

Wie Energie die Wirtschaft treibt und Entropie den Wohlstand mindert

Reiner Kümmel

Institut für Theoretische Physik und Astrophysik
Universität Würzburg

Ringvorlesung Oldenburg 29.06.2016

Programm

1. Energie und Entropie
2. Energieumwandlung und Wirtschaftswachstum
3. Entropieproduktion und Emissionen
4. Die Minderung der “konventionellen” Wertschöpfung durch Emissionsbekämpfung
5. Zusammenfassung

Quellen:

“The Second Law of Economics: Energy, Entropy, and the Origins of Wealth”. Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2011;

“The economic power of energy and the need to integrate it with energy policy”, Energy Policy 86, 833-843 (2015);

“The Impact of Entropy Production and Emission Mitigation on Economic Growth”, Entropy 18, 75 (2016).

Energie und Entropie

- **Energie = Exergie + Anergie** = konstant, 1. HS. **Exergie** ist die Fähigkeit, **Veränderungen** in der Welt zu bewirken. Sie ist gespeichert in Materie und Kraftfeldern. Fossile, nukleare und erneuerbare Energien sind zu $\approx 100\%$ Exergie. **Anergie**, z. B. an die Umgebung abgegebene Wärme, ist nutzlos. **Energieumwandlung** liefert die Arbeit, die die Lebensprozesse und die Produktion von Gütern und Dienstleistungen antreibt.
- **Entropie** ist das physikalische Maß für **Unordnung**. **Entropieproduktion** ist immer mit Energieumwandlung verkoppelt, 2. HS. Sie
 - 1) **zerstört Exergie** und erhöht nutzlose Anergie. → **absolute Grenzen für Steigerungen der Energieeffizienz**.
 - 2) führt zu **Emissionen** von Wärme und Teilchen, → Änderung der Energieflüsse und Stoffkonzentrationen in der Biosphäre, → **Anpassungsdefizite** → ökologische Probleme, z.B. **anthropogener Treibhauseffekt**, Hitzemauer.

Entropie ($S = k_B \ln \Omega$) und Unordnung

Vielen Naturwissenschaftlern wird die Entropie nie so richtig vertraut:

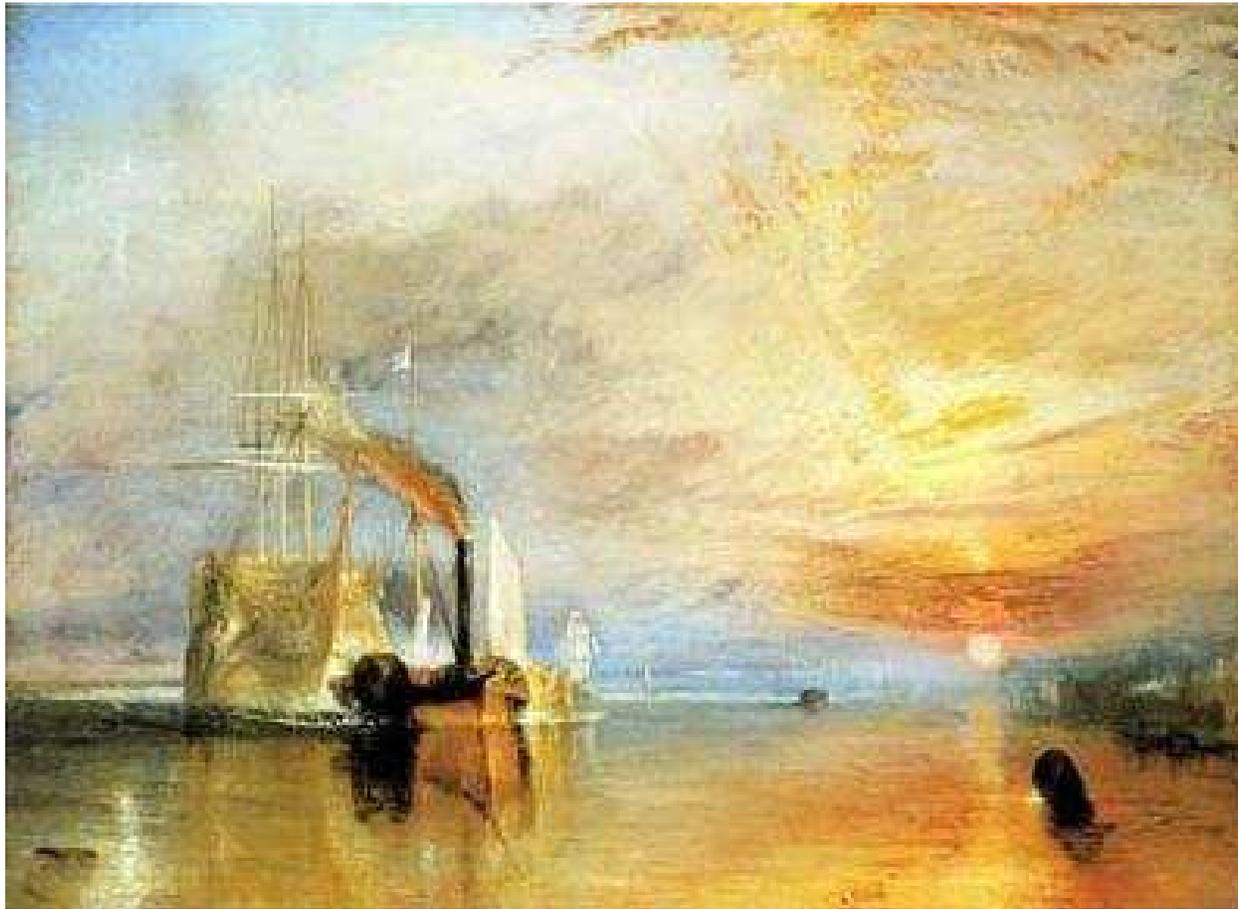
Die Zustandsfunktion Entropie -
statistisch seit Boltzmanns Genie.

Ich zähl' Komplexionen,
tu Stirling nicht schonen.
Doch richtig versteh' ich sie nie!



Industr. Revolution: Macht und Emissionen

- Energetische Menschheitsepochen: 1. Jäger und Sammler: Horde.
2. Bauern und Handwerker: agrarische Feudalgesellschaft.
3. Wärmekraftmaschinen und Transistoren: Demokratischer/totalitärer Kapitalismus. 1776



“The Fighting Temeraire” (William Turner, 1833)

Energiesklaven

Energiesklave: Diejenige Primärenergiemenge, die, eingespeist in eine Energieumwandlungsanlage, eine Energiedienstleistung erbringt, die rein rechnerisch der eines Schwerstarbeiters mit einem täglichen Arbeitskalorien-Bedarf von 2500 kcal (= 2.9 kWh) entspricht.

Energiesklaven

Energiesklave: Diejenige Primärenergiemenge, die, eingespeist in eine Energieumwandlungsanlage, eine Energiedienstleistung erbringt, die rein rechnerisch der eines Schwerstarbeiters mit einem täglichen Arbeitskalorien-Bedarf von 2500 kcal (= 2.9 kWh) entspricht.

Primärenergiebedarf pro Person und Tag
und **Energiesklaven (ES):**

Vor einer Million Jahren: 2 kWh (Sammler ohne Feuer).

Vor 100 000 Jahren: 6 kWh (Jäger und Sammler mit Feuer), \approx **1 ES.**

Vor 7000 Jahren : 14 kWh (einfache Agrargesellschaft), \approx **4 ES.**

AD 1400: 30 kWh (Westeuropa), \approx **9 ES.** Welt: 400 Mio. Menschen

AD 1900: 89 kWh (Deutschland), \approx **30 ES.**

AD 1995:

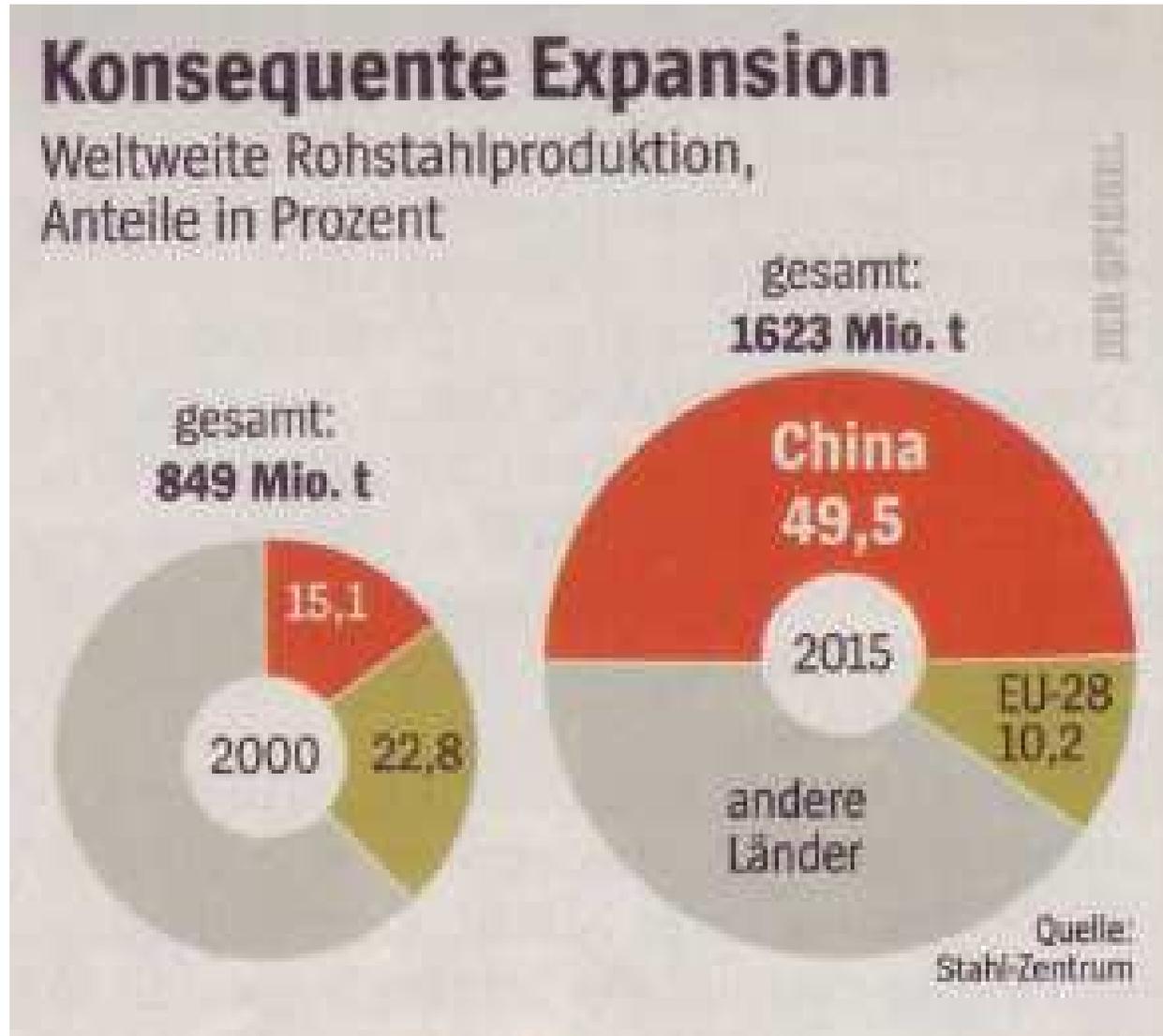
133 kWh (Deutschland), \approx **45 ES,** 270 kWh (USA), \approx **92 ES;**

