

## 1. DIE BEDEUTUNG VON GÜTER-SUBSTITUTIONS- PROZESSEN FÜR DIE VOLKSWIRTSCHAFT

Unter Substitution versteht man im weitesten Sinne das Ersetzen eines Gutes durch ein anderes. Aus dem täglichen Leben ließen sich viele Beispiele für Substitutionen anführen, denn wir begegnen ihnen immer aufs Neue und nehmen vielleicht sogar, beispielsweise als Konsumenten, aktiv Einfluß darauf. Diese Substitutionsvorgänge verändern unsere Lebensgewohnheiten und unsere Umgebung in ganz entscheidender Weise. Man denke nur an das Vordringen von Kunststoffen im Verpackungssektor und den damit verbundenen Umweltproblemen des „Plastikmülls“.

Einschneidende Substitutionsvorgänge sind auch im Bereich der Energiewirtschaft zu beobachten. Weltweit kann hierbei im Bereich der fossilen Energieträger auf den Verlust der Vorrangstellung der Kohle im Laufe der Zeit hingewiesen werden, während Erdgas und in besonderem Maße Erdöl diese Verdrängung bewirkt haben (s. Abb. 1).

festen Brennstoffen durch Heizöl und in zunehmendem Umfang auch durch Erdgas und Strom (s. Abb. 2).

Es erscheint mithin als eine wichtige Aufgabe, Substitutionsvorgänge zu beschreiben und zu analysieren. In einer Volkswirtschaft kommt es dabei weniger auf die Entscheidung zur Substitution einer einzelnen Wirtschaftseinheit an (eines Haushaltes z. B.), vielmehr interessiert die makroökonomische Betrachtungsweise, das Verhalten von mehr oder weniger hochaggregierten Größen also. Denn es ist gerade dieses Verhalten, das zu nachhaltigen Strukturveränderungen in einer Wirtschaft führt und damit nicht immer als erstrebenswert anzusehende wirtschafts- und sozialpolitische Konsequenzen zur Folge hat. Ein Beispiel hierfür ist die Fehleinschätzung der Nachfrage mit daraus resultierenden Problemen wie der Behinderung des gesamtwirtschaftlichen Wachstums und der Arbeitsplatzunsicherheit.

Im folgenden sollen nun zunächst einige bisher gebräuchliche Ansätze zur Beschreibung von Substitutionsvorgängen aufgezeigt werden, und zwar in all-

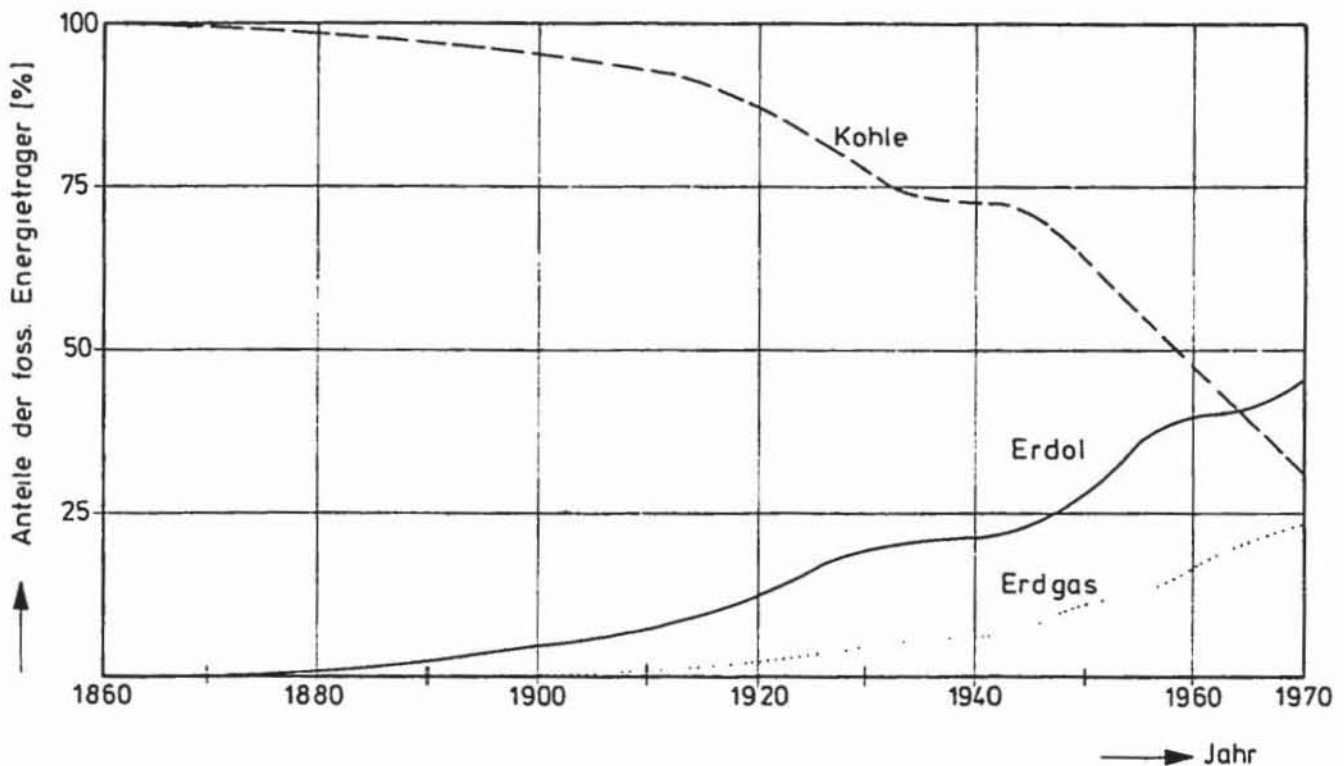


Abb. 1: Anteil der Energieträger am Weltenergieverbrauch <sup>1)</sup>

Ähnliche Vorgänge zeigen sich auch speziell im Bereich der Raumheizwärme in den privaten Haushalten der BRD: die fortschreitende Verdrängung der

<sup>1)</sup> Voß, A., Ansätze zur Gesamtanalyse des Systems Mensch — Energie — Umwelt, Dissertation an der RWTH-Aachen, gedruckt als Bericht der KFA-Jülich, Nr. 982, 1973.

gemeiner Form, d. h., ihre Anwendbarkeit ist für beliebige Substitutionsgüter gegeben. Danach werden zwei spezielle Substitutionsansätze für den Brennstoffsektor aufgeführt.

