

# Der Kampf ums Dasein: eine Analyse der langfristigen Entwicklung von Infrastruktur und Transporttechnologien

Autor(en): **Grübler, Arnulf**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **106 (1988)**

Heft 8

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-85647>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Der Kampf ums Dasein

Eine Analyse der langfristigen Entwicklung von Infrastruktur und Transporttechnologien

**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 Ausdehnungen einzelner Infrastruktursysteme, Anzahl von Automobilen usw.) 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 vielmehr 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.**

**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.**

## Logistisches Wachstum und technologischer Wandel

In Bild 1 fassen wir die Grundgleichung zur Beschreibung der interspezifischen Beziehungen innerhalb von Biozönosen (Lotka-Volterra-Gleichung) sowie deren wichtigste Ableitungen zur Beschreibung autokatalyti-

VON ARNULF GRÜBLER,  
LAXENBURG

scher 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  $N_j$  sowie der

«Interaktionsrate» mit anderen Spezies. Diese «Interaktionsrate» hängt ihrerseits von der Anzahl der Spezies  $N_i$  und  $N_j$  sowie der «Kollisionsrate»  $\lambda_{ij}$  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 verzichten. Eine ausführliche mathematische Abhandlung und Diskussion der Lotka-Volterra-Gleichung und ihrer mannigfaltigen komplexen Lösungen findet sich in Umberto d'Anconas 1939 erschienenem Werk «Der Kampf ums Dasein», das als Namensgeber dieses Beitrages fungierte. 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 dreiparametrischen 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 Inflexionspunktes der logistischen Funktion ( $K/2$ ) symmetrisch abnehmen und somit zu einer Verlangsamung des Wachstums führen, bis schliesslich der Endwert  $K$  der Bevölkerung erreicht ist.  $K$  stellt das Sättigungsniveau 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, usw.), 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 Abteilung der Lotka-Volterra-Gleichung: zur logistischen Substitutionsfunktion. A. 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

Lotka-Volterra Gleichung		
Allgemeine Form		$\frac{dN_i}{dt} = \alpha_i N_i - \frac{1}{\gamma_i} \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} N_i N_j$
<b>Verhulst-Pearl:</b>	<b>Fisher-Pry:</b>	<b>Marchetti-Nakicenovic:</b>
Bevölkerungswachstum	zwei Konkurrenten	viele Konkurrenten
Tragfähigkeit der "Nische" (Saturationsniveau): $K$	Markt: $K=1$ (d.h. $K=100\%$ )	Markt: $K=1$ (d.h. $K=100\%$ )
$N =$ Bevölkerungsanzahl	$F_i$ 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)
$\log \frac{N}{K-N} = at + b$	$\log \frac{F_1}{1-F_1} = at + b$	$\log \frac{F_i}{1-F_i} = a_i t + b_i$ $F_j = 1 - \sum_{i \neq j} F_i$

Bild 1. Lotka-Volterra - Gleichung und Ableitungen zur Beschreibung technologischer Wachstums- und Substitutionsprozesse

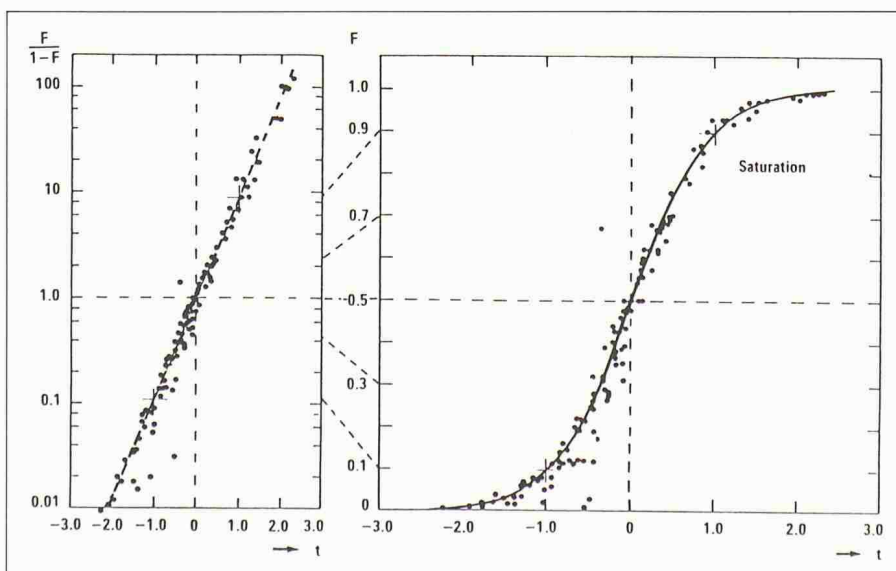
Spezies  $i$  an der Gesamtbevölkerung der Nische errechnet.

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. Bild 2 zeigt die Marktanteils- und die Einführungs-(Substitutions-)kurve von 17 verschiedenen technologischen Innovationen, die von Fisher und Pry untersucht wurden. Die charakteristischen Phasen des Produkt-

lebenszyklus werden in Bild 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.

Bild 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

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



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 der Fisher-Pry-Modelle zur Beschreibung multipler Substitutionsprozesse (Bild 1), wie sie am IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) erstmals zur Beschreibung der Primärenergiesubstitution (Bild 3) vorgeschlagen wurde (Marchetti und Nakicenovic, 1979).

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.

### 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 des Gesamtinfrastruktursystems 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 lan-

gen historischen Zeitkonstanten als extrem beschränkt erscheinen.

**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 «Trekvaart», die allerdings hauptsächlich dem Personentransport diente, 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 (Bild 4). Wie ersichtlich, vollzog sich der Ausbau des Kanalnetzes in Form eines logistischen Wachstumsimpulses, der im wesentlichen um 1860 (zur gleichen Zeit wie in England) abgeschlossen war. Das Sättigungsniveau (K in Bild 4) dieses Wachstumsprozesses betrug etwa 4000 Meilen Betriebslänge des Kanalnetzes. Der Wachstumsprozess umspannt etwa 60 Jahre, wobei allerdings die eigentliche Wachstumsphase, d. h. das Wachstum von 10 auf 90 Prozent des geschätzten Saturationsniveaus ( $\Delta t$  in Bild 4), 30 Jahre dauerte. Der Wendepunkt der logistischen Wachstumfunktion (d. h.  $K/2$ ), wo die Wachstumsrate am höchsten ist, liegt im Jahr 1832. Ab diesem Zeitpunkt sinken die Wachstumsraten, bis 1860 der Wachstumsprozess abgeschlossen ist.

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. Diese Konkurrenz- und Substitutionsmuster werden wir später auch bei der Einführung des Strassentransportes und des Flugverkehrs beobachten können.