Welt-Mittel 46 kWh, \approx **15 ES;**

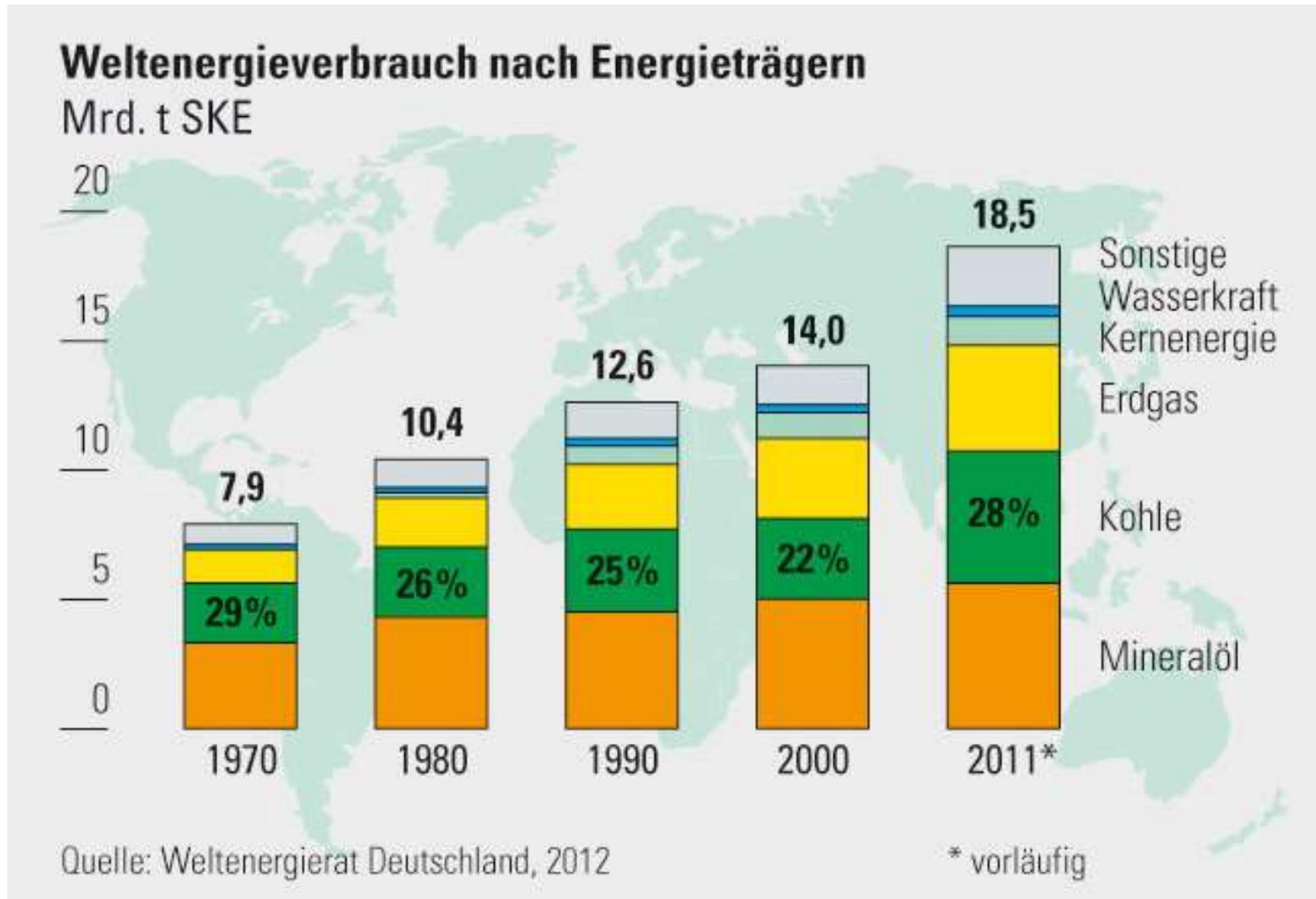
Entwicklungsländer 20 kWh, \approx **6 ES .**

AD 2011: Welt-Mittel 59 kWh, \approx **19 ES.** Welt: 7000 Mio. Menschen

Industrielle Expansion: Stahlproduktion



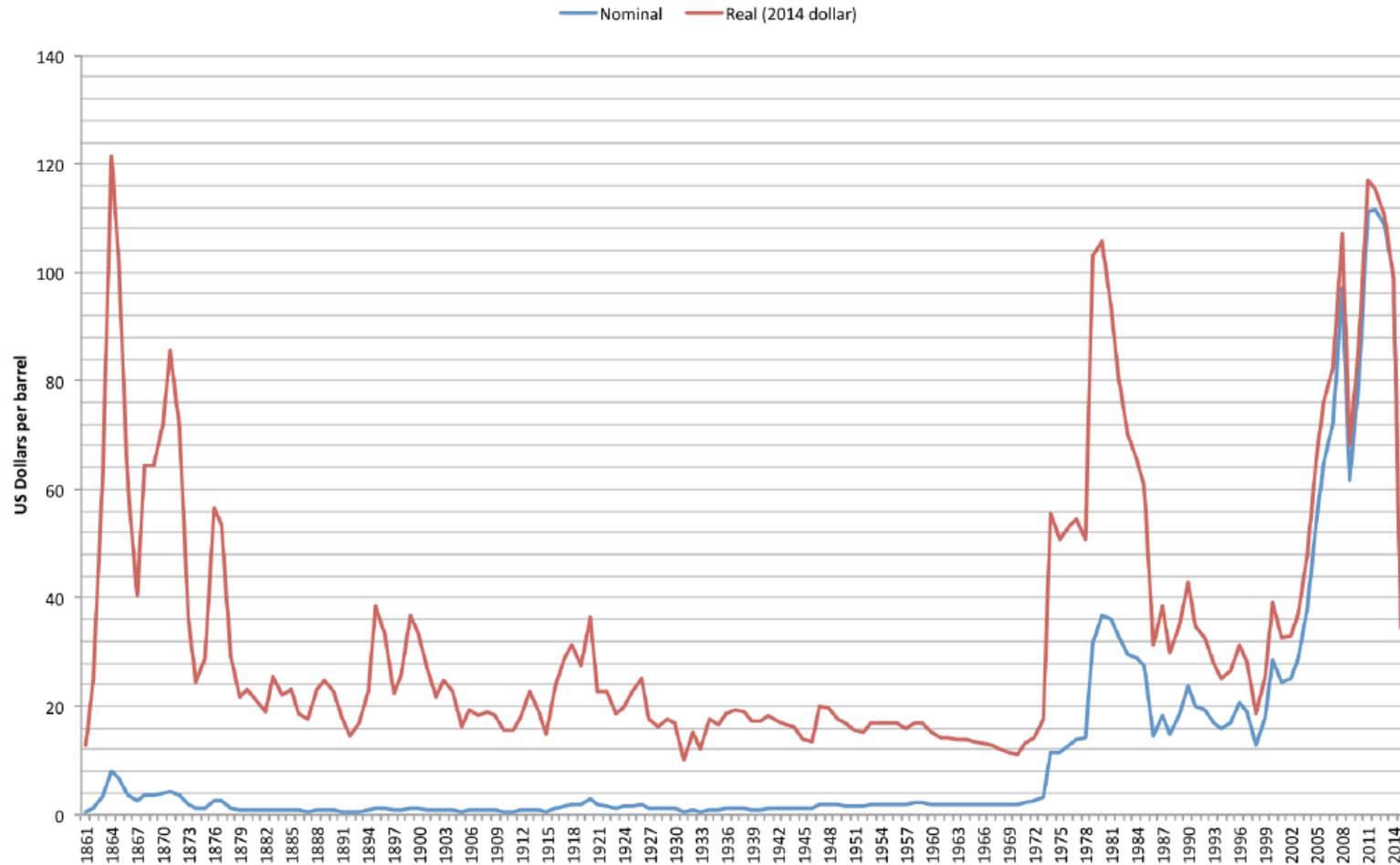
Wachstum des Weltenergieverbrauchs



18,5 Mrd. t SKE/ Jahr = $1.72 \cdot 10^{13} \text{W}$

Ölpreisschocks → Energieökonomie

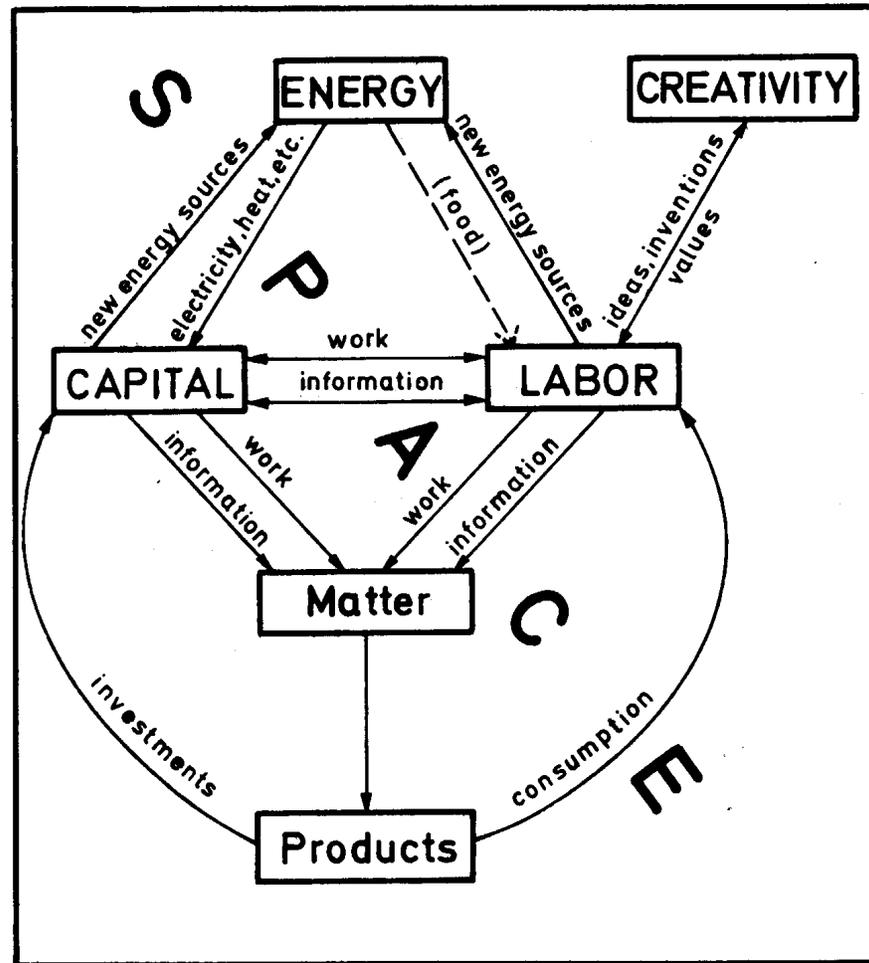
CRUDE OIL PRICES SINCE 1861



Preisentwicklung eines Barrels Rohöl von 1861 bis 2015; in 2014 US Dollars (*obere Kurve*) und nicht-inflationsbereinigt (*untere Kurve*).

