

AUFSTIEG UND FALL VON INFRASTRUKTUREN¹⁾

(Eine Analyse der langfristigen Entwicklung von Verkehrsinfrastruktur und Transporttechnologien)

von **Arnulf Grübler**

Inhalt: 1. Einleitung; 2. Logistisches Wachstum und technologischer Wandel; 3. Entwicklung der Infrastruktur: Wachstum, Zerfall und Technologiewandel; 3.1. Kanalnetz und Schiffsverkehr; 3.2. Eisenbahn; 3.3. Straßennetz und Autoverkehr; 3.4. Flugzeug und Flugverkehr; 4. Gesamtinfrastruktur und Modal Split; 5. Schlußfolgerungen; Literatur.

1. EINLEITUNG

In diesem Beitrag soll die langfristige Dynamik der Entwicklung der Infrastruktur sowie verschiedener Transporttechnologien untersucht werden. Zu diesem Zweck werden lange historische Zeitreihen physischer Indikatoren (wie etwa Ausdehnung einzelner Infrastruktursysteme, Anzahl von Automobilen etc.) mit Hilfe einfacher, der Biologie entlehnter Modelle, untersucht.

Diese Modelle zur Beschreibung einzelner Wachstums- bzw. Diffusionsprozesse sowie von Marktdurchdringungs- und Substitutionsphänomenen innerhalb des Gebietes der Transporttechnologien dienen in erster Linie als Instrument der Systematisierung und Organisation der empirischen Datenbasis und erheben keinerlei Erklärungsanspruch bezüglich der **Kausalität** der untersuchten Prozesse. Vielmehr wird die durch die Modelle beschriebene Dynamik der Diffusion neuer Infrastrukturen bzw. der Substitution alter durch neue Transporttechnologien als **Endresultat** der Einführung und Verbreitung erfolgreicher Innovationen verstanden. Der Verlauf in Form charakteristischer S-förmiger Kurven bzw. die Geschwindigkeit, mit der solch ein Diffusionsprozeß fortschreitet, ist das Resultat der Mechanismen der Ausbreitung von Innovationen sowie der zugrundeliegenden komparativen Vorteile einer neuen Technologie, die nur als eine komplexe Kombination technischer, sozialer, institutioneller, ökonomischer und psychologischer Faktoren verstanden werden kann.

1) Überarbeitete Fassung eines am Hopfgartner Verkehrskolloquium "Verkehr 2001 - Perspektiven", Hopfgarten/Brixental, 19.-21. März 1987, gehaltenen Vortrags (Grübler 1987). Die Ergebnisse sind Bestandteil einer am Institut für Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik, Technische Universität Wien, und am International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA, Laxenburg, bearbeiteten Dissertation.

Anhand der in diesem Beitrag vorgestellten Beispiele einer Reihe verschiedener Verkehrsinfrastrukturen und Transporttechnologien wollen wir nachweisen, daß die historische Entwicklung der Infrastruktur regelmäßigen Wachstums- und Substitutionsprozessen mit teilweise sehr langen Zeitkonstanten gehorcht, wobei die historische Entwicklung mittels der vorgestellten Modelle sehr gut nachvollzogen werden kann und damit deren Verwendung als langfristiges Prognoseinstrument rechtfertigt.

2. LOGISTISCHES WACHSTUM UND TECHNOLOGISCHER WANDEL

In Abbildung 1 fassen wir die Grundgleichung zur Beschreibung der interspezifischen Beziehungen innerhalb von Biozönosen (Lotka-Volterra Gleichung) sowie deren wichtigste Ableitungen zur Beschreibung autokatalytischer Wachstumsprozesse und zur Beschreibung einfacher und multipler technologischer Substitutionsprozesse zusammen.

Die allgemeine Lotka-Volterra Differentialgleichung beschreibt das Wachstum (oder die Abnahme) einer biologischen Spezies N_i als Funktion der Anzahl (Dichte) der Spezies N_i , sowie der "Interaktionsrate" mit anderen Spezies. Diese "Interaktionsrate" hängt ihrerseits von der Anzahl der Spezies N_i und N_j sowie der "Kollisionsrate" λ_{ij} zwischen den Spezies ab. Die Lotka-Volterra Differentialgleichung führt in der Biologie in der Regel zu sehr komplexen, oszillatorischen Lösungen, weswegen wir in diesem Beitrag auf eine eingehendere Diskussion nicht eingehen können. Eine ausführliche mathematische Abhandlung und Diskussion der Lotka-Volterra Gleichung und ihrer mannigfaltigen komplexen Lösungen findet sich in Umberto d'Ancona's 1939 erschienenem Werk "Der Kampf ums Dasein", das einen programmatischen Kurztitel für die vorliegende Arbeit liefert. Neuere Ergebnisse können Goel, Maitra und Montroll (1971) sowie dem mathematisch-philosophischen Buch "Leben wir in einer Volterra Welt?" von M. Peschel und W. Mende (1983) entnommen werden.

Die einfachste Ableitung der allgemeinen Lotka-Volterra Gleichung besteht aus einer drei-parametrischen logistischen Wachstumsfunktion, wie sie zum erstenmal von Verhulst (1838) zur Beschreibung des Wachstums der Weltbevölkerung vorgeschlagen und von Pearl (1925) zur Beschreibung biologischer Wachstumsprozesse wiederentdeckt wurde. Diese Funktion beschreibt das Wachstum einer Population als Funktion der Bevölkerungszahl sowie der noch zur Verfügung stehenden Ressourcen mit zunächst steigenden Wachstumsraten (exponentielle Wachstumsphase), die jedoch bei Erreichen des Wendepunktes der logistischen Funktion ($K/2$)

Abbildung 1: Lotka-Volterra Gleichung und Ableitungen zur Beschreibung technologischer Wachstums- und Substitutionsprozesse

Lotka-Volterra Gleichung

Allgemeine Form	$\frac{dN_i}{dt} = \alpha_i N_i - \frac{1}{\gamma_i} \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} N_i N_j$	
Verhulst-Pearl:	Fisher-Pry:	Marchetti-Nakicenovic:
Bevölkerungswachstum	zwei Konkurrenten	viele Konkurrenten
Tragfähigkeit der "Nische"	Markt: $K=1$	Markt: $K=1$
(Saturationsniveau): K	(d.h. $K=100\%$)	(d.h. $K=100\%$)
N = Bevölkerungsanzahl	F_1 Marktanteil Konkurrent 1	F_i Marktanteil Konkurrent i
$\frac{dN}{dt} = \alpha N \left(1 - \frac{N}{K}\right)$	$1-F_1$ Marktanteil Konkurrent 2	F_j Konkurrent in Übergangsphase (ältester, wachsender Konkurrent als Residuum berechnet)
$\log \frac{N}{K-N} = at+b$	$\log \frac{F_1}{1-F_1} = at+b$	$\log \frac{F_i}{1-F_i} = a_i t + b_i$
		$F_j = 1 - \sum_{i \neq j} F_i$

symmetrisch abnehmen und somit zu einer Verlangsamung des Wachstums führen, bis schließlich der Endwert K der Bevölkerung erreicht ist. K stellt das Saturationsniveau des Wachstumsprozesses bzw. die "Kapazität" der zu füllenden Öko- oder Marktnische dar. Wie in den folgenden Beispielen gezeigt wird, eignet sich diese Funktion hervorragend zur Beschreibung des Wachstums nicht nur biologischer, sondern auch technologischer Spezies (etwa Infrastrukturen, Anzahl von Automobilen, Marktanteile verschiedener Produktionsverfahren etc.), wobei nicht nur das Wachstum dieser Systeme, sondern auch die Entwicklung ihrer **Leistungsfähigkeit** mittels der logistischen Funktion beschrieben werden kann.

Die theoretische Begründung für einen logistischen Wachstumsverlauf findet sich sowohl in der Theorie der Produkt-Lebenszyklen als auch im charakteristischen Muster, nach dem sich Innovationen (neue Produkte, Verfahren, Transporttechnologien usw.) sowohl zeitlich als auch räumlich ausbreiten (s. dazu etwa Rogers 1962, Bass 1969 und 1980 und Hägerstrand 1967).

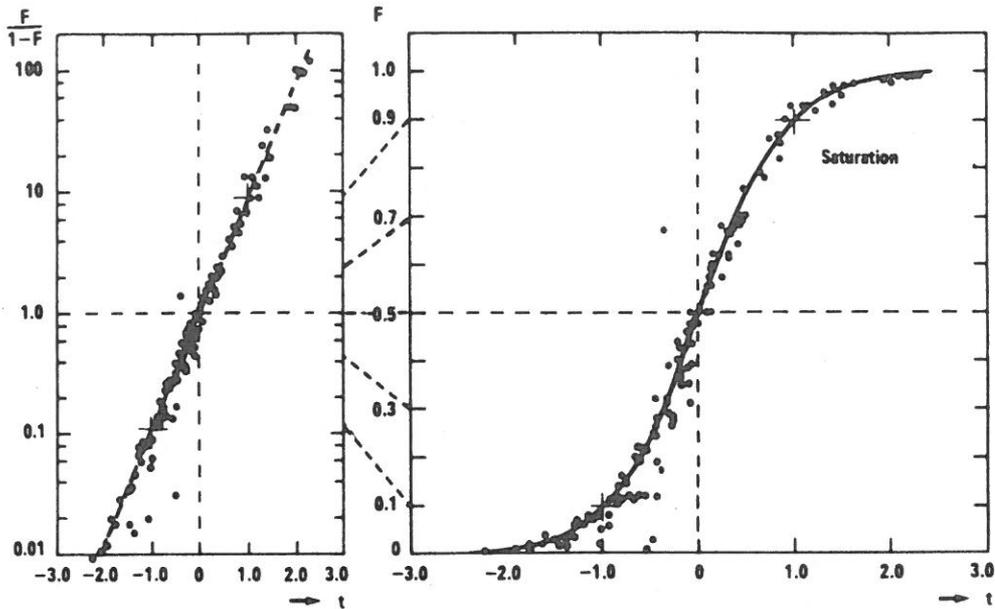
Die Analogie zwischen einer Ökonische und einer Marktnische führt uns zu einer weiteren wichtigen Ableitung der Lotka-Volterra Gleichung: zur logistischen Substitutionsfunktion. Lotka (1910) beschrieb erstmalig das charakteristische logistische Substitutionsmuster des Eindringens einer neuen (besser angepaßten) Spezies und der Verdrängung der alten Spezies innerhalb einer Ökonische. Da sich die "Kapazität" (Tragfähigkeit) K der Nische nicht verändert, wird diese zu $K=1$ normiert und der Substitutionsprozeß mittels zweier logistischer Funktionen, die den Zeitverlauf des Anteils der wachsenden (F) bzw. des Anteils der fallenden ($1-F$) Spezies beschreiben. Hierbei wird der Anteil F_i jeweils als Anteil der Spezies i an der Gesamtbevölkerung der Nische errechnet.

Fisher und Pry (1971) haben dieses Substitutionsmodell zur Beschreibung der Einführung neuer Technologien und Verfahren vorgeschlagen, wobei sich im Fisher-Pry Modell die Entwicklung der Marktanteile neuer Verfahren (etwa Anteil des L-D Verfahrens an der gesamten Stahlerzeugung) mittels einer logistischen Substitutionskurve beschreiben läßt. Abbildung 2 zeigt die Marktanteils- und Einführungs-(Substitutions-)Kurve von 17 verschiedenen technologischen Innovationen, die von Fisher und Pry untersucht wurden. Die charakteristischen Phasen des Produktlebenszyklus werden in Abbildung 2 durch den Verlauf der Marktanteilskurve neuer Technologien und Produkte ersichtlich: langsame Einführungsphase, gefolgt von der rapiden Wachstumsphase und schließlich Übergang zur reifen oder Saturationsphase im Produktzyklus.

Abbildung 2 beschreibt eine weitere wichtige Transformation (Linearisierung) der logistischen Substitutionskurve. Wird der Quotient der bereits erreichten Marktanteile (F) durch die noch zu erreichenden Marktanteile ($1-F$) im logarithmischen Maßstab gezeichnet (d. h. $\log(F/1-F)$), erscheint die logistische Substitutionskurve als Gerade, die sich besser zur optischen Analyse vor allem der Einführungs- und Saturationsphase des technologischen Lebenszyklus eignet, weswegen in den hier vorgestellten Beispielen in der Regel die Transformation $\log(F/1-F)$ der logistischen Substitutionsfunktion Verwendung findet.

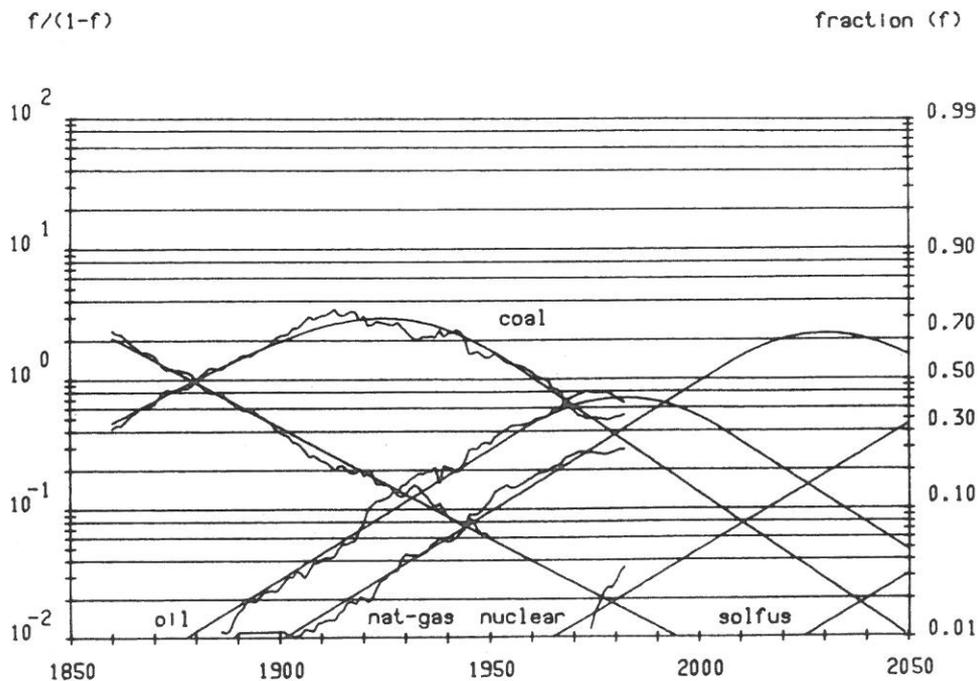
Schließlich wollen wir noch einen weiteren Komplexitätsgrad technologischer Substitutionsprozesse betrachten: die Erweiterung des Fisher-Pry Modells zur Beschreibung multipler Substitutionsprozesse (Abbildung 1), wie sie am International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA, erstmals zur Beschreibung der Primärenergiesubstitution (Abbildung 3) vorgeschlagen wurde (Marchetti und Nakicenovic 1979).

Abbildung 2: Lebenszyklus zur Beschreibung der Einführung von 17 verschiedenen Innovationen (nach Fisher und Pry, 1971)



Hier vollziehen sich die Einführungs- und Verdrängungsphasen in einer sukzessiven Abfolge logistischer Funktionen, wobei eine nicht-logistische Übergangsfunktion die Transitionsphase zwischen Saturation einer eingeführten Technologie und deren Verdrängung durch neuere Technologien beschreibt. Hierbei befindet sich jeweils die älteste der wachsenden Technologien in der Übergangsphase, und ihr Marktanteil wird durch das verbleibende Residuum nach Abzug der Marktanteile aller übrigen (wachsenden oder fallenden) Technologien vom Gesamtmarkt ($K=1$, d. h. 100 Prozent) bestimmt.

