelliert und orientiert sich ausschließlich am Erdölpreis (vgl. Kapitel 11.3.1.1.1).

Die Grundlage im Teilmodell *Systemgeschwindigkeit* (Kapitel 10) bildet das konstante Reisezeitbudget, welches besagt, dass die Zeit jedes Menschen, innerhalb welcher er seine Daseinsgrundfunktionen wahrnimmt über die gesamte Welt relativ konstant bei 1,1 Stunden pro Tag liegt (vgl. Kapitel 10.1.1). Durch die Zunahme der Geschwindigkeit in unserem Mobilitätsraum und durch die stark angestiegene Motorisierung in den letzten Jahrzehnten bei gleichzeitiger Konstanz des Reisezeitbudgets, hat sich der Raum in welchem wir uns bewegen, um ein Vielfaches vergrößert (vgl. Kapitel 10.2.4). Der Greißler, welchen wir vor 30 Jahren noch zu Fuß besuchten und der sich im eigenen Dorf befunden hat, ist dem großen Einkaufszentrum außerhalb der nächsten Stadt gewichen. Dieses steuern wir vor allem mit dem Auto an, da sie sich oft auf der grünen Wiese befinden und nur unzureichend mit dem öffentlichen Nahverkehr verbunden sind – außerdem, wer will schon seine Einkaufssackerl zu Fuß schleppen, wie wir das noch vor 40 Jahren gemacht haben?

Durch diese Geschwindigkeitszunahme und den gleichzeitigen Einkommenszuwächsen in den letzten Jahrzehnten, wollten sich viele Österreicher den Traum vom eigenen Einfamilienhaus im Grünen erfüllen und haben sich am Rande der Städte niedergelassen, jedoch ohne die Infrastrukturvorteile einer Stadt missen zu wollen. Die Folge ist eine sehr niedrige Siedlungsdichte, die hohe Infrastrukturkosten an Straße, Kanal, Strom und Gas mit sich zieht. Da der öffentliche Nahverkehr nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll bei einer derartig niedrigen Siedlungsdichte zu betreiben ist, sind viele Menschen an das Auto angewiesen um ihre Daseinsgrundfunktionen wahrnehmen zu können und der Motorisierungsgrad steigt folglich.

Mit Hilfe eines Rational-Choice-Ansatzes wird der Verkehrsmittelanteil am Gesamtverkehrsaufwand in Österreich anhand der Hauptparameter *Zeit, Kosten* und *Energieaufwand* bestimmt. Die Gewichtung dieser Parameter zeigt, dass der Energieaufwand für den Menschen die entscheidende Größe unter diesen Parametern darstellt (vgl. Kapitel 10.2.2.6). Es wurde nach Fußgängern, Fahrradfahrern, Autofahrern und Benützern der Eisenbahn im Modell unterschieden. Mit der charakteristischen Geschwindigkeit eines jeden Verkehrsmittels und dem vorliegenden Verkehrsmittelanteil lässt sich die Systemgeschwindigkeit nach Formel (11.4) berechnen.

Anhand des konstanten Reisezeitbudgets, der Systemgeschwindigkeit, der Bevölkerung von Österreich und der konstanten Wegeanzahl pro Tag kann der Gesamtverkehrsaufwand in Österreich nach Formel (10.13) bestimmt werden. Wird dieser Gesamtverkehrsaufwand nun mit dem PKW-Anteil am Gesamtverkehrsaufwand multipliziert erhält man den Verkehrsaufwand des Individualverkehrs.

Im Kapitel 10.2.3.2 wurde die Annahme eines konstanten Personenverkehrsaufwands pro PKW als Grundlage für die Berechnung des Motorisierungsgrades angenommen. Wie man erkennen kann, ist der Personenverkehrsaufwand pro PKW in Österreich und in anderen Ländern der Europäischen Union in den letzten Jahrzehnten konstant geblieben. Der Personenverkehrsaufwand pro PKW kann, bei Annahme eines konstanten Reisezeitbudgets und einer konstanten Wegeanzahl bei Fahrzeugen nur durch zwei Faktoren beeinflusst werden:

- Besetzungsgrad
- Geschwindigkeitserhöhung im Individualverkehr

Da nach Kapitel 10.2.3.1 der Besetzungsgrad für Jahrzehnte beim Automobil konstant geblieben ist, und sich aus der Überlegung, dass ein Auto im engsten Sinne für Individualtransport, also für einen Besetzungsgrad von 1 steht, muss auch die Geschwindigkeit im Individualverkehr in den letzten Jahrzehnten, bei gleichzeitiger Proklamierung eines konstanten Verkehrsaufwands pro PKW, konstant geblieben sein. Der steigende Motorisierungsgrad in Österreich führt zu einer größeren Dichte an Kraftfahrzeugen auf Österreichs Straßen. Da das Verkehrsnetz in Österreich kaum noch wächst und sich einem Sättigungszustand nähert, muss bei einer Übersättigung der Straße auch die Geschwindigkeit zurückgehen (vgl. Kapitel 11.3.3.1). Gleichzeitig ist seit den siebziger Jahren durch die Einführung von Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Autobahnen und Bundesstraßen eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit bei Kraftfahrzeugen kaum mehr möglich. Der Motorisierungsgrad steht in engem Zusammenhang zum Urbanisierungsgrad bzw. der Bevölkerungsdichte, wie man in Kapitel 10.2.3.3 sehen konnte. Der zu erwartende steigende Urbanisierungsgrad in Österreich fließt folglich in die Berechnung des Motorisierungsgrades anhand der Formel (10.17) mit ein.

Im Teilmodell *Individualverkehr* (Kapitel 11) werden die Substitutionsprozesse der einzelnen Fahrzeugtypen berechnet. Dieses Teilmodell ist mit dem Teilmodell *Systemgeschwindigkeit* über die Geschwindigkeit im Individualtransport und dem Motorisierungsgrad rückgekoppelt.

Der Substitutionsprozess zwischen Fahrzeugen wurde im Modell anhand von Kostenvergleichen der einzelnen Fahrzeugtypen implementiert. Es wurden die Kosten in Fixkosten, die sich aus den Anschaffungskosten und dem Abschreibungszeitraum ergeben und in variable Kosten, welche sich aus Treibstoffkosten, dem Treibstoffverbrauch der Autoflotte und den zurückgelegten

Kilometern pro Jahr ergeben, aufgeteilt. In Kapitel 11.3.1.3 erkennt man, dass die Gesamtkosten pro Fahrzeug und Jahr in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch die Einführung der Massenproduktion zurückgehen und für lange Zeit in etwa konstant bleiben. Erst durch die steigenden Treibstoffpreise nimmt der Anteil der variablen Kosten einen immer größeren Teil der Gesamtkosten ein, was zu einem Steigen der Gesamtkosten führt. Doch nicht nur die variablen Kosten nehmen mit den Treibstoffkosten zu, sondern auch die Fixkosten. Da die Hauptbestandteile eines Autos aus Stahl, Aluminium und Kunststoffen bestehen, und auch bei diesen Werkstoffen mit steigenden Kosten zu rechnen ist, werden die Herstellungskosten für Fahrzeuge zumindest in naher Zukunft steigen (siehe Kapitel 11.3.1.2).

Die Anschaffungskosten und die variablen Kosten von Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen wurden außerdem in Abhängigkeit zu Treibstoffpreisen für konventionelle Fahrzeuge gesetzt um einen technologischen Fortschritt in neue Technologien bei steigenden Treibstoffpreisen zu simulieren.

In den einzelnen Szenarien ist die Entwicklung des Motorisierungsgrades als recht unterschiedlich zu bewerten. Während im Szenarium *URR 7000Gb,* also im Szenarium mit sehr hohem Gesamtpotential, der Motorisierungsgrad sich nur gemächlich abflacht und im Jahr 2070 ca. 725 PKW pro 1000 Einwohner in Österreich erreicht, ist im Szenarium *OLDUVAI* ein deutlicher Rückgang des Motorisierungsgrades zu bemerken.

Der PKW-Anteil am Gesamtverkehrsaufwand hat ebenfalls in den Szenarien *URR 7000Gb* und *OLDUVAI* seine Grenzwerte. Der Anteil für PKW wächst bei gleichzeitiger Abgabe von Anteilen der anderen Verkehrsmittel im größten Fall auf über 91% an. Im Szenarium *OLDVUAI* sinkt der Anteil des PKWs unter die Anteile von Eisenbahn, Radfahrern und Fußgänger auf 13%.

Der Gesamtverkehrsaufwand und die Streckenlänge pro Weg werden in den unterschiedlichen Szenarien eine schmalere Bandbreite als beim Motorisierungsgrad aufweisen. Dies liegt daran, dass in den Szenarien mit großem Motorisierungsrückgang ein starkes Anwachsen der Anteile für die Eisenbahn festzustellen ist und dadurch die Systemgeschwindigkeit nur dezent und nicht unter den Wert aus dem Jahr 1970 fallen wird. Das zeigt, dass der Zersiedlungsvorgang, welcher in den letzten vier Jahrzehnten stattgefunden hat, nur mehr bedingt wieder durch eine Verdichtung der Siedlungsstrukturen rückgängig gemacht werden kann. Es scheint, als hätte sich der Mensch an die Erlangung des Wohlstandes (z.B. Einfamilienhaus), der mit der Motorisierung Einzug gehalten hat, gewöhnt und wolle diesen nicht wieder aufgeben. Durch diesen Umstand wäre es möglich, dass Grundstücke, welche gut an das öffentliche Nahverkehrsnetz angebunden sind, erheblich im Wert steigen und das Gesetz des konstanten Reisezeitbudgets vielleicht in Zukunft nicht mehr gelten könnte. Die Menschen könnten gewillt

sein, mehr Zeit für die Mobilität zu opfern um sich den Traum vom Haus im Grünen, auch ohne Auto zu bewahren.

Angesichts des bevorstehenden möglichen Energieversorgungsproblems, vor welchem die Menschheit in Zukunft stehen könnte, sind langfristige Lösungen, welche seitens der Politik gesetzt werden, schwer bis gar nicht zu erkennen. Die Energieversorgung mit Erdöl wird früher oder später in dem Ausmaß, wie es jetzt geschieht, nicht mehr aufrechtzuerhalten sein. Der Zeitpunkt, wann dies geschehen wird, ist angesichts der verschleierten und spärlich zugänglichen Daten von Außenstehenden schwer zu beziffern.

Die Lösung für ein langfristiges Energiekonzept liegt eindeutig in der Entbindung von nichterneuerbaren Energieträgern, hin zu erneuerbaren Energieträgern. Die Technologie für die Nutzung derartiger Energieträger für die breite Masse ist vorhanden, und wartet nur auf die Weiterentwicklung und die Nutzung durch die Menschheit. Je schneller dieser Prozess vonstatten geht, desto kleiner ist das Potential für energiebedingte Krisen oder Kriege. Die Tatsache, dass eines Tages die fossile Energie wieder abgelöst wird, ist schon entschieden und scheinen viele Menschen zu vergessen. 141 Sollte das abnehmende Angebot an Erdöl am Weltmarkt zu höheren Preisen und folglich zu kriegerischen Auseinandersetzungen führen, kann man davon ausgehen, dass die Erdölversorgung für kleine Länder ohne militärischen Einfluss, wie für Österreich, zuerst zum Erliegen kommt bzw. unterschiedlichste Preise für Erdöl am Weltmarkt zu bezahlen wären.

In diesem Sinne liegt es nur an der Menschheit selbst, wie die Persiflage von Jeremy K. LEGGET (siehe Prolog, Kapitel 6) weitergeht. Für einen Einschlag eines Meteoriten, welcher die Menschheit unter Umständen auslöschen könnte, können die Menschen nicht viel unternehmen, aber es wäre in gewisser Weise schon sehr widersprüchlich und lachhaft, wenn sich die intelligentesten Wesen auf diesem Planeten durch Eigeninteresse und Passivität selbst auslöschen würden.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>141</sup> Hermann SCHEER, *Solare Weltwirtschaft – Strategie für die ökologische Moderne*, München, 2002, Seite 250ff

## 19 LITERATURVERZEICHNIS

- ALPERIN L. M. (1983). *History of the Gulf Intracoastal Waterway*, US Army Engineer Institute for Water Resources, Alexandria, Seite 3, 13
- ASPO (THE ASSOCIATION FOR THE STUDY OF PEAK OIL&GAS) (2008). Newsletter #95, November 2008, Seite 4
  Internet: http://www.aspo-ireland.org/contentFiles/newsletterPDFs/newsletter95\_200811.pdf, Stand: 09. September 2009
- ASPO (2008). Newsletter #91, Juli 2008, Internet: http://www.aspo-ireland.org/contentFiles/newsletterPDFs/newsletter91\_200807.pdf, Stand: 29. Juli 2008
- ASPO (2009). Newsletter #99, März 2009, Seite 4, Internet: http://www.aspoireland.org/contentFiles/newsletterPDFs/newsletter99\_200903.pdf, Stand: 11. September 2009
- ASPO, CAMPBELL C. J. (2001). *Peak Oil: A turning for Mankind*, Hubbert Center Newsletter #2001/2-1, Seite 3
- ASPO, FENG L., LI J., PANG X. (2008). *China's oil reserve forecast and analysis based on peak oil models*, Energy Policy 36, 4149–4153, Seite 4150
- ASPO, HÖÖK M., ALEKLETT K. (2009). *Historical trends in American coal production and a possible future outlook*, International Journal of Coal Geology 78, 201–216, Seite 207ff
- ASPO, HÖÖK M. (2009). Depletion and Decline Curve Analysis in Crude Oil Production, Global Energy Systems Department for Physics and Astronomy, Uppsala University, Seite 24
- ASPO, HÖÖK M. (2009). *Norway reduced the Barent Sea resource estimate*, 2009, Internet: http://www.peakoil.net/norway-reduced-the-barent-sea-resource-estimate, Stand: 11. September 2009
- ASPO, LAHERRERE J. (2001). *Estimates of Oil Reserves*, EMF/IEA/IEW Konferenz, Laxenburg, 19. Juni 2001
- ASPO, ZITTEL W., SCHINDLER J. (2001), *Future world oil supply*, International Summer School on the politics and economics of renewable energy, Salzburg, 2002, Seite 24ff
- BALL M., WIETSCHEL M. (2009). The *future of hydrogen opportunities and challenges*, International Journal Of Hydrogen Energy 34, Seiten 618 und 620
- BALL P. (2005). *Critical mass how one thing leads to another,* arrow books, London, 2005, Seite 197ff
- BALZ W., FRIK H. (1996). Teil II: Modellkalibrierung und –bewertung in Entwicklung von Verfahren zur großräumigen Prognose der Verkehrsentwicklung und Folgerungen für