Der Hauptgrund für die höhere Transportgeschwindigkeit der Eisenbahnen war die Verwendung von Dampfkraft.

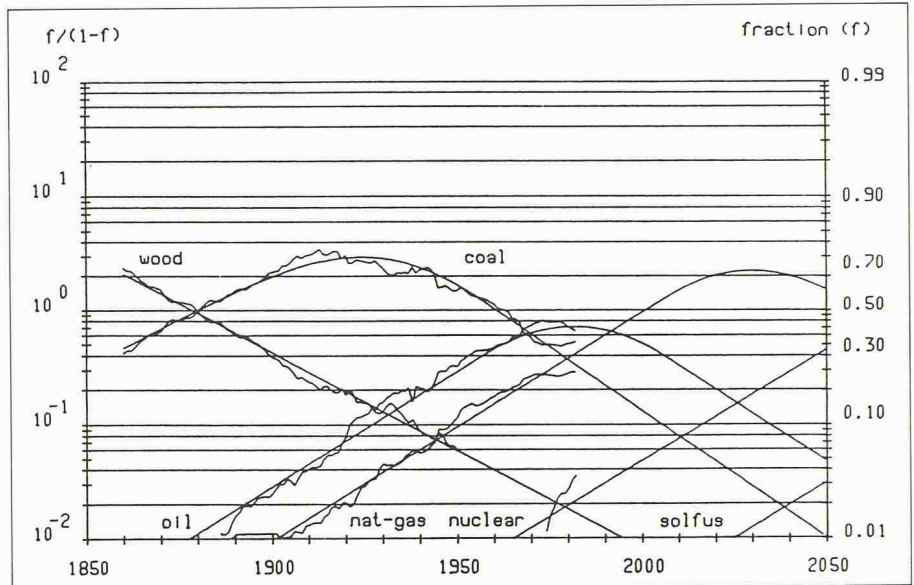


Bild 3. Weltprimärenergiesubstitution (Marchetti und Nakicenovic, 1979)

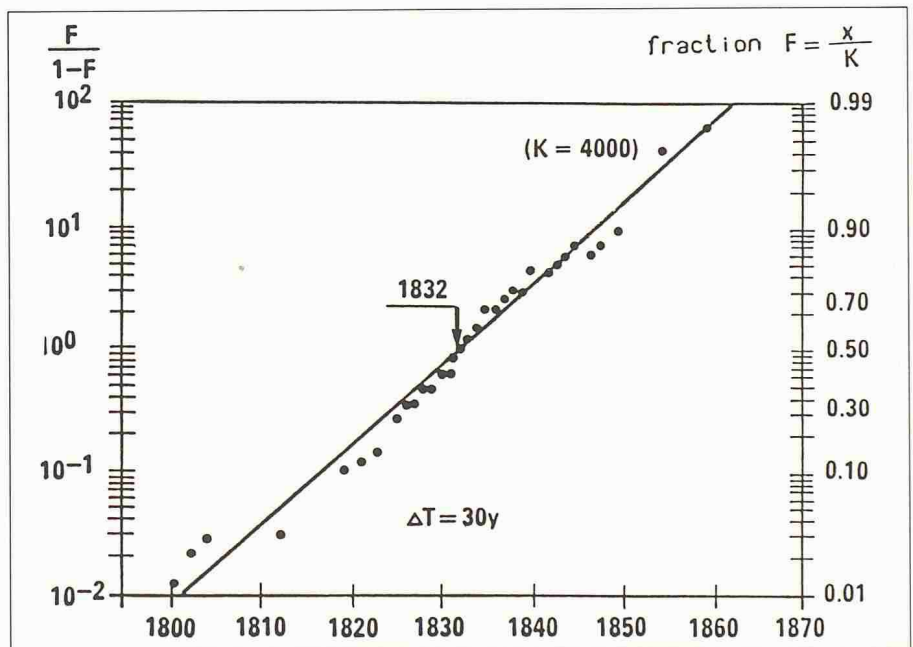


Bild 4. Wachstum des Kanalnetzes in den USA

Obwohl diese neue Antriebsform ebenso in der Schifffahrt übernommen wurde (Bild 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.

**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 etwa 100 Jahren, wobei der Hauptwachstumsim-

puls (gemessen an der Zeit  $\Delta t$ , die benötigt wird, um von 10 auf 90 Prozent der grössten Netzausdehnung zu wachsen) rund 50 Jahre dauert (Bild 6).

Die Bedeutung des Eisenbahnnetzes der USA kann am besten daraus ersehen werden, dass um 1840 das amerikanische Eisenbahnnetz bereits etwa 4500 km umfasste, wohingegen in Europa im gleichen Zeitraum erst etwa 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).

Seit diesem Zeitpunkt schrumpft die Länge des Eisenbahnnetzes in den USA, allerdings ist der Schrumpfungsprozess mit einem  $\Delta t$  von 125 Jahren langsamer als der Wachstumsprozess.

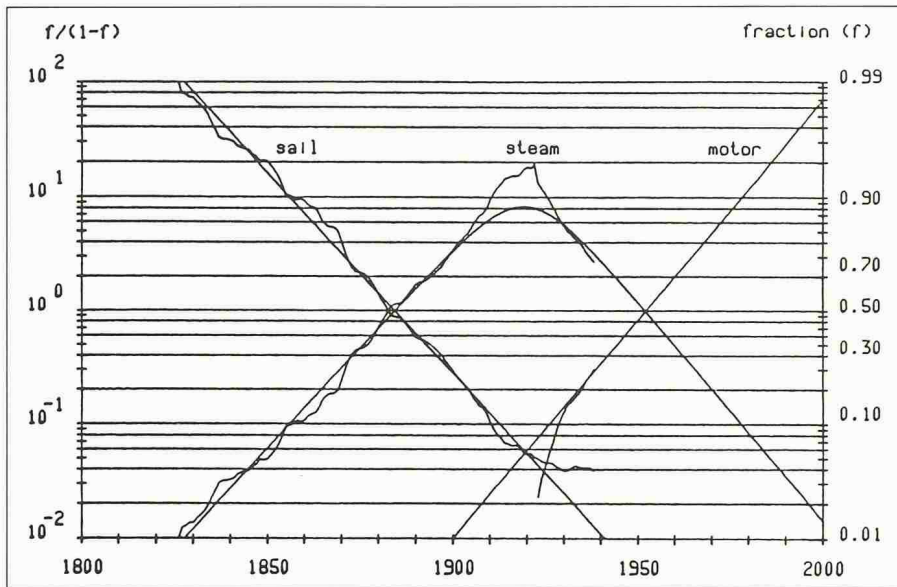


Bild 5. Anteil verschiedener Antriebsarten in der Schiffsflotte (Bruttoregistertonnen) Grossbritanniens (Nakicenovic, 1987c)