In Absatz 3 wird anschließend ein neuentwickelter Ansatz, beruhend auf einem System gekoppelter Dif-

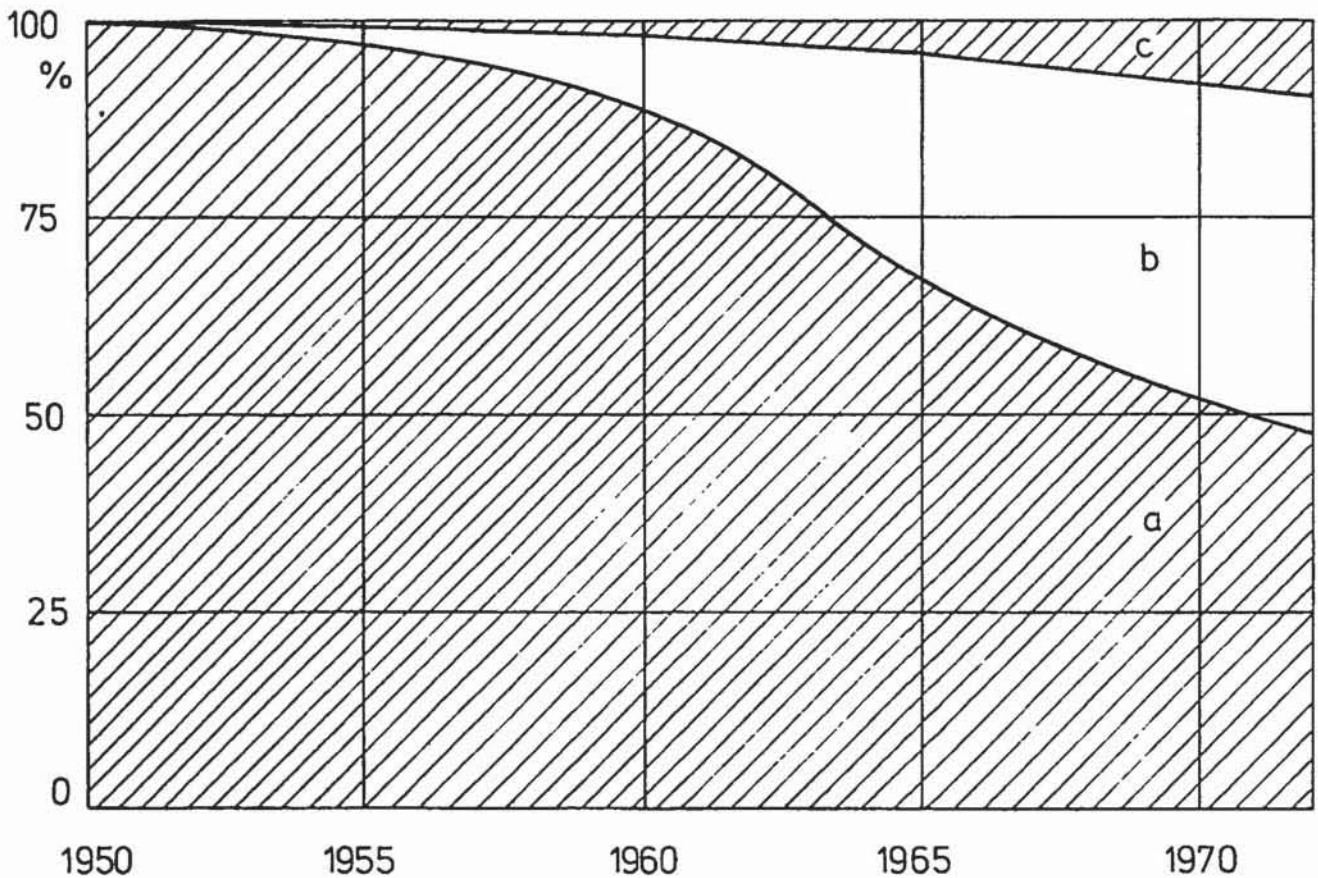


Abb. 2: Anteil der Energieträger am Brennstoffverbrauch für Raumheizwärme in den privaten Haushalten der BRD (ohne Fernwärme)

a = feste Brennstoffe; b = Heizöl; c = Gas und Strom

ferentialgleichungen, vorgestellt. Ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Energiewirtschaft soll abschließend die Anwendbarkeit überprüfen.

Bei der Bewertung der betrachteten Verfahren werden folgende in der Realität existierende Gegebenheiten berücksichtigt:

1. Substitutionsprozesse stellen grundsätzlich einen dynamischen Vorgang dar. Auf Grund der Tatsache, daß in einer Volkswirtschaft die Entscheidungszeitpunkte vieler Wirtschaftssubjekte äußerst selten zusammenfallen und daß ökonomische Systeme durch eine gewisse Trägheit gekennzeichnet sind, sind Substitutionsvorgänge aus makroökonomischer Sicht immer durch zeitliche Verzögerungen gekennzeichnet.
2. Substitutionen erfolgen oft zwischen mehreren oder vielen konkurrierenden Gütern, da zur gleichen Zweckerfüllung in der Regel mehrere Güter gleichrangig nebeneinander stehen.
3. Eine Fülle von Einflußgrößen charakterisiert meistens einen Substitutionsvorgang. Fast immer sind die Antriebskräfte einer Substitution nicht allein durch eine oder zwei Größen erklärbar.

## 2. EINIGE BISHER GEBRÄUCHLICHE ANSÄTZE ZUR BESCHREIBUNG VON SUBSTITUTIONSVORGÄNGEN

### 2.1 Elastizitäten

Elastizitäten sind definiert als Maßzahlen zur Quantifizierung des Veränderungsgrades einer Größe bei

Änderung einer anderen. In der Substitutionsbetrachtung sind diese beiden Größen meist Mengen und Preise, d. h. es wird der Reagibilitätsgrad von Mengen bei Veränderungen von Preisen ermittelt. Folgende Elastizitätsbegriffe finden dabei Verwendung:

— die direkte Preiselastizität: (1)

$$\epsilon = \frac{\delta x_1}{x_1} : \frac{\delta p_1}{p_1}$$

— die (positive) Kreuzpreiselastizität: (2)

$$\kappa = \frac{\delta x_1}{x_1} : \frac{\delta p_2}{p_2}$$

— die Substitutionselastizität: (3)

$$\eta = \frac{\delta \frac{x_1}{x_2}}{\frac{x_1}{x_2}} : \frac{\delta \frac{p_1}{p_2}}{\frac{p_1}{p_2}}$$

mit  $x_1$  ( $x_2$ ) = Menge eines Gutes  $x_1$  ( $x_2$ )

$p_1$  ( $p_2$ ) = Preis eines Gutes  $x_1$  ( $x_2$ )

Der Anwendung von Elastizitäten bei einer Substitutionsbetrachtung sind jedoch aus folgenden Gründen Grenzen gesetzt:

- streng genommen gelten Elastizitäten nur für marginale Änderungen
- die Betrachtungsweise ist eine rein statische
- es werden höchstens zwei Güter betrachtet
- die direkte Preiselastizität und die Kreuzpreiselastizität sind an die „ceteris-paribus-Klausel“ gebunden

— Substitutionsvorgänge werden nur durch eine erklärende Größe, die Preise, beschrieben.