Abbildung 3: Weltprimärenergiesubstitution (Marchetti und Nakicenovic 1979)



3. ENTWICKLUNG DER INFRASTRUKTUR: WACHSTUM, ZERFALL UND TECHNOLOGIEWANDEL

In den folgenden Abschnitten wollen wir kurz die Entwicklung einzelner Infrastruktursysteme in chronologischer Reihenfolge aufzeigen. Dabei diskutieren wir zuerst die Entwicklung des Kanalnetzes, sodann des Eisenbahn- und Straßennetzes und schließen mit einer Diskussion des Flugverkehrs. In der Diskussion der Entwicklung der einzelnen Infrastrukturen stellen wir auch Beispiele technologischer Substitutionsprozesse in den Transporttechnologien dieser Infrastrukturen vor. Abschließend verknüpfen wir die historische Entwicklung einzelner Infrastruktursysteme zu einer Gesamtschau, um zu zeigen, daß auch die historische Entwicklung der Gesamtinfrastruktursysteme sowohl in der Dimension der **Länge** als auch in der Dimension der **Leistungsfähigkeit (Modal Split)** der langfristigen Dynamik technologischer Substitutionsprozesse, auch in Ländern unterschiedlicher Wirtschaftsordnung, gehorcht. Dies erlaubt Schlußfolgerungen über die kurzfristigen Möglichkeiten der Veränderung dieses historischen Prozesses, die angesichts der langen historischen Zeitkonstanten als extrem beschränkt erscheinen.

3.1. Kanalnetz und Schiffsverkehr

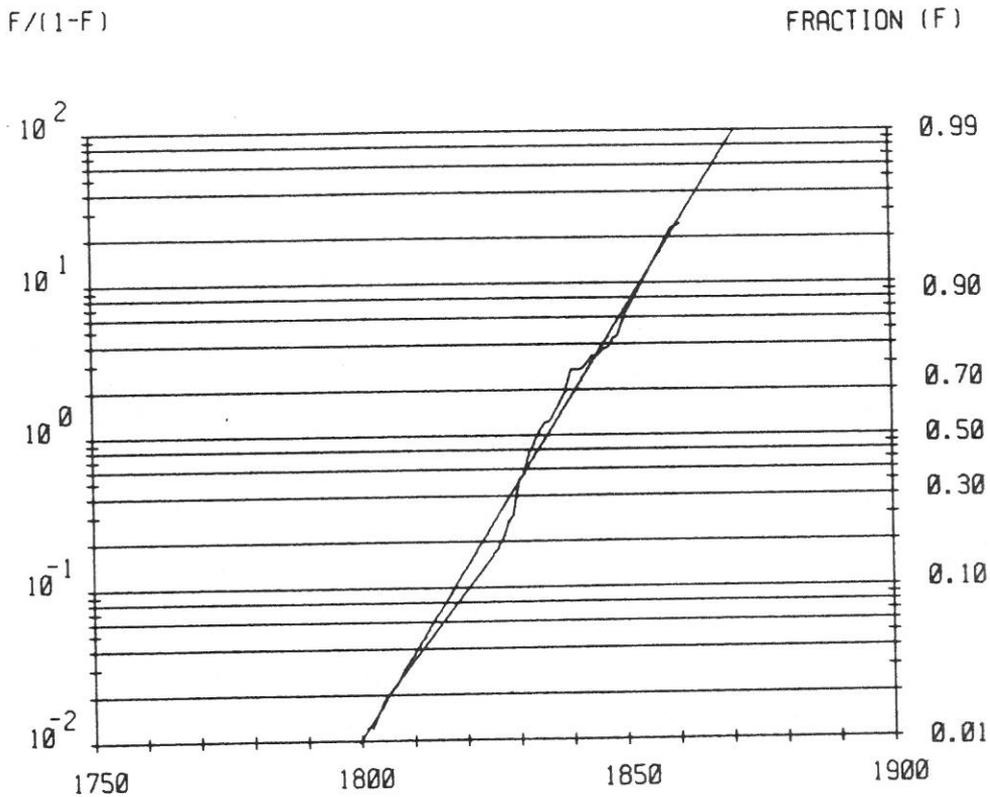
Das erste bedeutende Infrastruktursystem der Neuzeit bestand in einem systematischen Ausbau des Kanalnetzes und der damit einhergehenden Verbindung der schiffbaren Flüsse zu einem **integrierten** Infrastruktursystem. Den Ursprung fand diese Entwicklung im Ausbau der niederländischen "Trekvaarten", die allerdings hauptsächlich dem Personentransport dienten, sowie in Frankreich, wo etwa der Canal de Briare bereits 1642 fertiggestellt wurde.

Die größte Bedeutung erlangte der Ausbau des Kanalnetzes an der Wende des 18. Jahrhunderts zum 19. Jahrhundert in England, wo das Kanalnetz die Haupttransportinfrastruktur zum Transport von Kohle, Eisenerz und Eisen war, bis seine Rolle, wie wir später sehen werden, von der Eisenbahn übernommen wurde.

In ähnlicher Weise war der Ausbau des Kanalnetzes die erste in einer Reihe von Infrastrukturinvestitionen in den Vereinigten Staaten (siehe Abbildung 4 nach Daten von Isard 1942). Wie ersichtlich, vollzog sich der Ausbau des Kanalnetzes in Form eines logistischen Wachstumsimpulses, der im wesentlichen um 1860 (zur gleichen Zeit wie in England oder Frankreich) abgeschlossen war. Das Sättigungsniveau dieses Wachstumsprozesses betrug ca. 4400 Meilen Betriebslänge des Kanalnetzes. Der Wachstumsprozeß umspannt etwa 70 Jahre, wobei allerdings die eigentliche

Wachstumsphase, d. h. das Wachstum von 10 auf 90 Prozent des geschätzten Saturationsniveaus, 34 Jahre dauerte. Der Wendepunkt der logistischen Wachstumsfunktion (d. h. $K/2$), wo die Wachstumsrate am höchsten ist, liegt im Jahre 1836. Ab diesem Zeitpunkt sinken die Wachstumsraten, bis um 1860 kurz vor Erreichen des Sättigungsniveaus der Wachstums- in einen Verfallsprozeß übergeht.

Abbildung 4: Wachstum der Länge der errichteten Kanäle in den USA

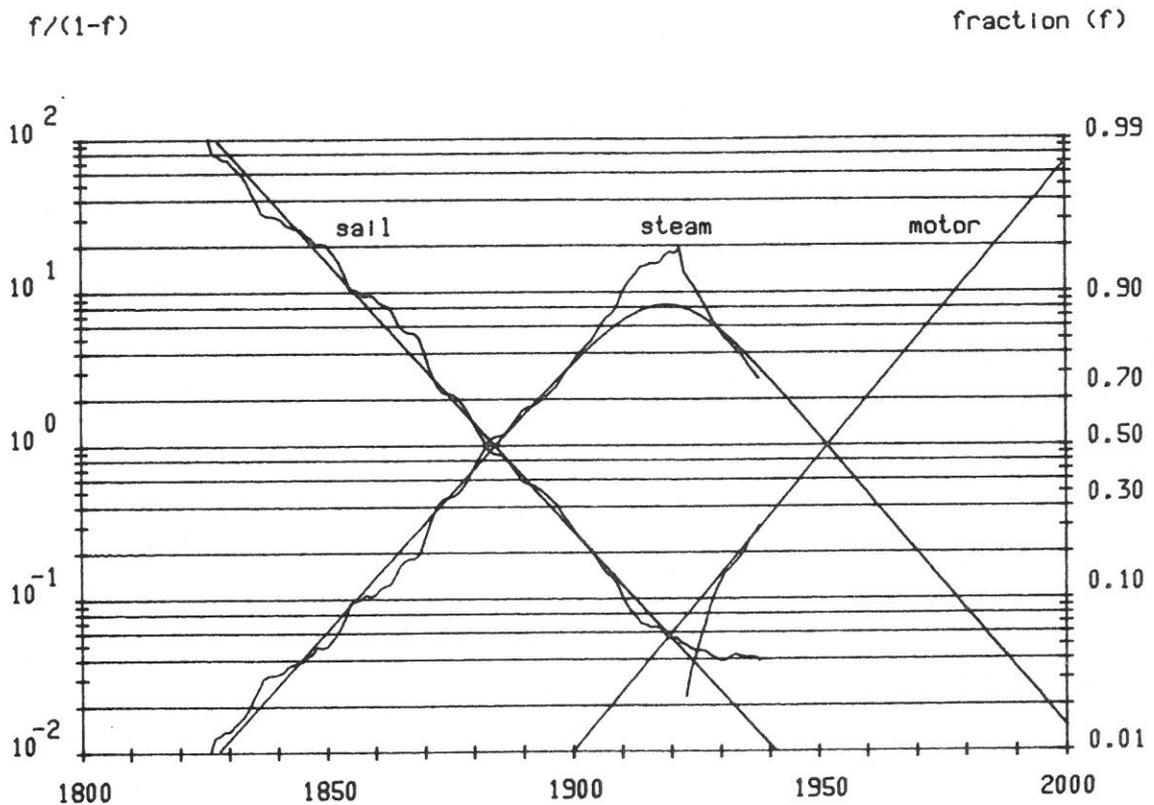


Seit diesem Zeitpunkt ist die Gesamtlänge des Kanalnetzes in den USA kontinuierlich geschrumpft und beträgt gegenwärtig etwa 2500 Meilen. Es ist weiters interessant festzustellen, daß der Großteil der Schließungen deswegen erfolgte, weil Eisenbahnlinien parallel zu Kanälen errichtet wurden und trotz höherer Tarife, jedoch auf Grund der viel höheren Transportgeschwindigkeit einen Großteil der Marktanteile erobern konnten. Dieses Konkurrenz- und Substitutionsmuster werden wir später auch bei der Einführung des Straßentransportes und des Flugverkehrs beobachten können.

Der Hauptgrund für die höhere Transportgeschwindigkeit der Eisenbahn war die Verwendung von Dampfkraft. Obwohl diese neue Antriebsform ebenso in der Schifffahrt übernommen wurde (Abbildung 5 illustriert das am Beispiel der Schifffahrtsflotte von Großbritannien, wo der technologische Substitutionsprozeß

von Segel- zu Dampf- und schließlich zu Verbrennungsmotorschiffen dargestellt ist), konnte die Eisenbahn ihren komparativen technologischen Vorsprung gegenüber der Kanalschifffahrt behaupten und wurde zum wichtigsten Transportmittel der industriellen Revolution.

Abbildung 5: Anteil verschiedener Antriebsarten in der Schiffsflotte (Bruttoregistertonnen) Großbritanniens (Nakicenovic 1984)

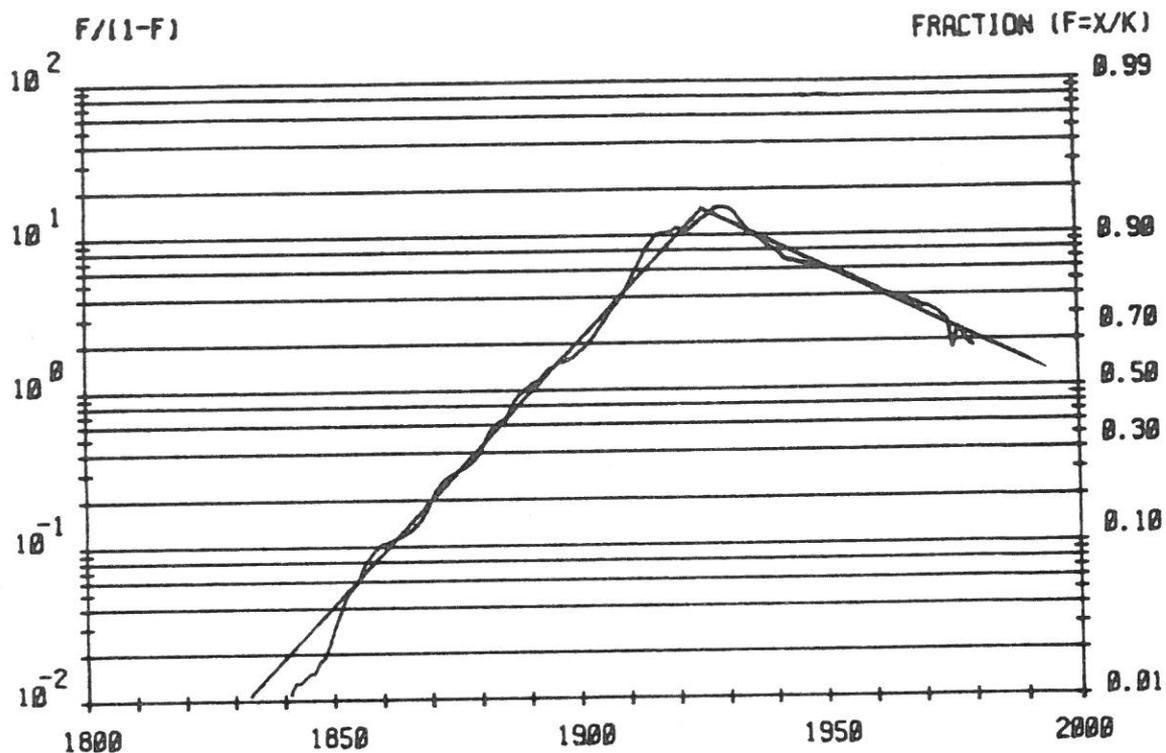


3.2. Eisenbahn

Die Entwicklung des Eisenbahnnetzes in den USA vollzog sich seit der Eröffnung der ersten Bahnlinie im Jahre 1829 (Baltimore Ohio Railroad) als regelmäßiger logistischer Wachstumsimpuls über einen Zeitraum von ca. 100 Jahren, wobei der Hauptwachstumsimpuls (gemessen an der Zeit Δt , die benötigt wird, um von 10 auf 90 Prozent der größten Netzausdehnung zu wachsen) rund 50 Jahre dauert (Abbildung 6).

Die Bedeutung des Eisenbahnnetzes der USA kann am besten daraus ersehen werden, daß um 1840 das amerikanische Eisenbahnnetz bereits 4500 km umfaßte, wohingegen in Europa im gleichen Zeitraum erst ca. 3000 km eröffnet waren (Taylor 1962). Der Wachstumsprozeß war 1929 abgeschlossen, als das Eisenbahnnetz in den USA über 480.000 km umfaßte, im Vergleich zu rund 400.000 km in Europa (Woytinsky 1927) und rund 1,25 Millionen km auf der gesamten Erde (Mothes 1950).