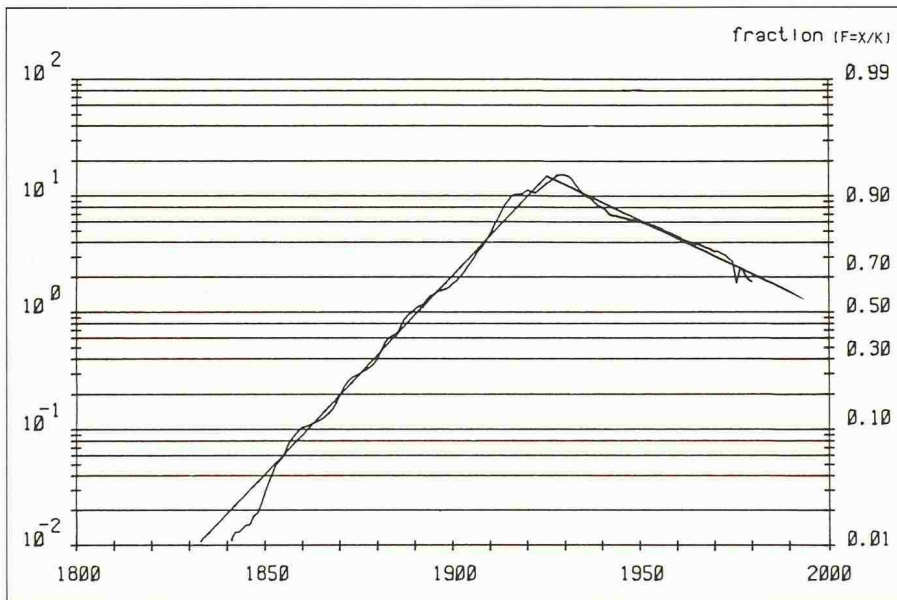
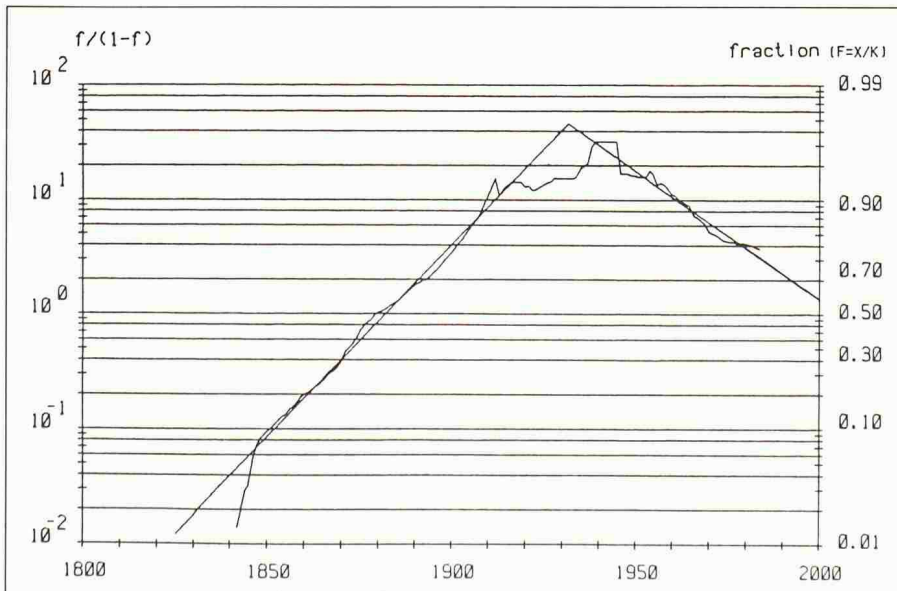


Bild 6. Entwicklung des Eisenbahnnetzes den USA (Nakicenovic, 1987b)

Bild 7. Entwicklung des Eisenbahnnetzes in Deutschland (BRD)



Das Gesamtnetz ist seit 1929 um etwa 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 Bild 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, bzw. 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.

Interessant sind ferner Regelmässigkeit und Symmetrie zwischen Wachstum 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?) mit gänzlich anderer Netzgestalt (radiale anstelle der herkömmlichen vernetzten Verbindungen) als neues Infrastruktursystem zu interpretieren. Dieses neue Infrastruktursystem wäre seinerseits 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 letztlich 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.

Bild 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 Innovationen 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.

**Strassennetz und Autoverkehr**

Bild 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* (Bild 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 zulasten der unbefestigten Landstrassen anhand der in Abbildung 11 dargestellten logistischen Substitutionskurve, wobei der eigentliche Wachstumsimpuls ( $\Delta t$ ) rund 75 Jahre dauerte.

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.

Die rapide Verbreitung des Autos in den USA, die im Gegensatz zu Westeuropa bereits vor dem Zweiten Welt-

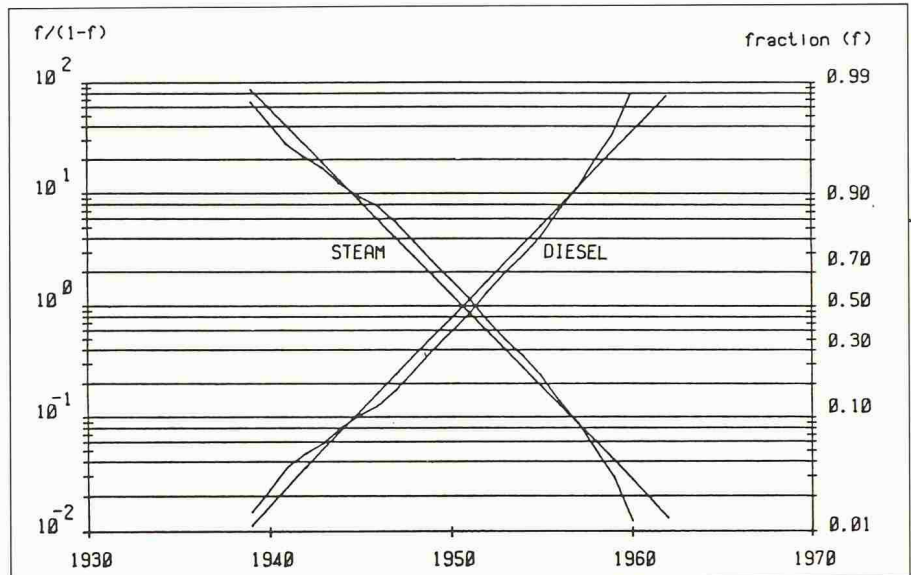


Bild 8. Substitution von Dampf- durch Diesellokomotiven in den USA (Nakicenovic, 1987b)