Der Versuch, den Mangel der monokausalen Erklärung zu beheben, wird in einem Ansatz von Zimmermann<sup>2)</sup> unternommen. Dabei wird zur Berechnung des Mengenverhältnisses zweier Substitute nicht allein das Preisverhältnis, sondern zusätzlich die Zeit als Bestimmungsgröße herangezogen, so daß zwischen zwei Gütern  $x_1$  und  $x_2$ , ihren Preisen  $p_1$  und  $p_2$  sowie der Zeit  $t$  folgender Zusammenhang besteht:

$$(4) \quad \frac{x_1}{x_2} = f\left(\frac{p_1}{p_2}, t\right)$$

Grundsätzlich kann auch dieser Ansatz nicht befriedigen, da die Zeit zwar einer Entwicklung oder einem Trend zuzuordnen ist, jedoch selbst nicht als Ursache dieser Entwicklung und damit als erklärende Größe auftreten kann.

## 2.2 Deterministische s-förmige Substitutionskurven

Aufbauend auf empirischen Untersuchungen geht der Modellansatz davon aus, daß Substitutionsvorgänge in den Anfangsjahren exponentiell verlaufen, um anschließend die Form einer s-Kurve anzunehmen. Die diesen Vorgang beschreibende Grundgleichung baut dabei auf der Hypothese auf, daß der Marktanteil  $f$  des „Newcomers“ mit einer Rate wächst, die dem noch verbleibenden  $(1-f)$  proportional ist<sup>3)</sup>. Mathematisch formuliert bedeutet das in Differentialgleichungsform

$$(5) \quad \frac{1}{f} \cdot \frac{df}{dt} = 2\alpha \cdot (1-f),$$

wobei  $\alpha$  die halbe Wachstumsrate von  $f$  in den Anfangsjahren des Substitutionsprozesses ist. Nach Integration von (5) erhält man:

$$(6) \quad \frac{f}{1-f} = e^{2\alpha \cdot (t-t_0)}$$

$t_0$  ist dabei der Zeitpunkt, zu dem  $f = 1/2$  ist. Der Substitutionsprozeß ist dabei dann zur Hälfte abgeschlossen. Formt man Gleichung (6) um in

$$(6a) \quad f = \frac{1}{1 + e^{-2\alpha(t-t_0)}}$$

so erkennt man, daß es sich um einen logistischen Trend handelt.

Stellt man die Funktion  $f/(1-f)$  halblogarithmisch über der Zeit dar, so erhält man eine Gerade mit der Steigung  $2\alpha$  und der Zeit  $t_0$  zugehörig zum Funktionswert  $f/(1-f) = 1$  (s. Abb. 3). Bei bekannter Steigung der Geraden — unter Umständen schon nach sehr kurzer Zeit ermittelt, d. h., wenn die Substitution erst einige Prozent erreicht hat — wird dem Modell durch Extrapolation der Geraden die Fähigkeit zur Prognose unterstellt.

<sup>2)</sup> Zimmermann, H., Zur Frage der Substitutionselastizität zwischen Steinkohle und Heizöl, in: Mitteilungen des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung, Essen 1960, Heft 9/10, S. 161 ff.

<sup>3)</sup> Fisher, J. C., Pry, R. H., A Simple Substitution Model of Technological Forecasting and Social Change, Vol. 3, 1971—1972, S. 75 ff.

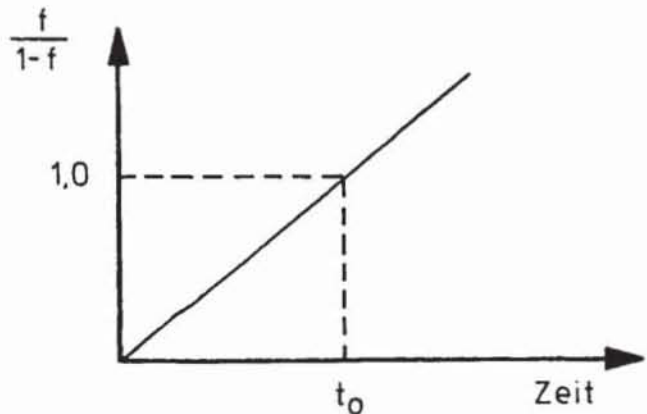


Abb. 3: Halblogarithmische Darstellung des Verhältnisses  $f/(1-f)$  über der Zeit

Wenngleich der vorliegende Ansatz durchaus geeignet erscheinen mag, im Sinne eines „curve-fittings“ bisher abgelaufene Substitutionsprozesse nachzubilden, so müssen doch einige Schwächen aufgezeigt werden:

- Es erfolgt keine Zuordnung von Ursache und Wirkung, vielmehr wird davon ausgegangen, daß sich ein Substitutionsprozeß, der einmal eingesetzt hat, auf quasi fatalistische Weise auf einem vorgezeichneten Weg auch durchsetzen wird. Dabei wird sogar noch unterstellt, daß die Substitutionsrate  $2\alpha$  konstant bleibt.
- Die Substitutionsbetrachtung ist eingeschränkt auf nur zwei miteinander konkurrierende Güter.

## 2.3 Spezielle Substitutionsansätze für den Brennstoffsektor

Im folgenden werden zwei Ansätze vorgestellt, die vornehmlich im Energiebereich angewendet werden, insbesondere im Brennstoffsektor. Eine Einschränkung der Ansätze für andere Anwendungsbereiche muß dadurch nicht gegeben sein, wenn vergleichbare Verhältnisse vorliegen. Die Darstellung erfolgt nur beispielhaft für den Brennstoffsektor.