Abbildung 6: Entwicklung des Eisenbahnnetzes der USA (Nakicenovic 1987b)

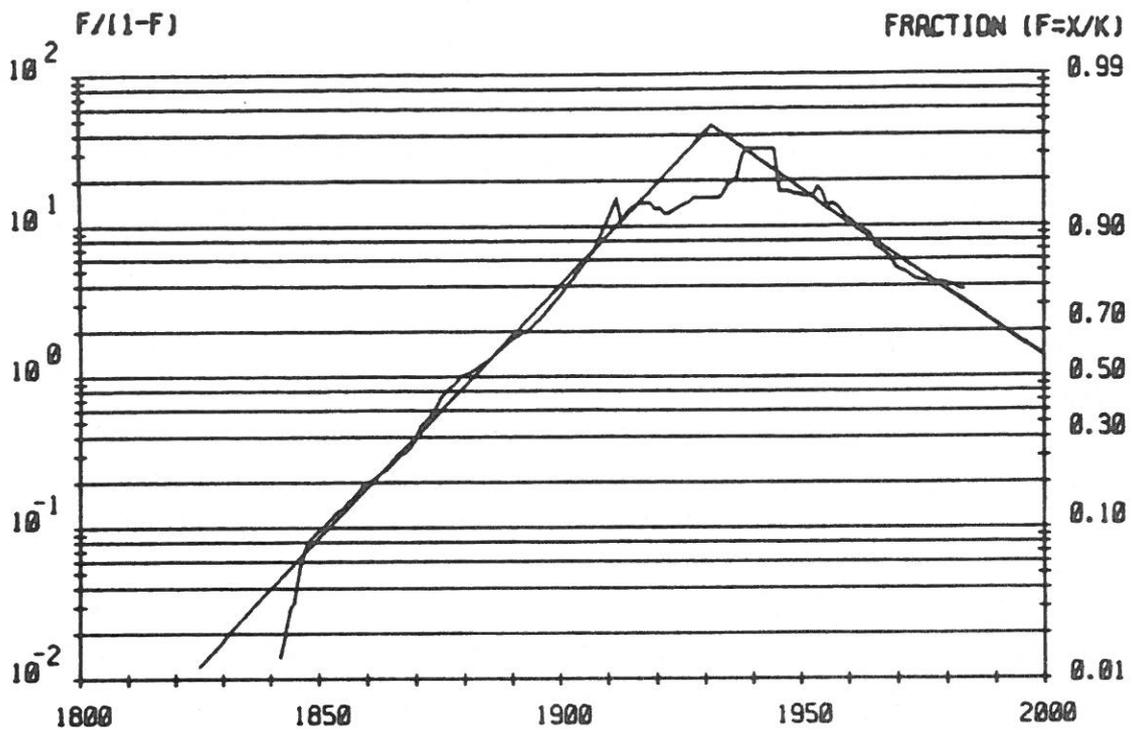


Seit diesem Zeitpunkt schrumpft die Länge des Eisenbahnnetzes in den USA, allerdings ist der Schrumpfungsprozeß mit einem Δt von 125 Jahren langsamer als der Wachstumsprozeß. Das Gesamtnetz ist seit 1929 um ca. ein Drittel auf rund 320.000 km zurückgegangen und wird bei Fortsetzung des historischen Trends auf etwa 270.000 km im Jahre 2000 schrumpfen. Symbolisch für diesen Schrumpfungsprozeß ist die Einstellung regelmäßiger transkontinentaler Zugverbindungen, da der Markt für Personentransport praktisch vollständig an Auto- und Flugverkehr verloren wurde.

Diese Regelmäßigkeit in der Entwicklung des Eisenbahnnetzes können wir nicht nur in den USA beobachten, ähnliche Entwicklungen vollziehen sich praktisch in allen europäischen Ländern, insbesondere in Großbritannien und, wie Abbildung 7 veranschaulicht, in Deutschland.

Der Wachstumsprozeß des deutschen Eisenbahnnetzes war praktisch zu Beginn des Ersten Weltkrieges abgeschlossen, als das Netz über 60.000 km umfaßte. Berechnet man, um die territorialen Veränderungen zu berücksichtigen, den Anteil des Staatsgebietes Deutschlands der Zwischenkriegszeit und der BRD an diesem Gesamtnetz, zeigt sich, daß der Stagnations- und anschließende Schrumpfungsprozeß bereits zu einem Zeitpunkt eingeleitet wurde, wo der Straßenverkehr als wichtigster Konkurrent noch völlig unbedeutend war.

Abbildung 7: Entwicklung des Eisenbahnnetzes Deutschlands (BRD)



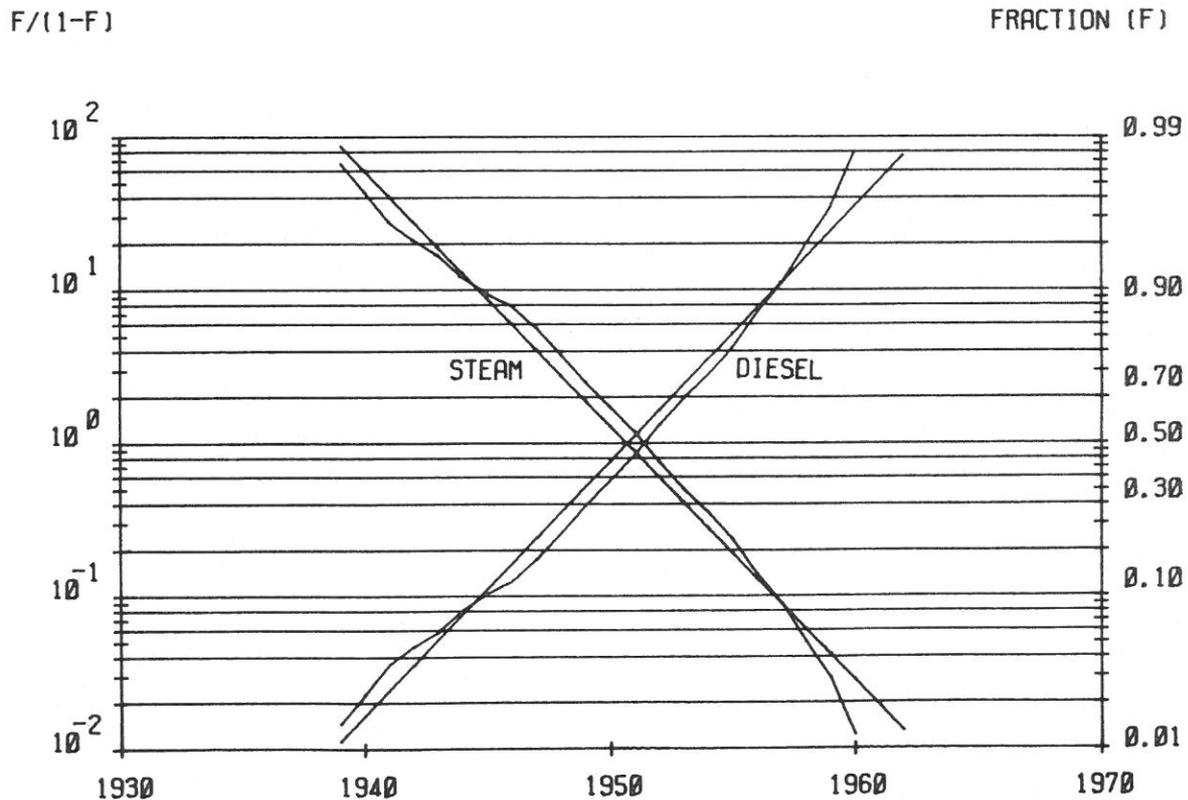
Interessant sind ferner Regelmäßigkeit und Symmetrie zwischen Wachstums- und Zerfallsprozeß, die darauf hindeuten, daß eine dramatische Trendumkehr kaum zu erwarten ist. Ein neu einzuführendes schienengebundenes Verkehrsmittel wäre vielmehr mit völlig neuer Technologieform (Magnetschwebbahnen?) und gänzlich anderer Netzgestalt (radiale anstelle der herkömmlichen vernetzten Verbindung) als neues Infrastruktursystem zu interpretieren. Dieses neue Infrastruktursystem wäre seinerzeit wiederum den historischen Zeitkonstanten und den Produktzyklenphasen (Einführung - Wachstum - Saturation), die wir bei den klassischen Infrastruktursystemen beobachten können, unterworfen.

Der Vollständigkeit halber wollen wir auch erwähnen, daß es auch Gegenbeispiele dieses Anpassungs-(Schrumpfungs-)Prozesses im Eisenbahnnetz gibt: So ist die Länge des österreichischen Eisenbahnnetzes mit rund 6000 km seit 1919 praktisch unverändert geblieben. Deuten vielleicht die schlechten betriebswirtschaftlichen Ergebnisse einer Reihe von Nebenbahnen darauf hin, daß ein ähnlicher Regulationsmechanismus der Netzlängen Anpassung wie in anderen Ländern (Reduktion der Netzlänge um ein Drittel) für Österreich letztendlich doch zu erwarten ist?

Wir wollen diese Diskussion der historischen Entwicklung des Eisenbahnnetzes mit einem Beispiel des Technologiewandels im Eisenbahnsektor abschließen, um zu zeigen, daß der Rückgang der Bedeutung der Eisenbahn sowohl hinsichtlich der Streckennetzlänge als auch bezüglich ihres Anteils an beförderten Personen und Gütern nicht auf einen mangelnden technologischen Wandel zurückzuführen ist.

Abbildung 8 veranschaulicht die Substitution von Dampf- durch Diesellokomotiven in den USA (Elektroloks haben keine praktische Bedeutung in den USA). Dies bedeutet, daß trotz erfolgreicher technischer Innovation auf dem Eisenbahnsektor die kompetitive Position der Eisenbahn gegenüber Auto- und Flugverkehr nicht nachhaltig verbessert werden konnte, was zu der im folgenden weiter abgehandelten Entwicklung im Modal Split der USA führte.

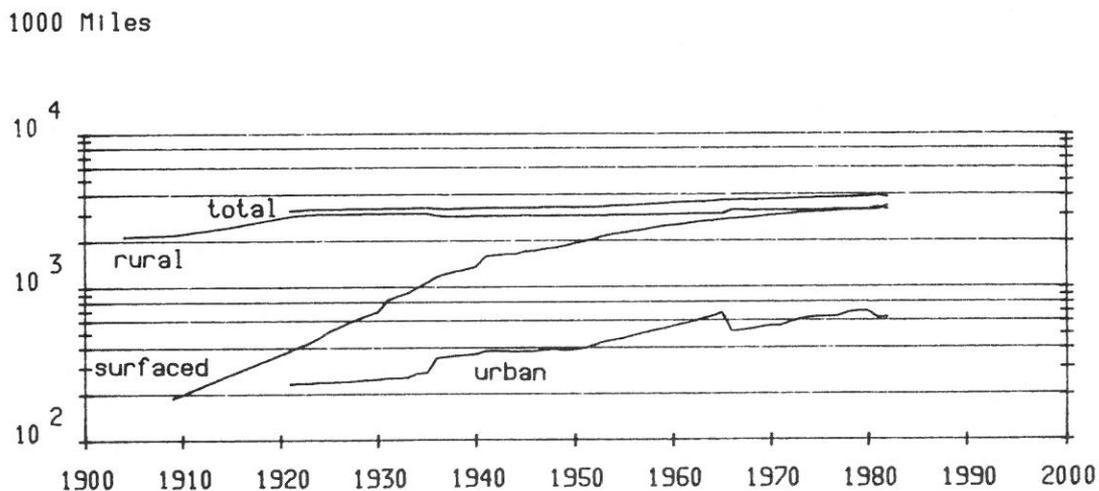
Abbildung 8: Substitution von Dampf- durch Diesellokomotiven in den USA (Nakicenovic, 1987b)



3.3. Straßennetz und Autoverkehr

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung des Straßennetzes der USA seit Beginn dieses Jahrhunderts. Auffällig ist, daß die Gesamtlänge des Straßennetzes nur sehr langsam zugenommen hat, nämlich von 3,16 Millionen Meilen im Jahr 1921 auf 3,85 Millionen Meilen 1981. Betrachten wir hingegen die Entwicklung des **befestigten Straßennetzes** (Abbildung 10), sehen wir, daß sich die Länge einem logistischen Wachstumsimpuls folgend entwickelt hat, wobei gegenwärtig bereits über 90 Prozent der endgültigen Straßennetzlänge erreicht sind. Der Anteil der befestigten Straßen am gesamten Straßennetz der USA entwickelte sich zu Lasten der unbefestigten Landstraßen anhand der in Abbildung 11 dargestellten logistischen Substitutionskurve, wobei der eigentliche Wachstumsimpuls (Δt) rund 75 Jahre dauerte.

Abbildung 9: Entwicklung des Straßennetzes der USA (Nakicenovic 1987b)



Es ist häufig diskutiert worden, ob die Entwicklung des Straßennetzes eine Folge der zunehmenden Motorisierung gewesen sei, d. h., ob die zunehmende Anzahl von Automobilen den Bau von entsprechenden Straßen gleichsam "erzwingen" habe. Bevor wir diese Frage verneinen können (da wir zeigen werden, daß das Wachstum der befestigten Straßen dem Wachstum der Autopopulation erheblich voranschreitet und gegenwärtig praktisch saturiert ist, wohingegen die Autoanzahl erst knapp über 50 Prozent ihres Endwertes erreicht hat), müssen wir zuerst die Entwicklung der Anzahl der Autos untersuchen.

Abbildung 10: Entwicklung der Länge des befestigten Straßennetzes der USA
(Nakicenovic 1987b)

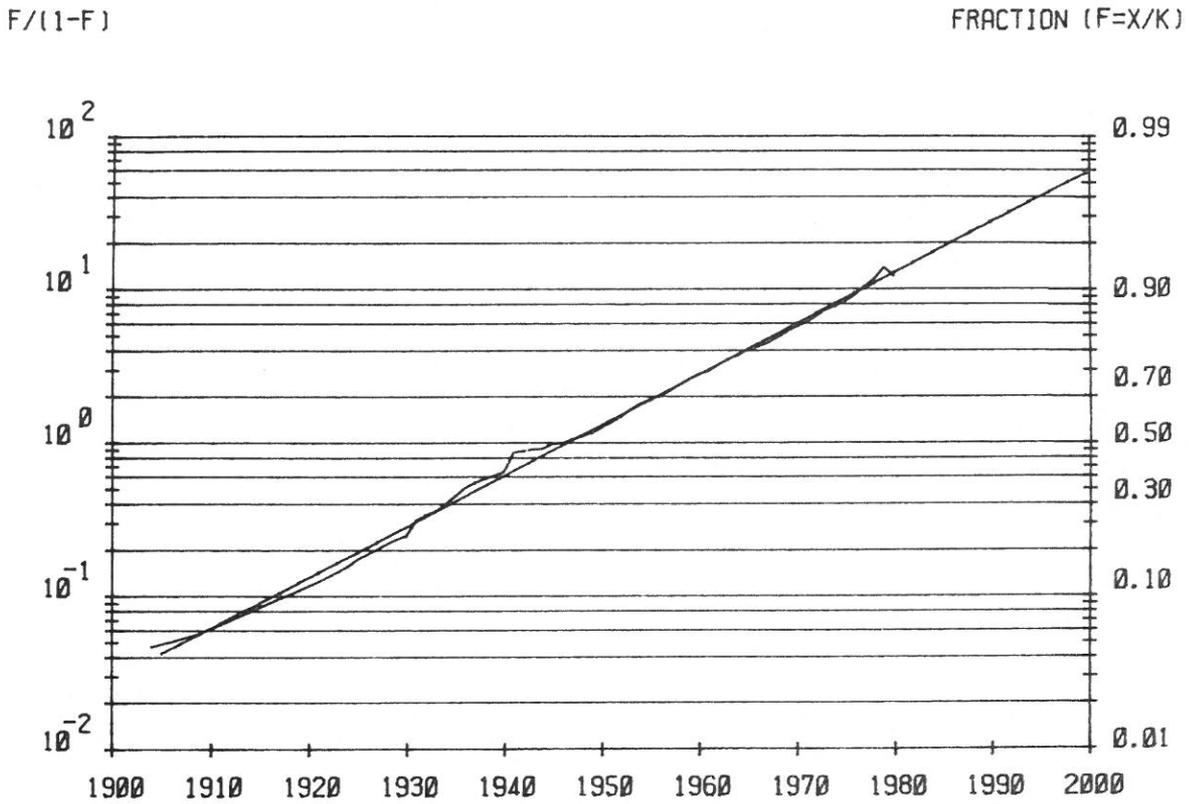
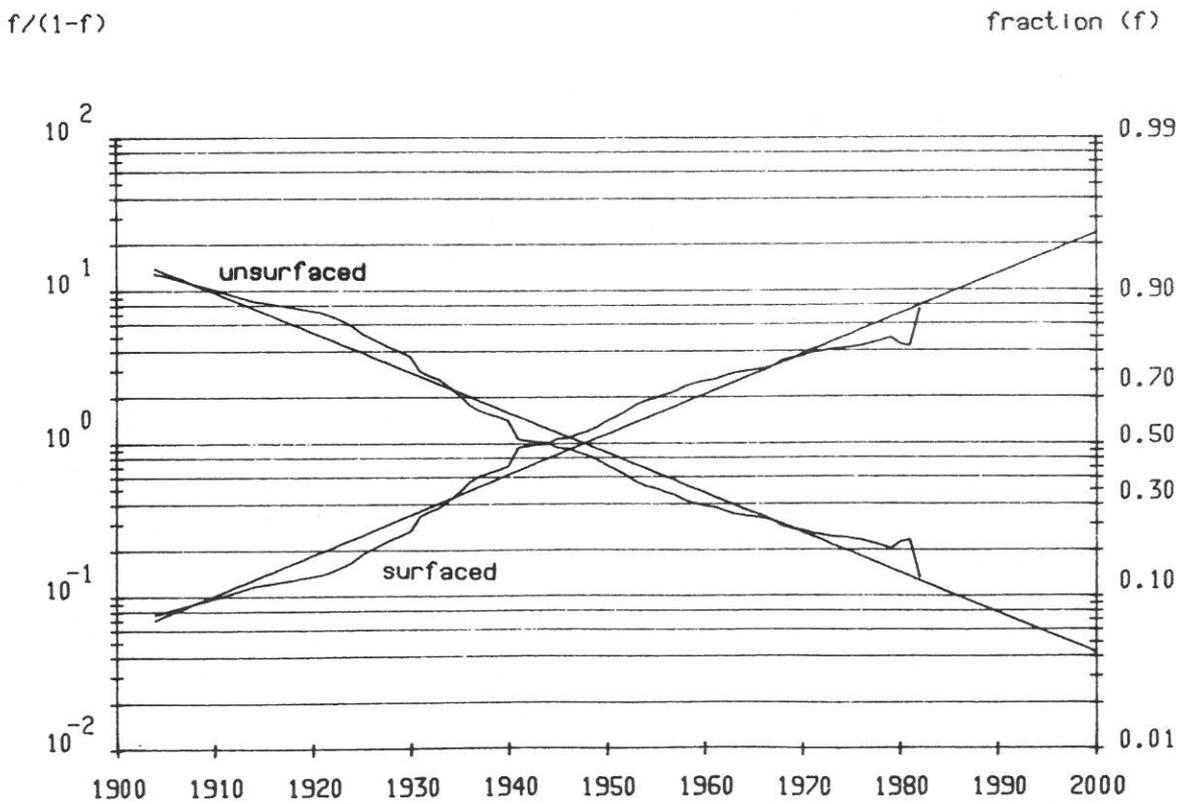