Öl-Preis-Schocks 1973-1975, 1978-1981; negativer: 1981-1986; Instabilitäten seit 2000. Quelle: BP-Daten, Graphik: Jashuah (Wikipedia)

Produktionsfaktoren



Kapital: Alle Energieumwandlungsanlagen und Informationsprozessoren samt der zu ihrem Schutz und Betrieb benötigten Gebäude und Installationen.

KLEC-Modell

Structural Change and Economic Dynamics **13** 415-433 (2002)

Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics **35** 145-179 (2010)

New Journal of Physics **16** 125008 (2014)

Energy Policy **86** 833-843 (2015)

Wertschöpfung (Output) und Produktionsfaktoren (Inputs) zur Zeit t , normiert auf ihre Größen Y_0, K_0, L_0, E_0 im Basisjahr t_0 :

$y(t) = Y(t)/Y_0$ (normierte Wertschöpfung),

$k(t) = K(t)/K_0$ (normierter Kapitalstock),

$l(t) = L(t)/L_0$ (normierte Arbeit),

$e(t) = E(t)/E_0$ (normierter Energieeinsatz).

Die Kreativität verursacht eine explizite Zeitabhängigkeit der

Produktionsfunktion $y = y(k, l, e; t)$,

die Produktion und Wirtschaftswachstum beschreibt.

Wachstumsgleichung

Infinitesimal kleine Änderungen von Wertschöpfung, dy , Kapital, dk , Arbeit, dl , Energieeinsatz de und Zeit, dt werden verknüpft durch die **Wachstumsgleichung**, (die man aus dem totalen Differential der Produktionsfunktion erhält):

$$\frac{dy}{y} = \alpha \frac{dk}{k} + \beta \frac{dl}{l} + \gamma \frac{de}{e} + \delta \frac{dt}{t - t_0} \quad .$$

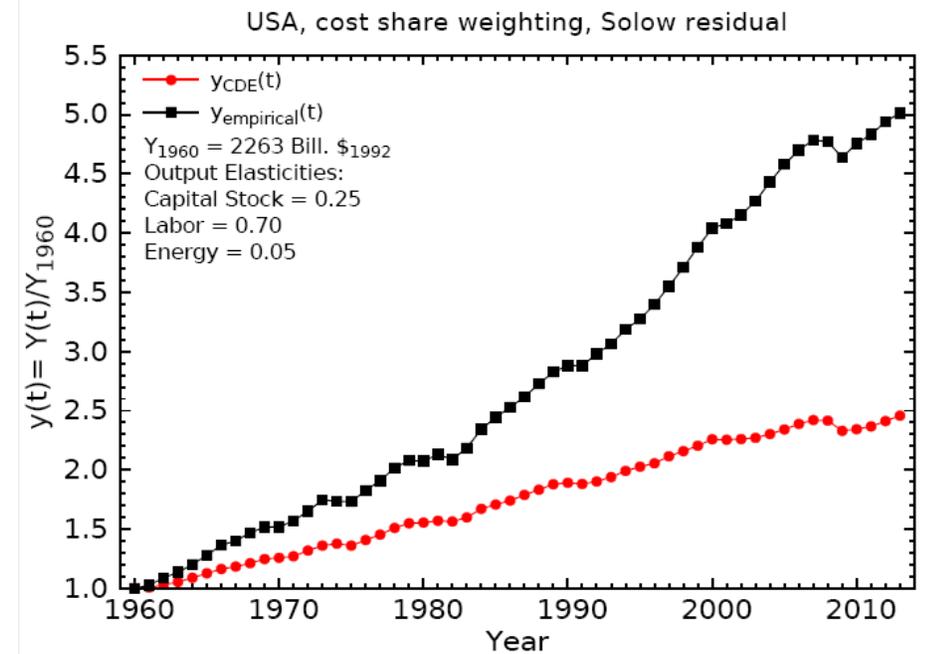
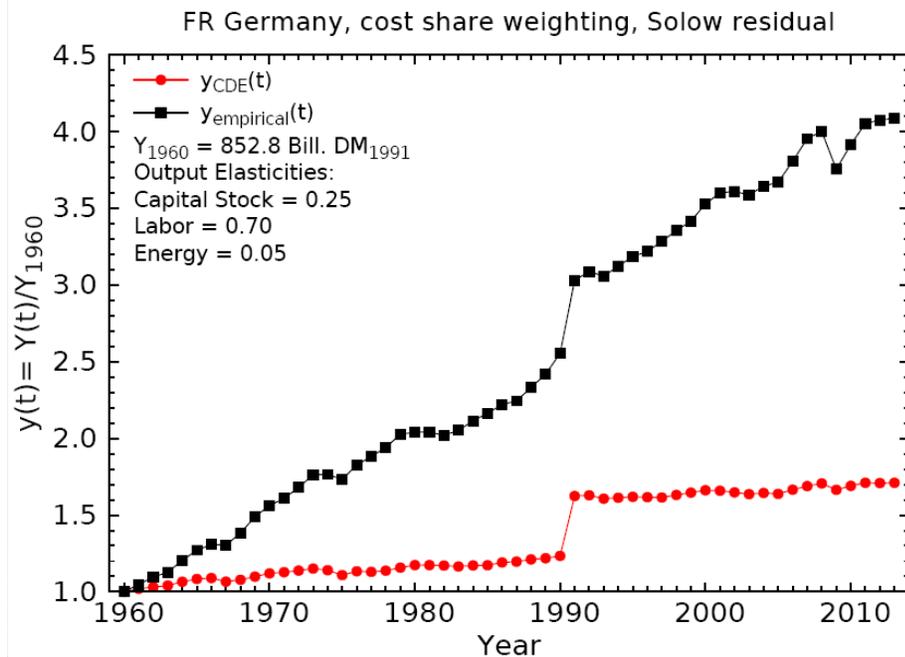
Die Produktionselastizitäten (PE)

$$\alpha(k, l, e) \equiv \frac{k}{y} \frac{\partial y}{\partial k}, \quad \beta(k, l, e) \equiv \frac{l}{y} \frac{\partial y}{\partial l}, \quad \gamma(k, l, e) \equiv \frac{e}{y} \frac{\partial y}{\partial e}, \quad \delta \equiv \frac{t - t_0}{y} \frac{\partial y}{\partial t}$$

geben die Gewichte an, mit denen die relativen Änderungen von **Kapital** k ($= K/K_0$), **Arbeit** l ($= L/L_0$), **Energie** e ($= E/E_0$) sowie der Zeit t zur relativen Änderung der **Wertschöpfung** y ($= Y/Y_0$) beitragen. In diesem Sinne **messen** sie die **Produktionsmächtigkeiten** von Kapital, Arbeit, Energie und Kreativität.

Lehrbuch-Ökonomie: $\alpha \approx 0,25$, $\beta \approx 0,7$, $\gamma \approx 0,05$, + **techn. Fortschritt**

Solow Residuen



Die Differenz zwischen empirischer Wertschöpfung (schwarz) und theoretischer Wertschöpfung **rot** (\equiv **Solow Residuum**) bei Gewichtung der Produktionsfaktoren mit ihren Faktorkostenanteilen wird von der Lehrbuch-Ökonomie dem **“technischen Fortschritt”** zugeschrieben.

Daten: Florian Weiser, EWI Köln. Rechnung und Grafik: Tobias Winkler, Uni Würzburg.

Produktionselastizitäten und -funktionen

Gemischte 2. Ableitungen der Produktionsfunktion müssen gleich sein. → Partielle Differentialgleichungen für α, β, γ . Deren Lösungen sind u.a.