### 2.3.1 Die Einsatzkostendifferenz

Eine Einsatzkostendifferenz wird wie folgt ermittelt:

$$(7) \quad \text{EKD} = \frac{p_1}{\varepsilon_1} - \frac{p_2}{\varepsilon_2}$$

$p_1$  und  $p_2$  sind die Preise zweier Energieträger und  $\varepsilon_1$  bzw.  $\varepsilon_2$  ihre sogenannten Äquivalenzziffern, das sind Bezugswerte, die die Unterschiede der Energieträger im Wärmewert und Ausnutzungsgrad berücksichtigen. Ist  $\text{EKD} > 0$ , so wird eine Substitution in Richtung Energieträger 2 erfolgen, andernfalls in Richtung Energieträger 1.  $\text{EKD} = 0$  bedeutet keinerlei wirtschaftlichen Vorteil bei Verwendung des einen oder anderen Energieträgers.

Entscheidende Nachteile dieses Ansatzes sind, daß alleine die Preise auslösende Momente einer Substitution sind und die Betrachtung rein statisch erfolgt. Eine Substitution kann demnach in ihrem Zeitverhalten nicht beschrieben werden.

### 2.3.2 Dynamischer Substitutionsansatz mit preISEmpfindlichem und preisunempfindlichem Nachfrager

Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, daß in erster Linie nur der Preis als Nachfrage-Bestim-

mungsgröße existiert. Ferner wird angenommen, daß es einen preisempfindlichen und preisunempfindlichen Teil der Nachfrage gibt. Für den Energieträgerverbrauch, speziell im Brennstoffbereich, wurde daher eine zeitliche Entwicklung angenommen, die folgendem Ansatz genügt<sup>4)</sup>:

$$(8) \quad M_i(t+1) = U_i \cdot M_i(t) + R_i(t) \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (V_i \cdot M_i(t)) + W(t) \right]$$

- mit
- $M_i(t)$  Brennstoffmenge  $i$ , die den Brennstoffbedarf  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  deckt
  - $U_i$  Unveränderbarer Marktanteil eines Brennstoffes (Grundbedarf)
  - $V_i$  Anteil  $1-U_i$
  - $R_i$  Maß für die Verteilung der preisempfindlichen Nachfrage auf die einzelnen Brennstoffe
  - $W$  wachstumsbedingte Nachfrage nach Brennstoffen (neue Verbraucher)

Die Größe  $R_i(t)$  ist eine Funktion der Brennstoffpreise  $p_i$ . Eine mögliche funktionale Beschreibung wird durch einen logarithmischen Zusammenhang folgender Art vorgegeben:

$$(9) \quad R_i(t) = A_i \cdot e^{a_{i1}} \cdot p_1(t) \cdot e^{a_{i2}} \cdot p_2(t) \dots e^{a_{in}} \cdot p_n(t)$$

Dieser Zusammenhang erscheint sinnvoll, denn für alle  $p_i$  bleibt  $R_i$  positiv, und zwar für direkte und indirekte Preiswirkungen, die für die Verknüpfungsfaktoren vorzeichenbestimmend sind. Die Größen  $A_i$  sowie  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$  werden als bester Schätzwert auf Grund statistischer Methoden ermittelt.

Obschon mit Hilfe des aufgezeigten Ansatzes eine dynamische Beschreibung von (Brennstoff-) Substitutionsprozessen möglich ist, muß dennoch berücksichtigt werden, daß einziger erklärender Faktor für eine Substitution der Preis ist. Liegen zudem die Preise für eine Anzahl betrachteter Substitute weit auseinander, so würde in diesem Modell keine Substitutionskonkurrenz bestehen.

### 3. EIN DIFFERENTIALGLEICHUNGSANSATZ ZUR BESCHREIBUNG VON SUBSTITUTIONSPROZESSEN

- Reale Substitutionsprozesse sind, wie bereits erwähnt, dadurch gekennzeichnet, daß
  - mehrere Substitute miteinander konkurrieren
  - mehrere verursachende Faktoren die Substitution vorantreiben
  - der Substitutionsprozeß dynamisch abläuft.

Nachdem der Mangel der bekannten Ansätze zur Beschreibung von Substitutionen in bezug auf einzelne oder mehrere dieser drei Kennzeichen kurz erläutert wurde, soll im folgenden ein Verfahren vorgestellt werden, das allen drei Forderungen in geeigneter Weise Rechnung trägt.

#### 3.1 Die Dynamik von Substitutionsprozessen

Substitutionsvorgänge sind dynamischer Natur. Damit ist gemeint, daß sich bei Veränderungen der die Substitution verursachenden Faktoren, z. B. der

<sup>4)</sup> Baughman, M. L., Dynamic Energy System Modelling-Interfuel Competition, M. I. T. Energy Analysis and Planning Group, Sept. 1972.

Preisverhältnisse, nicht unmittelbar die diesen veränderten Verhältnissen entsprechenden neuen Mengenrelationen der Substitute einstellen werden. So wird sich z. B. eine Erhöhung des Heizölpreises erst nach einer gewissen Zeit in einem verminderten Anteil von Heizöl an der Raumheizung niederschlagen. Dies hat seinen Grund darin, daß es zum einen unwirtschaftlich wäre, vorhandene und noch nicht abgeschriebene Systeme umzustellen und zum anderen ist es durch die notwendigen Umstellungszeiten und fertigungstechnischen Kapazitätsgrenzen bedingt, die eine sofortige Umstellung auf den „billigen“ Energieträger nicht erlauben. Die Zeit, die im Mittel vergeht, bis sich nach einer Veränderung der auslösenden Faktoren, z. B. des Preises, die der neuen Situation entsprechenden Mengenverhältnisse eingestellt haben, kann man als die durchschnittliche Substitutionszeit bezeichnen. Sie liegt je nach Substitutionsvorgang in der Größenordnung von Tagen bis zu mehreren Jahrzehnten.