Abbildung 11: Substitution unbefestigter durch befestigte Straßen in den USA
(Nakicenovic 1987b)

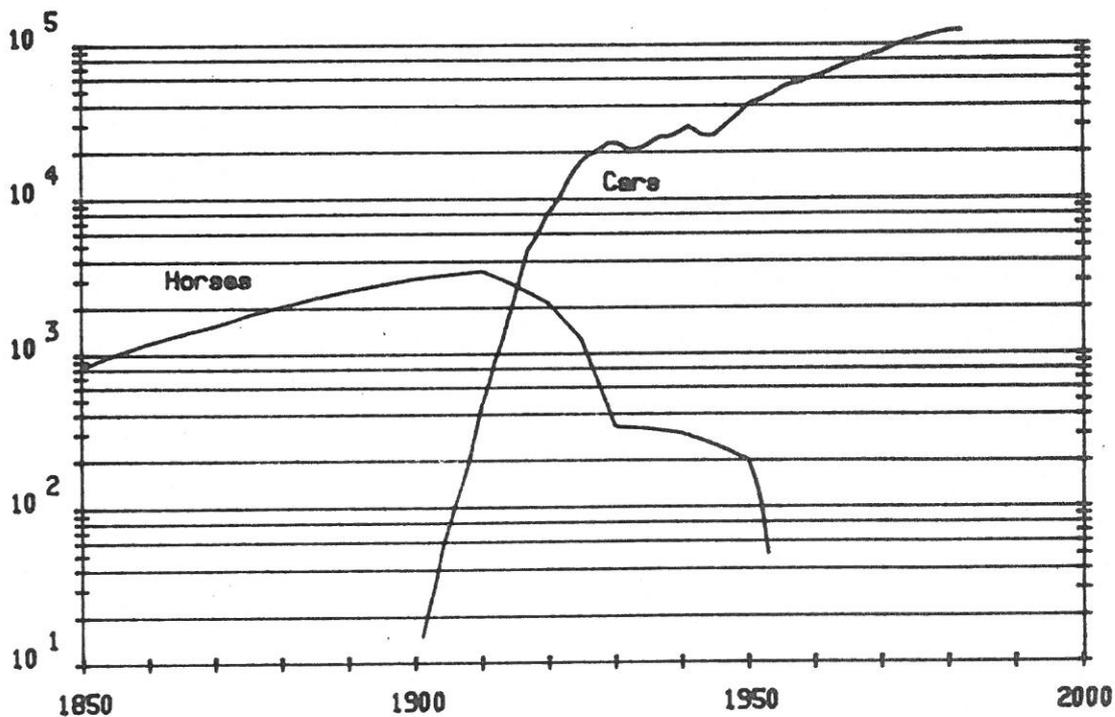


Die rapide Verbreitung des Autos in den USA, die im Gegensatz zu Westeuropa bereits vor dem Zweiten Weltkrieg eingesetzt hat, muß zuallererst vor dem Hintergrund verstanden werden, daß es vor dem Auto bereits ein weitverbreitetes Individualverkehrsmittel gegeben hat, nämlich das Pferd (Pferde in der Landwirtschaft nicht eingerechnet, also nur Reitpferde und Zugpferde für Kutschen).

Wie aus Abbildung 12 hervorgeht, können wir deutlich zwei Phasen der Expansion des Autos feststellen: eine erste rapide Phase bis 1930, während der das Auto als "pferdelose Kutsche" das Pferd ersetzte (deren Anzahl von knapp 4 Millionen um 1910 auf rund 400.000 im Jahre 1930 zurückging), sowie eine langsamere zweite Wachstumsphase, die einsetzte, nachdem der Substitutionsprozeß des Pferdes (siehe Abbildung 13) abgeschlossen war.

Abbildung 12: Anzahl der Pferde und Autos in den USA (Nakicenovic 1987b)

1000 Units



Betrachten wir hingegen die Gesamtanzahl aller Straßenverkehrsmittel (Pferde außerhalb der Landwirtschaft plus Auto) können wir einen, nach anfänglicher Turbulenz sehr regelmäßig werdenden, logistischen Wachstumsimpuls mit sehr langem Δt (rund 100 Jahre) feststellen (Abbildung 14). Bei einer Extrapolation dieses Wachstumstrends zeigt sich, daß in den USA - im Gegensatz zu allen anderen Industrieländern - die Anzahl der Autos noch weit vom Sättigungsniveau entfernt erscheint und eine Saturation erst weit nach der Jahrtausendwende auf einem Niveau von rund einem Auto pro Einwohner zu erwarten wäre.

Abbildung 13: Substitution des Pferdes als Transportmittel durch Autos in den USA (Nakicenovic 1987b)

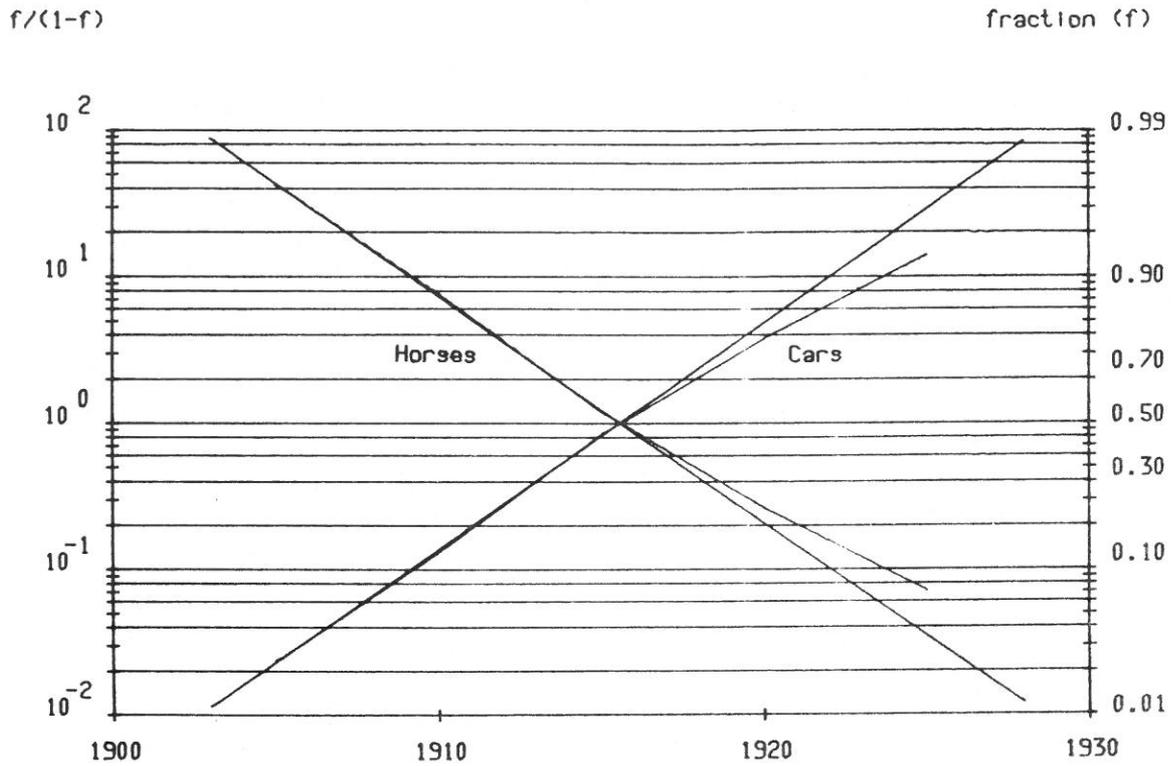
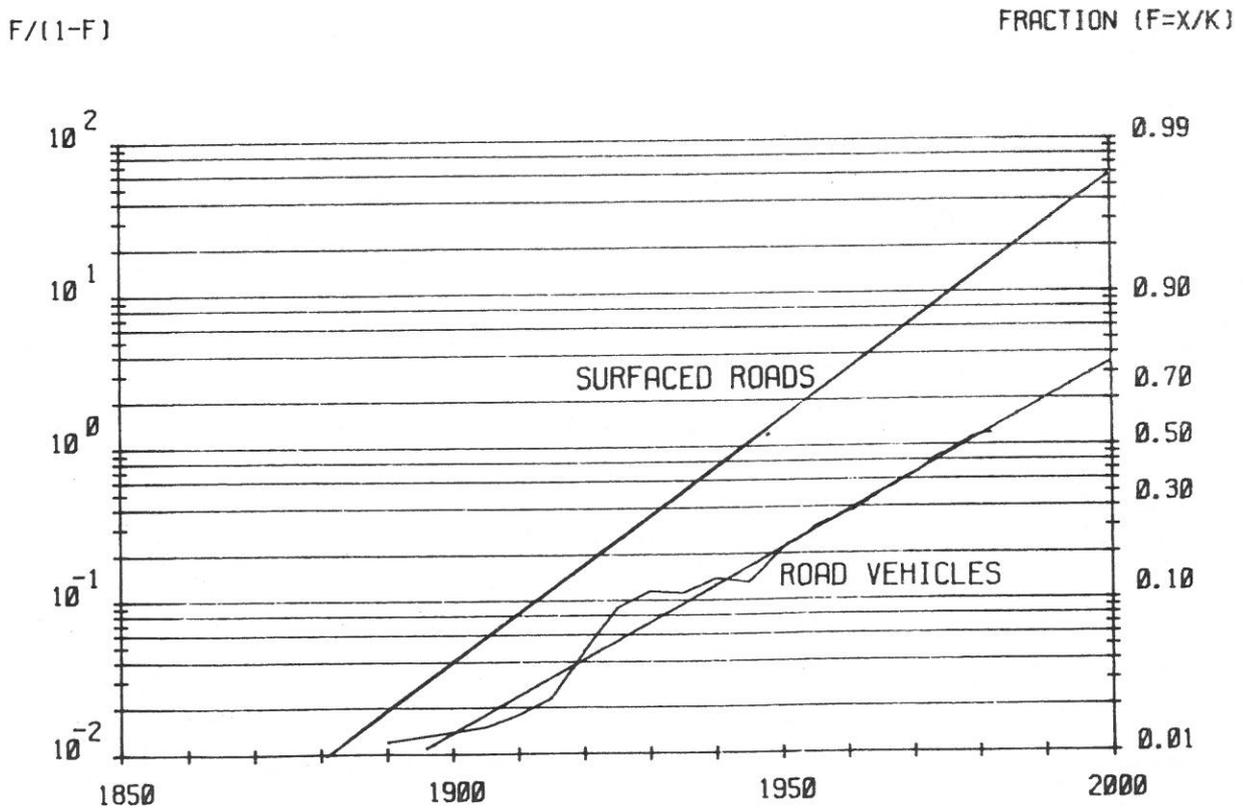


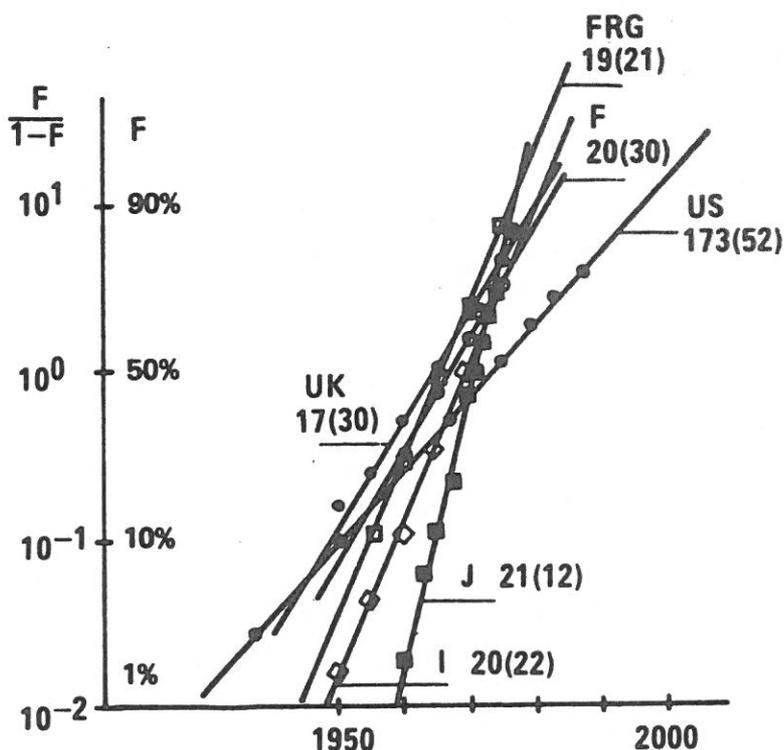
Abbildung 14: Entwicklung der Anzahl der Straßenverkehrsmittel (Pferde und Autos) und der befestigten Straßen in den USA (Nakicenovic 1987b)



Im Gegensatz dazu haben wir bereits weiter oben ausgeführt, daß die Entwicklung des Straßennetzes gegenwärtig bereits abgeschlossen ist und in allen Phasen der Entwicklung der Motorisierung voranging (Abbildung 14). Dies wird auch am besten durch die Situation zu Anfang der Einführung des Autos illustriert: so waren 1910 bereits rund 10 Prozent des Straßennetzes befestigt, wohingegen erst weniger als 400.000 Autos im Vergleich zu den 3,3 Millionen Reit- und Zugpferden (außerhalb der Landwirtschaft) existierten. Um 1950 waren bereits 50 Prozent des Straßennetzes befestigt, die Autoanzahl betrug aber erst rund 17 Prozent des geschätzten Saturationswertes.