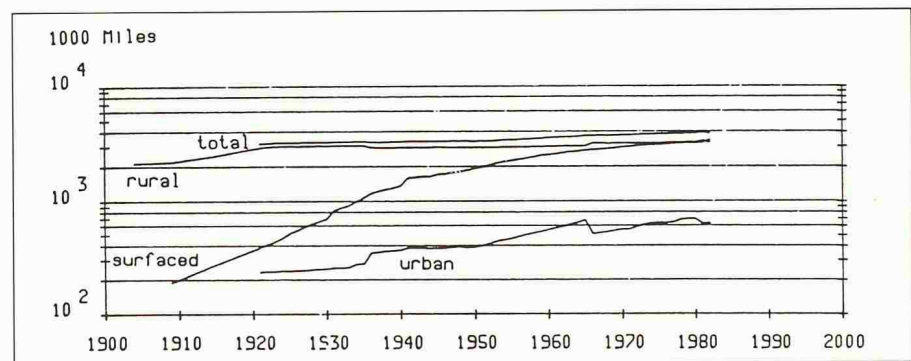
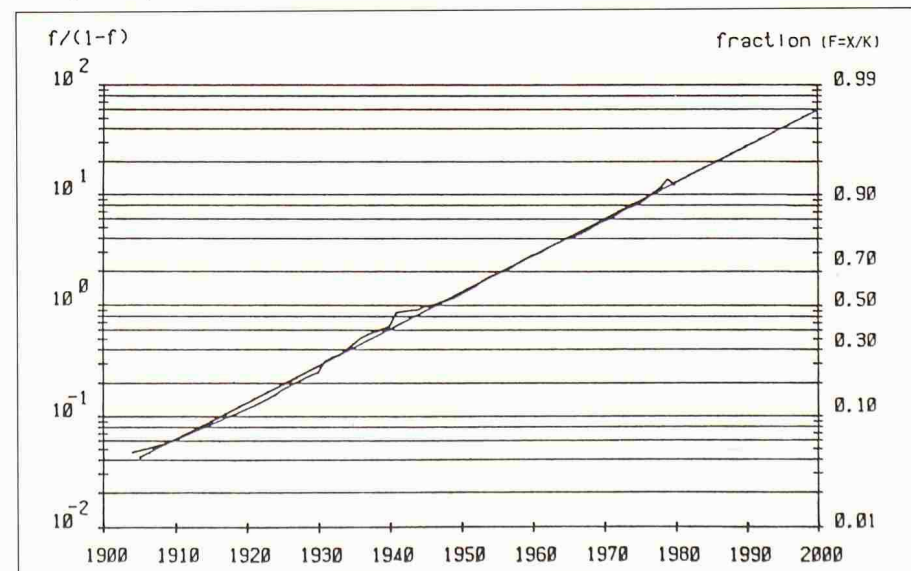


Bild 9. Entwicklung des Strassennetzes in den USA (Nakicenovic, 1987b)

krieg eingesetzt hat, muss zu allererst 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 Bild 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 langsame-

Bild 10. Entwicklung der Länge des befestigten Strassennetzes in den USA (Nakicenovic, 1987b)



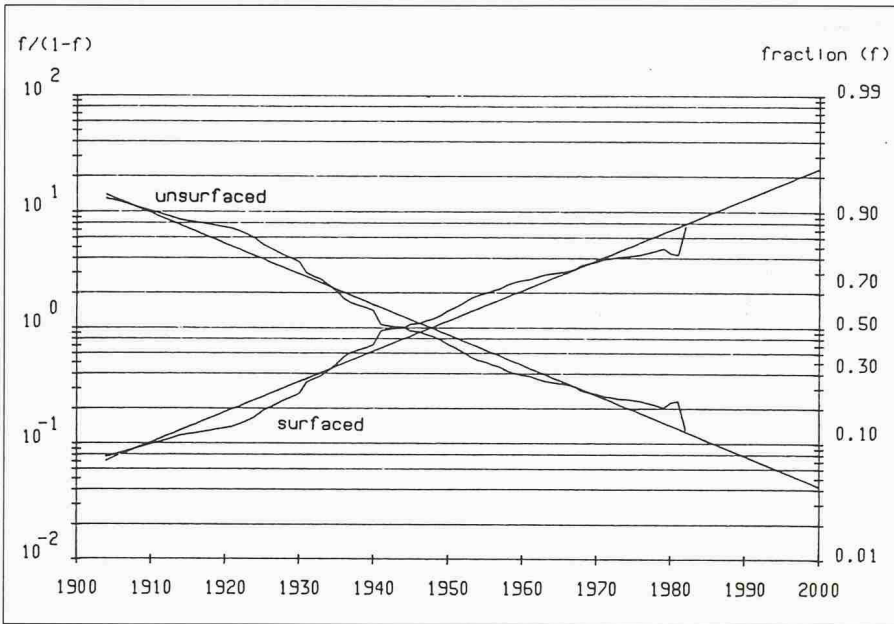


Bild 11. Substitution unbefestigter durch befestigte Strassen in den USA (Nakicenovic, 1987b)

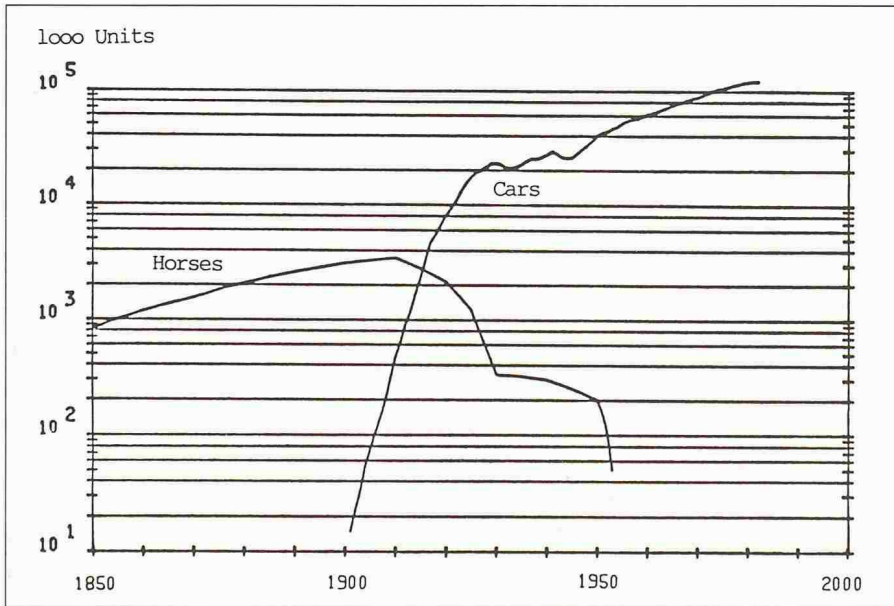


Bild 12. Anzahl der Pferde und Autos in den USA (Nakicenovic, 1987b)