- den Datenaustausch von Verkehrsrechnerzentralen, Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 727, Bonn-Bad Godesberg, Seite 123
- BAMBERG S., GUMBL H.,SCHMIDT P. (2002). Rational Choice und theoriegeleitete
  Evaluationsforschung Am Beispiel der "Verhaltenswirksamkeit verkehrspolitischer
  Maßnahmen", Leske + Budrich, Opladen, Seite 70
- BEHRENS W. W. (1972). *The dynamics of natural resource utilization*, System Dynamics Group, Massachusetts Institute of Technology ,Cambridge, Seite 93
- BEHRENS W. W. (1972). *The dynamics of natural resource utilization*, System Dynamics Group, Massachusetts Institute of Technology ,Cambridge, Seite 95
- BEHRENS W. W. (1972). *The dynamics of natural resource utilization*, System Dynamics Group, Massachusetts Institute of Technology ,Cambridge, Seite 96
- BERGER H. (2007) *Dem Elektroauto gehört die Zukunft*, Pressemeldung der FH-Joanneum Kapfenberg, 20. November 2007, Internet: http://www.fh-joanneum.at/aw/home/Info/Online-Magazin/~l/pressemeldungen/?archiv=1&lan=de, Stand: 4. Februar 2009
- BP p.l.c. (2008). Statistical Review of World Energy 2008, Internet:

  http://www.bp.com/liveassets/bp\_internet/globalbp/globalbp\_uk\_english/reports\_a

  nd\_publications/statistical\_energy\_review\_2008/STAGING/local\_assets/downloads/p

  df/statistical\_review\_of\_world\_energy\_full\_review\_2008.pdf, Stand: 29. Juli 2008
- BRAESS H.-H., SEIFFERT U. (2007). *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik,* Wiesbaden, Seite 734-736
- BROWN T. L. (2006). *Chemistry the central science,* Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, Seite 102
- BROWN T. L. (2006). *Chemistry the central science,* Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, Seite 1035
- BROWN T. L. (2006). *Chemistry the central science,* Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, Seite 973ff
- BRÜDERL J., PREISENDÖRFER P. (1995). Der Weg zum Arbeitsplatz: Eine empirische Untersuchung zur Verkehrsmittelwahl in DIEKMANN A., FRANZEN A., Kooperatives Umwelthandeln Modelle, Erfahrungen, Maßnahmen, Rüegger Ag, Zürich, 1995, Seite 72

- BRÜDERL J., PREISENDÖRFER P. (1995). Der Weg zum Arbeitsplatz: Eine empirische Untersuchung zur Verkehrsmittelwahl in DIEKMANN A., FRANZEN A., Kooperatives Umwelthandeln Modelle, Erfahrungen, Maßnahmen, Rüegger Ag, Zürich, 1995, Seite 82
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE, Umweltbilanz Verkehr Zahlenspiegel, Österreich 1950-1996, 1997, Seite 10
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, JUGEND UND FAMILIE (1997). *Umweltbilanz Verkehr Zahlenspiegel, Österreich 1950-1996*, Seite 20, 21
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN (2002). Mobilität in Deutschland Ergebnisbericht, 2002, Internet: http://daten.clearingstelleverkehr.de/196/10/mid2002\_ergebnisbericht.pdf, Stand: 14. Juli 2008
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN. Mobilität in Deutschland Ergebnisbericht 2002, Seite 54
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN. Mobilität in Deutschland Ergebnisbericht 2002, Seite 57
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION und TECHNOLOGIE (2007). *Verkehr in Zahlen 2007*, Internet:

http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz07gesamt.pdf, Stand: 21. August 2008, Seite 47

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION und TECHNOLOGIE (2007). Verkehr in Zahlen 2007, Internet:

http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz07gesamt.pdf, Stand: 21. August 2008, Seite 80

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION und TECHNOLOGIE (2007). Verkehr in Zahlen 2007, Internet:

http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz07gesamt.pdf, Stand: 29. August 2008, Seite 91, Abbildung 55

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION und TECHNOLOGIE (2007). Verkehr in Zahlen 2007, Internet:

http://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz07gesamt.pdf, Stand: 29. August 2008, Seite 92

CAMPBELL C. J., LAHERRERE J. (1998). *The end of cheap oil*, Scientific American, Seite 79 und 80ff

- CERA (CAMBRIDGE ENERGY RESEARCH ASSOCIATES). Peak Oil Theory World Running Out of Oil Soon is Faulty, Cambridge USA, 14. November 2006, Internet: http://www.cera.com/aspx/cda/public1/news/pressReleases/pressReleaseDetails.a spx?CID=8444, Stand: 23. Juli 2008
- CERBE G., HOFFMANN H.-J. (1999). Einführung in die Thermodynamik Von den Grundlagen zur technischen Anwendung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, Seite 34
- COOKE R. R. (2004). *Oil, Jihad and Destiny: Will Declining Oil Production Plunge Our Planet into a Depression?*, The Cultural Economist, Saskatoon, Seite 49
- COOPER J. C. B. (2003). *Price elasticity of demand for crude oil: estimates for 23 countries,* OPEC, Seite 4
- DALE L. L. (1984). *The Pace of Mineral Depletion in the United States,* Land Economics, Vol. 60, No. 3, Seite 259ff
- DE CASTRO C., MIGUEL L. J., MEDIAVILLA M. (2009). *The role of non conventional oil in the attenuation of peakoil*, Energy Policy, Seiten 1827 und 1828, © 2009 Elsevier Ltd.
- DE SOUSA L. *Hubberts Peak Mathematics*, Internet: http://wolf.readinglitho.co.uk/subpages/hubbertmaths/hubbertmaths.html, Stand: 23. August 2008
- DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) (2005). *The Validity of Food Miles as an Indicator of Sustainable Development,* Final Report, Seite 7
- DIAMOND J. M. (1999). Guns, germs and steel The fates of human societies, W. W. Norton Company, New York, Seite 242ff
- DUBASH M. (2005). *Moore's Law is dead, says Gordon Moore in* Techworld, London, 13 April 2005, Internet: http://www.techworld.com/opsys/news/index.cfm?newsid=3477, Stand 3. August 2008
- DUNCAN R. C. (2006). *The Olduvai Theory Energy, Population, and Industrial Civilization*, The Social Contract, Vol. 16, No. 2, Seite 1
- EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). *Crude Oil Production,* Internet: http://www.eia.doe.gov/neic/infosheets/crudeproduction.html, Stand: 23. Mai 2008
- EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). *Estimated Primary Energy Consumption in the United States, Selected Years, 1635-1945*, Internet: http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/pdf/pages/sec13\_e\_1.pdf, Stand: 23. April 2008
- EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). *Spot Prices,* Internet: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet\_pri\_spt\_s1\_d.htm), Stand: 9. Jänner 2008

- EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). *U.S. Crude Oil Field Production (Thousand Barrels per Day)*, Internet: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/mcrfpus2a.htm Stand: 23. März 2008
- EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). *U.S. Finished Motor Gasoline Product Supplied,* Internet: Internet: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/hist/mgfupus1a.htm, Stand: 23. Juli 2008
- EINSTEIN A. (1917). Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Friedr. Vieweg&Sohn, Braunschweig, Vorwort
- EINSTEIN A. (1917). Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Friedr. Vieweg&Sohn, Braunschweig, Seite 24
- EUROSTAT. Statisitical pocket book 2007, Internet: http://ec.europa.eu/dgs/energy\_transport/figures/pocketbook/doc/2007/dn\_3\_6\_mea ns\_of\_transport\_2007.xls, Stand: 29. August 2008
- EUROSTAT. Verkehr/Straßenverkehr/Länge der übrigen Straßen nach Straßenkategorien, Internet: http://ec.europa.eu/eurostat, Stand: 5. Mai 2008
- FEICHTINGER G. (1986). Demographische Entwicklungstendenzen in der Welt und in Österreich, in Evolution, Mensch, Technik Perspektiven für das nächste Jahrzehnt, ORAC Verlag, Wien, Seite 9ff
- FHWA (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION). Annual vehicle distance traveled in miles, US Department of Transportation, Internet: http://www.fhwa.dot.gov/ohim/summary95/vm201.pdf, Stand 23. Juli 2008
- FORD A., FORD F.A. (1999). Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental systems, Island Press, Washington DC, Seite 225ff
- FORRESTER J. W. (1972). *Grundzüge einer Systemtheorie (Principles of Systems)*, Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, Seite 15ff, 88
- FORRESTER J. W. (1972). Der teuflische Regelkreis Das Globalmodell der Menschheitskrise, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart, Seite 38ff
- GETHMANN C. F., STREFFER Ch., HEINLOTH K., WITT A. (2005). *Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung*, Walter de Gruyter, Berlin, Seite 58, 59

- GIMBEL B. (2008). The Hunt for Oil at the Top of the World. Fortune: Special Issue / Fortune 500, Volume 157(9), 2008
- GLOVER P. (2008). *Aramco Chief Debunks Peak Oil*, Energy Tribune, Houston, 17. Jänner 2008, Internet: http://www.energytribune.com/articles.cfm?aid=764, Stand: 4. April 2008
- GOLD R., DAVIS A, (2007). Oil Officials see limit looming in production, The Wall Street Journal, Internet:

  http://online.wsj.com/article/SB119543677899797558.html?mod=hpp\_us\_whats\_ne ws, Stand: 12. Mai 2008
- GONCALVES P. *The Dynamics of Natural Resource Utilization*, Internet: http://www.metasd.com/models/Library/Environment/NaturalResources/, Stand: 12. Juni 2008
- GUILFORD J. P. (1957). *Louis Leon Thurstone 1887-1955 A Biographical Memoir*, National Academy of Sciences, Washington DC, Seite 352
- GUNITSKIY V. (2008). *On the Thin Ice: Water Rights and Disputes in the Arctic Ocean*, Journal of International Affairs, Volume *61*(2), Seite 261-272
- HELBING D., KÖLBL R. *Energy laws in human travel behaviour*, New Journal of Physics, 2003, Seite 48.4, Internet: http://www.iop.org/EJ/article/1367-2630/5/1/348/nj3148.pdf, Stand: 29. August 2008
- HOPSON J. L., GREENE D. L., LI J. (2003). Running out of and into oil: Analyzing global oil depletion and transitition through 2050, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Knoxville, Seite 21
- HOPSON J. L., GREENE D. L., LI J. (2003). Running out of and into oil: Analyzing global oil depletion and transitition through 2050, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Knoxville, Seite 7ff
- HOPSON J.L., GREENE D. L.,LI J. (2003). Running out of and into oil: Analyzing global oil depletion and transitition through 2050, Knoxville, Seite A-16
- HOTELLING H. (1931). *The Economics of Exhaustible Resources*, The Journal of Political Economy, Vol. 29, No.2, Seite 141, 142
- HUBBERT M. K. (1956). *Nuclear Energy and Fossil Fuels*, Publication No. 95, Shell Development Company, Houston, Seite 24
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *Medium-Term Oil Market Report*, World Petrolem Congress am 1. Juli 2008, Internet:

- http://iea.org/textbase/speech/2008/eagles\_mtomr2008.pdf, Stand: 1. September 2008, Seite 22
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). World Energy Outlook 2004, OECD, Paris, Seite 94, 96
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). Annual Report 2006: *Hybrid and electric vehicles The electric drive takes off*, 2007, Internet: http://www.ieahev.org/pdfs/2006 annual report.pdf, Stand: 2. August 2008
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). *Outlook for hybrid and electric vehicles*, 2008, online, Internet: http://www.ieahev.org/pdfs/ia-hev\_outlook\_2008.pdf, 2. August 2008
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). World Energy Outlook 2007, OECD, Paris, Seite 74
- IIASA (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS). Internet: ftp://ftp.iiasa.ac.at/pub/ecs/ag\_book/usa-cars.csv, Stand: 2. April 2008
- IIASA (INTERNATIONAL INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEMS ANALYSIS). Internet: ftp://ftp.iiasa.ac.at/pub/ecs/ag\_book/usa-infra.csv, Stand: 2. April 2008
- INTEL. Moore's law, Internet:

  http://www.intel.com/cd/corporate/techtrends/emea/eng/209727.htm, Stand: 3.