Diese sehr langen Zeitkonstanten in der Entwicklung der Motorisierung in den USA als erstem Land der massiven Einführung des Autos stehen in starkem Gegensatz zu der viel schnelleren Einführung des Autos in anderen Industrieländern. Wie Abbildung 15 zeigt, wird der Diffusionsprozeß immer schneller, je später die Einführung des Autos einsetzt, um im Extremfall Japans, wo der Wachstumsprozeß erst um 1960 einsetzte, ein Δt von nur 12 Jahren zu erreichen. Marchetti (1983) hat darüberhinaus eine (bislang nicht erklärable) mathematische Beziehung zwischen dem Einführungszeitpunkt und der Geschwindigkeit des Anwachsens der Autoanzahl festgestellt, die er "last come, first served"-Regel genannt hat.

Abbildung 15: Motorisierung verschiedener Länder (nach Marchetti 1983)

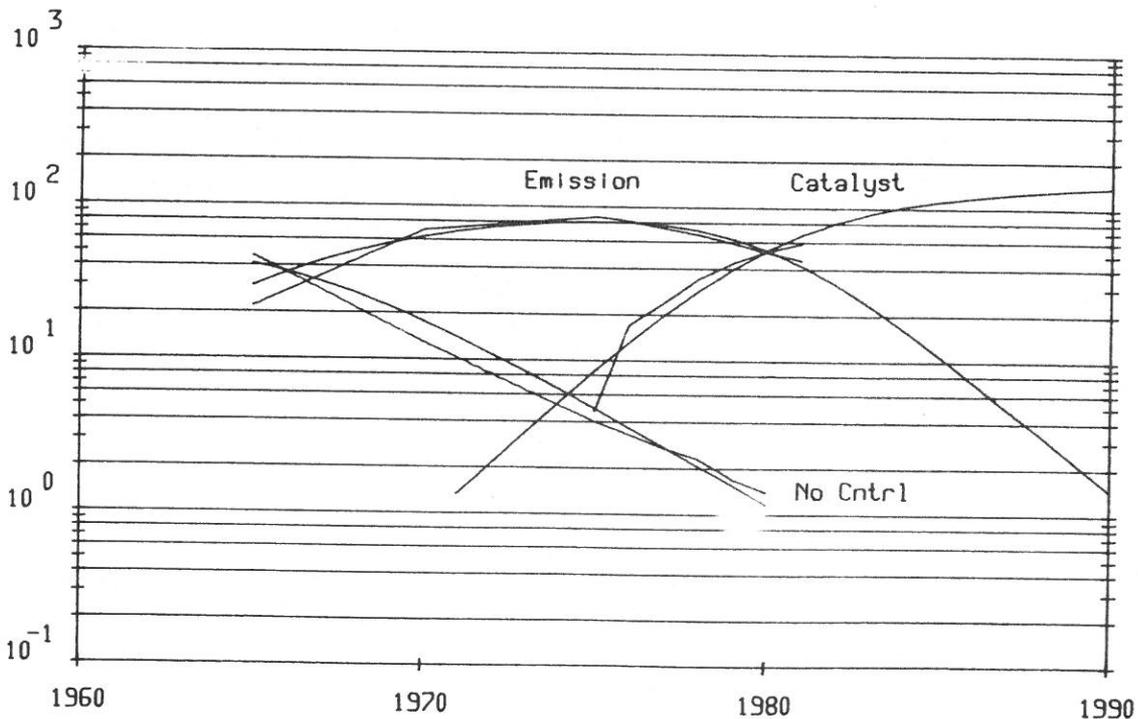


Anhand dieses Zusammenhanges müßte eine um 1987 beginnende Motorisierung in einem Land innerhalb von weniger als 5 Jahren abgeschlossen werden, was aus praktischen Überlegungen auszuschließen ist. Vielmehr deutet dieser Zusammenhang auf ein Faktum hin, das bereits in Abbildung 15 ersichtlich wird, nämlich, daß die Motorisierungsphase in allen Industrieländern mit Ausnahme der USA und Kanadas im wesentlichen abgeschlossen und eine ähnliche Motorisierung in Ländern der zweiten und dritten Welt **nicht** zu erwarten ist.¹⁾

Analog den vorangegangenen Abschnitten wollen wir die Diskussion der Entwicklung des Autos mit einem Beispiel eines technologischen Substitutionsprozesses im Automobilsektor abschließen. Abbildung 16 zeigt die Einführung von Autos mit ersten Emissionsminderungsmaßnahmen (CO-Abgasminderung, Rückführung von Öldämpfen etc.) sowie die Einführung von Katalysatorautos in den USA.

Abbildung 16: Einführung von Umweltschutzmaßnahmen in der Automobilflotte der USA (Nakicenovic 1987a)

In Millions



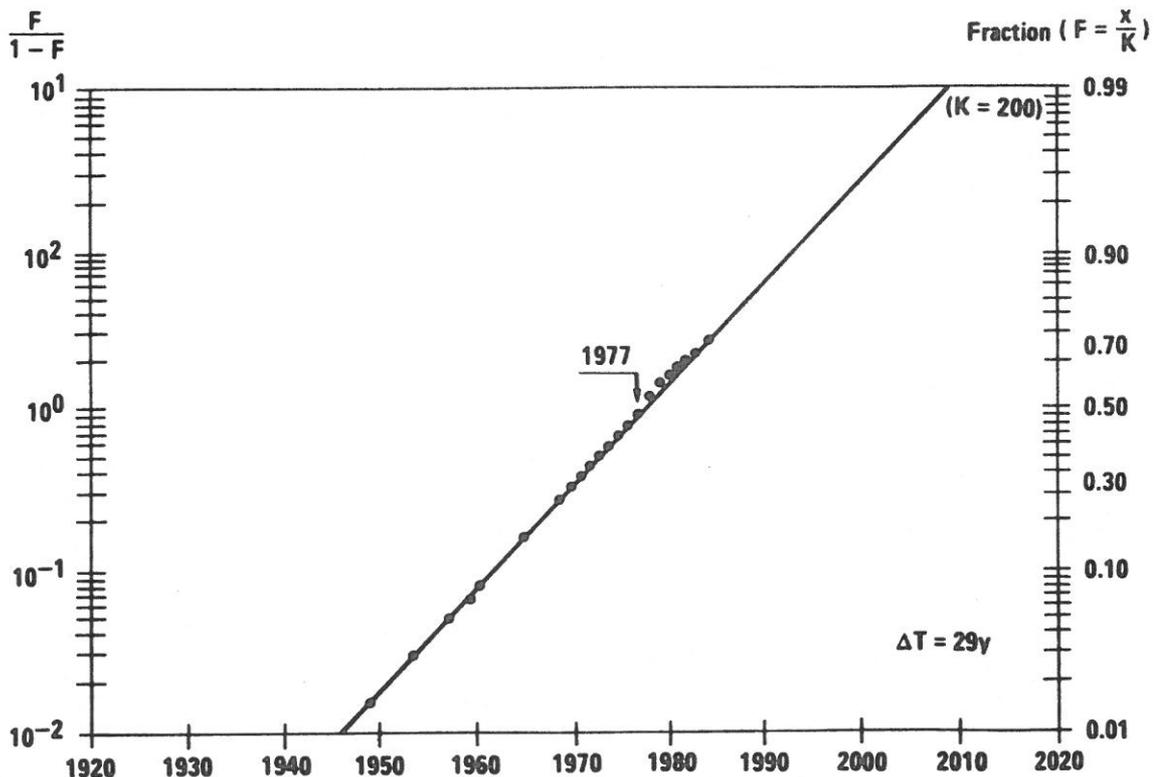
1) In ähnlicher Weise kam es auch nach Abschluß der Entwicklung des Eisenbahnnetzes der Industrieländer während der 30er Jahre zu **keinem** vergleichbaren Wachstum der Eisenbahnen in den Entwicklungsländern.

Wie ersichtlich, kann auch die Einführung neuer Technologien auf Grund gesetzlicher Maßnahmen mit Hilfe des logistischen Substitutionsmodells nachvollzogen werden. In den USA beträgt das Δt (Zeitraum in dem die Anzahl der Autos mit Katalysatoren von 1 auf 50 bzw. von 10 auf 90 Prozent des gesamten Autobestandes wächst) der Diffusionsphase von Katalysatorautos rund 10 Jahre, ähnliche Untersuchungen für Japan zeigen einen noch schnelleren Diffusionsprozeß, was für die österreichische Situation Grund zum Optimismus bezüglich der raschen Wirksamkeit der Katalysatorpflicht gibt.

3.4. Flugzeug und Flugverkehr

Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Leistung des weltweiten Flugverkehrs (Planwirtschaften eingeschlossen) in Millionen Personen-Kilometern pro Stunde. Wie ersichtlich, vollzog sich die Entwicklung gemäß einem regelmäßigen logistischen Wachstumsimpuls, der von externen Ereignissen (etwa den Ölschocks 1973 und 1979) offensichtlich nicht berührt wurde.

Abbildung 17: Entwicklung des Weltflugverkehrs einschließlich Planwirtschaften
(Nakicenovic 1987b)

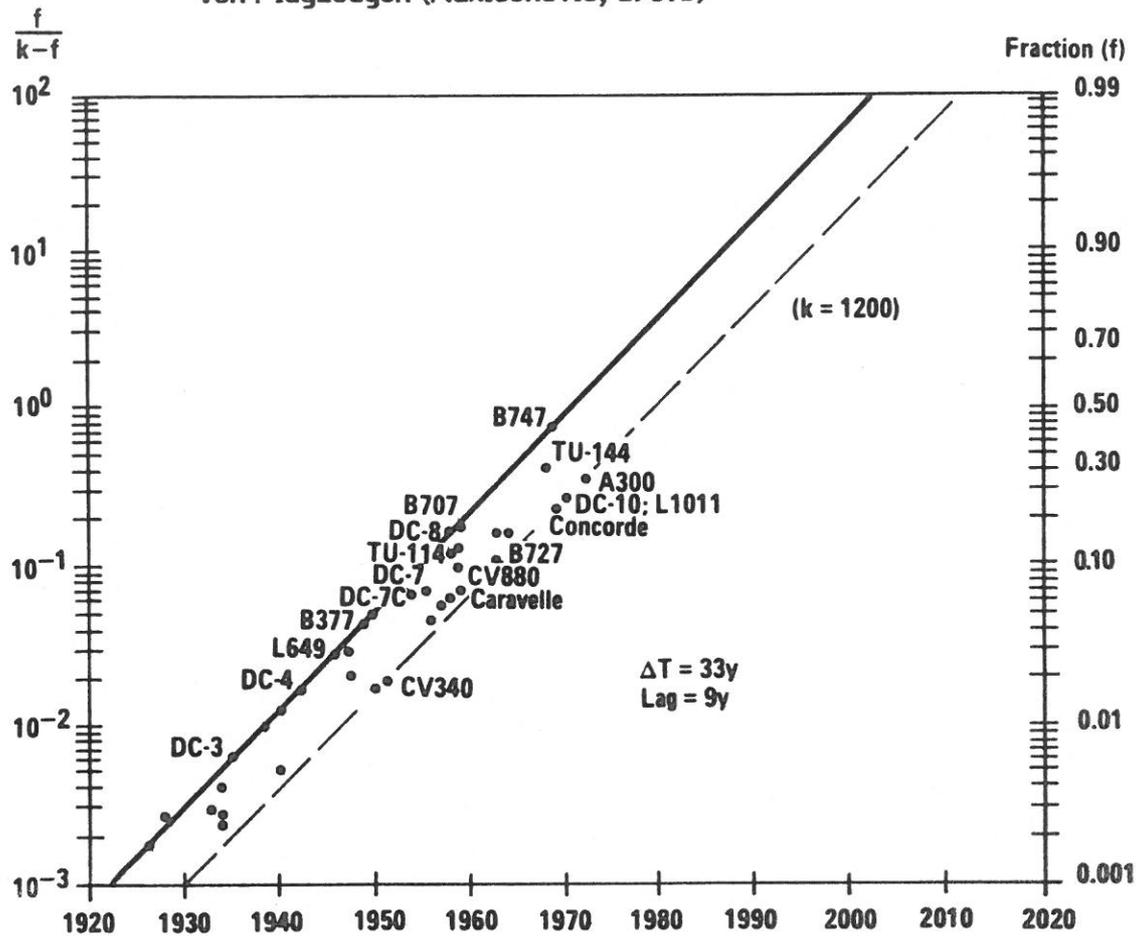


Bis zum Jahr 1977, dem Wendepunkt des logistischen Wachstumsimpulses, stieg der Weltflugverkehr exponentiell, mit einer Verdoppelung der Leistung alle paar Jahre, an. Seit 1977 ist jedoch nur mehr mit einer einzigen Verdoppelung der Transportleistung des Weltflugverkehrs zu rechnen, bis das Saturationsniveau von 200 Millionen Personen-Kilometern pro Stunde (rund 1750 Milliarden Personen-Kilometern pro Jahr) nach der Jahrtausendwende erreicht sein wird.

In einem weiteren Schritt wollen wir die Entwicklung der Leistung von Passagierflugzeugen - ebenfalls in der Dimension Personen-Kilometer pro Stunde (d. h. ein Flugzeug mit 500 Passagieren und einer Reisegeschwindigkeit von 1000 km/h entwickelt eine Transportleistung von 500.000 Personen-Kilometern pro Stunde) - untersuchen. Wie Abbildung 18 zeigt, liegen alle bekannten Passagierflugzeuge innerhalb eines engen Bandes der Entwicklung der Leistungskurve, kein einziges Flugzeug darüber und alle kommerziell erfolgreichen Flugzeuge genau auf der Leistungskurve. Dies erklärt zum Beispiel auch den kommerziellen Mißerfolg der Concorde, die etwa im Vergleich zu den Leistungsdaten einer Boeing 747 zu klein dimensioniert war (die Concorde hätte statt 100 Sitzplätze ca. 250 Plätze haben müssen, um eine der Boeing 747 vergleichbare Transportleistung in Personen-Kilometern pro Stunde aufzuweisen). Im Vergleich zu Abbildung 17 wird ersichtlich, daß die Leistung der Langstreckenflugzeuge genau parallel zur Entwicklung des Flugverkehrsaufkommens steigt und den Inflexionspunkt (d. h. 50 Prozent des Sättigungswertes) bereits überschritten hat. Eine direkte Konsequenz dieser Entwicklung ist, daß im Gegensatz zur Vergangenheit die zukünftigen Leistungswerte eines Flugzeuges einfach durch Modifikation existierender Modelle zu erreichen sein werden (Boeing arbeitet etwa gegenwärtig an einer 747 mit rund 800 Plätzen), d. h., daß die Modellentwicklung von einer revolutionären Phase (neue Modelle in rascher Reihenfolge) in eine evolutionäre Phase übergehen wird.

Abbildungen 17 und 18 können auch anders interpretiert werden: die Parallelität der Wachstumskurven von Flugverkehr und Leistung der einzelnen Flugzeuge bedeutet, daß die Anzahl der Flugzeuge in den letzten 50 Jahren gleich geblieben ist. In der Tat blieb die Anzahl der registrierten Passagierflugzeuge (Privatmaschinen nicht eingerechnet) mit etwa 4000, davon rund 600 Langstreckenflugzeuge, unverändert, eine Beobachtung, die wir etwa auch bei einer Analyse der Schiffsflotte machen können.