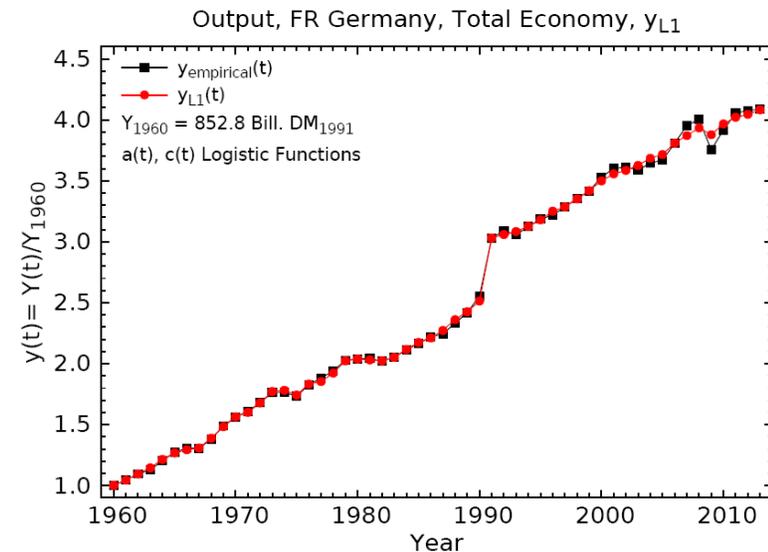
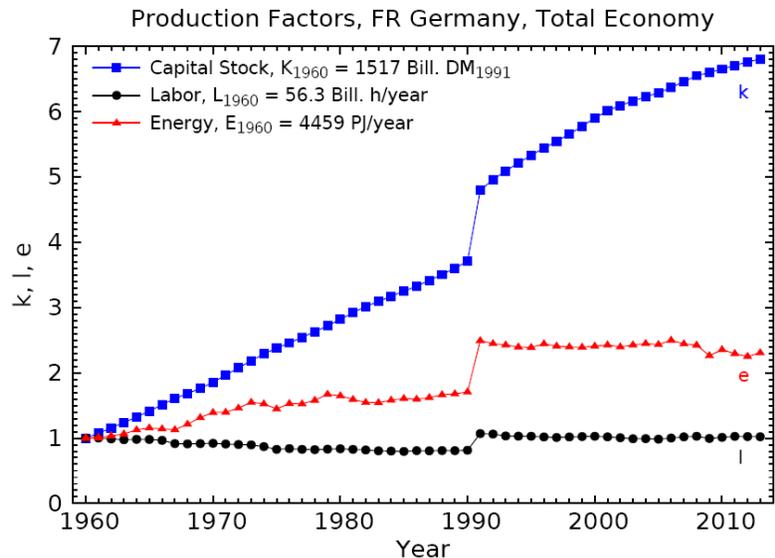
- die Konstanten $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$. → Energieabhängige Cobb-Douglas-Produktionsfunktion $y_{CDE} = y_0 k^{\alpha_0} l^{\beta_0} e^{\gamma_0}$,
- einfachste faktorabhängige Produktionselastizitäten $\alpha = a(l + e)/k$ [→ 0 für $(l + e)/k \rightarrow 0$], $\beta = a(cl/e - l/k)$ [→ 0 für $k \rightarrow k_m, e \rightarrow ck_m$], $\gamma = 1 - \alpha - \beta$. →

LinEx-Produktionsfunktion:

$$y_{Lt} = y_0 e \exp \left[a \left(2 - \frac{l + e}{k} \right) + ac \left(\frac{l}{e} - 1 \right) \right].$$

$a(t)$ = Kapital-Effizienz-Parameter, $c(t)$ = Parameter des Energiebedarfs, und y_0 werden bestimmt, indem die LinEx-Funktion an die empirischen Zeitreihen der Wertschöpfung mittels SSE-Minimierung angepasst wird, unter Beachtung der Nebenbedingungen: $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, $\gamma \geq 0$.

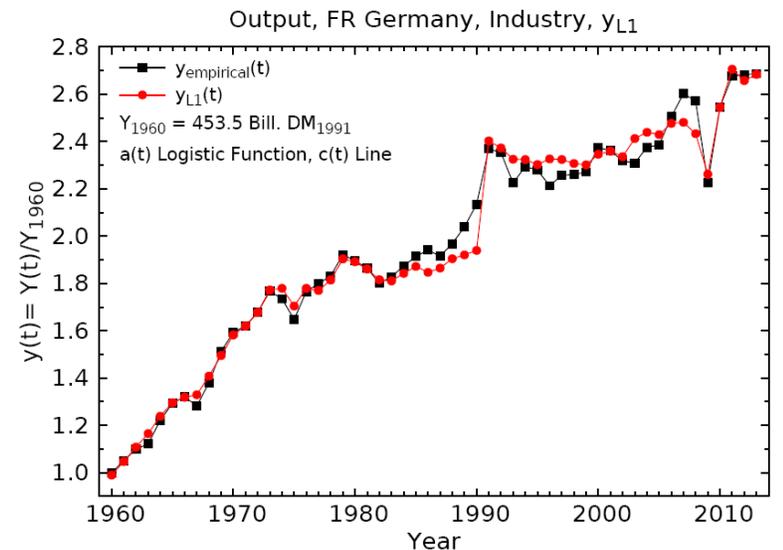
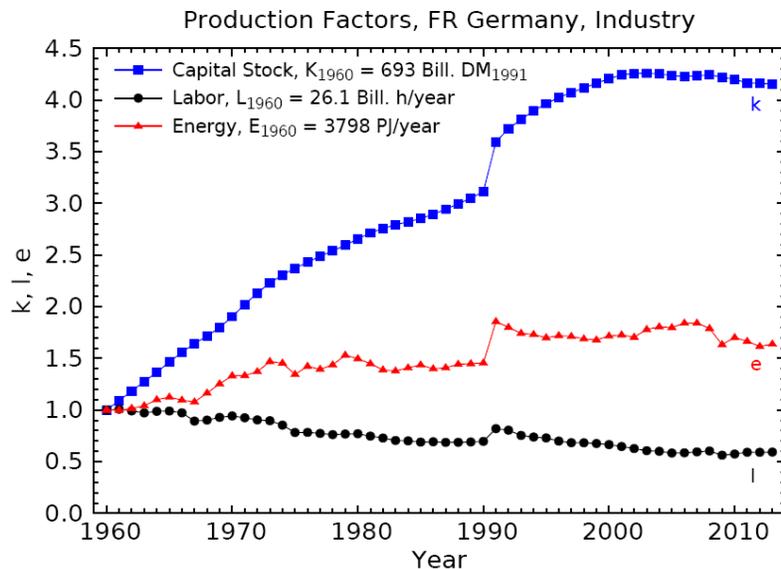
BR Deutschland, Gesamtwirtschaft



Links: Empirische Entwicklung von Kapital, Arbeit und Energie.
Rechts: Wachstum der Wertschöpfung; schwarz: empirisch, rot:
mit LinEx-Funktion berechnet.

Daten: Florian Weiser, EWI Köln. Rechnung und Grafik: Tobias
Winkler, Uni Würzburg.

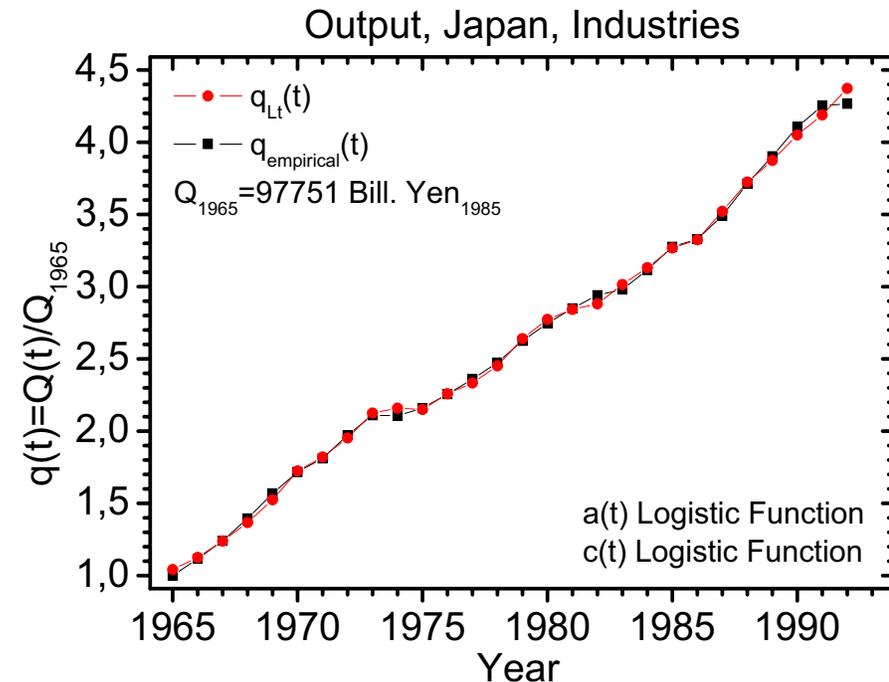
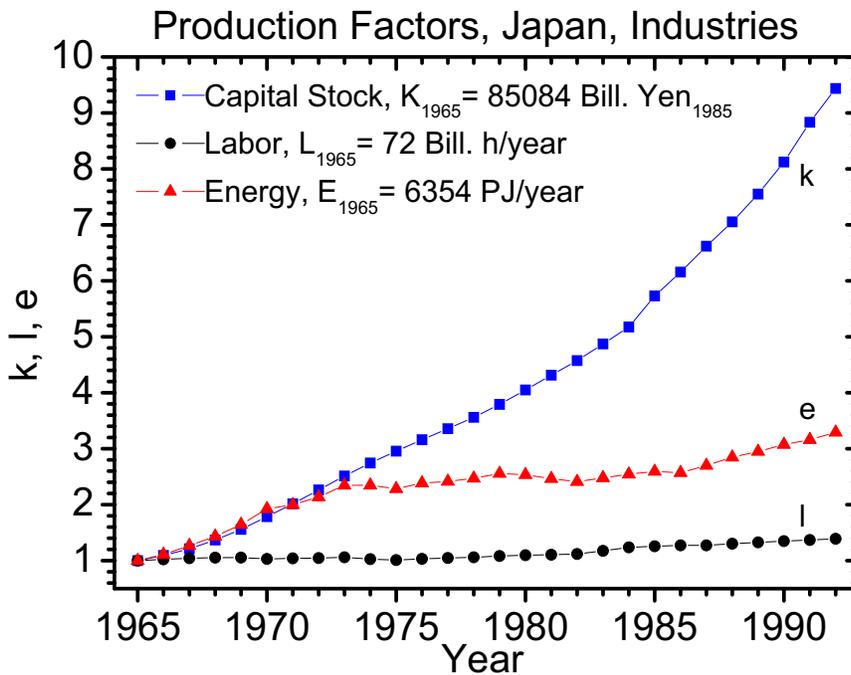
BR Deutschland, Warenprod. Gewerbe



Links: Empirische Entwicklung von Kapital, Arbeit und Energie.
Rechts: Wachstum der Wertschöpfung.
Schwarz: empirisch. Rot: mit LinEx-Funktion berechnet.

Daten: Florian Weiser, EWI Köln. Rechnung und Grafik: Tobias Winkler, Uni Würzburg.