  August 2008
- IRF (INTERNATIONAL ROAD FEDERATION). World Road Statistics 2006 Data 1999 to 2004, Genf, 2006, Seiten 8-13, 139-142
- JACKSON R., BOWMAN M. W., PARTRIDGE E. (2006). Flugzeuge Die internationale Enzyklopädie, Motorbuch Verlag, Stuttgart, Seite 22
- JACKSON R., BOWMAN M. W., PARTRIDGE E. (2006). Flugzeuge Die internationale Enzyklopädie, Motorbuch Verlag, Stuttgart, Seite 67
- JACKSON R., BOWMAN M. W., PARTRIDGE E. (2006). Flugzeuge Die internationale Enzyklopädie, Motorbuch Verlag, Stuttgart, Seite 499
- JETSCHGO J., LACINA F., PAMMER M., SANDGRUBER R. (2004). Österreichische Industriegeschichte 1848-1955, Österreichische Industriegeschichte GmbH (Hrsg.), Linz, Seite 237ff

- JOWETT B. (1968). Translation of *The Republic- by Plato*, Plain Label Books, New York, Seite 111
- KAHN RIBEIRO S., KOBAYASHI S., BEUTHE M., GASCA J., GREENE D., LEE D. S., MUROMACHI Y., NEWTON P. J., PLOTKIN S., SPERLING D., WIT R., ZHOU P. J. (2007). Transport and its infrastructure. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [METZ B., DAVIDSON O.R., BOSCH P.R., DAVE R., MEYER L.A. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Seite 339, 340
- KAHN RIBEIRO S., KOBAYASHI S., BEUTHE M., GASCA J., GREENE D., LEE D. S., MUROMACHI Y., NEWTON P. J., PLOTKIN S., SPERLING D., WIT R., ZHOU P. J. (2007). Transport and its infrastructure. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [METZ B., DAVIDSON O.R., BOSCH P.R., DAVE R., MEYER L.A. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Seite 354ff
- KNOFLACHER H. (2007). *Grundlagen der Siedlungs- und Verkehrsplanung: Verkehrsplanung,* Böhlau Verlag, Wien, S.44ff
- KNOFLACHER H. (2007). *Grundlagen der Siedlungs- und Verkehrsplanung: Verkehrsplanung,* Böhlau Verlag, Wien, S.230ff
- KNOFLACHER H. (2001). *Stehzeuge der Stau ist kein Verkehrsproblem*, Böhlau Verlag, Wien, Seite 142
- KRAMER, STREBEL, KAYSER (Hrsg.) (2003), Internationale Umweltmanagement, Gabler Verlag, S. 144
- KUBISZEWSKI I. (2008). *Motor Vehicle Air Pollution Control Act of 1965, United States*, Encyclopedia of Earth, Internet: http://www.eoearth.org/article/Motor\_Vehicle\_Air\_Pollution\_Control\_Act\_of\_1965% 2C\_United\_States, Stand: 13. August 2008
- LEGGETT J. K. (2006). *Peak-Oil Die globale Energiekrise, die Klimakatastrophe und das Ende des Ölzeitalters,* Kiepenheuer & Witsch, Köln, Seite 7ff
- LEVY A. (2000). From Hotelling to Backstop Technology, Department of Economics, University of Wollongong, Wollongong, Seite 1
- LOHSE D., SCHNABEL W. (1980). *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Straßenverkehrsplanung*, Transpress, Berlin, Seite 593

- LOHSE D., SCHNABEL W. (1997). Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, Band 2: Verkehrsplanung, Verlag für Bauwesen, Berlin, 229
- MADDISON A. (2008). Statistics on World Population, GDP and Per Capita GDP, 1-2006 AD, Faculty of Economics University of Groningen, Online im Internet: URL: http://www.ggdc.net/maddison/Historical\_Statistics/horizontal-file\_09-2008.xls, Stand: 13. Dezember 2008
- MAGGIO G., CACCIOLA G. (2009).A variant of the Hubbert curve for world oil production forecasts, Energy Policy, , Seite 1 und 2, Online im Internet: URL: http://www.sciencedirect.com/science?\_ob=ArticleURL&\_udi=B6V2W-4WR0D1J-1&\_user=464393&\_rdoc=1&\_fmt=&\_orig=search&\_sort=d&\_docanchor=&view=c&\_acct=C000022138&\_version=1&\_urlVersion=0&\_userid=464393&md5=ecacd0c1f06bc49087c22467c9b686c7, Stand: 10. September 2009
- MARSHALL S. (2007). *Renewable Energy in the Pacific Northwest*, Law Seminars International, Third Annual Conference, Seattle, Seite 2
- MARTIN J. R. *The Learning Curve*, The Management and Accounting Web, Internet: http://maaw.info/LearningCurveSummary.htm, Stand: 7.August 2008
- MEADOWS D. L. (2004). *Limits to Growth The 30-Year Update*, Chelsea Green Publishing ,White River Junction, Seite 87ff
- MEADOWS D. L. (2004). *Limits to Growth The 30-Year Update*, Chelsea Green Publishing ,White River Junction, Seite 90ff
- MEYERS LEXIKONVERLAG (2007). Assimilation, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG (Hrsg.), Online im Internet: URL: http://lexikon.meyers.de/index.php?title=Assimilation&oldid=285504, Stand: 12. August 2008
- MEYERS LEXIKONVERLAG (2007). *Dissimilation,* Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG (Hrsg.), Online im Internet: URL: http://lexikon.meyers.de/index.php?title=Dissimilation&oldid=170792, Stand: 12. August 2008
- MEYERS LEXIKONVERLAG (2007). *Halbwertszeit,* Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG (Hrsg.), Online im Internet: URL: http://lexikon.meyers.de/index.php?title=Halbwertszeit&oldid=154309, Stand: 16. Juni 2008
- MEYERS LEXIKONVERLAG (2007). System, Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG (Hrsg.), Online im Internet: URL: http://lexikon.meyers.de/index.php?title=System&oldid=142210, Stand: 12. August 2008
- MOORE D. S., McCABE G. P. (1989). Introduction to the Practice of Statistics. New York, Seite 109

- MORSE W. J. (1972). *Reporting Production Costs That Follow the Learning Curve Phenomenon,* The Accounting Review, Vol. 47, No. 4, Seite 756
- NAKICENOVIC N. (1987). The automobile road to technological change Diffusion of the automobile as a process of technological substitution, Laxenburg, Seite 321
- NAKICENOVIC N. (1988). *Dynamics and Replacement of U.S. Transport Infrastructures*, in AUSUBEL J. H., *Cities and their vital systems Infrastructure past, present, and future*, National Academy Press, Washington DC, Seite 184
- NAKICENOVIC N., GRÜBLER A., NORDHAUS W. D. (2002). *Technological change and the environment*, Resources for Future, Washington DC, Seite 167
- NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION). The Learning Curve Calculator, Cost Estimating and Assessments Office, Internet: http://cost.jsc.nasa.gov/learn.html, Stand: 7. August 2008
- ODUM E. P. (1999). Ökologie Grundlagen, Standorte, Anwendung, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1999, Seite 42
- ODUM E. P. (1999). *Ökologie Grundlagen, Standorte, Anwendung*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1999, Seite 219ff
- OLBRICH R. (2006). *Marketing Eine Einführung in die marktorientierte Unternehmensführung, Springer Verlag,* Berlin/Heidelberg, Seite 149ff
- PAEGER J. Eine kleine Geschichte des menschlichen Energieverbrauchs, Internet: http://www.oekosystem-erde.de/html/energiegeschichte.html, Stand: 1. September 2008
- PINDYCK R.S. (1978). *The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources*, The Journal of Political Economy, Vol. 86, No. 5, Seite 843
- PRIGOGINE I., STENGERS I. (1981). Dialog mit der Natur Neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens, R. Piper & Co. Verlag, München, 1981, Seite 136
- SALVADOR, A. (2005). *Energy: A historical perspective and 21st century forecast*: AAPG Studies in Geology 54, Seiten 33-121. Tabelle 8
- SAMUELSON P. A., NORDHAUS W. D. (1998), *Volkswirtschaftslehre, Wirtschaftsverlag Carl Ueberreuter*, Frankfurt/Wien,1998, Originaltitel: *Economics, McGraw-Hill, New York 1995*, Seite 88f

- SAMUELSON P. A., NORDHAUS W. D. (1998), *Volkswirtschaftslehre, Wirtschaftsverlag Carl Ueberreuter*, Frankfurt/Wien,1998, Originaltitel: *Economics, McGraw-Hill, New York* 1995, Seite 150, 151
- SCHEER H. (2002). *Solare Weltwirtschaft Strategie für die ökologische Moderne,* Antje Kunstmann GmbH, München, Seite 250ff
- SCHEIER Ch., HELD D. (2006). *Wie Werbung wirkt: Erkenntnisse des Neuromarketings*, Haufe Verlag DE, Seite 53
- SCHOLL-KUHN Ch., PRASCHL M., RISSER R. (1994). *Gute Vorsätze und Realität: Die Diskrepanz zwischen Wissen und Handeln am Beispiel Verkehrsmittelwahl*, Schriftenreih der Sektion I des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie (Hrsg.), Wien, Seite 72
- SCHWARTZ N. L., KAMIEN M. I. (1970). *Market Structure, Elasticity of Demand and Incentive to Invent*, Journal of Law and Economics, Vol. 13, No. 1 (Apr., 1970), pp. 241-252, Seite 245
- SCHWARTZ R. (2002). *Controlling Systeme Eine Einführung in Grundlagen, Komponenten und Methoden des Controlling,* Gabler Verlag, Wiesbaden, Seite 148, 149, 155
- SEIDENSTICKER R. B. (2006). *Future Hype: the myths of technological change*, Berret-Koehler, San Francisco, Seite 1
- SKREBOWSKI Ch. (2005). *The production reality,* Energy Institute, Internet: http://www.energyinvestmentstrategies.com/infoFiles/articlePDFs/060105Skrebowski Projections.pdf, Stand: 4. September 2008, Seite 12
- STATISTIK AUSTRIA. Berechnung des vorläufigen Bevölkerungsstandes 31.10.2008 nach Gemeinden, Internet:

  http://www.statistik.at/web\_de/static/berechnung\_des\_vorlaeufigen\_bevoelkerungs standes\_31.10.2008\_nach\_gemeinden\_034212.pdf, Stand: 26. März 2009
- STATISTIK AUSTRIA. Bevölkerung seit 1869 nach Politischen Bezirken (einschl. Veränderung 1991 bis 2001 nach Komponenten), Internet:

  http://www.statistik.at/web\_de/static/bevoelkerung\_seit\_1869\_nach\_politischen\_be zirken\_einschl.\_veraenderung\_199\_023291.xls, Stand: 6. August 2008
- STATISTIK AUSTRIA. *Bevölkerungsstand 2007*, Internet: http://www.statistik.at/dynamic/wcmsprod/idcplg?IdcService=GET\_NATIVE\_FILE& dID=55770&dDocName=027512, Stand: 31. August 2008
- STATISTIK AUSTRIA, *Bevölkerungsvorausschätzung 2006-2050 für Österreich*, Internet: http://www.statistik.at/web\_de/statistiken/bevoelkerung/demographische\_prognos en/bevoelkerungsprognosen/index.html, Stand: 13. Juli 2008

STATISTIK AUSTRIA. Ergebnisse im Überblick: Vorausberechnete Bevölkerungsstruktur für Österreich 2006-2075 laut Hauptszenario, Internet:

http://www.statistik.at/web\_de/static/ergebnisse\_im\_ueberblick\_vorausberechnete\_bevoelkerungsstruktur\_fuer\_oeste\_027308.xls, Stand: 6. August 2008

STATISTIK AUSTRIA, *Jahresdurchschnittsbevölkerung seit 1870*, Internet: http://www.statistik.at/web\_de/static/jahresdurchschnittsbevoelkerung\_seit\_1870\_022311.xls, Stand: 13. Dezember 2008

STATISTIK AUSTRIA. *KFZ Bestand 2008*, Tabelle 7, Internet: http://www.statistik.at/web\_de/static/kfz-bestand\_2008\_035580.pdf, Stand: 26. März 2009

STATISTIK AUSTRIA, Volkszählung 2001 – Wohnbevölkerung nach Gemeinden (mit der Bevölkerungsentwicklung seit 1869)

THE OIL DRUM (2006). *Peak Oil Update - November 2006: Production Forecasts and EIA Oil Production Numbers*, Internet: http://www.theoildrum.com/story/2006/11/13/225447/79, Stand: 12. Dezember 2007

THE SCOTTISH GOVERNMENT (2005). *Travel by Scottish Residents*, 19. April 2005, Internet: http://www.scotland.gov.uk/Publications/2005/04/1894658/46593, Stand: 5. August 2008

THE US NATIONAL ARCHIVE. Eli Whitney's Patent for the Cotton Gin, Internet: http://www.archives.gov/education/lessons/cotton-gin-patent/, Stand: 13. Mai 2008

TRENDLINE RESEARCH, *21-Model URR Estimate 2008,* Internet: http://www.trendlines.ca/urr.htm, Stand: 4. Februar 2009

TSUCHIYA H., KOBAYASHI O. (2004). *Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, Seite 988

TUPOLEV, *Airlines*, Internet: http://www.tupolev.ru/English/Show.asp?SectionID=49&Page=10, Stand: 3. September 2008

UIC (INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS). Internet: http://www.uic.asso.fr/download.php/stats/4trim2007\_op.xls, Stand: 12. August 2008

UITP (UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS) (2001). The Millenium Cities Database for Sustainable Mobility

- UNITED NATIONS COMMON DATABASE (UNCDB). Internet:
  - http://unstats.un.org/unsd/cdb\_discontinued/cdb\_discontinued.asp, Stand: 13. August 2008
- UNITED NATIONS, World Population to 2300. Internet:

http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/WorldPop2300final.pdf, Stand 23. Juni 2008

- UNITED NATIONS, World Population Prospects The 2006 Revision, Internet: http://data.un.org/Default.aspx, Stand 23. März 2009
- US CENSUS BUREAU. Historical Estimates of World Population, Internet: http://www.census.gov/ipc/www/worldhis.html, Stand: 23. Juni 2008
- US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Bureau of Transportation Statistics, *US Passenger car vehicle miles, Internet:*

http://www.bts.gov/publications/national\_transportation\_statistics/html/table\_01\_32. html, Stand: 29. August 2008

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Bureau of Transportation Statistics, *US Passenger car passenger miles, Internet:* 

http://www.bts.gov/publications/national\_transportation\_statistics/html/table\_01\_37. html, Stand: 29. August 2008

- USGS (US GEOLOGICAL SURVEY). 90 Billion Barrels of Oil and 1,670 Trillion Cubic Feet of Natural Gas Assessed in the Arctic, 23. Juli 2008, Internet: http://www.usgs.gov/newsroom/article.asp?ID=1980, Stand: 28. Juli 2008
- VERKEHRSWERKSTATT.de. *Bestand an Berliner Droschken von 1910 1929,* Internet: http://ods.schule.de/bics/son/verkehr/pferdefu/geschich/gesch35.htm, Stand: 3. September 2008
- VICTOR D. G., SCHAFER A. (2000). *The future mobility of the world population, Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 34, Issue 3, April 2000, Pages 171-205, Seite 174
- VICTOR D. G., SCHAFER A. (2000). *The future mobility of the world population,* Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 34, Issue 3, April 2000, Seiten 171-205, Seite 175
- VLASIC B. (2009). *Detroit Goes for Electric Cars, but Will Drivers?*, New York Times, 10. Jänner 2009, Internet: http://www.nytimes.com/2009/01/11/business/11electric.html?\_r=1, Stand: 4. Februar 2009
- VOLTERRA V. (1931). *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la Vie,* Gauthier-Villars, Paris, Seite 14