Betrachtet man Substitutionsvorgänge, die aus einer Vielzahl von Einzelentscheidungen, d. h. mikroökonomischer Substitutionen der am Wirtschaftsleben Beteiligten resultieren, so stellen sich die Substitutionsvorgänge gewöhnlich als ein kontinuierlicher Prozeß dar, wie dies z. B. in der Vergangenheit der Fall bei der Verdrängung der Kohle im Raumheizwärmebereich war. In der Realität bestand dieser Vorgang aus einer Vielzahl von diskreten Umstellungsaktionen, was sich jedoch nur in einer Makrobetrachtung als kontinuierliche Entwicklung darstellte. Dabei ist ein kontinuierlich ablaufender Substitutionsvorgang durch ein ganz bestimmtes Zeitverhalten und eine besondere Verzögerungscharakteristik geprägt. Zur Beschreibung derartiger zeitverzögerter Substitutionsvorgänge kann man sich eines Systems von gekoppelten Differentialgleichungen bedienen. Ein solcher Ansatz kann z. B. die folgende Form haben:

$$(10) \quad a \frac{d^3 \bar{x}_i}{dt^3} + b \frac{d^2 \bar{x}_i}{dt^2} + \tau \frac{d \bar{x}_i}{dt} + \bar{x}_i = \overline{GN}_i(t)$$

mit  $\bar{x}_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$

mit  $i$  als Index der Anzahl der konkurrierenden Substitute.

$\bar{x}_i$  bezeichnet hierbei den Marktanteil eines Substitutionsgutes und  $\overline{GN}_i(t)$  ist die Größe, die den Anteil des Substitutes im Gleichgewichtszustand angibt (hierauf wird später noch genauer eingegangen).

$\tau$  stellt die durchschnittliche Substitutionszeit dar, während  $a$  und  $b$  bestimmte Vielfache von  $\tau$  sind.

Gleichung 10 stellt eine Differentialgleichung dritter Ordnung dar. Natürlich ist diese Form, d. h. die Ordnung der Differentialgleichung, nicht naturgesetzlich vorgegeben. Es hat sich nur gezeigt, daß eine Differentialgleichung 3. Ordnung die Dynamik der Substitutionsprozesse gut beschreibt. Dies wird deutlich, wenn man die dynamische Charakteristik dieses Typs von Differentialgleichung genauer betrachtet. Sie wird gewöhnlich durch die Einheitssprungantwort beschrieben. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Störglied, d. h. die rechte Seite der Differentialgleichung

chung einen Einheitssprung macht, d. h. mathematisch beschrieben den Verlauf

$$\bar{GN}_i(t) \begin{cases} = 0 & \text{für } t < 0 \\ = 1 & \text{für } t \geq 0 \end{cases}$$

hat.

Die Lösung der Differentialgleichung gibt dann den charakteristischen Verlauf der abhängigen Variablen  $\bar{x}_i$  (in unserem Fall der Marktanteil der einzelnen Substitute) wieder. In Abb. 4 ist dieser charakteristische Verlauf der Einheitssprungantwort für Differentialgleichungen verschiedener Ordnung dargestellt.

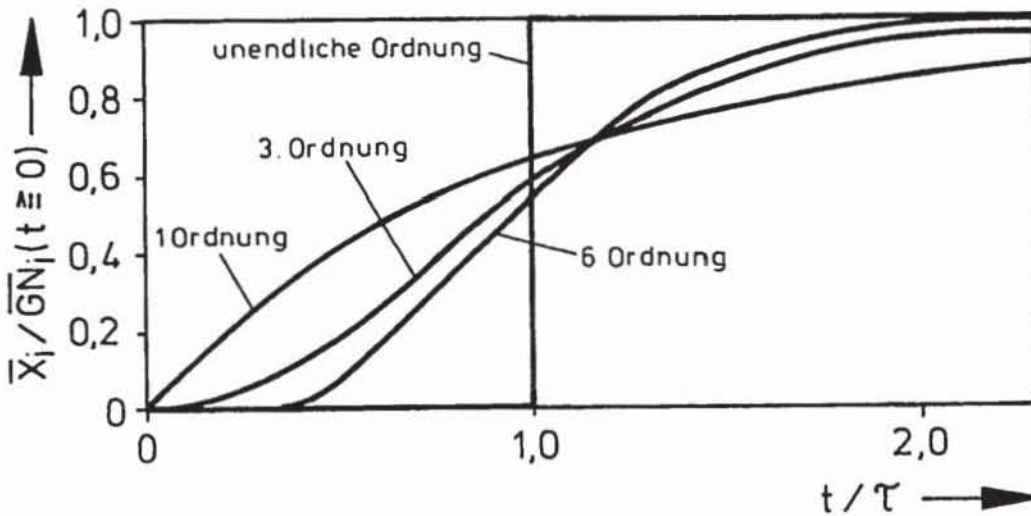


Abb. 4: Einheitssprungantwort für Differentialgleichungen verschiedener Ordnung

Die Sprungantwort einer Differentialgleichung 1. Ordnung ist dadurch gekennzeichnet, daß sie ihre größte Steigung zum Zeitpunkt  $t = 0$  hat. Übertragen auf die Beschreibung des Substitutionsprozesses würde dies bedeuten, daß z. B. unmittelbar nach einer Veränderung der Preise die Substitutionsrate am größten wäre. In der Realität muß man jedoch davon ausgehen, daß erst eine gewisse Anlaufzeit verstreicht, bevor die Substitution realisiert werden kann (Informations-lag usw.). Eine Differentialgleichung unendlicher Ordnung entspricht einer reinen Totzeit-Verzögerung. Auch sie ist für die Beschreibung von Substitutionsvorgängen wenig geeignet, da sie implizieren würde, daß alle Umstellungsprozesse gleichzeitig nach einem gewissen „time-lag“ stattfinden. Der charakteristische Verlauf einer Differentialgleichung 3. Ordnung dagegen ist durch ein zunächst langsames Ansteigen der Substitutionsrate gekennzeichnet, die nach der mittleren Verzögerungszeit wieder abnimmt. Die abhängige Variable  $\bar{x}_i$  nähert sich dann asymptotisch der erklärenden Variablen  $\bar{GN}_i(t)$ . Die Beschreibung der Substitutionsdynamik mit Hilfe einer Differentialgleichung 3. Ordnung darf jedoch nicht mit dem im Punkt 2.2 beschriebenen Ansatz der s-förmigen Substitutionskurven verwechselt werden. Dort wird die Entwicklung des Substitutionsvorganges zeitlich quasi autonom vorgegeben, während sie hier eine Funktion des Störgliedes  $\bar{GN}_i(t)$ , also der zeitlichen Entwicklung der verursachenden Faktoren, ist.