Japan, Industries \approx Gesamtwirtschaft

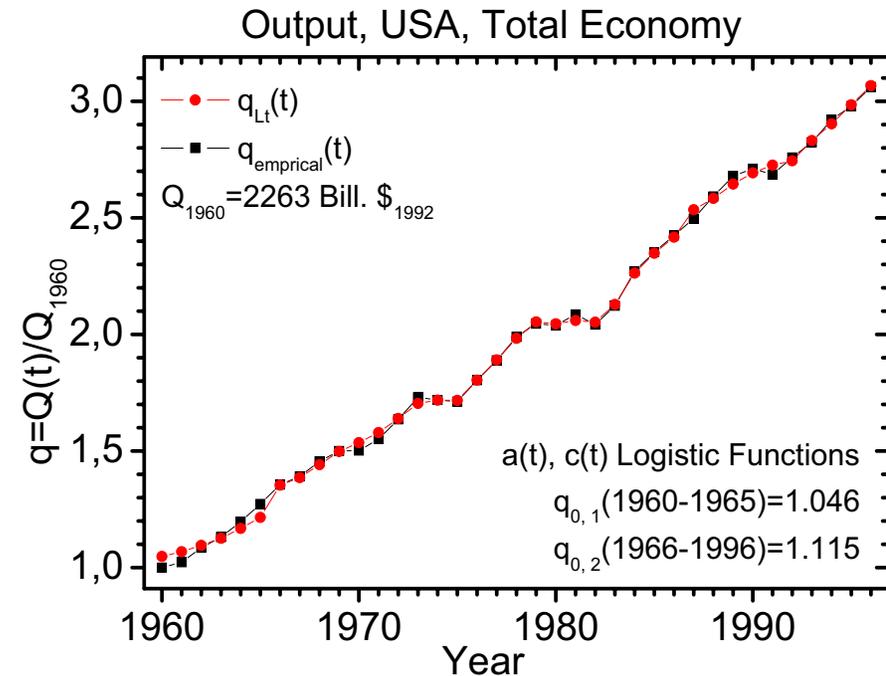
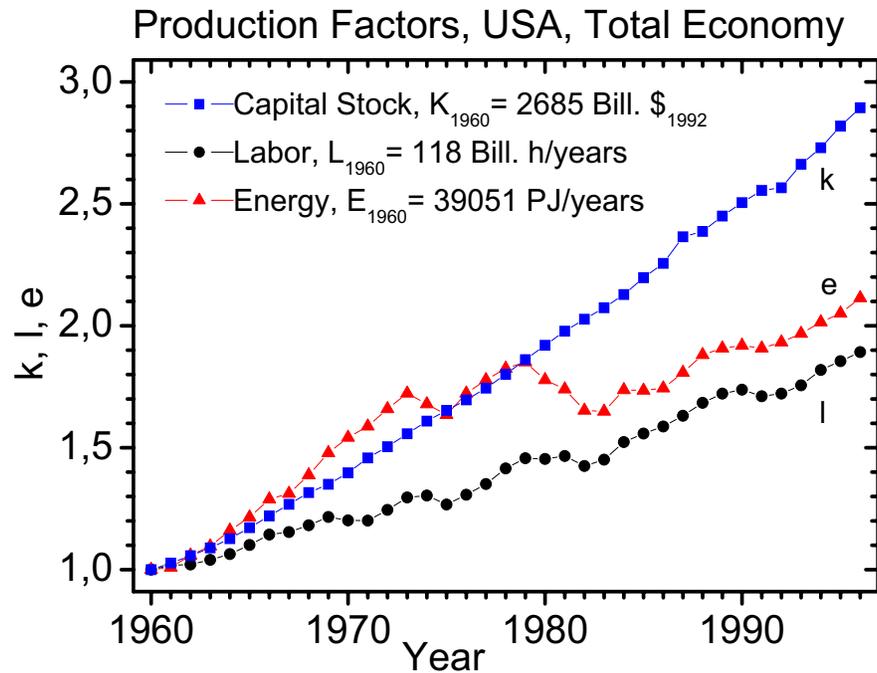


Links: Empirische Entwicklung von Kapital, Arbeit und Energie.

Rechts: Wachstum der Wertschöpfung.

Schwarz: empirisch. Rot: mit LinEx-Funktion berechnet.

USA, Gesamtwirtschaft



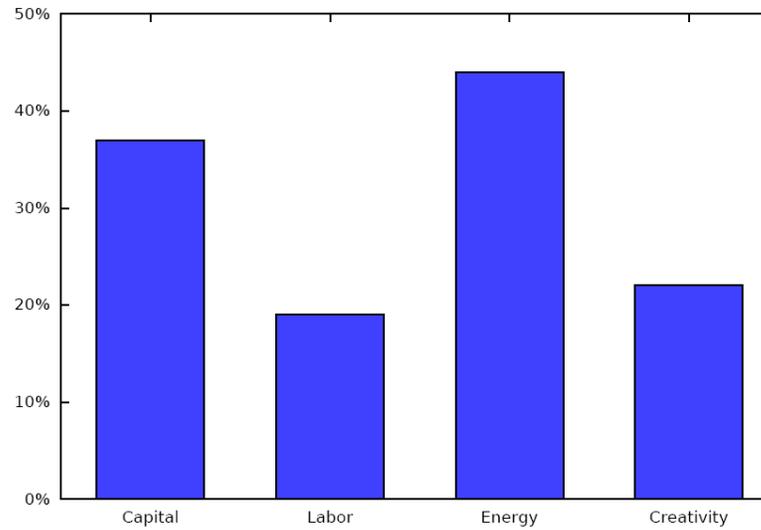
Links: Empirische Entwicklung von Kapital, Arbeit und Energie.

Rechts: Wachstum der Wertschöpfung.

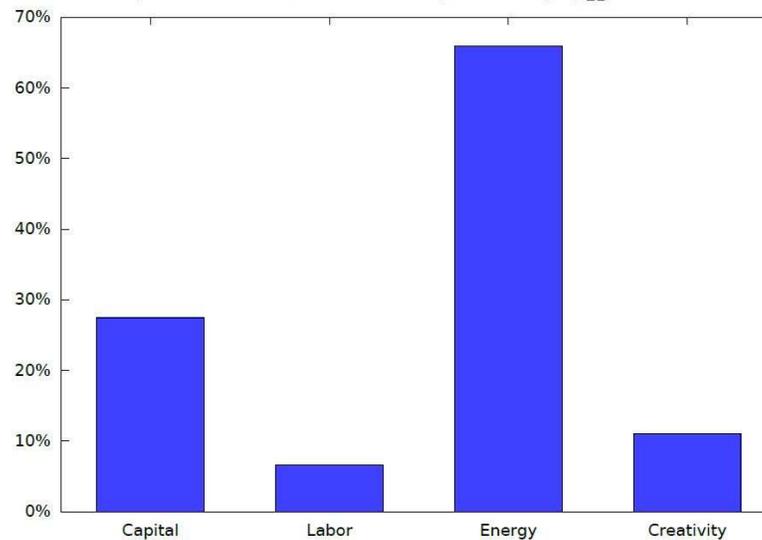
Schwarz: empirisch. Rot: mit LinEx-Funktion berechnet.