- WELT-IN-ZAHLEN.de. Internet: http://www.welt-in-zahlen.de/laendervergleich.phtml, Stand: 12. August 2008
- WELT-ONLINE (2008). *Erdölnachfrage steigt schneller als das Angebot*, Juli 2008, Internet: http://www.welt.de/welt\_print/article2168298/Erdoel-Nachfrage\_steigt\_schneller\_als\_das\_Angebot.html, Stand: 17. Juli 2008
- WIRTSCHAFTSVERBAND ERDÖL- UND ERDGASGEWINNUNG e.V. (2008). Reserven und Ressourcen Potenziale für die zukünftige Erdgas- und Erdölversorgung, Hannover, Seite 2ff
- WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (WKO), *Einkommensentwicklung 1955 2005*, Internet: http://wko.at/statistik/Extranet/Langzeit/GLang-Einkommen.pdf, Stand: 12. Dezember 2008
- WOLF W. (2007). *Verkehr. Umwelt. Klima Die Globalisierung des Tempowahns,* Promedia, Wien, Seite 19ff
- WORLD BANK. *World Development Indicators Online*, Development Data Group, Washington DC, Internet:

http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/DATASTATISTICS/0,,contentMDK:2 0535285~menuPK:1192694~ppageP:64133150~piPK:64133175~theSitePK:23941 9,00.html, Stand: 20. August 2008

WORLD BANK, *Development Education Team*, Internet:

http://www.worldbank.org/depweb/english/modules/social/pgr/datanot.html, Stand: 28. August 2008

ZAHAVI Y. (1979). *The UMOT Project*, Prepared for the US Department of Transportation and the Ministry of Transport, Fed. Rep. Of Germany, Bethesda, Seite 61ff

# 20 APPENDIX

#### 20.1 Berechnung der Preiselastizität aus der Nachfragefunktion

Ausgang für die Berechnung ist die Geradengleichung der Nachfragefunktion aus Kapitel 9.2.1.4.

$$p = k * q + d$$

$$\frac{PpF}{PpF_{ANF}} = k * \frac{tatNF}{erwNF} + d$$
(9.7)
(9.8)

Die Nachfragefunktion soll durch den Punkt (1/1) gehen:

$$1 = k + d \tag{9.11}$$

daraus folgt aus (9.7):

$$p = k * q + 1 - k \tag{20.1}$$

$$\eta = \frac{\frac{dq}{q}}{\frac{dp}{n}} = \frac{dq}{dp} * \frac{p}{q} \tag{9.15}$$

Gleichung (20.1) wird nun nach q differenziert:

$$\frac{dp}{da} = k \tag{20.2}$$

und in Gleichung (9.15) eingesetzt:

$$\eta = \frac{1}{k} * \frac{p}{q} = \frac{1}{k} * \frac{k * q + 1 - k}{q} = \frac{k * q + 1 - k}{k * q}$$
 (20.3)

# 20.2 ÜBERSICHT DER KONSTANTEN NACH SZENARIUM

Konstante	URR 7000Gb	URR 3500Gb a	URR 3500Gb b	URR 4500Gb a	URR 4500Gb b	Solar	Olduvai	Formel
Anteil vom Einkommen für Transport ausgegeben	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(10.8)
Reserven ANFANG	200	200	200	200	200	200	200	(9.1)
BWP Rate	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	(9.6)
Einsatzjahre konventioneller Autos	10	10	10	10	10	10	10	(11.13)
Eisenbahninfrastrukturkonstante	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	(10.6)
Eisenbahnkosten pro km	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	-
Elastizität Produktionsrate zu Bruttoweltprodukt	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	(9.6)
Elastizität Erdoelpreis Rohstoffpreise	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	(11.11)
Elastizität Treibstoffpreise zu Rohölpreis	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	(11.3)
Entdeckungskonstante	0.045	0.075	0.075	0.057	0.057	0.065	0.057	(9.1)
FINAL TIME	2070	2070	2070	2070	2070	2070	2070	-
Produktionskostenfunktion K1	277.5	277.5	277.5	277.5	277.5	277.5	277.5	(9.3)
Produktionstechnologiegeschwindigkeit	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-05	(9.22)
Fuhrwerk Anschaffungskosten	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	-
Fuhrwerk Einsatzjahre	10	10	10	10	10	10	10	-
Fuhrwerke ANFANG	300000	300000	300000	300000	300000	300000	300000	-
Fußgänger Durchschnittsgeschwindigkeit	4	4	4	4	4	4	4	(10.4)
Gehen Energieverbrauch	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	(10.6)
Gesamtpotential	7000	3500	3500	4500	4500	3500	3200	(9.1)
Hybrid Anschaffungskosten ANFANG	70000	70000	70000	70000	70000	70000	70000	-
Hybridautos Durchschnittsgeschwindigkeit	37	37	37	37	37	37	37	(11.24)
Hybridautos Einsatzjahre	10	10	10	10	10	10	10	(11.13)
INITIAL TIME	1900	1900	1900	1900	1900	1900	1900	-
IV Einkommensfaktor	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	(10.6)

Konstante	URR 7000Gb	URR 3500Gb a	URR 3500Gb b	URR 4500Gb a	URR 4500Gb b	Solar	Olduvai	Formel
Justierungsfaktor	1	1	1	1	1	1	0.95	(9.29)
konstante Wege pro Tag	3	3	3	3	3	3	3	(10.7)
konstanter Besetzungsgrad	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	(10.17)
konstantes Reisezeitbudget pro Weg	0.383333	0.383333	0.383333	0.383333		0.383333		(10.2)
Konventionelle Autos Anschaffungskosten ANFANG	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000	(11.10)
konventionelle Autos Durchschnittsgeschwindigkeit	37	37	37	37	37	37	37	(11.24)
Kostenfunktion K2	30	30	30	30	30	30	30	(9.4)
Kostenfunktion K3	1	1	1	1	1	1	1	(9.4)
max technologisches Potential Hybrid	0.75	0.7818	0.7818	0.75	0.75	0.4363	0.3	-
max technologisches Potential konventionelle Autos	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-
max technologisches Potential Treibstoffeffizienz	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	-
max technologisches Potential Wasserstoff	0.6	0.6606	0.6606	0.6	0.6	0.672727	0.3	-
Maximaler Substitutionsanteil	1	1	1	1	1	1	1	(9.26)
Anteil Fußgänger ANFANG	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	-
Anteil IV ANFANG	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	-
Anteil Radfahrer ANFANG	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	-
Nachfragefunktion K1	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-75	(9.8)
Reale Bruttoeinkommenszunahme	0.03	0	0	0.02	0.02	0.01	-0.02	-
Nutzenfunktion Energiekonstante	4	4	4	4	4	4	4	(10.6)
Nutzenfunktion Kostenkonstante	2	2	2	2	2	2	2	(10.6)
Nutzenfunktion Zeitkonstante	1	1	1	1	1	1	1	(10.6)
Pferde Durchschnittsgeschwindigkeit	10	10	10	10	10	10	10	(11.24)
Potentielle Straßenlänge	110000	110000	110000	110000	110000	110000	110000	(11.25)
Produktionsrate K1	0.00015	0.00015	0.00015	0.00015	0.00015	0.00015	0.00015	-
Radfahren Energieverbrauch	3	3	3	3	3	3	3	(10.6)
Radfahrer Durchschnittsgeschwindigkeit	8	8	8	8	8	8	8	(10.4)
Radfahrkosten pro Fahrt	4	4	4	4	4	4	4	-

Konstante	URR 7000Gb	URR 3500Gb a	URR 3500Gb b	URR 4500Gb a	URR 4500Gb b	Solar	Olduvai	Formel
Sitzen Energieverbrauch	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	(10.6)
Straßenbaugeschwindigkeit	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	(11.25)
Straßenlänge ANFANG	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	(11.25)
Substitutionsfunktion K2	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	(9.26)
Substitutionsfunktion K3	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	(9.26)
Technologie Multiplikator Endwert	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	-
Technologiedauer	20	60	60	55	55	10	200	(9.27)
Technologiegeschwindigkeit Hybrid	0.0334	0.0422	0.0115	0.037	0.016	0.1271	0.01	(11.16)
Technologiegeschwindigkeit konventionelle Autos	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	(11.8)
Technologiegeschwindigkeit Treibstoffeffizienz	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	(11.4)
Technologiegeschwindigkeit Wasserstoff	0.035	0.0451	0.0115	0.037	0.016	0.06	0.01	(11.17)
TIME STEP	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	-
Treibstoffpreis K1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	(11.3)
Urbanisierungsrate	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
Treibstoffverbrauch Verbrennungsmotor ANFANG	20	20	20	20	20	20	20	(11.6)
Wasserstoffauto Anschaffungskosten ANFANG	60000	60000	60000	60000	60000	60000	60000	-
Wasserstoffautos Durchschnittsgeschwindigkeit	37	37	37	37	37	37	37	(11.24)
Wasserstoffautos Einsatzjahre	10	10	10	10	10	10	10	-
Wasserstoffautos variable Kosten ANFANG	40	40	40	40	40	40	40	-

Die zeitlichen Konstanten, welche in roter Schrift gehalten sind, haben je nach Szenarium unterschiedliche Ausgangswerte. Alle obengenannten Parameterwerte bleiben in der Modellberechnung konstant.

# 20.3 ÜBERSICHT DER VERWENDETEN DATEN

20.3.1 Bruttoweltprodukt (BWP), BIP pro Kopf in Österreich, Bevölkerung in Österreich

Jahr	BWP (in Millionen 1990 International Geary-Khamis dollars )	BIP pro Kopf in Österreich (in 1990 International Geary- Khamis dollars )	Bevölkerung Österreich
1900	1.973.682	2.882	5.973.000
1901		2.864	6.035.000
1902		2.945	6.099.000
1903		2.941	6.164.000
1904		2.956	6.228.000
1905		3.090	6.292.000
1906		3.176	6.357.000
1907		3.338	6.421.000
1908		3.320	6.485.000
1909		3.276	6.550.000
1910		3.290	6.614.000
1911		3.365	6.669.000
1912		3.505	6.724.000
1913	2.733.366	3.465	6.767.000
1914		2.876	
1915		2.653	
1916		2.628	
1917		2.586	
1918		2.555	
1919		2.259	6.420.000
1920		2.412	6.455.000
1921		2.650	6.504.000
1922		2.877	6.528.000
1923		2.842	6.543.000
1924		3.163	6.562.000
1925		3.367	6.582.000
1926		3.413	6.603.000
1927		3.505	6.623.000
1928		3.657	6.643.000
1929		3.699	6.664.000

1930		3.586	6.684.000
1931		3.288	6.705.000
1932		2.940	6.725.000
1933		2.833	6.746.000
1934		2.852	6.760.000
1935		2.907	6.761.000
1936		2.995	6.758.000
1937		3.156	6.755.000
1938		3.559	6.753.000
1939		4.096	6.653.000
1940	4.502.584	3.959	
1941		4.217	
1942		3.983	
1943		4.065	
1944		4.152	
1945		1.725	
1946		1.956	7.000.000
1947		2.166	6.971.000
1948		2.764	6.953.000
1949		3.293	6.943.000
1950	5.336.686	3.706	6.935.000
1951	5.651.080	3.959	6.935.000
1952	5.912.796	3.967	6.928.000
1953	6.211.331	4.137	6.932.000
1954	6.423.300	4.555	6.940.000
1955	6.832.919	5.053	6.947.000
1956	7.154.233	5.397	6.952.000
1957	7.427.228	5.716	6.966.000
1958	7.664.818	5.907	6.987.000
1959	8.015.605	6.051	7.014.000
1960	8.434.828	6.519	7.047.000
1961	8.727.584	6.827	7.086.000
1962	9.138.818	6.950	7.130.000
1963	9.537.304	7.186	7.176.000
1964	10.229.283	7.567	7.224.000
1965	10.763.152	7.734	7.271.000
1966	11.349.649	8.112	7.322.000
1967	11.772.053	8.297	7.377.000

	1		
1968	12.419.378	8.621	7.415.000
1969	13.105.033	9.131	7.441.000
1970	13.771.750	9.747	7.467.000
1971	14.342.113	10.200	7.500.000
1972	15.025.998	10.771	7.544.000
1973	16.022.888	11.235	7.586.000
1974	16.393.446	11.658	7.599.000
1975	16.643.806	11.646	7.579.000
1976	17.457.413	12.201	7.566.000
1977	18.167.405	12.767	7.568.000
1978	18.968.976	12.731	7.562.000
1979	19.647.810	13.448	7.549.000
1980	20.042.400	13.759	7.549.000
1981	20.438.488	13.718	7.568.710
1982	20.666.659	13.961	7.574.140
1983	21.258.355	14.394	7.561.910
1984	22.232.693	14.439	7.561.434
1985	23.000.472	14.752	7.564.984
1986	23.818.077	15.081	7.569.794
1987	24.719.305	15.313	7.574.586
1988	25.772.062	15.754	7.585.317
1989	26.582.911	16.360	7.619.566
1990	27.136.041	16.895	7.677.850
1991	27.496.511	17.289	7.754.891
1992	28.080.697	17.481	7.840.709
1993	28.696.819	17.377	7.905.632
1994	29.702.089	17.753	7.936.118
1995	30.947.076	18.048	7.948.278
1996	31.995.218	18.490	7.959.016
1997	33.245.667	18.809	7.968.041
1998	33.807.102	19.463	7.976.789
1999	35.001.135	20.065	7.992.323
2000	36.692.661	20.691	8.011.566
2001	37.742.744	20.813	8.043.046
2002	39.024.819	20.956	8.083.797
2003	41.014.515	21.165	8.117.754
2004	42.921.184	21.627	8.174.733
2005	44.928.765	22.049	8.233.306