### 3.2 Nutzwertansatz zur Verknüpfung der verursachenden Faktoren

Mit dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Differentialgleichungsansatz ist ein Weg zur Beschreibung der Dynamik von Substitutionsvorgängen aufgezeigt worden. Dies ist aber nur eine der Anforderungen an einen brauchbaren realitätsnahen Modellansatz. Das zweite Kennzeichen bestand darin, mehrere verursachende Faktoren berücksichtigen zu können. Geht man also von der Hypothese des Preises als einzigen Verursachungsfaktor ab, so stellt sich generell das Problem der Verknüpfung unterschiedlicher Einflußgrößen und der Bestimmung ihres

relativen Gewichts für den Substitutionsprozeß. Man hat es dabei mit einer multidimensionalen Bewertungsaufgabe zu tun, wobei erschwerend noch die Aufgabe der Quantifizierung schwer erfassbarer Größen hinzutritt. Für die dynamische Beschreibung von Substitutionsprozessen im Energiebereich z. B. heißt das, daß so unterschiedliche Einflußgrößen, wie die Kosten, die Verfügbarkeit oder die Nutzungseigenschaften (Sauberkeit in der Handhabung, Bedienungskomfort, Regelbarkeit u. a.) quantifiziert und verglichen werden müssen. Zur Lösung dieser Aufgabe eignen sich die aus der Systemtechnik bekannten Methoden der Nutzwertanalyse.

Die Vielzahl der die Substitution beeinflussenden Größen wird dabei zu geeigneten Indikatoren zusammengefaßt, so z. B. zum Indikator „Kosten“, der die Größen Kapitaldienst- und Betriebskosten umfaßt. Für die einzelnen Indikatoren, die in der Regel nicht direkt miteinander vergleichbar sind, muß nun eine Norm (Maßeinheit) gefunden werden, auf welche die unterschiedlichen Maßeinheiten der Indikatoren zurückgeführt werden können und die somit Vergleiche und Verknüpfungen erlaubt. Diese Norm wird allgemein als „Indikatornutzen“ bezeichnet. Die Ermittlung eines Indikatornutzens erfolgt, indem man den relativen Nutzen eines Substitutes in bezug auf einen Indikator bestimmt. Der Indikatornutzen ist also zu interpretieren als Bewertungsmaß der realen Indikatorausprägung bezüglich der Summe der Indikatorausprägungen. Mathematisch beschrieben wird der Indikatornutzen durch sog. Nutzwertfunktionen.

Hat man so für jeden Indikator den Indikatornutzen bestimmt und vergleichbar gemacht, so sind die verschiedenen Indikatornutzen im Hinblick auf ihren Einfluß auf den Substitutionsprozeß zu beurteilen. Hierzu bedient man sich sog. Gewichtungsfaktoren, die angeben, welchen Einfluß die einzelnen Indikatornutzen auf die Substitution haben.

Hat man den einzelnen Indikatornutzen ihre Gewichte zugeordnet, so werden nun die gewichteten Indikatornutzenwerte für jedes Substitut zum Gesamtnutzen ( $GN_i(t)$ ) des Substitutes verknüpft. Dies kann prinzipiell erfolgen:

— durch eine additive Verknüpfung

$$(11) \quad GN_i(t) = \sum_{j=1}^m g_j(t) \cdot IN_{i,j}(t)$$

mit  $i = 1, 2, \dots, n$  Substitute  
 $j = 1, 2, \dots, m$  Indikatoren

$GN_i(t)$  = zeitabhängiger Gesamtnutzen des Substitutes  $i$

$g_j(t)$  = zeitabhängiger Gewichtungsfaktor des Indikators  $j$

$IN_{i,j}(t)$  = zeitabhängiger Indikatornutzen bezüglich Indikator  $j$  und Substitut  $i$

— durch eine multiplikative Verknüpfung

$$(12) \quad GN_i(t) = \prod_{j=1}^m g_j(t) \cdot IN_{i,j}(t)$$

— durch eine Mischform von beiden Verknüpfungsverfahren.

Welche Art der Verknüpfung sinnvoller ist, läßt sich nur in jedem Einzelfall entscheiden.

Geht man nun von der Hypothese aus, daß sich der Marktanteil eines Substitutes im Gleichgewichtszustand wie der Gesamtnutzen dieses Gutes bezogen auf den Gesamtnutzen aller Substitute verhält, so erhält man für das Störglied in Gleichung 10 den Ausdruck

$$\overline{GN}_i(t) = \frac{GN_i(t)}{\sum_{i=1}^n GN_i(t)}$$

Man hat somit einen quasi geschlossenen Modellansatz zur Beschreibung von Substitutionen, der die eingangs aufgestellten Forderungen erfüllt. Natürlich darf die formale Eleganz dieses Ansatzes nicht darüber hinwegtäuschen, daß bei seiner Anwendung eine Reihe von Schwierigkeiten überwunden und einige Randbedingungen erfüllt sein müssen. So ist eine der wesentlichen, notwendigen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des vorgestellten Ansatzes die, daß sich der zu beschreibende Substitutionsprozeß aus einer Vielzahl von diskreten Einzelereignissen zusammensetzen muß. Größere Probleme treten bei der Verifizierung dieses Modellansatzes auf. Dem Gewinn an Realitätsnähe, erreicht durch die Erfassung mehrerer erklärender Determinanten, stehen auf der anderen Seite die wachsenden Probleme beim Nachweis der statistischen Signifikanz des Ansatzes und bei der Datenbeschaffung entgegen. Der statistische Nachweis der Richtigkeit des Ansatzes wird proble-

matisch, da die isolierte Überprüfung der Wirkung einzelner Einflußgrößen mittels statistischer Zeitreihen oder einer Querschnittsanalyse meistens nicht möglich ist. Hierzu tritt dann noch das Problem, daß subjektive Indikatoren nicht statistisch erfaßt sind und man hier auf z. T. subjektive, wenn auch vielfach objektivierbare Wertungen oder Untersuchungen aufbauen muß. Diese bei der praktischen Arbeit auftretenden Schwierigkeiten können allerdings durch eine sorgfältige Modellkonstruktion und ausführliche Sensibilitätsuntersuchungen gemildert werden.

#### 4. EIN ANWENDUNGSFALL DES DIFFERENTIALGLEICHUNGSANSATZES

Um die Anwendbarkeit des Differentialgleichungsansatzes zur Beschreibung von Substitutionsprozessen zu überprüfen, ist eine Reihe von Ex-post-Analysen durchgeführt worden. Im folgenden wird ein auf diesem Ansatz aufbauendes einfaches Modell zur Beschreibung der Substitutionsvorgänge für den Raumheizwärmebereich der privaten Haushalte erläutert.