Produktionselastizitäten: Deutschland

Output Elasticities, FR Germany, Total Economy, y_{L1} , 1960-2013

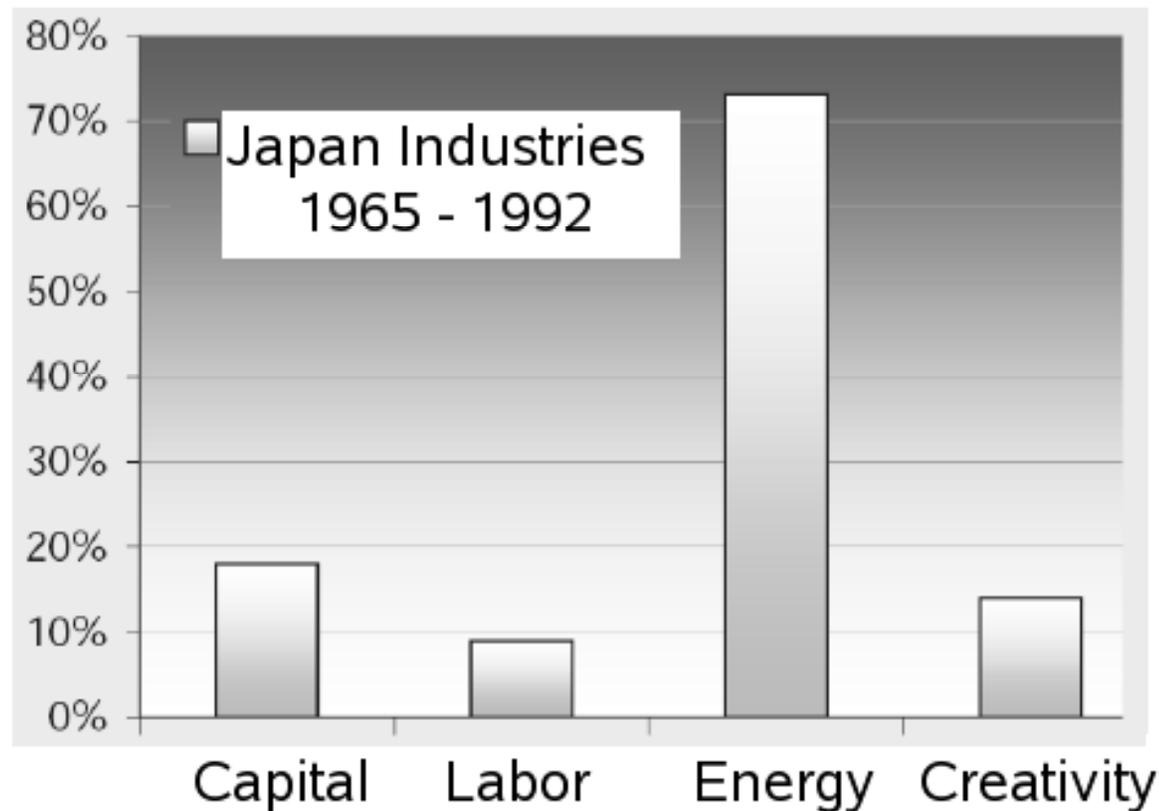


Output Elasticities, FR Germany, Industry, y_{L1} , 1960-2013



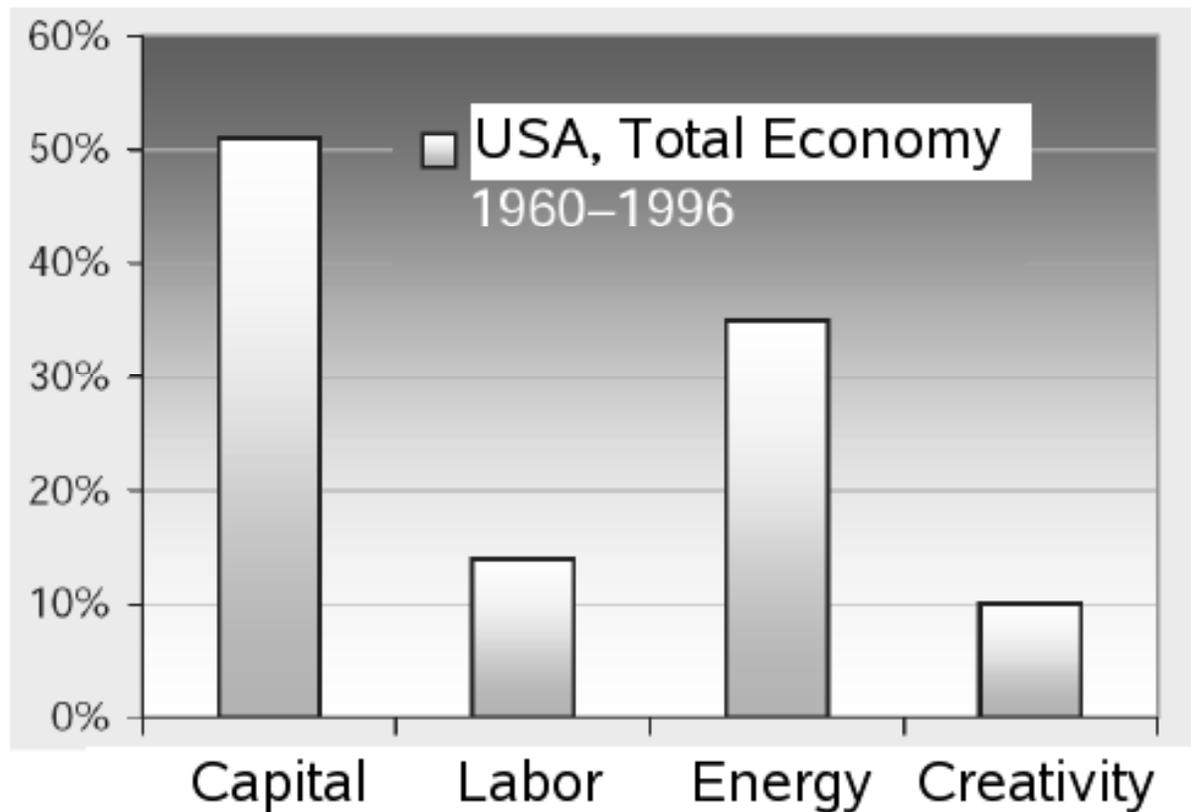
Zeitliche Mittelwerte der Produktionselastizitäten in der Gesamtwirtschaft (oben) und im industriellen Sektor “Warenproduzierendes Gewerbe” der BR Deutschland (unten)

Produktionselastizitäten: Japan



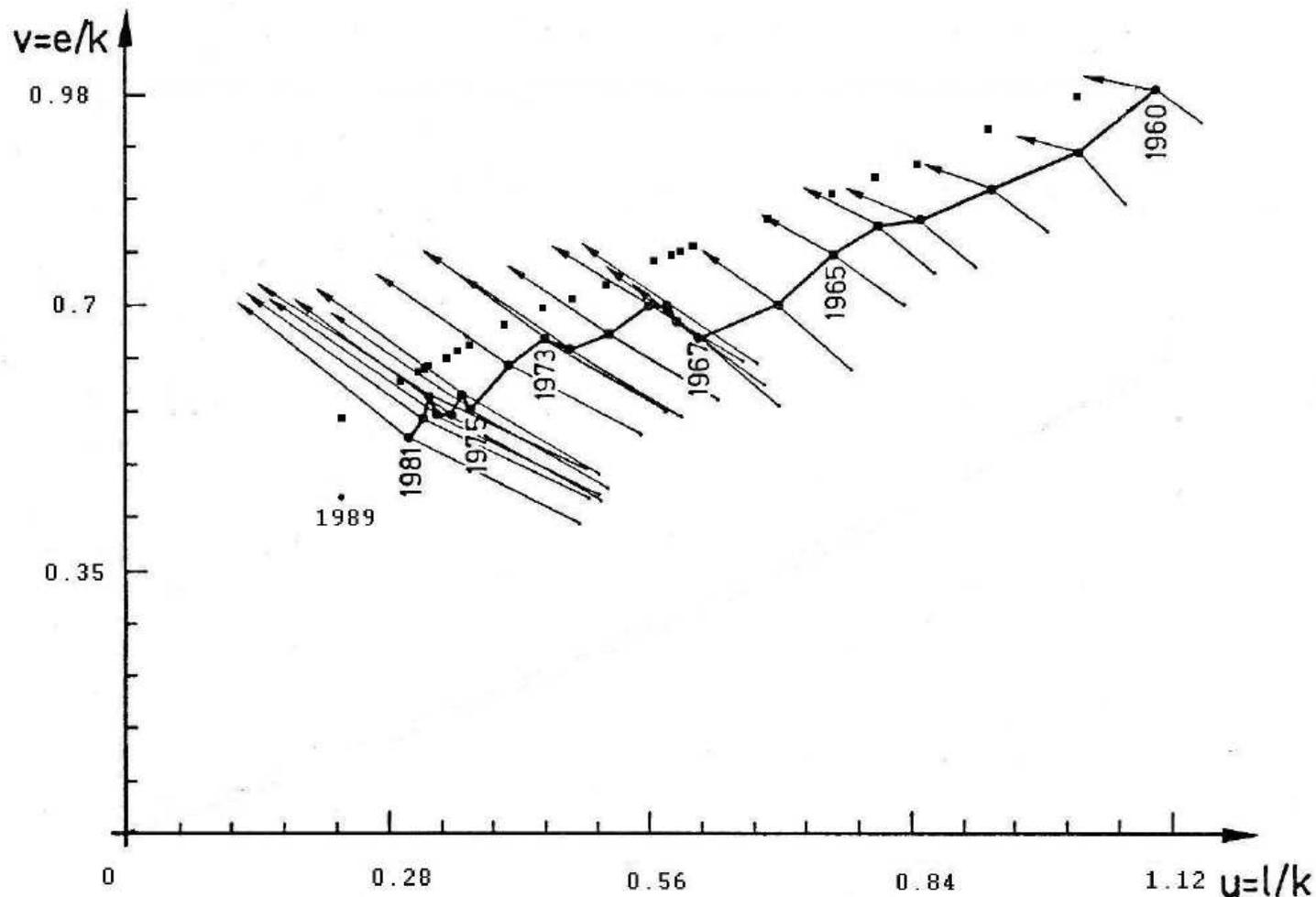
Time-averaged output elasticities in the Japanese sector “Industries”, which produces about 90% of Japanese GDP.

Produktionselastizitäten: USA



Time-averaged output elasticities in the total US economy.

Wachstum entlang Beschränkungsbarriere



Pfad des deutschen industriellen Sektors (GWG) im Kostengebirge, projiziert auf die l/k - e/k Ebene. (Quadrate: Beschränkungsbarriere bei Auslastungsgrad $\eta = 1$, Pfeile/Linien: negative Kostengradienten.)

Entropieproduktion und Emissionen

Entropieproduktionsdichte im Volumen V über einem Territorium, in dem N verschiedene Teilchensorten k aus Verbrennungsprozessen vorliegen:

$$\sigma_{S,dis}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{j}_Q \nabla(1/T) + \sum_{k=1}^N \mathbf{j}_k [-\nabla(\mu_k/T) + \mathbf{f}_k/T] > 0.$$

\mathbf{j}_Q = **Wärme**stromdichte, T = Temperatur, ∇ : Gradient,

\mathbf{j}_k = **Teilchen**stromdichte, μ_k = chemisches Potential,

\mathbf{f}_k = äußere Kräfte auf Teilchen k .

Emissionsbelastung der Umwelt

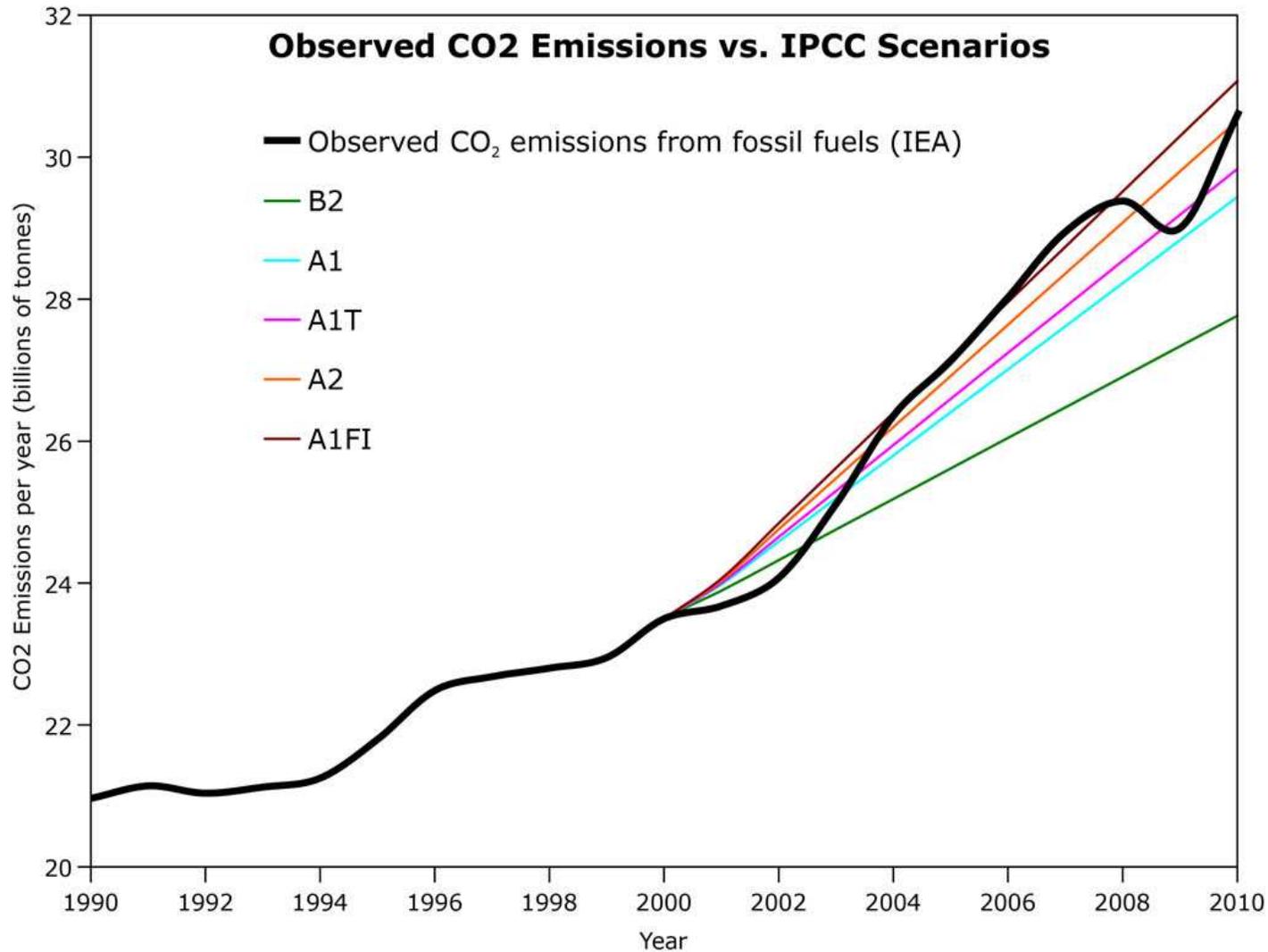
thermisch: $p_0 \equiv \frac{1}{V} \int_V \mathbf{j}_Q \nabla \frac{1}{T} dV$,

durch Teilchen der Sorte k : $p_{i=k=1\dots N} \equiv \frac{1}{V} \int_V \mathbf{j}_i [-\nabla(\mu_i/T) + \mathbf{f}_i/T] dV$.