	T		
2006	47.267.513	22.742	8.282.000
2007			8.315.000
2008			8.353.379
2009			8.385.882
2010			8.416.931
2011			8.446.702
2012			8.475.411
2013			8.502.931
2014			8.529.492
2015			8.554.966
2016			8.579.408
2017			8.602.983
2018			8.625.613
2019			8.647.251
2020			8.667.985
2021			8.688.225
2022			8.708.341
2023			8.728.267
2024			8.747.784
2025			8.766.860
2026			8.785.328
2027			8.803.100
2028			8.820.243
2029			8.836.538
2030			8.852.159
2031			8.866.860
2032			8.880.501
2033			8.893.212
2034			8.904.923
2035			8.915.768
2036			8.925.847
2037			8.935.189
2038			8.943.864
2039			8.951.836
2040			8.959.289
2041			8.966.062
2042			8.972.120
2043			8.977.405

2044		8.981.906
2045		8.985.446
2046		8.988.102
2047		8.989.825
2048		8.990.661
2049		8.990.639
2050		8.989.784
2051		8.987.469
2052		8.983.245
2053		8.977.265
2054		8.969.821
2055		8.961.091
2056		8.951.423
2057		8.940.984
2058		8.930.172
2059		8.919.052
2060		8.908.011
2061		8.897.137
2062		8.886.612
2063		8.876.603
2064		8.867.137
2065		8.858.262
2066		8.849.918
2067		8.842.157
2068		8.834.794
2069		8.827.843
2070		8.821.054

Tabelle 20-1, BWP, BIP pro Kopf in Österreich, Bevölkerung in Österreich

Daten (BWP und BIP pro Kopf in Österreich): ANGUS MADDISON, *Statistics on World Population, GDP and Per Capita GDP, 1-2006 AD*, Faculty of Economics – University of Groningen

Internet: http://www.ggdc.net/maddison/Historical\_Statistics/horizontal-file\_09-2008.xls, Stand: 13. Dezember 2008 Daten (Bevölkerung in Österreich bis 2007): STATISTIK AUSTRIA, *Jahresdurchschnittsbevölkerung seit 1870* Internet: http://www.statistik.at/web\_de/static/jahresdurchschnittsbevoelkerung\_seit\_1870\_022311.xls, Stand: 13. Dezember 2008

 $\label{eq:continuous} \textbf{Daten (Bev\"{o}lkerung in \"{O}sterreich 2008-2070): STATISTIK AUSTRIA, \textit{Bev\"{o}lkerung svoraussch\"{a}tzung 2006-2050 f\"{u}r}\\ \textit{\"{O}sterreich 2008-2070): STATISTIK AUSTRIA, \textit{Bev\"{o}lkerung svoraussch\"{a}tzung 2006-2050 f\"{u}r}\\ \textit{\"{O}sterreich 2008-2070): STATISTIK AUSTRIA, \textit{Bev\"{o}lkerung svoraussch\"{a}tzung 2006-2050 f\"{u}r}\\ \textit{\ddot{O}sterreich 2008-2070): STATISTIK AUSTRIA, \textit{\ddot{O}sterreich$ 

Internet:

 $http://www.statistik.at/web\_de/statistiken/bevoelkerung/demographische\_prognosen/bevoelkerungsprognosen/in dex.html, Stand: 13. Juli 2008$ 

#### 20.3.2 Preis für ein Fass Rohöl im Jahr 1900

1 Fass Rohöl kostete im Jahr 1900 umgerechnet 29,75 \$2007. 142

#### 20.3.3 Straßenlänge

Die gesamte Straßenlänge in Österreich betrug im Jahr 2005 106.987km. <sup>143</sup> Die logistische Funktion mit Anfangswert im Jahr 1900 und Endwert im Jahr 2070 stellt eine Schätzung des Autors dar.

# 20.3.4 Anfangswerte für Fuhrwerke, konventionelle Autos, Hybridfahrzeuge und Wasserstofffahrzeuge

Alle Startwerte im Jahr 1900 stellen eine Schätzung des Autors dar. Für die Anzahl der Fuhrwerke wurden 300.000 als Startwert festgelegt, für alle anderen 1. Die anfänglichen Anschaffungskosten und der Treibstoffverbrauch sind ebenso eine Schätzung des Autors.

#### 20.3.5 Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrsmittel

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten der Verkehrsmittel sind eine Schätzung des Autors und bleiben bis auf die Durchschnittsgeschwindigkeit der Eisenbahn konstant. Für die Eisenbahn wurde eine logistische Funktion der Durchschnittsgeschwindigkeit über die Zeit angenommen.

<sup>&</sup>lt;sup>142</sup> BP, Statistical Review of World Energy June 2008

 $http://www.bp.com/liveassets/bp\_internet/globalbp/globalbp\_uk\_english/reports\_and\_publications/statistical\_energy\_review\_2008/STAGING/local\_assets/downloads/pdf/statistical\_review\_of\_world\_energy\_full\_review\_2008.pdf, Stand: 5. Oktober 2008$ 

<sup>&</sup>lt;sup>143</sup> BMVIT, *Verkehr in Zahlen2007*, Internet:

 $http://www.bmvit.gv. at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz07 gesamt.pdf, Stand: 21. \\ August 2008, Seite 47$ 

# 20.4 Modellübersicht

Nachstehend befindet sich der Quellcode für das Modell für VENSIM. Für die Berechnung der einzelnen Szenarien müssen die jeweiligen Konstanten aus Kapitel 20.2 verwendet werden.

# 20.4.1 VENSIM-QUELLTEXT

```
"Urbanisierung-Motorisierungsfaktor"(
         [(0,0)-(1,1)],(0,1),(1,0.9))
                             Urbanisierungsaenderung=
         IF THEN ELSE(Time>2001, Urbanisierungsrate, 0)
                             Urbanisierungsgrad= INTEG (
         Urbanisierungsaenderung,
                   Urbanisierungsgrad lookup(2001))
                             Urbanisierungsgrad DATEN=
         IF THEN ELSE(Time<2001, Urbanisierungsgrad lookup(Time), Urbanisierungsgrad)
                             I
Urbanisierungsgrad lookup(
          [(1900,0)-(2020,100)], (2001,79.4), (1991,78.3), (1981,76.8), (1971,76.5), (1961,74.4), (1951 \\
                   ,73.8),(1939,72),(1934,72.6),(1923,71.3),(1910,71.9),(1900,68.9))
                             Urbanisierungsrate=
         0.08
```

	~		I
Anschaffi	ungskostei	n Hvbrid=	
			ffungskostenfaktor*Hybrid Anschaffungskosten ANFANG*Rohstoffkostenfaktor
		itos Alisella	mungskostelliaktoi hybrit Alistilantungskostell ANI ANG Konstolikostelliaktoi
	~		
	~		I
Anschaffı	ungskoste	n konventio	oneller Autos=
	konventi	onelle Auto	s Anschaffungskosten ANFANG*(1-Technologischer Fortschritt Herstellung konventionelle Autos\
		)*Rohstof	fkostenfaktor
	~	€	
	~		I
Elastizita	et Erdoelp	oreis Rohsto	offpreise=
	0.2		
	~		
	~		I
Rohstoffk	konstante=	<b>=</b>	
	1/(Preis	pro Fass Al	NFANG^Elastizitaet Erdoelpreis Rohstoffpreise)
	~		
	~		I
Rohstoffk	kostenfakt	or=	
	Rohstoff	konstante*I	Preis pro Fass^Elastizitaet Erdoelpreis Rohstoffpreise
	~		
	~		I
Wasserst	offautos A	nschaffung	skosten=
	Wasserst	toffautos Ar	$nschaffungskosten faktor*Wasserstoffauto\ Anschaffungskosten\ ANFANG* \backslash$
		Rohstoffk	ostenfaktor
	~		
	~		I .
Produzie	rtes Erdoe	el= INTEG (	

Produktionsrate,

3)

```
Ressourcen= INTEG (
          -Entdeckungsrate,
                    Gesamtpotential-Reserven ANFANG-Produziertes Erdoel)
                    Milliarden Fass Erdöl
                             Eisenbahn Durchschnittsgeschwindigkeit=
          Eisenbahn Geschwindigkeit TABELLE(Time)
                             Eisenbahn Geschwindigkeit TABELLE(
           [(1900,0)-(2070,60)], (1900,10), (1919.24,12.1053), (1943.67,16.3158), (1963.94,22.8947) \backslash \\
                    , (1989.42, 34.4737), (2002.42, 38.4211), (2016.97, 40.7895), (2034.13, 42.1053), (2068.44, 43.6842 \\ \\
                   ))
                             Ī
Motorisierungsgrad konv Autos=
          konventionelle Autos/Bevoelkerung Oesterreich*1000
                             Nachfragefunktion K2=
          1-Nachfragefunktion K1
                             konventionelle Autos in=
          SMOOTH3I( MAX( Potential neue Fahrzeuge
          *Substitutionstabelle(Fuhrwerk Gesamtkosten/konventionelle Autos Gesamtkosten)*Substitutionstabelle\
                    (Hybrid
                               Gesamtkosten/konventionelle
                                                                           Gesamtkosten) *Substitution stabelle (Wasserstoff autos
                                                                 Autos
Gesamtkosten\
                    /konventionelle Autos Gesamtkosten), 0), 1
```

```
, 0)
konventionelle Autos Investitionsfaktor=
         konventionelle Autos Gesamtkosten/verfuegbares Einkommen fuer Individualtransport
                             Hybridautos in=
         SMOOTH3I( MAX( Potential neue Fahrzeuge*Substitutionstabelle
         (konventionelle Autos Gesamtkosten/Hybrid Gesamtkosten
         )*Substitution stabelle (Fuhrwerk Gesamtkosten/Hybrid Gesamtkosten)*Substitution stabelle \\ \\
                   (Wasserstoffautos Gesamtkosten/Hybrid Gesamtkosten), 0), 1
          , 0)
                             Substitutionstabelle(
         [(0,0)-(2,1)],(0,0),(0.415902,0.0175439),(0.550459,0.0657895),(0.66055,0.144737),(0.770642)
                   , 0.241228), (1, 0.5), (1.15596, 0.679825), (1.35168, 0.820175), (1.57187, 0.907895), (1.74924 \\ \\
                   ,0.973684),(2,1))
                             I
Kosten des Individualverkehrs pro Fahrt=
         MIN( Anschaffungskosten konventioneller Autos/Einsatzjahre konventioneller Autos/365\
                   /konstante Wege pro Tag+Treibstoffpreis
          *Treibstoffverbrauch Verbrennungsmotor/100*Streckenlaenge pro Weg, MIN( Anschaffungskosten Hybrid\
                   /Hybridautos Einsatzjahre
         /365/konstante Wege pro Tag
          +Treibstoffpreis*Treibstoffverbrauch Verbrennungsmotor*0.5/100*Streckenlaenge pro Weg\
                   , MIN(Wasserstoffautos Anschaffungskosten
         /Wasserstoffautos Einsatzjahre
          /365/konstante Wege pro Tag+Wasserstoffautos variable Kosten/100*Streckenlaenge pro Weg\
                   , Fuhrwerk Anschaffungskosten/Fuhrwerk Einsatzjahre
          +Fuhrwerk variable Kosten(Distanz pro Jahr)*Distanz pro Jahr)))
```

```
Fuhrwerke in=
         SMOOTH3I( MAX( Potential neue Fahrzeuge*Substitutionstabelle
          (konventionelle Autos Gesamtkosten/Fuhrwerk Gesamtkosten
          ) *Substitution stabelle (Hybrid Gesamtkosten/Fuhrwerk Gesamtkosten) *Substitution stabelle \\ \\
                    (Wasserstoffautos\ Gesamtkosten/Fuhrwerk\ Gesamtkosten),\ 0),\ 1
          , 0
                             variable Kosten Hybrid=
          Treibstoff preis* Treibstoff verbrauch \ Verbrennungs motor* 0.7/100* Distanz\ pro\ Jahr
                              Technologieaenderung Hybrid=
          Potentielle Technologie Hybrid*Technologischer Fortschritt Hybrid*Hybridautos Investitionsfaktor\
                    *Technologiegeschwindigkeit Hybrid
                              I
Treibstoffpreis ANFANG=
          Treibstoffpreis\ K1*Preis\ pro\ Fass\ ANFANG^Elastizitaet\ Treibstoffpreise\ zu\ Rohoelpreis
                              Hybridautos Investitionsfaktor=
          Treibstoffpreis/Treibstoffpreis ANFANG
```

Technologieaenderung Wasserstoff=

 $Potentielle\ Technologie\ Wasserstoff *Technologischer\ Fortschritt\ Wasserstoff *Technologiegeschwindigkeit\ Wasserstoff \\$ 

\*Wasserstoffautos Investitionsfaktor

```
Wasserstoffautos in=
                              SMOOTH3I( MAX(Potential neue Fahrzeuge*Substitutionstabelle(
                               Hybrid Gesamtkosten/Wasserstoffautos Gesamtkosten
                               ) *Substitution stabelle (konventionelle Autos Gesamtkosten/Wasserstoffautos Gesamtkosten) * (konventionelle Autos Gesamtkosten/Wasserstoffautos Gesamtkos
                               )*Substitutionstabelle(Fuhrwerk Gesamtkosten/Wasserstoffautos Gesamtkosten), 0), 1, \setminus
                                                              0)
                                                                                             I
Wasserstoffautos Investitionsfaktor=
                               Treibstoffpreis/Treibstoffpreis ANFANG
                                                                                            Wasserstoffautos out=
                               Wasserstoffautos/Wasserstoffautos Einsatzjahre
                                                                                            Technologieaenderung Treibstoffeffizienz=
                               Potentielle\ Technologie\ Treibstoffeffizienz * Technologischer\ Fortschritt\ Treibstoffeffizienz \setminus
                                                              {\bf *Technologiegeschwindigkeit\ Treibstoffeffizienz}
                                *Treibstoffpreis/Treibstoffpreis ANFANG
                                                                                            Potential neue Fahrzeuge=
                               +konventionelle Autos out+Fuhrwerke out+Wasserstoffautos out
```

variable Kosten konventionelle Autos=

Treibstoffpreis\*Treibstoffverbrauch Verbrennungsmotor/100\*Distanz pro Jahr

Treibstoffpreis= Treibstoffpreis K1\*Preis pro Fass^Elastizitaet Treibstoffpreise zu Rohoelpreis USD2006 pro Liter Anteil vom Einkommen fuer Transport ausgegeben= 0.2 konventionelle Autos Gesamtkosten= Anschaffungskosten konventioneller Autos/Einsatzjahre konventioneller Autos+variable Kosten konventionelle Autos € verfuegbares Einkommen fuer Individualtransport= Bruttoeinkommen pro Person AUT DATEN\*Anteil vom Einkommen fuer Transport ausgegeben Hybrid Gesamtkosten= Anschaffungskosten Hybrid/Hybridautos Einsatzjahre+variable Kosten Hybrid Bevoelkerung Oesterreich Tabelle( [(1870,0)-(2050,1e+007)],(1870,4.52e+006),(1871,4.562e+006),(1872,4.604e+006),(1873,4.562e+006),(1872,4.604e+006),(1873,4.562e+006),(1872,4.604e+006),(1873,4.562e+006),(1872,4.604e+006),(1874.646e+006),(1874,4.688e+006),(1875,4.73e+006),(1876,4.772e+006),(1877,4.815e+006), (1879,4.857e+006),(1879,4.899e+006),(1880,4.941e+006),(1881,4.985e+006),(1882,5.03e+006)),(1883,5.075e+006),(1884,5.121e+006),(1885,5.166e+006),(1886,5.212e+006),(1887,5.257e+006) ), (1888, 5.303e + 006), (1889, 5.348e + 006), (1890, 5.394e + 006), (1891, 5.446e + 006), (1892, 5.504e + 0), (1893, 5.563e + 006), (1894, 5.622e + 006), (1895, 5.68e + 006), (1896, 5.739e + 006), (1897, 5.798e + 006), (1896, 5.739e + 00