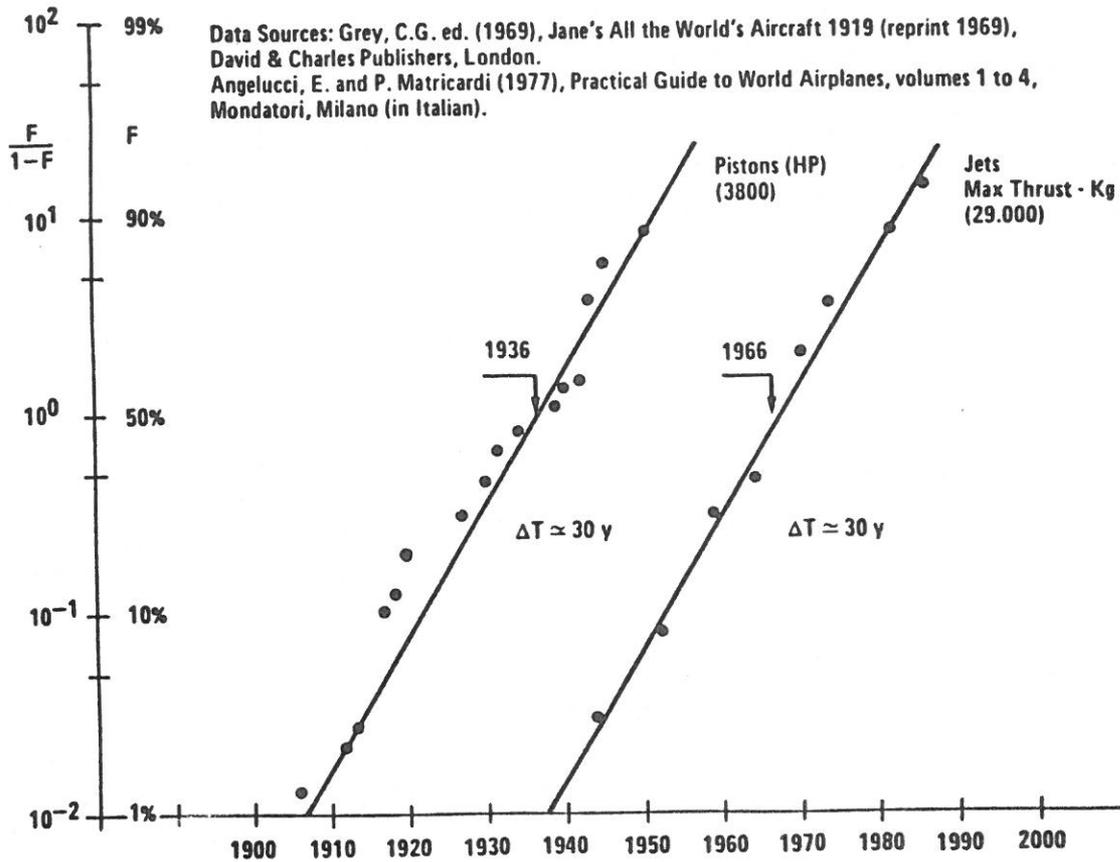
Abbildung 18: Entwicklung der Transportleistung (Personen-Kilometer pro Stunde) von Flugzeugen (Nakicenovic, 1987b)



Abschließend wollen wir noch kurz aufzeigen, daß die technologische Entwicklung, speziell in der Flugzeugantriebstechnik, nicht in kontinuierlichen Impulsen stattfand, aber in ihrer Entwicklung doch synchron mit der Gesamtentwicklung des Flugverkehrs und der Leistungsdaten der Flugzeuge verlaufen ist.

Abbildung 19 veranschaulicht die technische Entwicklung von Kolbenmotoren (Leistung in PS) und von Düsentriebwerken (Schub in kp). Wie ersichtlich, können wir zwei getrennte Wachstumsimpulse feststellen, wobei die Zeitdynamik der Impulse (Δt) und der Abstand der Wendepunkte mit jeweils 30 Jahren extrem synchron verlaufen. Ferner wird ersichtlich, daß die technologische Entwicklung der Düsentriebwerke praktisch abgeschlossen ist, was wiederum auf den evolutiven Charakter der Entwicklung der Flugzeuge in den nächsten 10 bis 15 Jahren hinweist. In Analogie zur Vergangenheit wäre eine neue Generation von Triebwerken (Ram/Scram) im Überschallbereich während des gegenwärtigen Wachstumsimpulses des Flugverkehrs nicht zu erwarten und würde erst nach der Jahrtausendwende zum Tragen kommen.

Abbildung 19: Wachstumsimpulse in der Leistung von Kolbenmotoren und Düsen-
triebwerken



4. GESAMTINFRASTRUKTUR UND MODAL SPLIT

Nach der Diskussion der historischen Entwicklung einzelner Transportsysteme wollen wir auch versuchen, diese einzelnen Tendenzen zu einer Gesamtschau zu verknüpfen. Hierbei betrachten wir jeweils den Anteil einzelner Infrastrukturtypen (Kanäle, Eisenbahnlinien, Straßen und als Analogon auch Flugverkehrsstraßen) an der gesamten Transportinfrastrukturlänge eines Landes. Nachdem die Gesamtinfrastrukturlänge, vor allem infolge der Einführung neuer Systeme, stark wächst (im Falle der USA in Form eines logistischen Wachstumsimpulses), wird die abnehmende relative Bedeutung und die Substitution alter Infrastrukturen klarer ersichtlich.

In ähnlicher Weise verfahren wir auch bei der Untersuchung des Modal Split als genauere Leistungsindikator der einzelnen Transportsysteme. Auch dabei wird die abnehmende Bedeutung alter Infrastrukturen klar ersichtlich, da bei stark anwachsendem Gesamttransportvolumen eine Technologie, die ihre Leistung nur beibehält oder nur gering steigert, ständig an Marktanteilen verliert. Dies zur Illustration der Rolle des Eisenbahnverkehrs, der, obwohl die Transportleistung einen historischen

Höhepunkt erreicht, dennoch kontinuierlich (logistisch) Marktanteile an neuere Transporttechnologien verliert. Wie das Beispiel aus den USA zeigt, ist dem Autoverkehr in bezug auf den Flugverkehr langfristig eine ähnliche Rolle beschieden, eine Entwicklung, die auch für Europa zu erwarten ist.

Wie die folgenden Beispiele zeigen, kann die Entwicklung der Infrastrukturen und der Transporttechnologien durch ein typisches dynamisches Grundmuster technologischer Substitutionsprozesse mit langen Zeitkonstanten und regelmäßigem Verlauf beschrieben werden. Die Tatsache, daß diese dynamischen Grundmuster in verschiedenen Ländern (auch unterschiedlicher Wirtschaftsordnung) feststellbar sind, erhärtet Schlußfolgerungen bezüglich des stabilen Charakters der Substitutionsprozesse, der zeitlichen Korrelierung der wichtigsten Strukturbrüche und Saturationsphasen mit langfristigen Wechsellagen der Konjunktur (Kondratieff-Wellen) sowie die Schlußfolgerung, daß die Dynamik des Systems nur durch Einführung neuer Technologien mit größerer Leistungsfähigkeit (etwa höherer Geschwindigkeit) beeinflussbar erscheint und daß daher kurzfristige Verlagerungen zugunsten alter Technologien, etwa durch dirigistische Maßnahmen, wenig erfolgversprechend erscheinen.

USA

Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Gesamtlänge der Verkehrsinfrastruktur in den USA als regelmäßigen logistischen Wachstumsimpuls mit einem Δt von rund 80 Jahren und einem geschätzten Sättigungsniveau von rund 4,6 Mio. Meilen, wovon 1980 rund 82% erreicht waren.

Abbildung 21 veranschaulicht die Anteile verschiedener Transportinfrastrukturen an der Gesamtinfrastrukturlänge der USA. Wie ersichtlich, können wir vor dem Hintergrund eines regelmäßigen Wachstumsimpulses der Gesamtlänge des Systems drei Substitutionsphasen unterscheiden:

- 1) Wachstum des Eisenbahnnetzes und Rückgang der Bedeutung des Kanalnetzes:¹⁾ mit einer Zeitrage Δt von rund 50 Jahren;
- 2) Saturation der Bedeutung der Eisenbahnen als wichtigste Verkehrsinfrastruktur um 1870, also rund 50 Jahre vor dem Zeitpunkt der größten Ausdehnung des Eisenbahnnetzes und anschließender Rückgang der Bedeutung der Eisenbahnen und entsprechendes Wachstum der Bedeutung des Straßennetzes mit einem Δt von rund 80 Jahren;

1) Man beachte, daß das Kanalnetz zum Zeitpunkt seiner größten Ausdehnung um 1860 trotzdem nur mehr rund 10 Prozent der Gesamtinfrastrukturlänge (Kanäle, Eisenbahnen und Straßen) der USA ausmachte.

Abbildung 20: Entwicklung der Gesamtverkehrsinfrastrukturlänge in den USA.

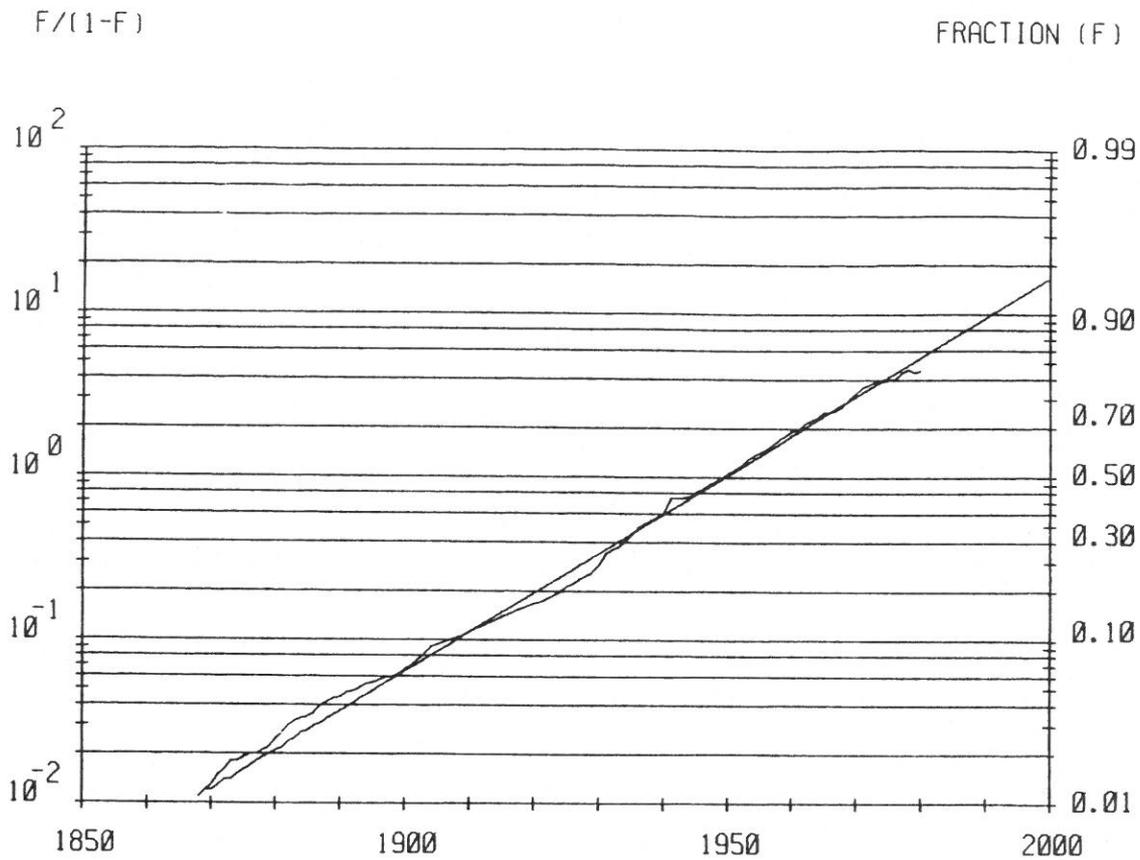
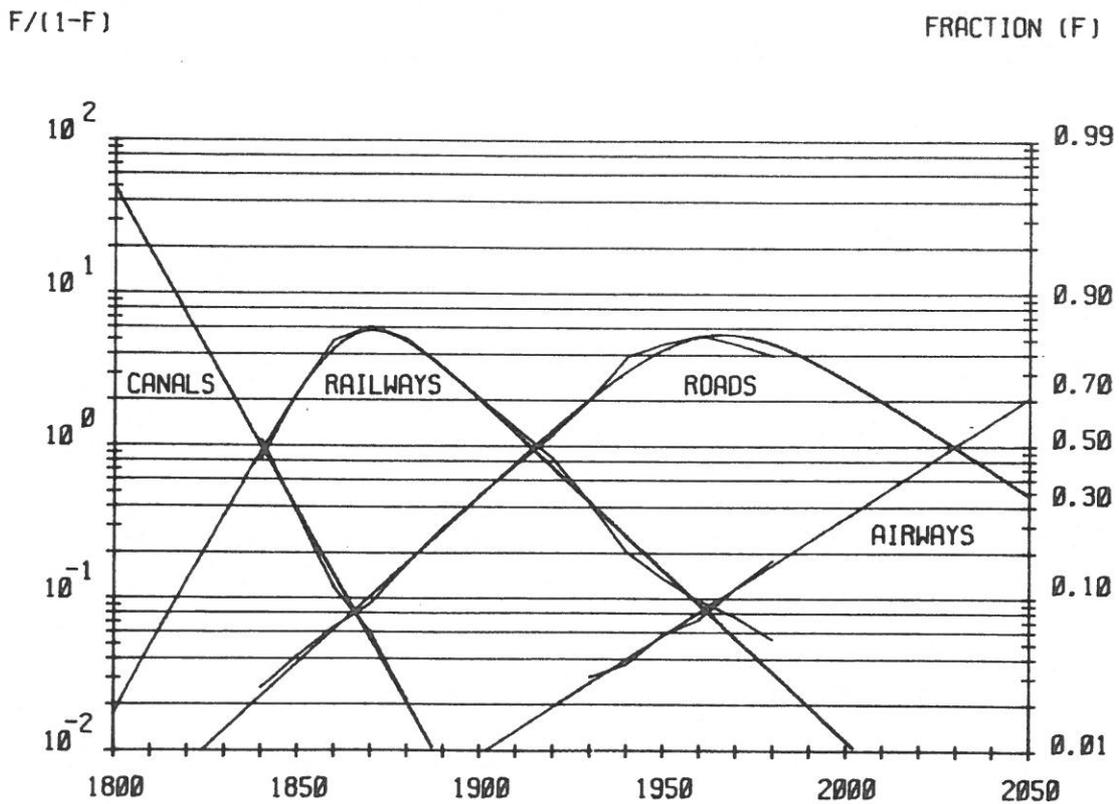


Abbildung 21: Infrastrukturentwicklung und Substitution in den USA in Längeneinheiten (Nakicenovic 1987b)

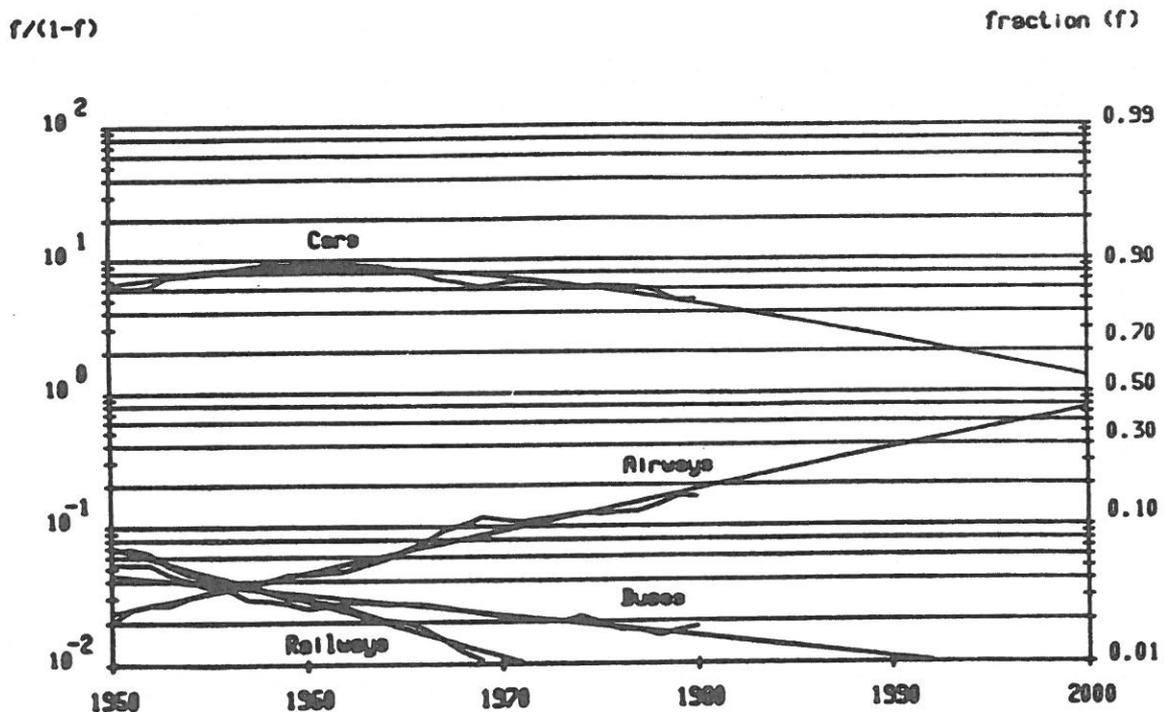


3) Lange Saturationsphase (von ca. 1940 bis 1980), während der (gemessen an der Länge) das Straßennetz die bedeutendste Infrastruktur der USA war, um aber seine Position langfristig an Flugverkehrsstraßen zu verlieren, die mit einem Δt von 120 Jahren wachsen.