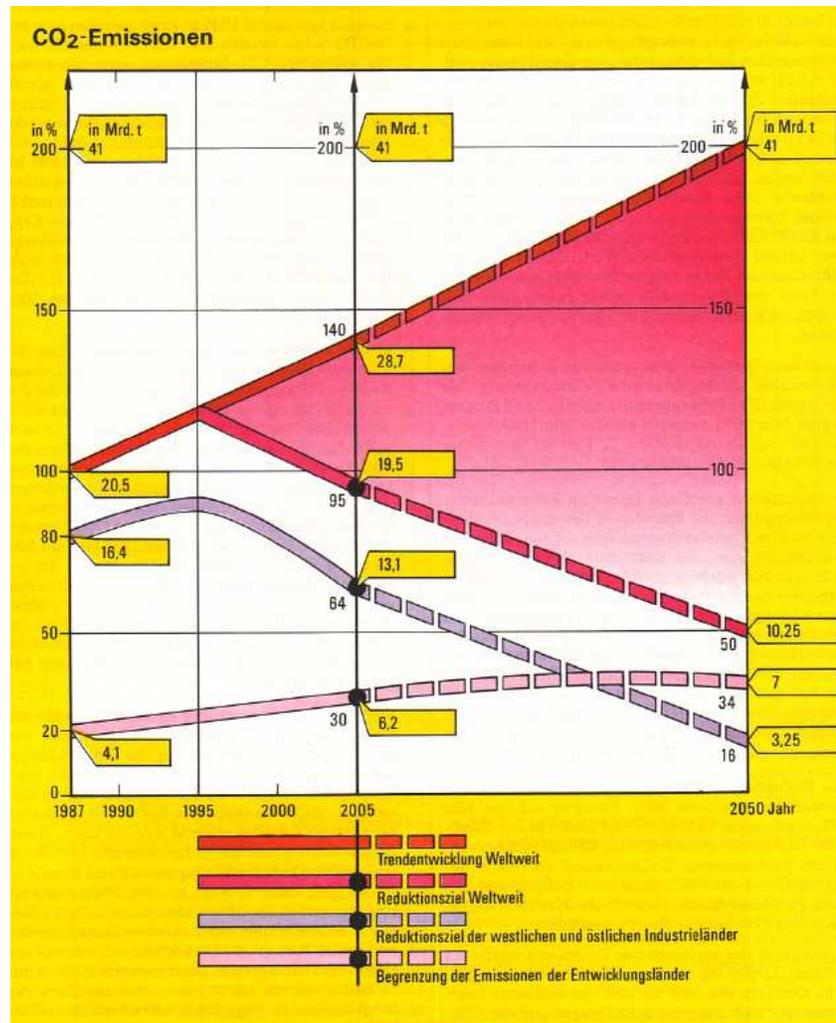
Pollutionsfunktion, mit kritischem Grenzwert p_{Ci} und natürlicher Reinigungsrate p_{0i} , modelliert Reaktion der Gesellschaft auf Emission vom Typ i :

$$\wp(p_i) = \frac{\exp[-p_{Ci}/p_{0i}] + 1}{\exp[(p_i - p_{Ci})/p_{0i}] + 1}, \quad i = 0, \dots, N.$$

Globale, energiebedingte CO₂-Emissionen



Klimaschutz: Emissionsminderung



Vorschlag der Enquetekommission des Deutschen Bundestages “Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre” zur Reduzierung der jährlichen CO₂ Emissionen, so dass CO₂ Konzentration nicht über 560 ppm steigt (Verdopplung gegenüber vorindustriellen 280 ppm) und die globale Temperaturerhöhung auf 2 Grad Celsius begrenzt bleibt.

Emissionsminderung und Wertschöpfung

Entropy 18 75 (2016)

Gesamt-Wertschöpfung = Summe aller monetär gemessenen ökonomischen Aktivitäten zur Produktion der von den VGR erfassten Güter und Dienstleistungen, z. B. Bruttoinlandsprodukt (BIP); wird beschrieben durch **Produktionsfunktion**

$$Y(K, L, E; t) = Y_0(t) \exp \left\{ \int_{K_0, L_0, E_0}^{K, L, E} \left[\alpha \frac{dK}{K} + \beta \frac{dL}{L} + \gamma \frac{dE}{E} \right] ds \right\}.$$

Verlust $\Lambda_m(t)$ = monetäre Wert aller Güter und Dienstleistungen, die zur Emissionsminderung der Art m eingesetzt werden.

$Y_C(K, L, E; t)$, “Konventionelle” Wertschöpfung, ist die Summe aller Güter und Dienstleistungen, die *nicht* zur Emissionsminderung eingesetzt werden:

$$Y_C(K, L, E; t) \equiv Y(K, L, E; t) - \sum_m \Lambda_m(t).$$

Produktionsfunktion konv. Wertschöpfung

$$Y_C(K, L, E; t) = Y_{C0}(t) \exp \left\{ \int_{K_0, L_0, E_0}^{K, L, E} \left[\alpha_p \frac{dK}{K} + \beta_p \frac{dL}{L} + \gamma_p \frac{dE}{E} \right] ds \right\}.$$

$\alpha_p, \beta_p, \gamma_p$ abhängig von

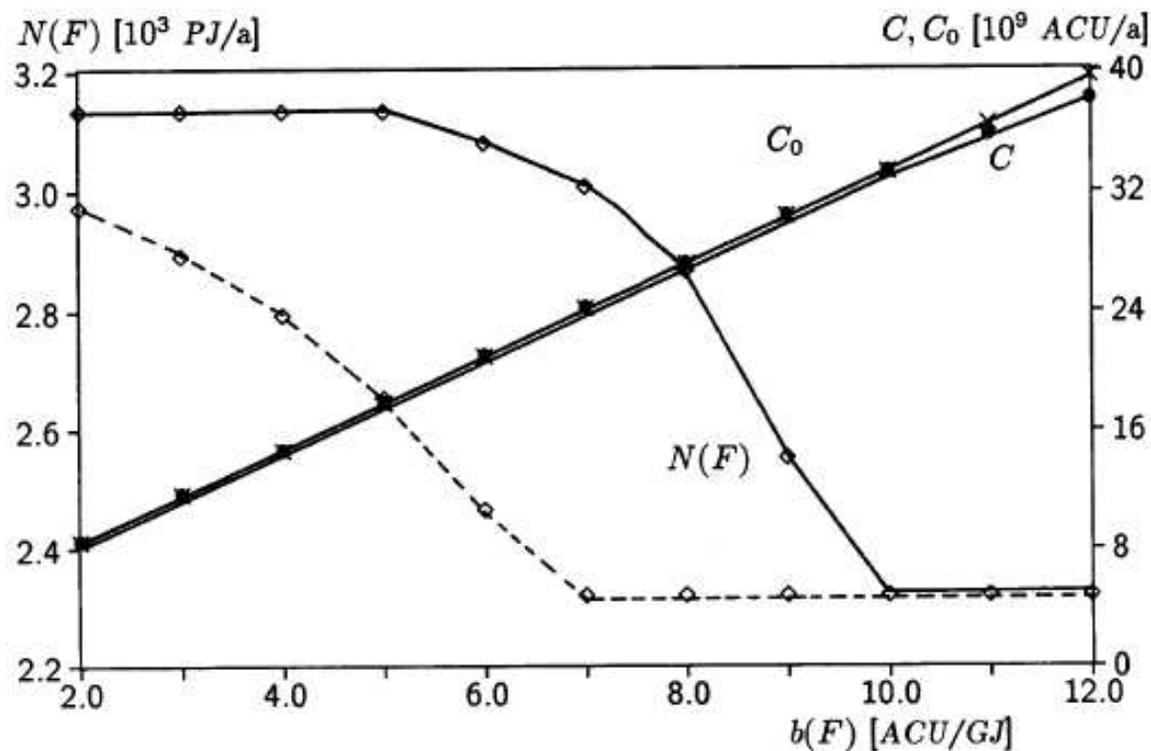
$$\varphi(p_i) = \frac{\exp[-p_{Ci}/p_{0i}] + 1}{\exp[(p_i - p_{Ci})/p_{0i}] + 1}, \quad i = 0, \dots, N.$$

Einfachste Näherung für Emissionsminderung mittels **Steigerung der Energieeffizienz** des Produktionssystems durch Wärmerückgewinnung:

$$\alpha_p = \phi_{\{p_i\}} \alpha, \quad \beta_p = \phi_{\{p_i\}} \beta, \quad \gamma_p = \phi_{\{p_i\}} \gamma; \quad \phi_{\{p_i\}} < 1 \quad .$$

Wärmerückgewinnung (WRG)

Energie- und Kostenoptimierung der WRG. **Unveränderte** industrielle Energiedienstleistung von Prozesswärme und Elektrizität in alter BRD. Techniken: Wärmetauscher-Netzwerke, Wärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplung. Kostenobergrenzen: $C \leq C_0; 1, 1C_0$.



$N(F)$ = jährlich benötigte Brennstoffmenge F , (C, C_0) =jährliche Kosten, diese Menge $N(F)$ (mit, ohne) WRG zur Verfügung zu stellen, $b(F)$ = Preis einer Brennstoff-Einheit, $4 \text{ ACU/GJ} \approx 24\$_{1986}/(\text{Barrel Öl})$.