),(1898,5.856e+006),(1899,5.915e+006),(1900,5.973e+006),(1901,6.035e+006),(1902,6.099e+006\),(1903,6.164e+006),(1904,6.228e+006),(1905,6.292e+006),(1906,6.357e+006),(1907,6.421e+006\)

```
),(1908,6.485e+006),(1909,6.55e+006),(1910,6.614e+006),(1911,6.669e+006),(1912,6.724e+006)
),(1913,6.767e+006),(1919,6.42e+006),(1920,6.455e+006),(1921,6.504e+006),(1922,6.528e+006)
), (1923, 6.543e + 006), (1924, 6.562e + 006), (1925, 6.582e + 006), (1926, 6.603e + 006), (1927, 6.623e + 006), (1928, 6.543e + 006), (1928, 6.542e + 0
), (1928, 6.643e + 006), (1929, 6.664e + 006), (1930, 6.684e + 006), (1931, 6.705e + 006), (1932, 6.725e + 0
),(1933,6.746e+006),(1934,6.76e+006),(1935,6.761e+006),(1936,6.758e+006),(1937,6.755e+006\
,(1938,6.753e+006),(1939,6.653e+006),(1946,7e+006),(1947,6.971e+006),(1948,6.953e+006)
),(1949,6.943e+006),(1950,6.935e+006),(1951,6.935e+006),(1952,6.928e+006),(1953,6.932e+006)
), (1954, 6.94e+006), (1955, 6.947e+006), (1956, 6.952e+006), (1957, 6.966e+006), (1958, 6.987e+006), (1
), (1959, 7.014e + 006), (1960, 7.047e + 006), (1961, 7.086e + 006), (1962, 7.13e + 006), (1963, 7.176e + 00
,(1964,7.224e+006),(1965,7.271e+006),(1966,7.322e+006),(1967,7.377e+006),(1968,7.415e+006)
),(1969,7.441e+006),(1970,7.467e+006),(1971,7.5e+006),(1972,7.544e+006),(1973,7.586e+006)
),(1974,7.599e+006),(1975,7.579e+006),(1976,7.566e+006),(1977,7.568e+006),(1978,7.562e+006\
),(1979,7.549e+006),(1980,7.549e+006),(1981,7.56871e+006),(1982,7.57414e+006),(1983
,7.56191e+006),(1984,7.56143e+006),(1985,7.56498e+006),(1986,7.56979e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.57459e+006),(1987,7.5
),(1988,7.58532e+006),(1989,7.61957e+006),(1990,7.67785e+006),(1991,7.75489e+006),(\)
1992, 7.84071e + 006), (1993, 7.90563e + 006), (1994, 7.93612e + 006), (1995, 7.94828e + 006), (1996), (1996, 7.94828e + 006), (1996, 7.9488e + 006), (1996, 7.9
, 7.95902e + 006), (1997, 7.96804e + 006), (1998, 7.97679e + 006), (1999, 7.99232e + 006), (2000, 8.01157e + 006), (2000, 8.0157e + 006), (2000, 8.015e + 006), (2000, 8.015e + 006), (2000, 8.015e + 006), (2000, 8.015e + 
), (2001, 8.04305e + 006), (2002, 8.0838e + 006), (2003, 8.11775e + 006), (2004, 8.17473e + 006), (2005 \land 0.06), (2004, 8.17473e + 0.06), (2005, 8.0838e + 0.06), (2005, 8.0838e + 0.06), (2006, 8.0
,8.23331e+006),(2006,8.28401e+006),(2007,8.31945e+006),(2008,8.35338e+006),(2009,8.38588e+006)
),(2010,8.41693e+006),(2011,8.4467e+006),(2012,8.47541e+006),(2013,8.50293e+006),(2014),(2010,8.41693e+006),(2011,8.4467e+006),(2012,8.47541e+006),(2013,8.50293e+006),(2011,8.4467e+006),(2012,8.47541e+006),(2013,8.50293e+006),(2012,8.47541e+006),(2013,8.50293e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47541e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006),(2012,8.47641e+006
, 8.52949e+006), (2015, 8.55497e+006), (2016, 8.57941e+006), (2017, 8.60298e+006), (2018, 8.62561e+006), (20
),(2019,8.64725e+006),(2020,8.66799e+006),(2021,8.68823e+006),(2022,8.70834e+006),(\)
2023,8.72827e+006),(2024,8.74778e+006),(2025,8.76686e+006),(2026,8.78533e+006),(2027\
,8.8031e+006),(2028,8.82024e+006),(2029,8.83654e+006),(2030,8.85216e+006),(2031,8.86686e+006),(2031,8.86686e+006),(2031,8.86686e+006),(2031,8.86686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8686e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.8666e+006),(2031,8.86666e+006),(2031,8.86666e+006),(2031,8.86666e+006),(2031,8.86666e+006),(2031,8.86666e+006),(203
), (2032, 8.8805 e + 006), (2033, 8.89321 e + 006), (2034, 8.90492 e + 006), (2035, 8.91577 e + 006), (2036 \land 2008 e + 2008), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), (2036, 2036), 
, 8.92585 e + 006), (2037, 8.93519 e + 006), (2038, 8.94386 e + 006), (2039, 8.95184 e + 006), (2040, 8.95929 e + 006),
), (2041, 8.96606 e + 006), (2042, 8.97212 e + 006), (2043, 8.97741 e + 006), (2044, 8.98191 e + 006), ((2041, 8.96606 e + 006)), ((2042, 8.97212 e + 006)), ((2043, 8.97741 e + 006)), ((2044, 8.98191 e + 006)), ((2043, 8.97212 e + 006))), ((2043, 8.97212 e + 006)))
2045, 8.98545 e + 006), (2046, 8.9881 e + 006), (2047, 8.98983 e + 006), (2048, 8.99066 e + 006), (2049 \land 0.0006), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8.98066), (2048, 8
, 8.99064e + 006), (2050, 8.98978e + 006), (2051, 8.98747e + 006), (2052, 8.98325e + 006), (2053, 8.97727e + 006), (2052, 8.98325e + 006), (2053, 8.97727e + 006), (2052, 8.98325e + 006), (2053, 8.98978e + 006), (2052, 8.98325e + 006), (2052, 8.98326e + 006), (2052, 8.98326e + 006), (2052, 8.9836e + 006), (2052, 8.9836e + 006), (2052, 8.9836e + 006), (2052, 8.986e + 00
2058,8.93017e+006),(2059,8.91905e+006),(2060,8.90801e+006),(2061,8.89714e+006),(2062\
,8.88661e+006),(2063,8.8766e+006),(2064,8.86714e+006),(2065,8.85826e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.84992e+006),(2066,8.8499600),(2066,8.84996
),(2067,8.84216e+006),(2068,8.83479e+006),(2069,8.82784e+006),(2070,8.82105e+006),(
2071, 8.81453 e + 006), (2072, 8.808 e + 006), (2073, 8.80149 e + 006), (2074, 8.79491 e + 006), (2075, 10.80149 e + 10.
8.7882e+006))
```

~

## Motorisierungsgrad= $Verkehrs aufwand\ IV/potentieller\ Verkehrs aufwand\ pro\ IV/Bevoelkerung\ Oesterreich/konstanter\ Besetzungsgrad \\ \backslash$ \*1000\*"Urbanisierung-Motorisierungsfaktor"(Urbanisierungsgrad DATEN) PKW pro 1000 Einwohner Bevoelkerung Oesterreich= Bevoelkerung Oesterreich Tabelle(Time) Kapazitaet Fahrzeuge= Motorisierungsgrad/1000\*Bevoelkerung Oesterreich Gesamtverkehrsaufwand= Streckenlaenge pro Weg\*konstante Wege pro Tag\*365\*Bevoelkerung Oesterreich Mrd Pkm Hybridautos= INTEG ( Hybridautos in-Hybridautos out, 1) Hybridautos Einsatzjahre= 10 Fuhrwerke ANFANG= 300000

	Hybridautos/Hybridautos Einsatzjahre				
	~				
	~				
Durchsch	nnittsgeschwindigkeit Individualverkehr=				
	$(Pferde\ Durchschnittsgeschwindigkeit*Fuhrwerke+konventionelle\ Autos\ Durchschnittsgeschwindigkeit \setminus (Pferde\ Durchschnittsgeschwindigkeit))))))))))))))))))))))))))))))))))))$				
	$*konventionelle\ Autos+Hybridautos\ Durchschnittsgeschwindigkeit$				
	*Hybridautos+Wasserstoffautos Durchschnittsgeschwindigkeit				
	$*Wasserstoffautos)/(Fuhrwerke+konventionelle\ Autos+Hybridautos+Wasserstoffautos)*Verkehrsflussfaktor$				
	~				
	~ I				
Fuhrwer	k Gesamtkosten=				
	Fuhrwerk Anschaffungskosten/Fuhrwerk Einsatzjahre+Fuhrwerk variable Kosten(Distanz pro Jahr\				
	)*Distanz pro Jahr				
	~				
	~ 1				
Fahrzeug					
	(konventionelle Autos+Fuhrwerke+Hybridautos+Wasserstoffautos)/Strassenlaenge				
	~ Fahrzeuge pro km Strasse				
	~ 1				
Wasserst	toffautos= INTEG (				
	Wasserstoffautos in-Wasserstoffautos out,				
	1)				
	~				
	~				
lronve	analla Autor auto				
Konventi	onelle Autos out=				
	konventionelle Autos/Einsatzjahre konventioneller Autos				
	~				
	~				

Hybridautos out=

Wasserstoffautos Gesamtkosten=

	Wasserst	offautos Anschaffungskosten/Wasserstoffautos Einsatzjahre+Wasserstoffautos variable Kosten
		/100*Distanz pro Jahr
	~	
	~	I
Fuhrwe	erke= INTEG	(
		ke in-Fuhrwerke out,
		Fuhrwerke ANFANG)
	~	
	~	I
Wasser	stoffautos Ei	nsatzjahre=
	10	
	~	
	~	
konven	tionelle Auto	os= INTEG (
	+konvent	ionelle Autos in-konventionelle Autos out,
		1)
	~	
	~	I
Fincatz	iahra konyar	ntioneller Autos=
LIIISACZ	10	Monetier Autos-
	10	
	~	I
Fuhrwe	erk Einsatzja	hre=
	10	
	~	
	~	I .
Fuhrwe	erke out=	
		xe/Fuhrwerk Einsatzjahre
	~	

G IV=

```
[(1900,0)-(2003,30000)],(1900,2881.81),(1901,2863.86),(1902,2945.31),(1903,2940.89),
                                                                             (1904, 2955.85), (1905, 3089.78), (1906, 3176.23), (1907, 3338.14), (1908, 3319.66), (1909, 3275.98), (1907, 3338.14), (1908, 3319.66), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (1909, 3275.98), (190
                                                                             ),(1910,3290.37),(1911,3365.21),(1912,3505.09),(1913,3465.49),(1914,2875.63),(1915,\
                                                                             2652.99),(1916,2627.59),(1917,2586.3),(1918,2554.81),(1919,2259),(1920,2412.31),(1921\
                                                                             ,2650.14),(1922,2877.49),(1923,2842.22),(1924,3162.78),(1925,3366.94),(1926,3413.06\
                                                                             ),(1927,3505.43),(1928,3657.27),(1929,3698.53),(1930,3585.72),(1931,3287.69),(1932,\
                                                                             2939.66), (1933, 2833.17), (1934, 2851.59), (1935, 2906.66), (1936, 2994.7), (1937, 3155.73), \\ \backslash
                                                                             (1938,3559.5),(1939,4095.91),(1940,3959.21),(1941,4217.36),(1942,3982.83),(1943,4064.66)
                                                                             ),(1944,4152.14),(1945,1724.59),(1946,1956.48),(1947,2166.47),(1948,2764.49),(1949,\
                                                                             3293.21),(1950,3706.07),(1951,3959.37),(1952,3967.22),(1953,4137.05),(1954,4554.76)\
                                                                             (1955,5383.91),(1956,5787.71),(1957,6025),(1958,6139.48),(1959,6354.36),(1960,6773.75)
                                                                             ),(1961,7193.72),(1962,7467.08),(1963,7855.37),(1964,8279.56),(1965,8577.62),(1966,\
                                                                             9263.83), (1967, 9727.02), (1968, 10125.8), (1969, 10622), (1970, 11015), (1971, 11907.2), (1972 \land 1000), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), (1971, 11907.2), 
                                                                             ,12455),(1973,13202.3),(1974,13743.5),(1975,14224.6),(1976,14964.3),(1977,15488),(1978
                                                                             ), (1984, 16672.6), (1985, 17039.4), (1986, 17891.4), (1987, 18267.1), (1988, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 18632.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 1862.5), (1989, 18
                                                                             19005.1),(1990,19537.3),(1991,20260.1),(1992,20523.5),(1993,20728.8),(1994,20832.4)\
                                                                             (1995,20978.2),(1996,20894.3),(1997,20831.6),(1998,21289.9),(1999,21630.6),(2000,21695.5)
                                                                             ),(2001,21478.5),(2002,21521.5),(2003,21693.6),(2004,21671.9),(2005,21498.6))
                                                                                                                    Bruttoeinkommen pro Person AUT= INTEG (
                                      Bruttoeinkommensaenderung AUT,
                                                                             Bruttoeinkommen pro Person AUT TABELLE(2003))
                                                                                                                    Ī
Bruttoeinkommen pro Person AUT DATEN=
                                       IF THEN ELSE(Time<2003, Bruttoeinkommen pro Person AUT TABELLE(Time), Bruttoeinkommen pro Person AUT\
                                                                            )
```