Vielleicht die bemerkenswerteste Schlußfolgerung, die aus den Abbildungen 20 und 21 gezogen werden kann, ist der extrem stabile Wachstums- bzw. Substitutionsprozeß in der Bedeutung einzelner Infrastrukturen, ein Prozeß, der von kurzfristigen Ereignissen wie der großen Depression in den 30er Jahren oder von den Weltkriegen nicht wesentlich berührt wurde.

Das Bild, das wir aus Abbildung 21 gewonnen haben, wird durch die Untersuchung der Dynamik des Modal Split im Personenfernverkehr aus Abbildung 22 bestätigt. Der Anteil der einzelnen Verkehrssysteme an der gesamten Leistung, gemessen an Personen-Kilometern, stellt einen besseren Index zur Bewertung der Bedeutung einzelner Transporttechnologien dar als deren Länge, die wir in Abbildung 21 untersucht haben. Leider sind entsprechende Zeitreihen nur seit 1950 verfügbar, jedoch stimmen die dynamischen Tendenzen der Abbildung 22 gut mit denen der Abbildung 21 überein.

Abbildung 22: Modal Split im Personenfernverkehr der USA in Personen-km
(Nakicenovic, 1987b)



Die geringe Bedeutung des Eisenbahn- und Busverkehrs im Personenfernverkehr (d. h. dem Markt mit dem größten Wettbewerb einzelner Verkehrsträger) charakterisiert das Ende ihres technologischen Lebenszyklus: Eisenbahnen befördern momentan weniger als 1% und Busse weniger als 2% des Passagieraufkommens (Personen-km) im Fernverkehr. Die Entwicklung in den USA schreitet somit ähnlichen Tendenzen in Europa um mehrere Jahrzehnte voran.

Es ist weiters vielleicht überraschend, daß der Autoverkehrsanteil in den 60er Jahren seinen Höhepunkt erreichte und seither zurückgeht, sodaß als einziger Gewinner der Flugverkehr steigende Marktanteile zu verzeichnen hat. Basierend auf der Modellfortschreibung würden wir für das Jahr 2000 erwarten, daß rund die Hälfte des Personenfernverkehrs vom Flugzeug und die andere Hälfte vom Auto bestritten wird, sofern nicht durch Einführung eines neuen Transportsystems dieses Bild verändert wird. Angesichts der langen historischen Zeitkonstanten der Veränderung des Modal Split können wir jedoch signifikante Auswirkungen eines neuen Transportsystems erst nach der Jahrtausendwende erwarten.

UdSSR

Die Analyse der Infrastrukturentwicklung und von Substitutionsprozessen im Transportsektor der UdSSR zeigt einen ähnlichen zeitlichen und funktionalen Verlauf wie in den USA oder in der BRD.

Dies ist aus drei Gründen bemerkenswert:

- 1) Es ist möglich, eine kontinuierliche technologische Entwicklung aufzuzeigen, die von gesellschaftlichen Umwälzungen wie der Oktoberrevolution offensichtlich unberührt geblieben ist.
- 2) Die langfristige Dynamik der Substitution einzelner Infrastrukturen und des Modal Split zeigt ähnliche Resultate in Planwirtschaften wie in Ländern mit Marktwirtschaft.
- 3) Die relative Bedeutung einzelner Infrastrukturen sowie deren Beitrag im Modal Split bleibt offensichtlich auch durch die Tatsache unberührt, daß die UdSSR als praktisch einziges industrialisiertes Land einen weiteren Ausbau des Kanal- und Eisenbahnnetzes betreibt, wohingegen diese beiden Infrastrukturen in westlichen Ländern bestenfalls stagnieren oder in den meisten Fällen einem Schrumpfungsprozeß unterworfen sind.

Wie die Abbildungen 23 und 24 zeigen, können wir ähnliche Tendenzen, wie wir sie bereits am Beispiel der USA diskutiert haben, auch in der Entwicklung des Verkehrssystems der UdSSR feststellen.

Abbildung 23: Infrastrukturentwicklung und Substitution in der UdSSR in Längeneinheiten

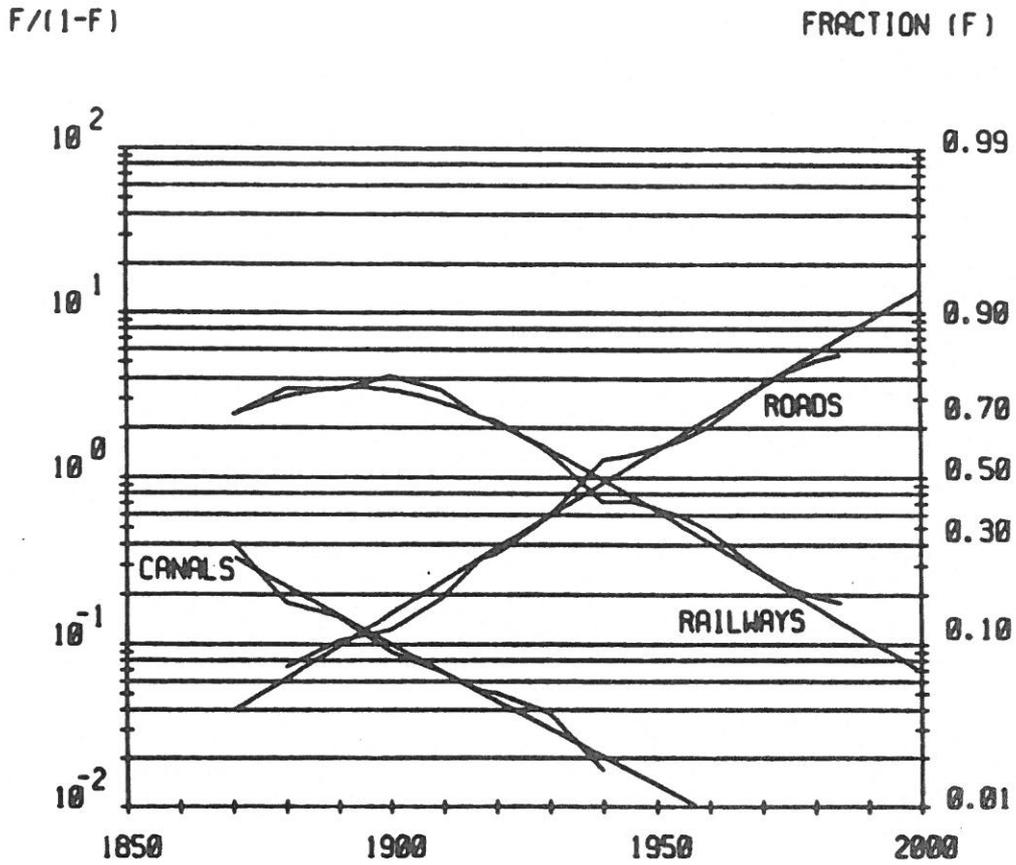
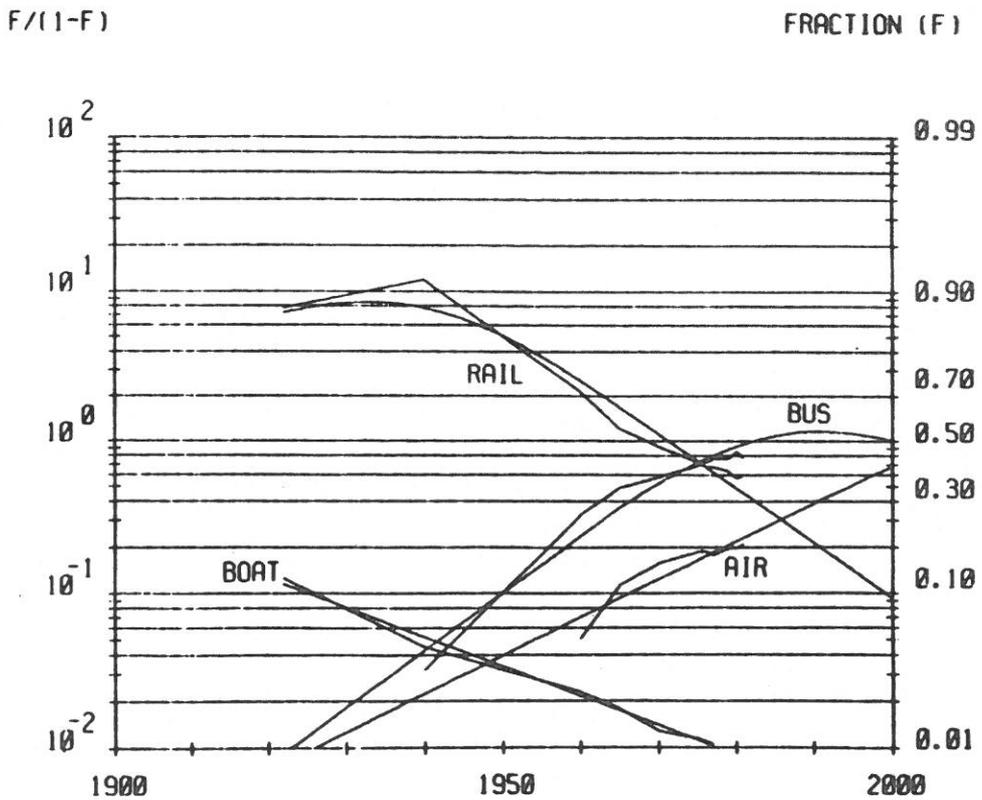


Abbildung 24: Modal Split im Personenfernverkehr der UdSSR in Personen-km



Die historische Entwicklung der Infrastruktur ist durch Substitutionsprozesse gekennzeichnet, wobei jeweils neuere Technologien alte ersetzen. Die Expansion des Eisenbahnnetzes führte zu einem Rückgang der Bedeutung von Kanälen als Transportinfrastruktur, der Ausbau des Straßennetzes führte zu einem Rückgang der Bedeutung der Eisenbahn, und obwohl entsprechende Zeitserien nicht verfügbar sind, können wir für 1985 feststellen, daß die Länge des Flugliniennetzes bereits der Länge der Straßen entspricht, was bedeutet, daß das Wachstum der Flugverkehrsinfrastruktur und der entsprechende Rückgang der Bedeutung der Straßeninfrastruktur schneller verlaufen als in den USA.

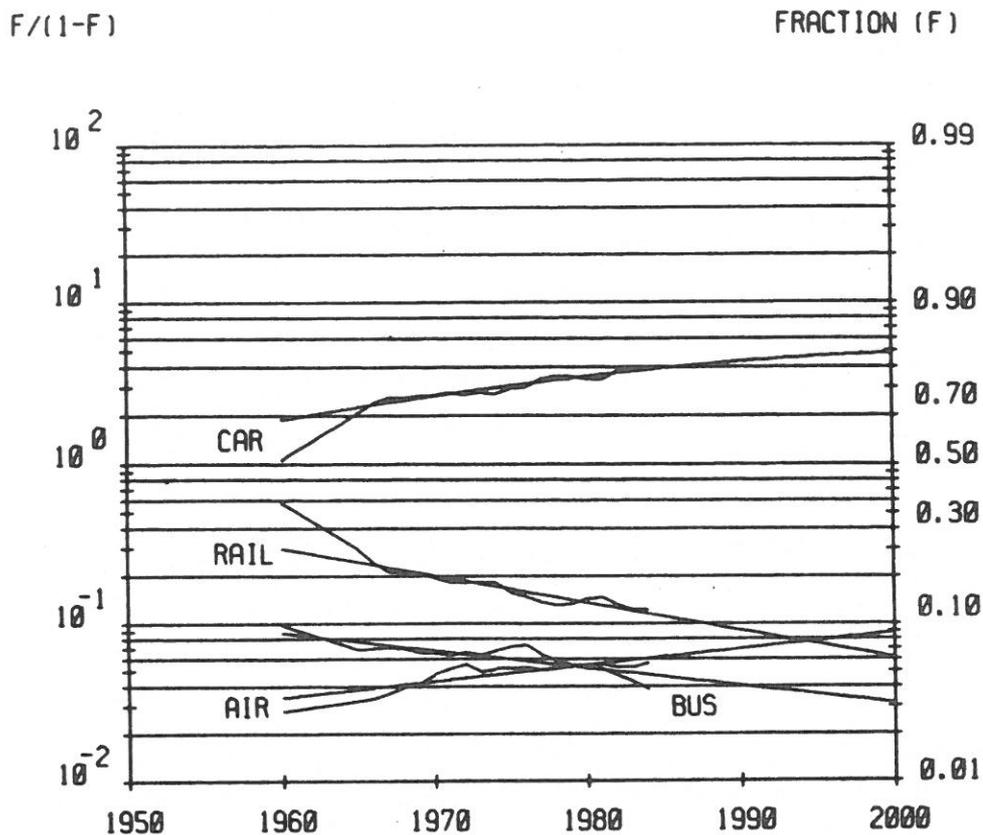
Bei Betrachtung des Modal Split des Personenfernverkehrs können wir eine ähnliche Dynamik der Entwicklung wie in den USA erkennen. Traditionelle Transportmittel wie der Schiffs- und Eisenbahnverkehr verlieren entlang eines logistischen Substitutionspfades Marktanteile an den Straßenverkehr (der ungleich westlichen Ländern nicht durch Individual-, sondern durch kollektive Verkehrsmittel bestritten wird). Dieser wiederum saturiert längerfristig und wird durch den wachsenden Flugverkehr ersetzt. Die so skizzierte Situation nach der Jahrtausendwende sieht die UdSSR in einer ähnlichen Lage wie die USA: Der Eisenbahnverkehr wird nur mehr wenige Prozent des gesamten Passagieraufkommens abdecken, wohingegen Straßen- und Flugverkehr zu etwa gleichen Teilen die Haupttransportmittel im Fernverkehr bilden werden.