Wachstumsminderung

Ein Szenario: Ab 1986 Verfünffachung des Brennstoff-Preises von 2 auf 10 ACU/GJ durch Energiebesteuerung →

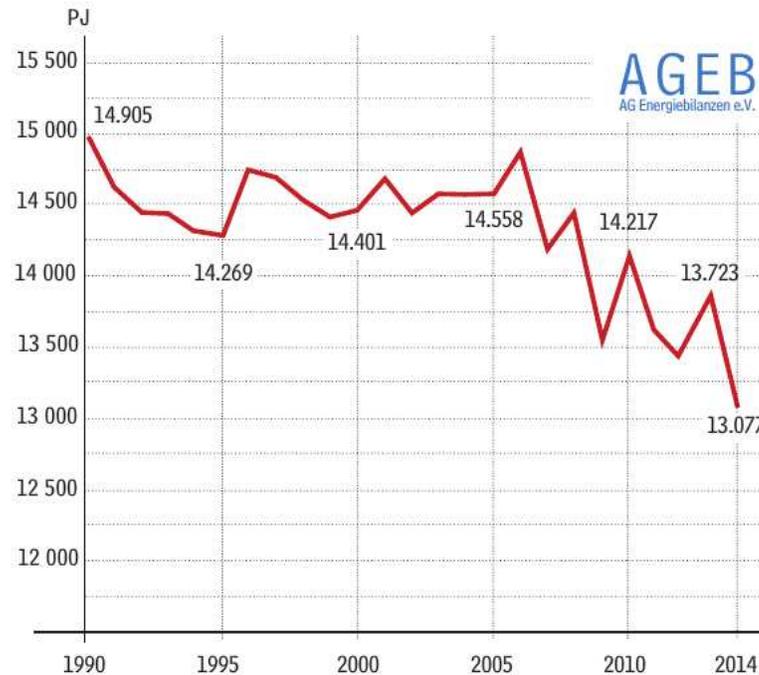
Reduzierung der jährlich industriell benötigten Brennstoffmenge von $N(F) = 3,15 \cdot 10^9$ PJ/a auf $N(F) = 2,3 \cdot 10^9$ PJ/a, also um $\Delta N(F) = 0,85 \cdot 10^9$ PJ/a oder 27%. → 27%ige Emissionsminderung.

1. Erhöhung der jährlichen Systemkosten (= Verlust Λ_{WRG}) um $\Delta C_{WRG} = 25 \cdot 10^9$ \$₁₉₈₆/Jahr \approx 6% der 1986er bundesdeutschen industriellen Wertschöpfung in Höhe von $880 \cdot 10^9$ DM \approx $440 \cdot 10^9$ \$₁₉₈₆.
2. Reduzierung aller Produktionselastizitäten um den Faktor $\phi_{\{p_i\}} \approx 0,91$. → Minderung des konventionellen Wachstums um 9%.

Energiewende: Primärenergie

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs
in Deutschland 1990 - 2014

in Petajoule (PJ)



Prozentuale Anteile der Energieträger an deutscher Primärenergie

Jahr	Öl	Gas	Steinkohle	Braunkohle	Kernenergie	Erneuerbare
2010	33	22	12	11	11	9
2011	33	21	13	12	9	11
2013	33	22	13	12	8	11
2014	35	21	13	12	8	11

Energiewende: Spezifische Emissionen

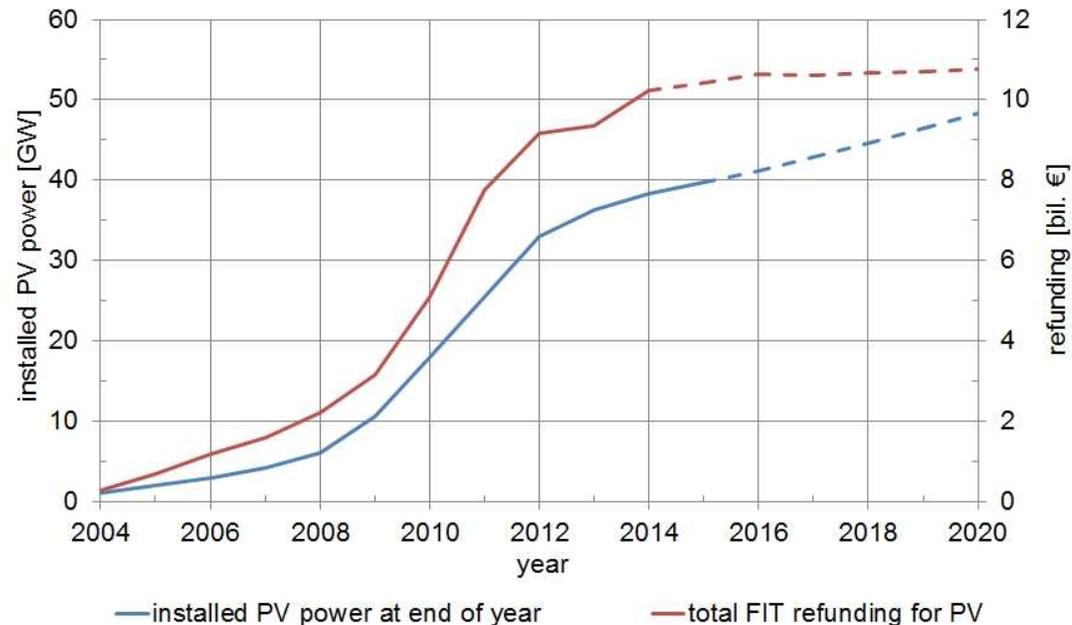
Prozentuale Anteile der Erneuerbaren an Stromerzeugung

Jahr	Gesamt	Wind	Biomasse	Wasser	Photovoltaik
2011	20	8	5	3	3
2013	23	8	7	3	5
2014	28	9	9	3	6

Spez. CO₂-Emissionen der Erzeugung, I_1 , und des Verbrauchs, I_2 , von Elektrizität in Deutschland (UBA 2014)

Year	1991	2000	2007	2010	2011	2012	2013	(2014)
I_1 , g/kWh	744	627	602	542	558	562	559	(609)
I_2 , g/kWh	745	623	623	559	564	586	595	

Photovoltaik: Gewinn und Verlust



Deutsche installierte PV-Kapazität (untere Kurve, linke Ordinate, GW) und gesamte jährliche PV-Vergütung gemäß EEG (obere Kurve, rechte Ordinate, Milliarden Euro). *H. Wirth, ISE*

Szenario A: Vergütung gemäß Abbildung.

Szenario B: 2011-Vergütung+ 2 Mrd. Euro jährlich. Deutsches BIP in 2014: 2740 Mrd. Euro; in 2018 (ab 2014 extrapoliert mit 0,9% Wachstumsrate): 2840 Euro.

Verluste konventioneller Wertschöpfung $\Lambda_{PVA/B}$ infolge PV-Vergütung gemäß Szenarien A und B: In 2014 $\Lambda_{PVA} = 9,7$ Mrd. Euro = **0,4%BIP, $\Lambda_{PVB} = 14$ Mrd. Euro = 0,5%BIP. In 2018 $\Lambda_{PVA} = 0,4$ %BIP, $\Lambda_{PVB} =$ **0,8%BIP**.**

Zusammenfassung

- Kapital, Arbeit, Energie und Kreativität schaffen den Wohlstand der Nationen. Technologische Beschränkungen verhindern bei der Gewinn- und Wohlfahrtsoptimierung die (neoklassische) Gleichheit von Produktionselastizitäten und Kostenanteilen .
- Das ökonomische Gewicht (Produktionselastizität) der Energie ist viel größer und das der Arbeit ist viel kleiner als die Anteile dieser Faktoren an den Kosten der Wertschöpfung.
- Dies führt zum **Rationalisierungsdruck**: (Fortschreitende Automation unter Ersetzung der teuren Arbeit durch billige Energie/Kapital-Kombinationen) und **Globalisierungsdruck**.
- Gekoppelt an Energieumwandlung ist Entropieproduktion, die mit umweltbelastenden Emissionen von Teilchen und Wärme verbunden ist. Ein Szenario der Emissionsminderung durch Wärmerückgewinnung ergibt eine Minderung des industriellen, konventionellen Wachstums in der BRD vor 1990 um rd. 9%. Die Einspeisevergütungen für Photovoltaik gemäß EEG führen gemäß Szenarien ab 2011 zu Verlusten des deutschen “konventionellen” BIP zwischen 0,4 und 0,8%.

Der Knackpunkt der Lehrbuch-Ökonomie

Lehrbuch-Annahme: Wirtschaft immer in einem Gleichgewicht, das aus Gewinn- oder Wohlfahrtsoptimierung *ohne technologische Beschränkungen* der Faktorkombinationen folgt.

Jedoch: die Faktoren $X_1 \equiv k$, $X_2 \equiv l$, $X_3 \equiv e$ unterliegen zwei **technologischen Beschränkungen:**

1) Kapitalauslastungsgrad $\eta(X_1, X_2, X_3) \leq 1$,

2) Automationsgrad $\rho(X_1, X_2, X_3) \leq \rho_T(t) \leq 1$.

Umwandlung (mit Schlupfvariablen) in Beschränkungsgleichungen

$f_a(X_1, X_2, X_3, t) = 0$. Damit ergibt Gewinn-Maximierung die 3 Gleichgewichtsbedingungen für die X_i :

$$\epsilon_i = \frac{X_i [p_i + s_i]}{\sum_{i=1}^N X_i [p_i + s_i]}, \quad i = 1, 2, 3; \quad s_i \equiv - \sum_a \frac{\mu_a}{\mu} \frac{\partial f_a}{\partial X_i}.$$

ϵ_i = Produktionselastizität (PE) des Faktors X_i , p_i = Marktpreis einer Einheit von X_i ; s_i = **Schattenpreis von X_i** . μ_a/μ = Quotienten der Lagrange-Multiplikatoren, hängen von den PE ab. → **Die PE können NICHT aus den Gleichgewichtsbedingungen bestimmt werden.**

Die Produktionselastizitäten werden aus Differentialgleichungen (\doteq Maxwell-Rel. in ThD) und deren technisch-ökonomischen Randbedingungen berechnet.

Integrabilitätsbedingungen

Die gemischten zweiten Ableitungen der Produktionsfunktion bezüglich k, l, e müssen gleich sein (und konstante Skalenerträge, $\alpha + \beta + \gamma = 1$, werden angenommen):

$$\begin{aligned}k \frac{\partial \alpha}{\partial k} + l \frac{\partial \alpha}{\partial l} + e \frac{\partial \alpha}{\partial e} &= 0, \\k \frac{\partial \beta}{\partial k} + l \frac{\partial \beta}{\partial l} + e \frac{\partial \beta}{\partial e} &= 0, \\l \frac{\partial \alpha}{\partial l} &= k \frac{\partial \beta}{\partial k}.\end{aligned}$$

Die allgemeinsten Lösungen dieser Gleichungen sind:

$$\alpha = A(l/k, e/k), \quad \beta = \int \frac{l}{k} \frac{\partial A}{\partial l} dk + J(l/e).$$