(verfuegbares Einkommen fuer Individualtransport/365/konstante Wege pro Tag\*IV Einkommensfaktor

\*Nutzenfunktion Kostenkonstante+Nutzenfunktion Zeitkonstante\*benoetigte Zeit Individualverkehr\ +Sitzen Energieverbrauch \*benoetigte Zeit Individualverkehr\*Nutzenfunktion Energiekonstante) Bruttoeinkommensaenderung AUT= IF THEN ELSE(Time>2003, Bruttoeinkommen pro Person AUT\*Bruttoeinkommenszunahme in Prozent\ , 0) Bruttoeinkommenszunahme in Prozent= I IV: Fuhrwerk, Konventionell, Hybrid, Wasserstoff Ι konstanter Besetzungsgrad= 1.1 G Eisenbahn=  $Eisen bahnin frastrukturkon stante/(Eisen bahnkosten \ pro\ km*Nutzen funktion\ Kostenkon stante)$ \*Streckenlaenge pro Weg+benoetigte Zeit Eisenbahn \*Nutzenfunktion Zeitkonstante+Sitzen Energieverbrauch \*benoetigte Zeit Eisenbahn\*Nutzenfunktion Energiekonstante) 

)/(Kosten des Individualverkehrs pro Fahrt

Tagesgebietsfläche=

		2*1/4*3.1415	
	~	km2	
	~	1	
Anteil Fu	ssgaenger=		
	SMOOTH	31( G Fussgaenger/G total, 3, Anteil Fussgaenger ANFANG)	
	~		
	~	I	
Entdecku	ngsrate=		
	Ressource	en*Entdeckungskonstante*Reserven/Gesamtpotential	
	~	Mrd Fass Erdoel	
	~	I	
Prozent ii	nvestiert ir		
		nvestiert in FE TABELLE(Preiselastizitaet der Nachfrage)	
	~	dimensionless	
	~		
Technolo	gie Multipl	ikator=	
		gbare Produktionstechnologie	
	~	dimensionless	
	~	ı	
Potentiel	le Produkti	onstechnologie= INTEG (	
	-Produkti	onsechnologieaenderung,	
		1/Technologie Multiplikator Endwert-1)	
	~		
	~	T. Comments of the Comment of the Co	
Гесhnolo	gie Multipl	ikator Endwert=	
	0.25		
	~		
	~		

Produktionsechnologieaenderung=

 $(konstantes\ Reisezeitbudget\ pro\ Weg*konstante\ Wege\ pro\ Tag)^2*Systemgeschwindigkeit^{\ }$ 

```
*Technologiebeschleunigung durch FE
                            I
Produktionstechnologiegeschwindigkeit=
         5e-005
                   [0,0.1]
                            Verfuegbare Produktionstechnologie= INTEG (
         Produktionsechnologieaenderung,
                   1)
Potentielle Strassenlaenge=
         110000
                            Ī
Level of Service Strasse TABELLE(
         [(0,0)-(400,1)],(0,1),(36.6972,0.97807),(72.1713,0.925439),(107.645,0.815789),(140.673)
                   ,0.684211),(165.138,0.52193),(181.04,0.333333),(196.942,0.166667),(228.746,0.0833333)
                   ),(298.471,0.0350877),(300,0.0131579))
                            Strassenlaenge= INTEG (
         strassenlaengenaenderung,
                   Strassenlaenge ANFANG)
                   km
Strassenlaenge ANFANG=
         20000
```

 $Ver fuegbare\ Produktionstechnologie*Potentielle\ Produktionstechnologie*Produktionstechnologiegeschwindigkeit \ Ver fuegbare\ Produktionstechnologiegeschwindigkeit \ Ver fund bei bei beite beite$ 

	~	l .	
Strassenl	baugeschw	rindigkeit=	
	0.03		
	~		
	~	T.	
verbleibe	ende Strass	senlaenge AUT= INTEG (	
	-strassen	laengenaenderung,	
		Potentielle Strassenlaenge-Strassenlaenge ANFANG)	
	~		
	~	I .	
strassenl	aengenaer		
	verbleibe	ende Strassenlaenge AUT*Strassenbaugeschwindigkeit*Strassenlaenge/(Potentielle Strassenlaenge\	
		-Strassenlaenge ANFANG)	
	~	km	
	~	I.	
Verkehrs	sflussfakto	·=	
	Level of S	Service Strasse TABELLE(Fahrzeugdichte)	
	~		
	~	I.	
potentiel	ler Verkeh	rsaufwand pro IV=	
	Durchsch	nittsgeschwindigkeit Individualverkehr*konstantes Reisezeitbudget pro Weg*konstante Wege pro Tag\	
		*365	
	~	km pro Jahr	
	~	I	
Systemge	eschwindig	keit=	
Durchsch	Anteil nnittsgesch	$Fuss gaenger *Fuss gaenger Durch schnittsgeschwindigkeit + Anteil Radfahrer* Rawindigkeit \backslash$	dfahre
Durchsch	nittsgesch	+Anteil IV*Durchschnittsgeschwindigkeit Individualverkehr+Anteil Eisenbahn*Eiswindigkeit	enbah
	~	kmh	

## 1-Anteil Radfahrer ANFANG-Anteil IV ANFANG-Anteil Fussgaenger ANFANG 1 Verkehrsaufwand IV= Gesamtverkehrsaufwand\*Anteil IV Mrd Pkm 1 Anteil IV= SMOOTH3I( G IV/G total, 3,Anteil IV ANFANG) max technologisches Potential Treibstoffeffizienz= 0.75 | max technologisches Potential Hybrid= 0.75 max technologisches Potential konventionelle Autos= 0.6 Technologischer Fortschritt Herstellung konventionelle Autos= INTEG ( Technologieaenderung konventionelle Autos, 0.001)

Anteil Eisenbahn ANFANG=

Technologischer Fortschritt Treibstoffeffizienz= INTEG (

		0.001)	
	~		
	~	1	
Гесhn	ologieaende	rung konventionelle Autos=	
	Potentie	elle Technologie Herstellung ko	nventionelle Autos*Technologischer Fortschritt Herstellung konventionelle Autos\
		*Technologiegeschwindigkei	t konventionelle Autos*konventionelle Autos Investitionsfaktor
	~		
	~	I	
Potent	tielle Techno	ologie Wasserstoff= INTEG (	
		logieaenderung Wasserstoff,	
		max technologisches Potentia	al Wasserstoff)
	~		
	~	I	
Гесhn	ologiegeschv	windigkeit Treibstoffeffizienz=	
	0.08		
	~		
	~	1	
Гесhn	ologiegeschv	windigkeit Wasserstoff=	
	0.01		
	~		
	~	1	
Tochn	ologischer F	ortschritt Wasserstoff= INTEG (	
i ceiiii		ogieaenderung Wasserstoff,	
	recinior	0.001)	
	~	0.001)	
	~	1	
Eisenb	oahninfrastri	ukturkonstante=	
	0.6		
	~		

Technologieaenderung Treibstoffeffizienz,

	~					
	~	I				
Technolo	ogiegeschwindigkeit l	Hybrid=				
	0.01					
	~					
	~	I				
Technolo	ogischer Fortschritt H	lybrid= INTEG (				
	+Technologieaende	rung Hybrid,				
	0.001)					
	~					
	~	I				
Potentiel	lle Technologie Treib	stoffeffizienz= INTEG (				
	-Technologieaenderung Treibstoffeffizienz,					
	max technologisches Potential Treibstoffeffizienz)					
	~					
	~	I and the second				
Potentiel	lle Technologie Herst	ellung konventionelle Autos= INTEG (				
	-Technologieaende	rung konventionelle Autos,				
	max tech	nologisches Potential konventionelle Autos)				
	~					
	~	I				
Technolo	ogiegeschwindigkeit l	conventionelle Autos=				
	0.1					
	~ [?,?,0.00	1]				
	~	I				
Potentiel	lle Technologie Hybri	d= INTEG (				
	-Technologieaende	rung Hybrid,				
	max tech	nologisches Potential Hybrid)				

max technologisches Potential Wasserstoff=

0.6

```
IV Einkommensfaktor=
         0.4
                           Anteil IV ANFANG=
         0.05
Anteil Eisenbahn=
         SMOOTH3I( G Eisenbahn/G total,3, Anteil Eisenbahn ANFANG)
                           G Radfahrer=
         1/(Radfahrkosten pro Fahrt*Nutzenfunktion Kostenkonstante+benoetigte Zeit Radfahrer*\
                  Nutzenfunktion Zeitkonstante+Radfahren Energieverbrauch*benoetigte Zeit Radfahrer*Nutzenfunktion
Energiekonstante\
                  )
                           G Fussgaenger=
         1/(Nutzenfunktion Zeitkonstante*benoetigte Zeit Fussgnger+Nutzenfunktion Energiekonstante\
                  *Gehen Energieverbrauch*benoetigte Zeit Fussgnger)
                           1
G total=
         G Radfahrer+G IV+G Eisenbahn+G Fussgaenger
```

	3	
	~	
	~	I
Radfahrk	osten pro Fahrt=	
	4	
	~	
	~	I
benoetigt	te Zeit Individualverk	ehr=
	Streckenlaenge pro	Weg/Durchschnittsgeschwindigkeit Individualverkehr
	~	
	~	I
Anteil Ra	dfahrer=	
	SMOOTH3I( G Radfa	hrer/G total, 3, Anteil Radfahrer ANFANG)
	~	
	~	I
Anteil Ra	dfahrer ANFANG=	
	0.27	
	~	
	~	
benoetigt	te Zeit Radfahrer=	
	Streckenlaenge pro	Weg/Radfahrer Durchschnittsgeschwindigkeit
	~	
	~	
kadtahre:	r Durchschnittsgesch	winaigkeit=
	8	
	~	
	~	

Radfahren Energieverbrauch=

Nutzenfunktion Energiekonstante=

~	I				
Nutzenfunktio	n Zeitkonstante=				
2					
~					
~	1				
konstante Weg	ge pro Tag=				
3					
~					
~	1				
Distanz pro Ja					
Stre	ckenlaenge pro Weg*k	onstante Wege pro Tag	g*365		
~					
~	I				
	isezeitbudget pro Weg	=			
0.38	33333				
~					
~					
	n Kostenkonstante=				
1					
~	ı				
~	I				
Sitzen Energie	uarbrauch-				
1.5	ver brauch-				
~	kcal/min				
~	kcai/IIIII				
	ı				
Anteil Fussgae	nger ANFANG=				
0.25					
~					
~	I				

	0.5		
	~		
	~		I
Fussgaen	ger Durchs	schnittsgeso	chwindigkeit=
	4		
	~		
	~		I
benoetigt	te Zeit Fuss	sgnger=	
	Streckenl	aenge pro V	Weg/Fussgaenger Durchschnittsgeschwindigkeit
	~		
	~		I
benoetigt	te Zeit Eise	nbahn=	
	Streckenl	aenge pro V	Weg/Eisenbahn Durchschnittsgeschwindigkeit
	~		I
Streckenl	laenge pro	Weg=	
	Systemge	eschwindig	xeit*konstantes Reisezeitbudget pro Weg
	~	km	
	~		I
Gehen En	ergieverbr	rauch=	
	4.3		
	~	kcal/min	
	~		I
Wasserst	offautos va	ariable Kost	ren ANFANG=
	40		
	~		
	~		I

Eisenbahnkosten pro km=

Wasserstoffautos variabler Kostenfaktor=

```
Wasserstoffautos variable Kosten=
                                                                                    Wasserstoffautos variabler Kostenfaktor*Wasserstoffautos variable Kosten ANFANG
                                                                                                                                                                                                                                                             Oelpreis TABELLE(
                                                                                      [(1900,0)-(2007,100)],(1900,29.75),(1901,24),(1902,19.23),(1903,21.77),(1904,19.92),
                                                                                                                                                                          (1905,14.36),(1906,16.9),(1907,16.07),(1908,16.68),(1909,16.22),(1910,13.63),(1911,
                                                                                                                                                                          13.63),(1912,15.95),(1913,20),(1914,16.83),(1915,13.17),(1916,21.04),(1917,25.41),(
                                                                                                                                                                          1918, 27.47), (1919, 24.28), (1920, 32.01), (1921, 20.21), (1922, 20.07), (1923, 16.41), (1924, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1923, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924, 20.07), (1924
                                                                                                                                                                          17.47), (1925, 20.03), (1926, 22.19), (1927, 15.64), (1928, 14.27), (1929, 15.48), (1930, 14.88 \\
                                                                                                                                                                          ), (1931, 8.92), (1932, 13.3), (1933, 10.8), (1934, 15.58), (1935, 14.75), (1936, 16.4), (1937, 17.13 \\
                                                                                                                                                                          ), (1938, 16.74), (1939, 15.31), (1940, 15.17), (1941, 16.15), (1942, 15.22), (1943, 14.47), (1944 \land 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940, 1940,
                                                                                                                                                                          , 14.35), (1945, 12.17), (1946, 11.96), (1947, 17.74), (1948, 17.23), (1949, 15.57), (1950, 14.81 \setminus 1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948), (1948, 1948),
                                                                                                                                                                          ),(1951,13.72),(1952,13.42),(1953,15.04),(1954,14.96),(1955,15.03),(1956,14.8),(1957\
                                                                                                                                                                          ,14.06),(1958,15),(1959,14.88),(1960,13.37),(1961,12.54),(1962,12.4),(1963,12.24),(\
                                                                                                                                                                          1964, 12.09), (1965, 11.89), (1966, 11.53), (1967, 11.23), (1968, 10.78), (1969, 10.23), (1970, 1966, 11.53), (1967, 11.23), (1968, 10.78), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23), (1969, 10.23),
                                                                                                                                                                          9.65),(1971,11.53),(1972,12.36),(1973,15.42),(1974,48.92),(1975,44.64),(1976,46.84)\
                                                                                                                                                                          (1977,47.83),(1978,44.77),(1979,90.68),(1980,93.08),(1981,82.25),(1982,71.08),(1983)
                                                                                                                                                                          ,61.73),(1984,56.14),(1985,53.21),(1986,27.22),(1987,33.64),(1988,26.24),(1989,30.47\
                                                                                                                                                                          ), (1990, 37.82), (1991, 30.57), (1992, 28.65), (1993, 24.52), (1994, 22.37), (1995, 23.4), (1996 \land 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996, 3.24), (1996
                                                                                                                                                                          , 27.54), (1997, 24.97), (1998, 16.69), (1999, 22.74), (2000, 34.92), (2001, 29.03), (2002, 29.06 \setminus 10.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002, 29.00), (2002
                                                                                                                                                                          ),(2003,32.51),(2004,42.02),(2005,57.9),(2006,67.03),(2007,72.39))
                                                                                                                                                                                                                                                               Kostenfunktion K1=
                                                                                      Oelpreis TABELLE(INITIAL TIME)
```