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

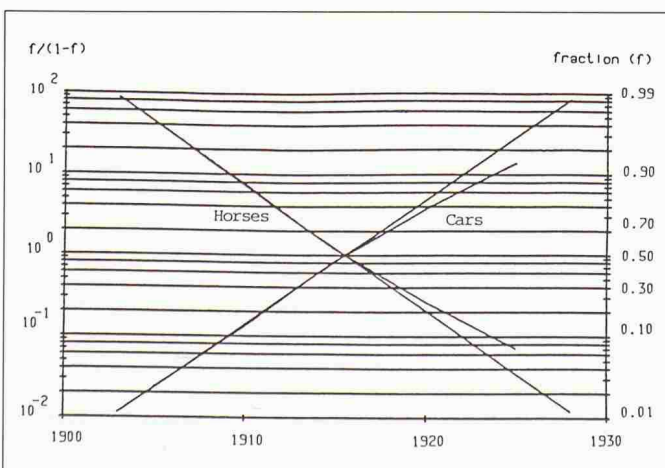
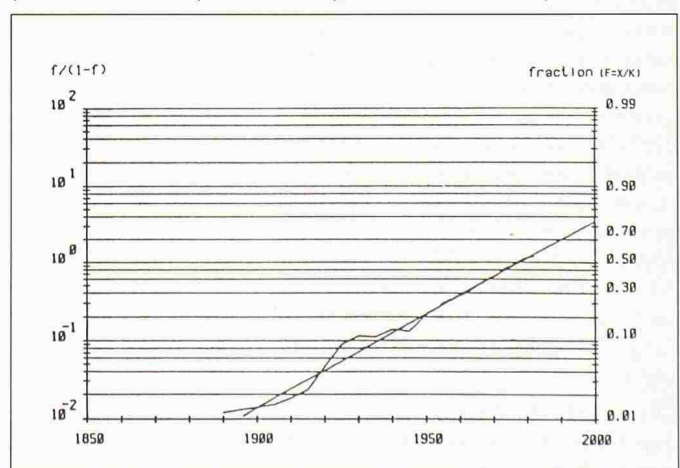


Bild 14. Entwicklung der Anzahl der Strassenverkehrsmittel (Pferde und Autos) in den USA (Nakicenovic, 1987b)



re zweite Wachstumsphase, die einsetzte, nachdem der Substitutionsprozess des Pferdes (Bild 13) abgeschlossen war.

Betrachten wir hingegen die Gesamtanzahl aller Strassenverkehrsmittel (Pferde ausserhalb der Landwirtschaft plus Autos) können wir einen, nach anfänglicher Turbulenz sehr regelmässig werdenden, logistischen Wachstumsimpuls mit sehr langem  $\Delta t$  (rund 100 Jahre) feststellen (Bild 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 ist.

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. Dies wird auch am besten durch die Situation zu Anfang der Einführung des Autos illustriert: so waren 1905 bereits rund 10 Prozent des Strassennetzes befestigt, wohingegen erst weniger als 80 000 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 Sättigungswertes.

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 Bild 15 zeigt, wird der Diffusionsprozess immer schneller, je später die Einführung des Autos ein-

setzt, um im Extremfall Japans, wo der Wachstumsprozess erst um 1960 einsetzte, ein  $\Delta t$  von nur 12 Jahren zu erreichen. Marchetti, 1983, hat darüber hinaus eine (bislang nicht erklärbare) mathematische Beziehung zwischen dem Einführungszeitpunkt und der Geschwindigkeit des Anwachsens der Autoanzahl festgestellt, die er «last come, first served»-Regel genannt hat.

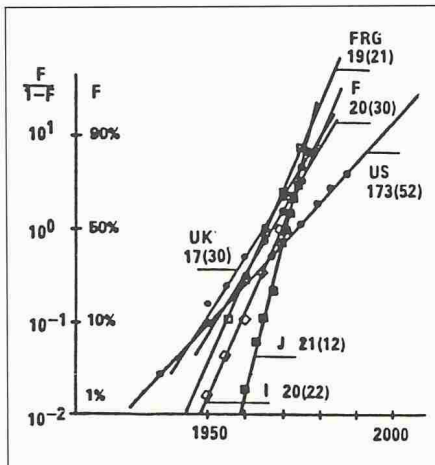


Bild 15. Motorisierung verschiedener Länder (Marchetti, 1983)

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 Bild 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.

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

Wie ersichtlich, kann auch die Einführung neuer Technologien auf Grund gesetzlicher Massnahmen mit Hilfe des logistischen Substitutionsmodells nachvollzogen werden. In den USA beträgt das  $\Delta t$  (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

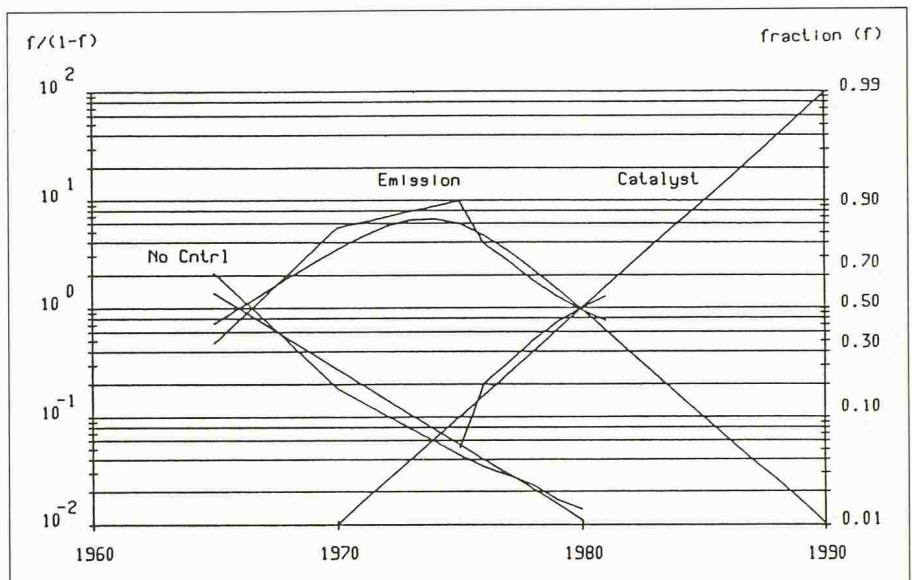


Bild 16. Einführung von Umweltschutzmassnahmen in der Automobilflotte der USA (Nakicenovic, 1987a)