Dem Modell liegen folgende Prämissen zugrunde:

- Keine Beschränkung des Angebotes, d. h. jeder Energieträger ist frei und uneingeschränkt zugänglich
- der Substitutionsvorgang ist ausschließlich auf Grund des nachfrageseitigen Konsumverhaltens determiniert
- die Bequemlichkeit der Handhabung eines Energieträgers ist vorrangiger außerökonomischer Einflußfaktor
- auf der Kostenseite sind nur die Brennstoffkosten relevant (allerdings unter Berücksichtigung eines spezifischen Verbrauchs pro Quadratmeter).

In Abbildung 5 sind die Zusammenhänge der einzelnen Modellelemente dieses einfachen Modells dargestellt. Aus dem spezifischen Verbrauch eines Energieträgers (der den Nutzungsgrad, also das Verhältnis aus Nutzungsenergieabgabe und verbrauchter Energie berücksichtigt) pro Quadratmeter sammelbeheizter Wohnfläche und dem Endenergieträgerpreis in DM/tSKE wird ein Nutzenergiepreis pro Quadratmeter errechnet. Damit kann für jeden Energieträger, der Teilnutzen in bezug auf die Energiekosten und damit auch der relative Kostenanteil im Vergleich zu anderen Energieträgern ermittelt werden. Die Bestimmung der Bequemlichkeit der Handhabung eines Energieträgers erfolgt wie unter 3.2 erläutert. Das Verhältnis des Gewichtungsfaktoren schließlich, als Ausdruck für unterschiedliche Gewichtung von Kosten und Bequemlichkeit, bestimmt das Gewicht, mit dem die beiden Teilnutzen zu einem Gesamtnutzen verknüpft werden (im vorliegenden Falle: additiv).

Anschließend an die so erfolgte Ermittlung des relativen Gesamtnutzen eines jeden Energieträgers wird der Substitutionsprozeß mit einem System gekoppelter Differentialgleichungen gemäß Gleichung (10) beschrieben. Durch Multiplikation der Anteile der einzelnen Energieträger mit dem jeweiligen spezi-

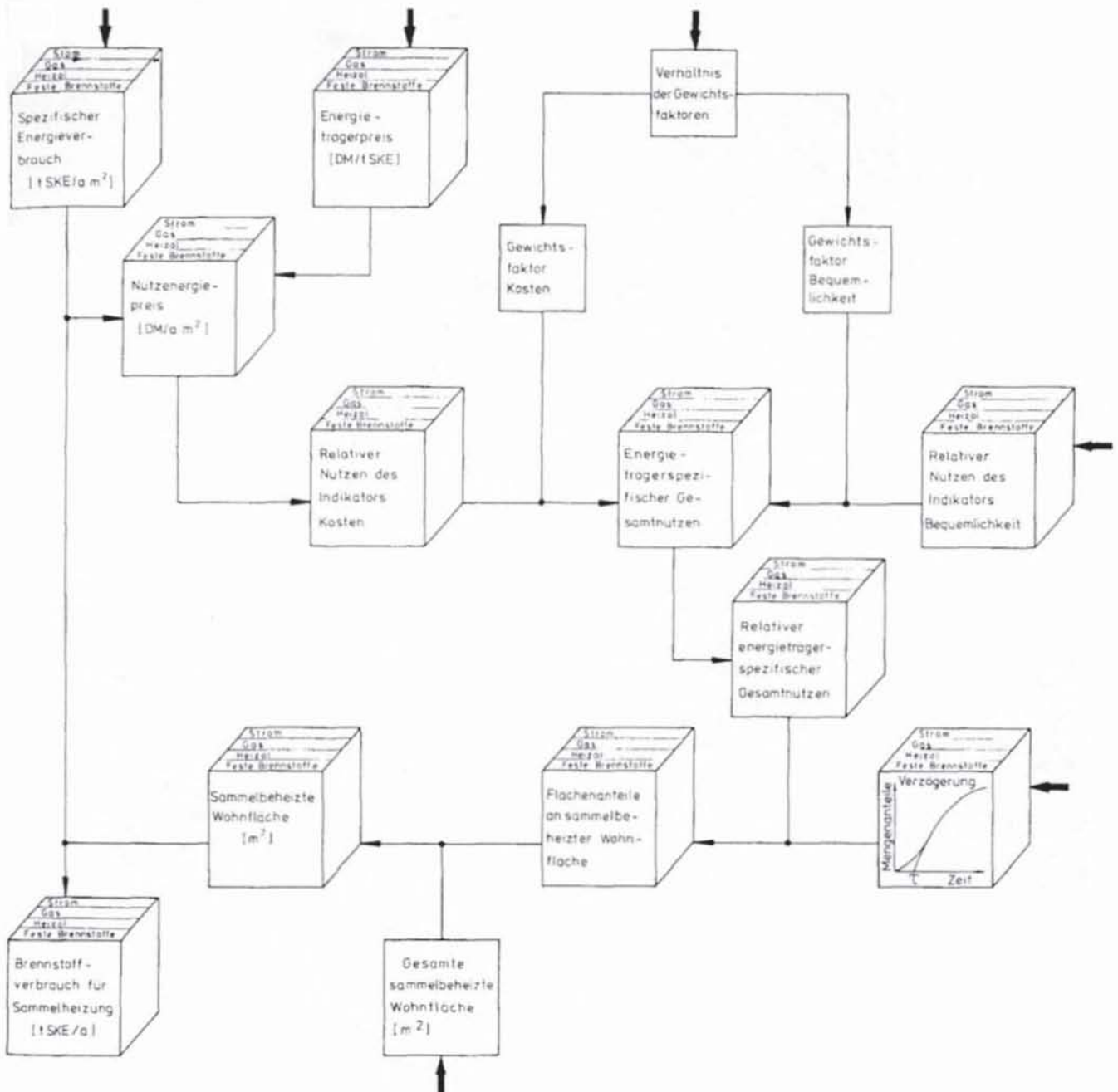


Abb. 5: Struktur des Substitutionsmodells „Raumheizwärme in den privaten Haushalten der BRD“

fischen Verbrauch und der Fläche der sammelbeheizten Wohnungen läßt sich der absolute Verbrauch eines Energieträgers ermitteln.

Durch eine exogene Vorgabe der Kosten der einzelnen Energieträger für den vergangenen Zeitraum von 1950 bis 1972 lassen sich nun mit Hilfe des Modells die Substitutionsvorgänge errechnen, die dann mit den tatsächlichen Vorgängen verglichen werden können. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse beispielhaft für den Einsatz fester Brennstoffe in sammelbeheizten Wohnungen dargestellt.