1-Technologischer Fortschritt Wasserstoff

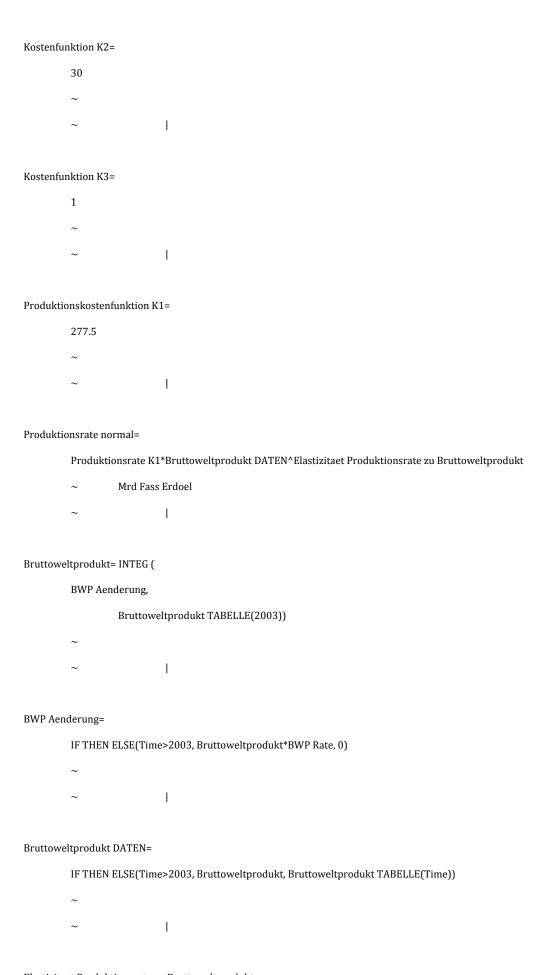
Preis pro Fass ANFANG=

Oelpreis TABELLE(INITIAL TIME)

	~	dollars/resource		
	~	I		
Hybrid	autos Durch	hschnittsgeschwindigkeit=		
	40			
	~			
	~	I		
***		B. I. I. W I W. W.		
wasser	stoffautos 1	Durchschnittsgeschwindigkeit=		
	~			
	~	I		
		ı		
konven	tionelle Au	ntos Durchschnittsgeschwindigkeit=		
	40			
	~			
	~	I		
Pferde	Durchschni	ittsgeschwindigkeit=		
	10			
	~			
	~	I		
<b>1</b> 47	ata Conta a	Annale office and a store fallow		
wassei		Anschaffungskostenfaktor= nologischer Fortschritt Wasserstoff		
	~	noingisener i or isemite wasserston		
	~	I		
		·		
Wasser	stoffauto A	Anschaffungskosten ANFANG=		
	60000			
	~			
	~	I		
Hybrid		ngskosten ANFANG=		
	70000			
	~			

konventione	lle Autos Anschaffungskosten ANFANG=
40	0000
~	
~	I
Treibstoffvei	rbrauch Verbrennungsmotor=
(1	- Technologischer Fortschritt Treibstoffeffizienz)* Treibstoffverbrauch Verbrennungsmotor ANFANG
~	Liter pro 100km
~	I
Hybridautos	Anschaffungskostenfaktor=
1-	Technologischer Fortschritt Hybrid
~	
~	I
Treibstoffvei	brauch Verbrennungsmotor ANFANG=
20	
~	
~	I
Preiselastizit	taet der Nachfrage=
SM	100TH3I( ((Nachfrage Erdoel 1 Jahr zuvor-Nachfrage Erdoel)/(Nachfrage Erdoel 1 Jahr zuvor\
	+Nachfrage Erdoel))/((Kosten pro Fass 1 Jahr zuvor-Preis pro Fass)/(Kosten pro Fass 1 Jahr zuvor\
	+Preis pro Fass)), 1, 0)
~	dimensionless
~	ı
Kosten pro F	ass 1 Jahr zuvor= DELAY FIXED (
Pr	eis pro Fass, 3, 0)
~	
~	ı
Nachfrage Er	doel 1 Jahr zuvor= DELAY FIXED (
Na	achfrage Erdoel, 3, 0)
~	

Nachfragefunktion K3=				
	1.5			
	~			
	~	T .		
Nachfrage	e Erdoel=			
	(Preis pro	o Fass/Preis pro Fass ANFANG-Nachfragefunktion K2)/Nachfragefunktion K1*Produktionsrate normal		
		*(1-Substitutionsanteil)*Justierungsfaktor		
	~	Mrd Fass Erdöl		
	~	1		
Justierun	gsfaktor=			
	1			
	~			
	~	1		
Nachfrage	efunktion I	K1=		
	-60			
	~			
	~	l		
Maximale		tionsanteil=		
	1			
	~	[0,1]		
	~	ı		
C. la atituti	ionsfunktio	V2		
Substituti	-15	OII KZ=		
	~			
	~	I		
		1		
Substituti	ionsfunktio	on K3=		
	-0.55			
	~			



 $Elastizita et\ Produktions rate\ zu\ Bruttowelt produkt=$ 

```
0.7
Produktionsrate K1=
                                                                                                                                                                          0.00015
   Bruttoweltprodukt TABELLE(
                                                                                                                                                                              [(1900,0)-(2003,1e+008)], (1900,1.97368e+006), (1913,2.73337e+006), (1940,4.50258e+006) \backslash \\
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        , (1950, 5.33669 e + 006), (1951, 5.65108 e + 006), (1952, 5.9128 e + 006), (1953, 6.21133 e + 006), (1954 \land 0.21133 e + 0.2
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        , 6.4233e + 006), (1955, 6.83292e + 006), (1956, 7.15423e + 006), (1957, 7.42723e + 006), (1958, 7.66482e + 006), (1958, 7.6
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ),(1959,8.01561e+006),(1960,8.43483e+006),(1961,8.72758e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1962,9.13882e+006),(1
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        1963, 9.5373 e + 006), (1964, 1.02293 e + 007), (1965, 1.07632 e + 007), (1966, 1.13496 e + 007), (1967 \land 1968, 1968), (1964, 1.02293 e + 007), (1965, 1.07632 e + 007), (1966, 1.13496 e + 007), (1967 \land 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (1968, 1968), (
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        , 1.17721e+007), (1968, 1.24194e+007), (1969, 1.3105e+007), (1970, 1.37718e+007), (1971, 1.43421e+007), (197
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ), (1972, 1.5026e + 007), (1973, 1.60229e + 007), (1974, 1.63934e + 007), (1975, 1.66438e + 007), (1976 + 007), (1976, 1.66438e + 007), (1976, 1.6648e + 007), (1976, 1.
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        , 1.74574e+007), (1977, 1.81674e+007), (1978, 1.8969e+007), (1979, 1.96478e+007), (1980, 2.00424e+007), (198
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ), (1981, 2.04385e + 007), (1982, 2.06667e + 007), (1983, 2.12584e + 007), (1984, 2.22327e + 007), (1984, 2.22227e + 007), (1984, 2.22222e + 007), (1984, 2.22222e + 007), (1984, 2.2222e + 007), (1984, 
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        1985, 2.30005 e+007), (1986, 2.38181 e+007), (1987, 2.47193 e+007), (1988, 2.57721 e+007), (1989 + 1985), (1988, 2.57721 e+007), (1988,
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        , 2.65829e+007), (1990, 2.7136e+007), (1991, 2.74958e+007), (1992, 2.80789e+007), (1993, 2.86933e+007), (1992, 2.80789e+007), (1993, 2.86933e+007), (1993, 2.86936e+007), (1993, 2.86936e+007), (1993, 2.86936e+007), (1993, 2.8696e+007), (1993, 2.8696e+007
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ), (1994, 2.96977e + 007), (1995, 3.0943e + 007), (1996, 3.19935e + 007), (1997, 3.32438e + 007), (1998 + 007), (1998, 3.19935e + 007), (1998, 3.19936e + 007), (1998, 3.1996e + 007)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        , 3.38574e+007), (1999, 3.50461e+007), (2000, 3.67039e+007), (2001, 3.77559e+007), (2002, 3.90314e+007), (20
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        ),(2003,4.09134e+007))
   BWP Rate=
                                                                                                                                                                          0.02
   Reserven= INTEG (
                                                                                                                                                                             -Produktionsrate+Entdeckungsrate,
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        Reserven ANFANG)
                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        Mrd Fass Erdoel
```

Anteil Gesamtressourcen zu Gesamtpotential=		
(Reserven+Ressourcen)/Gesamtpotential		
~ dimensionless		
~		
Reserven ANFANG=		
200		
~		
~		
Nachfrage Erdoel ANFANG=		
$Produktions rate\ K1*Bruttowelt produkt\ TABELLE (INITIAL\ TIME) ^E lastizita et\ Produktions rate\ zu\ Bruttowelt produktions rate\ zu\ Bruttowelt\ zu\ Bruttowelt$		
~ resource/year		
~		
Entdeckungskonstante=		
0.065		
~		
~		
Fuhrwerk variable Kosten(		
$[(0,0)-(100000,5)], (0,0), (3577.98,0.197368), (5504.59,0.789474), (9174.31,1.82018), (19266.1 \\ \land (100000,5)], (100000,5)], (100000,5)], (100000,5)], (100000,5)], (100000,5)], (100000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (1000000,5)], (10000000,5)], (10000000,5)], (10000000,5)], (10000000,5)], (100000000,5)], (1000000000,5)], (1000000000000000000000000000000000000$		
,3.15789),(58409.8,4.5614),(100000,5))		
~		
~		
Fuhrwerk Anschaffungskosten=		
2000		
~		
~		
Gesamtpotential=		
3500		
~ [2000,5000]		

Elastizitaet Treibstoffpreise zu Rohoelpreis=			
	0.85		
	~		
	~	I	
Treibstoffpreis K1=			
	0.03		
	~		
	~	I	
Potentieller Substitutionsanteil=			
	$Maximaler\ Substitutions anteil*EXP (Substitutions funktion\ K2*EXP (Substitutions funktion\ K3 \setminus Substitutions funktion\ K3)$		
		*Preis pro Fass/Preis pro Fass ANFANG))	
	~	fraction	
	~	I .	
Substitu		saenderung=	
	(Potentieller Substitutionsanteil-Substitutionsanteil)/Technologiedauer		
	~	fraction/year	
	~	I	
Substitutionsanteil= INTEG (			
	Substitut	tionsanteilsaenderung,	
		0)	
	~	fraction	
	~	l .	
Technologiedauer=			
	10		
	~	year	
	~		
Preis pro Fass=			
(Kostenfunktion K1+Kostenfunktion K2*(mittlere Produktionsrate/Produktionsrate normal)			
	llisiconj	-Kostenfunktion K3)^2)*Produktionskosten Multiplikator*Technologie Multiplikator	
	~	USD2006 pro Fass	
		0002000 pt0 t ass	

```
Produktionskosten Multiplikator=
           Produktionskostenfunktion\ K1*EXP (ln (1/Produktionskostenfunktion\ K1)*Anteil\ Gesamtressourcen\ zu\ Gesamtpotential \\ \backslash Produktionskostenfunktion\ K1*EXP (ln (1/Produktionskostenfunktion\ K1)*Anteil\ Gesamtressourcen\ zu\ Gesamtpotential)
                      dimensionless
Prozent investiert in FE TABELLE(
           \hbox{\tt [(-4,0)-(3,1)],(-3.95719,1),(-3.0581,0.951754),(-2.35168,0.828947),(-1.85933,0.666667)}
                      ),(-1.32416,0.460526),(-0.810398,0.285088),(-0.425076,0.223684),(0,0.197368))
                      dimensionless
                                  Investition FE=
           SMOOTH3I( Prozent investiert in FE*Umsatz, 1, 0)
                      Mrd Dollar
                                  Technologiebeschleunigung durch FE=
           DELAY3(Investition FE,15)
                      dollars/year
Umsatz=
           Preis pro Fass*Nachfrage Erdoel
                      Mrd Dollar
                                  Produktionsrate=
           IF THEN ELSE(Nachfrage Erdoel<=0:OR:Reserven<=0, 0, Nachfrage Erdoel)
                       Mrd Fass Erdöl
mittlere Produktionsrate=
           IF THEN ELSE(Reserven<=0, 0, SMOOTHI(Produktionsrate,3,Produktionsrate normal))
                      resource/year
```

```
*****************
       . Control
********************
               Simulation Control Paramaters
       FINAL TIME = 2070
               year
               The final time for the simulation.
       Ι
INITIAL TIME = 1900
               year
               The initial time for the simulation.
       1
SAVEPER =
   TIME STEP
               year
               The frequency with which output is stored.
TIME STEP = 0.0625
               year
               The time step for the simulation.
```