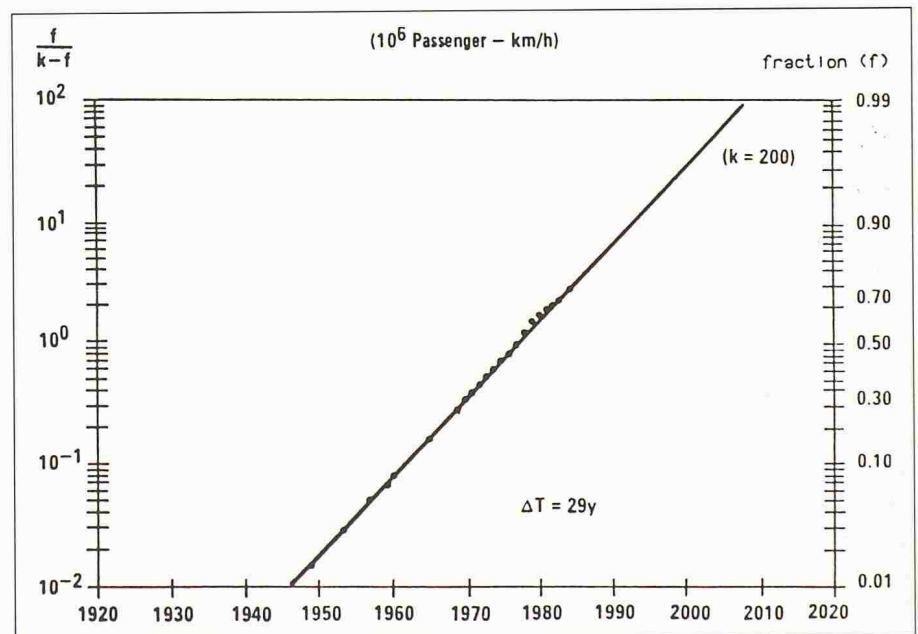


Bild 17. Entwicklung des Weltluftverkehrs einschliesslich Planwirtschaften (Nakicenovic, 1987b)

österreichische Situation Grund zum Optimismus bezüglich der raschen Wirksamkeit der Katalysatorpflicht gibt.

### Flugzeug und Flugverkehr

Bild 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.

Bis zum Jahr 1977, dem Inflexionspunkt 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 Bild 18 zeigt, liegen alle bekannten Passagierflugzeuge, innerhalb eines en-



gen 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 Sitzplätzen rund 250 Plätze haben müssen, um eine der Boeing 747 vergleichbare Transportleistung in Personen-Kilometern pro

Stunde aufzuweisen). Im Vergleich zu Bild 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.

Die Bilder 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 Schifffahrtsflotte machen können.

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.

Bild 19 veranschaulicht die technische Entwicklung von Kolbenmotoren (Leistung in PS) und von Düsentriebwerken (Schub in kp). Wie ersichtlich, können wir zwei getrennte Wachstumspulse feststellen, wobei die Zeitdynamik der Impulse ( $\Delta t$ ) und der Abstand der Inflexionspunkte mit jeweils 30 Jahren extrem synchron verlaufen. Ferner wird ersichtlich, dass die technologische Entwicklung der Düsentriebwerke praktisch abgeschlossen ist, was wiederum auf den evolutionären 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 Wachstumspulses des Flugverkehrs nicht zu erwarten und würde erst nach der Jahrtausendwende zum Tragen kommen.

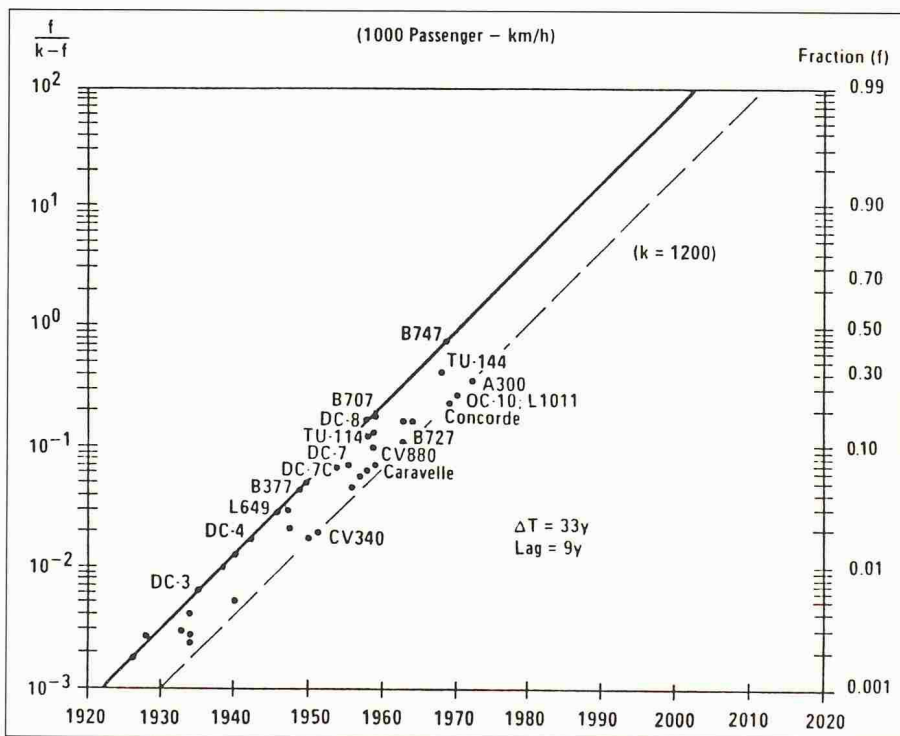
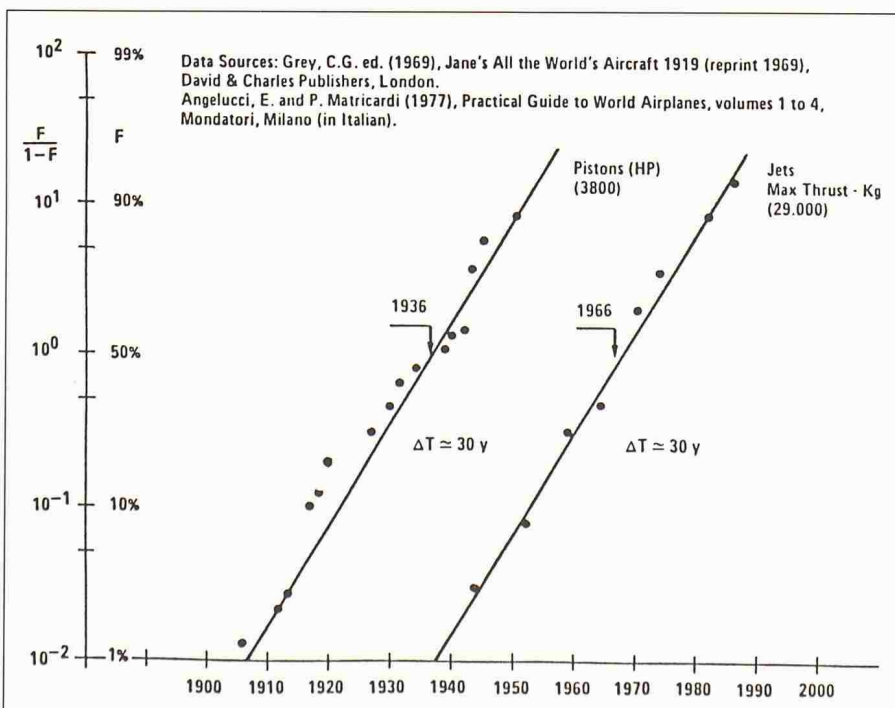