Bundesrepublik Deutschland

Als Abschluß dieses Beitrages wollen wir auch die Entwicklung des Modal Split der BRD untersuchen, obwohl die verfügbaren Zeitserien nur einen relativ kurzen Zeitraum umfassen und das gewonnene Bild sich dadurch notwendigerweise weniger dynamisch als in den USA und in der UdSSR darstellt.

Abbildung 25 zeigt die Entwicklung des Modal Split im Personenfernverkehr (über 50 km) für die BRD. Wie ersichtlich, können wir einen Substitutionsprozeß (der übrigens durch Ereignisse wie die Ölkrisen 1973 und 1979 nicht berührt wurde) des Autoverkehrs und des Flugverkehrs zu Lasten des Eisenbahn- und Busverkehrs feststellen. Aufgrund der geringeren Entfernungen ist es weiter nicht überraschend, daß das Wachstum und der Marktanteil des Flugverkehrs geringer als im Beispiel der USA und der UdSSR ist.

Abbildung 25: Modal Split im Personenfernverkehr der BRD in Personen-km



Die langfristige Stabilität und die nur geringfügigen Verschiebungen der Marktanteile verschiedener Transportmittel in der BRD lassen uns die kurzfristige Möglichkeit, den Modal Split signifikant durch planerische Maßnahmen zu beeinflussen, als eher unwahrscheinlich erscheinen. Vielmehr vertreten wir die Meinung, daß die relativ stabilen Marktverhältnisse innerhalb des Transportsektors nur durch Einführung einer neuen Transporttechnologie veränderbar erscheinen. Aus der historischen Analyse der Infrastrukturentwicklung können wir drei charakteristische Prinzipien erfolgreicher neuer Transporttechnologien ableiten:

- 1) Eigenes Infrastrukturnetz;
- 2) Neue technologische Voraussetzungen: Die neue Technologie sollte eine direkte Funktion einer neuen Infrastruktur (wie etwa Magnetschwebbahnen), weitgehend autark von bereits bestehender Infrastruktur, zu dieser jedoch komplementär sein. Diese Anforderungen sind deswegen bedeutsam, da sich "Hybridtechnologien" am Markt nicht erfolgreich durchsetzen konnten, wie zahlreiche Beispiele aus der Technologiesgeschichte beweisen (z. B. Segelschiffe mit Dampfmaschinen, Wasserflugzeuge, Kombinationen von Auto und Kleinflugzeug).
- 3) Neue institutionelle Voraussetzungen: Als Beispiel könnte hier die deutsche Lufthansa dienen, die spezielle Züge, deren Organisation und Service vom klassischen Bahnbetrieb abgelöst sind, betreibt.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Dieser Beitrag versuchte aufzuzeigen, daß das Wachstum und der technologische Wandel von Infrastruktursystemen und Transporttechnologien regelmäßigen Wachstums- und Substitutionsprozessen mit zum Teil sehr langen Zeitkonstanten gehorchen. Wir konnten nachweisen, daß diese Prozesse einen extrem homöostatischen Charakter aufweisen und durch kurzfristige Ereignisse unberührt bleiben.

Geburt, Wachstum und Saturation mit darauffolgendem Zerfall als Grundelemente des technologischen Lebenszyklus beschreiben die Infrastruktur- und Transporttechnologieentwicklung nicht nur in Markt-, sondern auch in Planwirtschaften. Einfache, der Biologie entlehnte Modelle zur Beschreibung von Wachstums- und Substitutionsprozessen stellen ein unentbehrliches, in ihrem analytischen Auflösungsvermögen erstaunlich genaues Instrument der quantitativen Beschreibung der dynamischen Entwicklung von Infrastrukturen dar. Dies läßt die Verwendung dieser Modelle als langfristiges Prognose- und Analyseinstrument gerechtfertigt erscheinen.

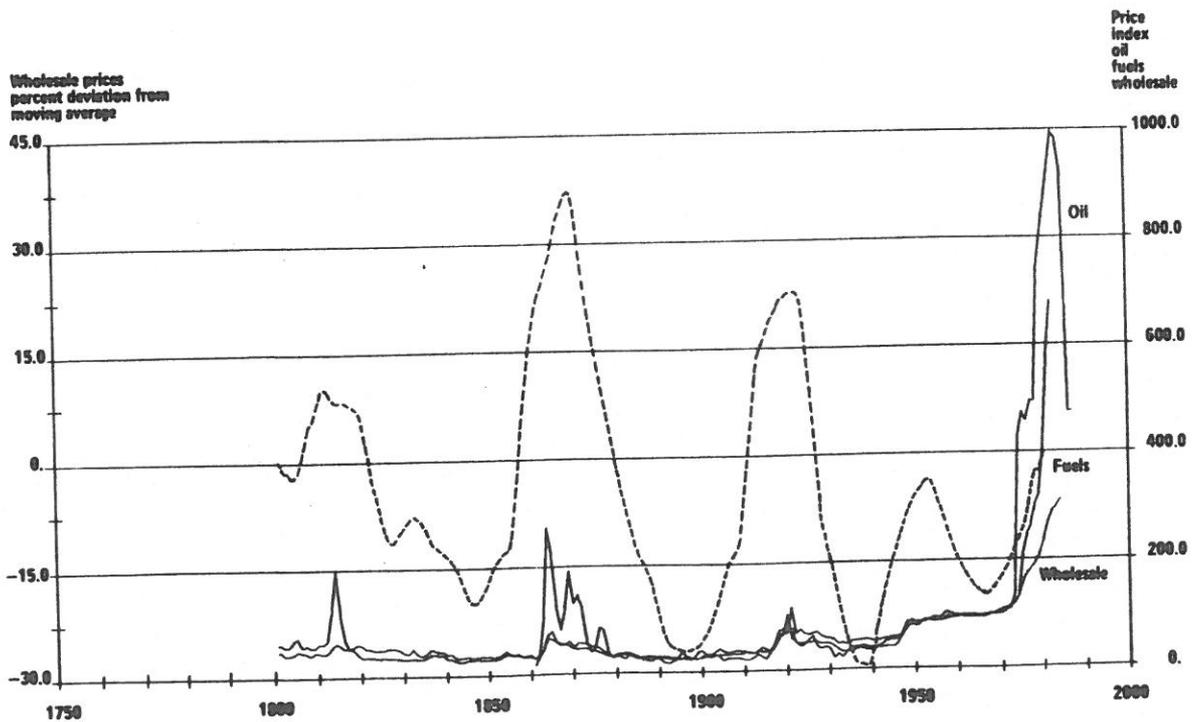
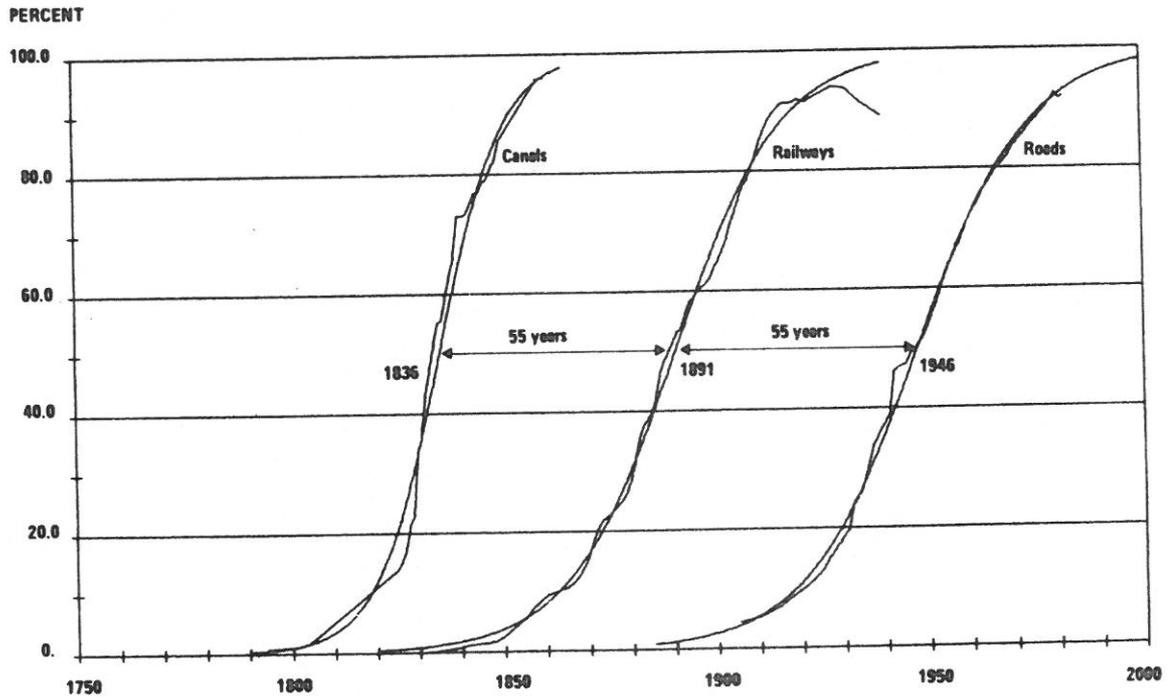
Technologische Lebenszyklen und Substitutionsprozesse erscheinen zeitlich mit langfristigen wirtschaftlichen Wechsellagen synchronisiert, wie sie in der Theorie der langen Wellen beschrieben werden (siehe z. B. Kondratieff 1926). Beispiele dafür finden wir in der Sättigung des Ausbaus des Kanalnetzes in den USA, England und Frankreich im Zeitraum 1860 bis 1870 (Abschwung und Depressionsphase des 2. Kondratieff-Zyklus¹⁾), der Saturation der Ausdehnung des Eisenbahnnetzes oder im Abschluß der Substitution des Pferdes durch das Automobil in allen Industrieländern während der Rezessions- und Depressionsphase des 3. Kondratieff-Zyklus (1920 - 1937) oder der Sättigung der Motorisierung sowie der Entwicklung des Straßennetzes in den meisten Industrieländern, wiederum während der Abschwungphase des letzten Kondratieff-Zyklus (bis 1995).

Abbildung 26 veranschaulicht diesen Sachverhalt am Beispiel der USA. Die konjunkturellen Wechsellagen werden durch die Abweichungen des Großhandelspreisindex vom gleitenden Mittelwert sowie durch das synchrone Ausschlagen der Erdöl-, Brennstoff- und Großhandelspreise während der Rezessions- und Depressionsphase der langen Welle gekennzeichnet. Während dieser Zeitperioden können wir die Sättigung der Entwicklung einzelner Infrastrukturen (sowie einer Reihe weiterer Technologien wie z. B. der Primärenergieträger) beobachten: Sättigung der Ent-

1) Zur Chronologie der Kondratieff-Zyklen siehe z. B. Van Duijn (1983).

wicklung des Kanalnetzes (und des Anteils von Futtermitteln an der Primärenergiebilanz) vor 1870, des Eisenbahnnetzes (und des Kohleanteils an der Primärenergie) um 1870 und die gegenwärtige Sättigung der Entwicklung des Straßennetzes (und des Anteils von Erdöl als Primärenergieträger).

Abbildung 26: Konjunkturelle Wechsellagen und Infrastrukturentwicklung in den USA



Transporttechnologien und Infrastrukturen können deshalb als wichtiger Bestandteil der Basisinnovation gelten, die einen Wachstumsimpuls bestimmen, deren Sättigung zu Strukturbrüchen führt und daher als Erklärungsmuster für Abschwungphasen in der langfristigen wirtschaftlichen Entwicklung dient. Während dieser Strukturbrüche (Depressionsphasen) wird der Zerfallsprozeß alter und die Entwicklung neuer Technologien eingeleitet. Dieser "schöpferische Zerstörungsprozeß" im Sinne von Schumpeter (1939) mag als theoretisches Grundkonzept zum Verständnis der uns zu erwartenden Veränderungen im Transportsektor dienen.

Bedauern über den Verlust der uns so vertrauten herkömmlichen Infrastrukturen und der sie benutzenden Technologien ist sicherlich unangebracht. Umsomehr als diese Technologien nicht wirklich verschwinden, sie erobern sich vielmehr eine neue "Marktnische". Die Anzahl der Segelboote ist heute ebenso groß wie zum Zeitpunkt der Einführung der Dampfschiffahrt, sie werden lediglich nicht mehr zu Transportzwecken, sondern zur Freizeitgestaltung benutzt. Ähnliches können wir bezüglich der neuen Nutzungen von Kanälen in den USA, Großbritannien und Frankreich sowie bezüglich der Dampflokomotiven feststellen.

LITERATUR

d'Arcoña, U., Der Kampf ums Dasein, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1939.

Bass, F. M., A New Product Growth Model for Consumer Durables, in: Management Science, 15/1969, S. 215 - 227.

Bass, F. M., The Relationship Between Diffusion Rates, Experience Curves and Demand Elasticities for Consumer Durable Technological Innovations, in: Journal of Business, 53/1980, S. 51 - 67.

Van Duijn, J. J., Fluctuations in Innovations over Time, in: C. Freeman (ed.), Long Waves in the World Economy, Butterworths, London 1983.

Goell, N. S./Maitra, S. C./Montroll, E. W., On the Volterra and Other Nonlinear Models of Interacting Populations, in: Review of Modern Physics, 43/1971, S. 231 - 276.

Fisher, J. C./Pry, R. H., A Simple Substitution Model of Technological Change, in: Technological Forecasting and Social Change, 3/1971, S. 75 - 88.

Grübler, A., Der Kampf ums Dasein: Eine Analyse der langfristigen Entwicklung von Infrastruktur und Transporttechnologien, in: Österreichische Gesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen 1987 (im Druck).

Hägerstrand, T., Innovation Diffusion as a Spatial Process, University of Chicago Press, Chicago, 1967.

Isard, W., A Neglected Cycle: The Transport-building Cycle, in: Review of Economic Statistics, Vol. XXIV, 4/1942, S. 149 - 158.

Kondratieff, N. D., Die langen Wellen in der Konjunktur, in: Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik, 56/1926, S. 573 - 609.

Lotka, A. J., (Titel nicht bekannt), in: Journal of Physical Chemistry 14, 271, 1910.

Marchetti, C., The Automobile in a System Context, The Past 80 Years and the Next 20 Years, Technological Forecasting and Social Change, 23/1983, S. 2 - 23.

Marchetti, C./Nakicenovic, N., The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model, International Institute for Applied Systems Analysis, RR-79-13, Laxenburg, Austria, 1979.

Mothes, F., Das Wachstum der Eisenbahnen, in: Zeitschrift für Ökonometrie, Heft 1/1950, S. 85 - 104.

Nakicenovic, N., The Automobile Road to Technological Change, International Institute for Applied Systems Analysis, RR-87-1, Laxenburg, Austria, 1987a.

Nakicenovic, N., Transportation and Energy Systems in the U.S., International Institute for Applied Systems Analysis, WP-87-1, Laxenburg, Austria, 1987b.

Nakicenovic, N., Growth to Limits. Long Waves and the Dynamics of Technology, Dissertation an der Universität Wien, 1984.

Pearl, R., The Biology of Population Growth, Knopf, New York, 1925.

Peschel, M./Mende, W., Leben wir in einer Volterra Welt?, Akademie Verlag, Berlin, 1983.

Rogers, E. M., Diffusion of Innovation, The Free Press, New York, 1962.

Schumpeter, J. A., Business Cycles, Band 1 und Band 2, McGraw-Hill, New York, 1939.

Taylor, G. R., The Transportation Revolution, 1815-1860, Vol IV, The Economic History of the United States, Hold, Rinehart and Winston, New York, 1962.

Verhulst, P.-F., Notice sur la Loi que la Population suit dans son Accroissement, Correspondence Mathématique et Physique, 10/1838, S. 113 - 121.

Woytinsky, W. L., Die Welt in Zahlen, Fünftes Buch, Handel und Verkehr, Rudolf Mosse Buchverlag, Berlin, 1927.