Folgende Annahmen für die subjektiv zu bewertenden Größen liegen der Rechnung für diesen Standardfall zugrunde:

- Gas ist zweimal, Heizöl zweieinhalbmals und Strom dreimal so bequem zu handhaben wie die festen Brennstoffe.
- Die durchschnittliche Substitutionszeit betrug für feste Brennstoffe 7 Jahre, Gas 8,5 Jahre, Heizöl 6,5 Jahre und Strom 8,5 Jahre.
- Der Indikator Bequemlichkeit ist am Gesamtnutzen eines Energieträgers mit einem Gewichtsfaktor von 10% beteiligt (90% Gewicht hat also der Indikator Kosten).

In einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluß der Veränderung dieser Annahmen auf das Ergebnis durch Parametervariationen genauer untersucht. Ab-

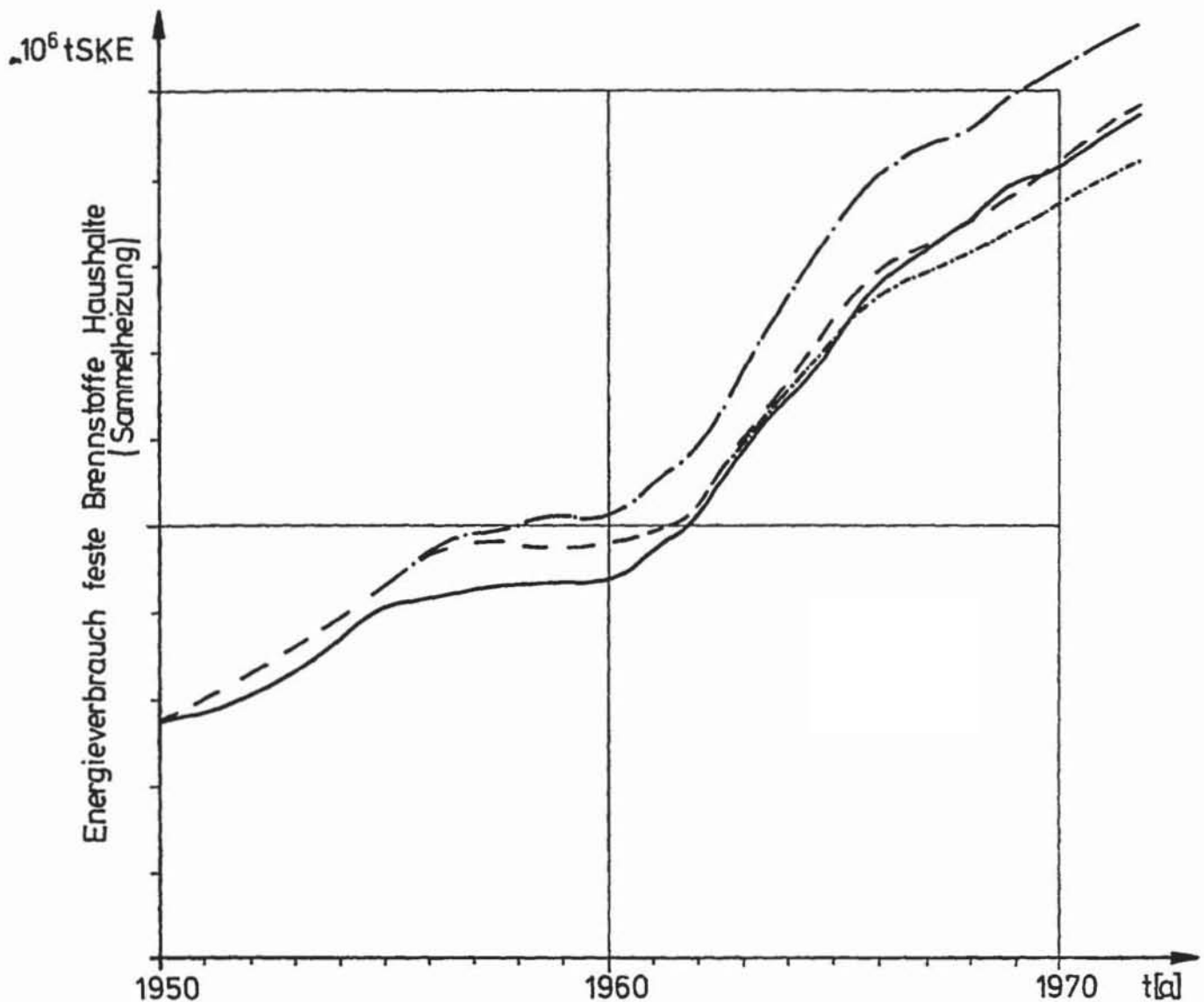


Abb. 6: Substitutionsmodell: Sensitivitätsuntersuchung

- realer Verlauf
- - - errechneter Verlauf (Standardfall)
- · - · - Substitutionszeit um 20% erhöht
- · · · · { Gewichtsfaktor des Indikators  
Bequemlichkeit um 100% vergrößert

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse zweier derartiger Parameteränderungen. In dem einen Fall wurde die durchschnittliche Substitutionszeit um 20% erhöht und im anderen Fall wurde das Gewicht des Indikators Bequemlichkeit verdoppelt. In beiden Fällen ergeben sich eindeutig erhebliche Abweichungen vom realen Verlauf.

Die mit Hilfe dieses Substitutionsansatzes erzielten Resultate lassen die Erwartung zu, daß er für die Beschreibung dynamischer Substitutionsprozesse geeignet ist. Eine Weiterentwicklung des hier erläuterten Modells läßt sicher noch auf befriedigendere Ergebnisse hoffen. So sind speziell bei dem hier dargestellten, relativ einfachen Modell noch folgende Unzulänglichkeiten verbesserungsbedürftig:

- Die Gewichtsfaktoren sind über der Zeit als konstant angenommen.
- Nur zwei Indikatoren wurden als bestimmend für die Substitutionsprozesse angesehen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der hier vorgestellte Modellansatz prinzipiell die drei Anforderungen zur Beschreibung von Substitutionsvorgängen, nämlich

- die Darstellung der Dynamik
- die Berücksichtigung mehrerer verursachender Faktoren und
- die Berücksichtigung mehrerer Substitute

erfüllt. Seine praktische Anwendbarkeit bedarf jedoch sicher noch vieler weitergehender Untersuchungen.