Bild 18. Entwicklung der Transportleistung (Personen-Kilometer pro Stunde) von Flugzeugen (Nakicenovic, 1987b)

Bild 19. Wachstumspulse in der Leistung von Kolbenmotoren und Düsentriebwerken



### 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 Infrastruktursysteme (Kanäle, Eisenbahnlinien, Strassen und als Analogon auch Flugverkehrsstrassen) an der gesamten Transportinfrastrukturlänge eines Landes. Nachdem die Gesamtin-

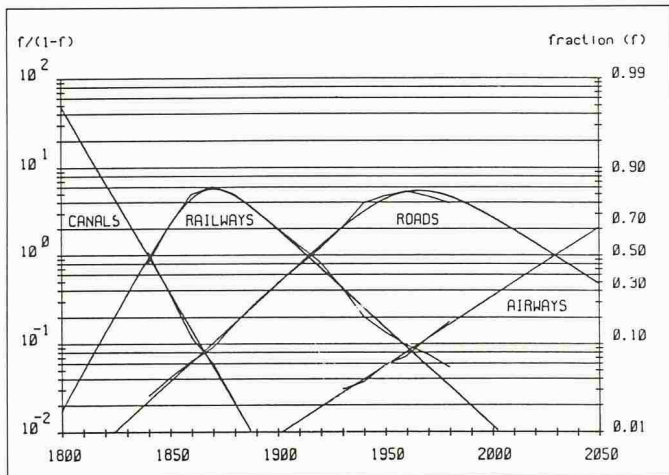


Bild 20. Infrastrukturentwicklung und Substitution in den USA in Dimension Länge (Nakicenovic, 1987b)

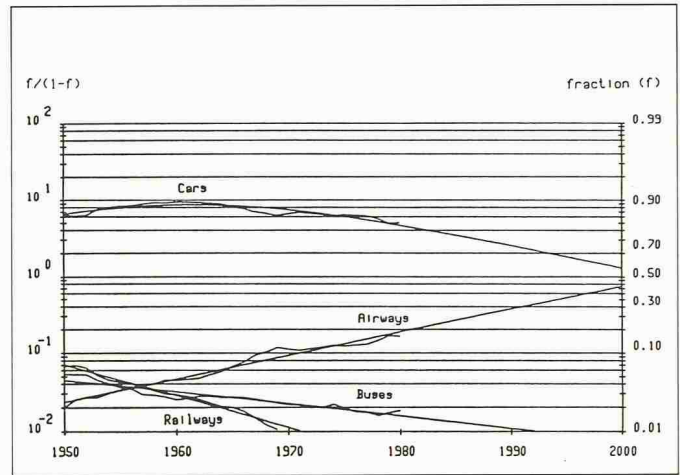


Bild 21. Modal Split im Personenfernverkehr in den USA in Dimension Personen-km (Nakicenovic, 1987b)

frastrukturlänge, vor allem infolge der Einführung neuer Systeme, stark wächst, 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 genauem 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 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

Bild 20 veranschaulicht die Anteile verschiedener Transportinfrastrukturen an der Gesamtinfrastrukturlänge der USA. Wie ersichtlich, können wir drei Substitutionsphasen unterscheiden:

1. Wachstum des Eisenbahnnetzes und Rückgang der Bedeutung des Kanalnetzes\*: mit einer Zeitrates  $\Delta t$  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  $\Delta t$  von rund 80 Jahren;
3. Lange Saturationsphase (von etwa 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  $\Delta t$  von 120 Jahren wachsen.

Vielleicht die bemerkenswerteste Schlussfolgerung, die aus Bild 20 gezogen werden kann, ist der extrem stabile Wachstums- und Rückgangsprozess in der Bedeutung einzelner Infrastrukturen, ein Prozess, der von kurzfristigen Ereignissen wie der grossen Depression in den 30er Jahren oder von den Weltkriegen nicht berührt wurde.

Die Sicht, die wir aus Bild 20 gewonnen haben, wird durch die Untersuchung der Dynamik des Modal Split im Personenfernverkehr aus Bild 21 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 Bild 20 untersucht haben. Leider sind entsprechende Zeitreihen nur seit 1950 verfügbar, jedoch stimmen die dynamischen Tendenzen in Bild 21 gut mit denen von Bild 20 überein.

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, so dass 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 die 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.

\* 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.

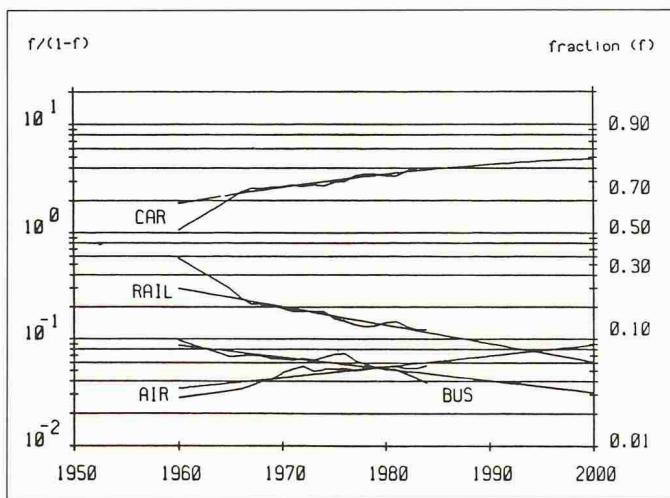
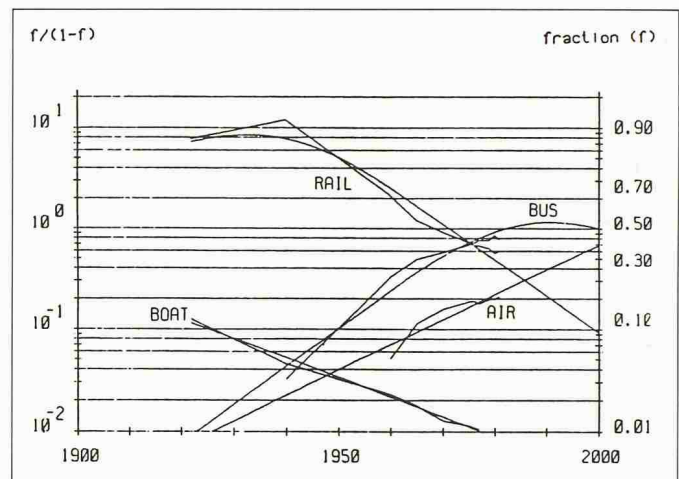
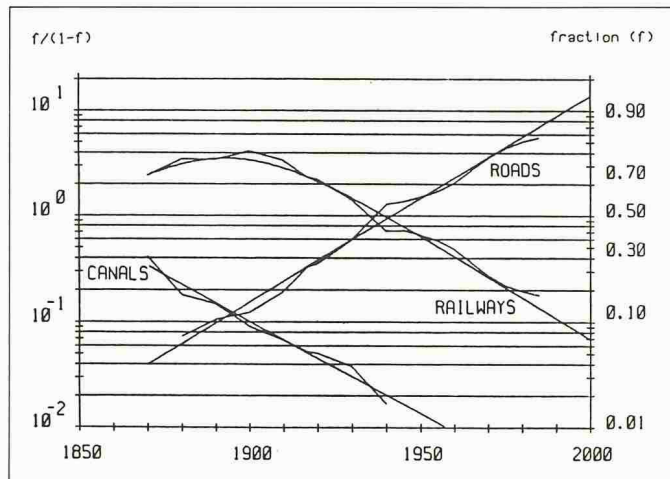


Bild 23 (oben). Modal Split im Personenfernverkehr in der UdSSR in Dimension Personen-km

Bild 22 (links oben). Infrastrukturentwicklung und Substitution in der UdSSR in Dimension Länge

Bild 24 (links). Modal Split im Personenfernverkehr in der BRD in Dimension Personen-km

**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 Bilder 22 und 23 zeigen, können wir ähnliche Tendenzen, wie wir sie bereits am Beispiel der USA diskutiert haben, auch in der Entwicklung des Verkehrssystems der UdSSR feststellen.

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 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 zu erwartende 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.

Bild 24 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 Ölkrise 1973 und 1979 nicht berührt wurde) des Autoverkehrs und des Flug-

verkehrs zulasten des Eisenbahn- und Busverkehrs feststellen.

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 Magnetschwebebahnen), 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 Technologiegeschichte 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.

### 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

### Quellennachweis

- d'Ancona, U.*, 1939. Der Kampf ums Dasein. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Bass, F. M.*, 1969. A New Product Growth Model for Consumer Durables. *Management Science* 15:215-227.
- Bass, F. M.*, 1980. The Relationship Between Diffusion Rates, Experience Curves and Demand Elasticities for Consumer Durable Technological Innovations. *Journal of Business* 53:51-67.
- Goell, N. S., S. C. Maitra und E. W. Montroll.*, 1971. On the Volterra and Other Nonlinear Models of Interacting Populations. *Rev. Mod. Phys.* 43:231-276.
- Fisher, J. C., und R. H. Pry.*, 1971. A Simple Substitution Model of Technological Change. *Technological Forecasting and Social Change* 3:75-88
- Hägerstrand, T.*, 1967. Innovation Diffusion as a Spatial Process. University of Chicago Press, Chicago.
- Kondratieff, N. D.*, 1926. Die langen Wellen in der Konjunktur. *Archiv für Sozialwissenschaft und Sozialpolitik* 56/3: 573-609.
- Lotka, A. J.*, 1910. *J. Physical Chemistry* 14, 271
- Marchetti, C.*, 1983. The Automobile in a System Context, The Past 80 Years and the Next 20 Years. *Technological Forecasting and Social Change* 23:2-23
- Marchetti, C. und N. Nakicenovic.* 1979. The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model. RR-79-13. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
- Nakicenovic, N.*, 1987a. The Automobile Road to Technological Change. RR-87-1. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
- Nakicenovic, N.*, 1987b. Transportation and Energy Systems in the U.S. WP-87-1. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
- Nakicenovic, N.*, 1987c. unveröffentlicht. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
- Pearl, R.*, 1925. *The Biology of Population Growth.* Knopf, New York
- Peschel, M., und W. Mende.* 1983. *Leben wir in einer Volterra-Welt?* Akademie Verlag, Berlin
- Rogers, E. M.*, 1962. *Diffusion of Innovation.* The Free Press, New York
- Schumpeter, J. A.*, 1939. *Business, Cycles, Band 1 und Band 2.* McGraw-Hill, New York
- Taylor, G. R.*, 1962. *The Transportation Revolution, 1815-1860, Vol IV, The Economic History of the United States.* Hold, Rinehart and Winston, New York
- Verhulst, P.-F.*, 1838. Notice sur la Loi que la Population suit dans son Accroissement. *Correspondence Mathématique et Physique* 10, 113-121
- Woytinsky, W. L.*, 1927. *Die Welt in Zahlen, Fünftes Buch, Handel und Verkehr.* Rudolf Mosse Buchverlag, Berlin.

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 Saturation der Entwicklung des Eisenbahnnetzes während der Talphase des vorletzten Kondratieff-Zyklus (1920-1930) oder der Stättigung der Motorisierung in den meisten Industrieländern, wiederum während der Abschwungsphase des letzten Kondratieff Zyklus (bis 1995).

Transporttechnologien und Infrastrukturen können deshalb als wichtiger Bestandteil der Basisinnovationen gelten, die einen Wachstumsimpuls bestimmen, deren Saturation zu Strukturbrüchen führt und daher als Erklärungsmuster für Abschwungsphasen in der langfristigen wirtschaftlichen Entwicklung dient. Während dieser Strukturbrüche (Depressionsphasen) wird der Zerfallprozess alter und die Entwicklung neuer Technologien eingeleitet. Dieser «schöpferische Zerstörungspro-

zess» 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. Umso mehr 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.

Adresse des Verfassers: *Arnulf Grübler, International Institute for Applied Systems Analysis, Schloss Laxenburg, A-2361 Laxenburg.*

Tagungsbeitrag zum Hopfgartner Verkehrskolloquium «Verkehr 2001-Perspektiven»; Hopfgarten / Brixental, 19. bis 21. März 1987.