



GUTENBERG SCHOOL OF  
MANAGEMENT  
& ECONOMICS



Johannes-Gutenberg Universität Mainz  
Bachelor of Science in Wirtschaftswissenschaften

# Makroökonomik I

Wintersemester 2015/ 16

Marten Hillebrand (Vorlesung), Dennis Krieger und Tutoren (Tutorien)

[www.macro.economics.uni-mainz.de](http://www.macro.economics.uni-mainz.de)

January 12, 2016

## Part V

# Umweltökonomik

3 DS

## 16 Die zentralen Fragestellungen

### 16.1 Fakten

#### 16.1.1 Ökonomie und die Umwelt

- Die Diskussion um Umweltverschmutzung ist fast so alt wie die Menschheitsgeschichte
- Ab dem ersten Moment der Energieumwandlung (Verwendung von Feuer) entstanden Emissionen (Abgase, Abwasser, Lärm, Licht) mit der entsprechenden Belastung von Luft, Wasser und Boden
- Belastung mag
  - ein Problem sein an sich oder
  - negative Effekte auf Menschheit haben (direkt oder über Nahrungskette)

- Politische Bedeutung gewann die Idee der Umwelterhaltung in den 1970ern
  - Limits to growth (Club of Rome, 1972)
  - Saurer Regen
  - Anti-Atomkraft-Bewegung
  - Entstehen von politischen Bewegungen und Parteien (Greenpeace, 1971, Die Grünen, 1980)

- Club of Rome (1972) Limits to growth

“Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht“

- Erste umfassende Kritik am exponentiellen Wirtschaftswachstum

### 16.1.2 Die aktuelle Diskussion

- Weltklimaberichte
  - Werden seit 1990 erstellt vom Weltklimarat IPCC ('Intergovernmental Panel on Climate Change')
  - 5. Sachstandsbericht veröffentlicht zwischen September 2013 und November 2014 (IPCC, 2014)
- UN-Klimakonferenzen ('United Nations Climate Change Conference')
  - Politische Konferenzen zum Verständnis des und Reaktion auf den Klimawandel
  - Erste Konferenz: 1995
  - Bekannteste Konferenz: Kyoto, Japan, 1997. Das Kyoto-Protokoll beschloss einen Rückgang des Ausstoßes von Treibhausgas durch Industrieländer bis 2012 um ca 5% relativ zu 1990
  - Gerade zu Ende gegangen: Paris, 2015. Erstmals Eingung auf umfassende und verbindliche Maßnahmen

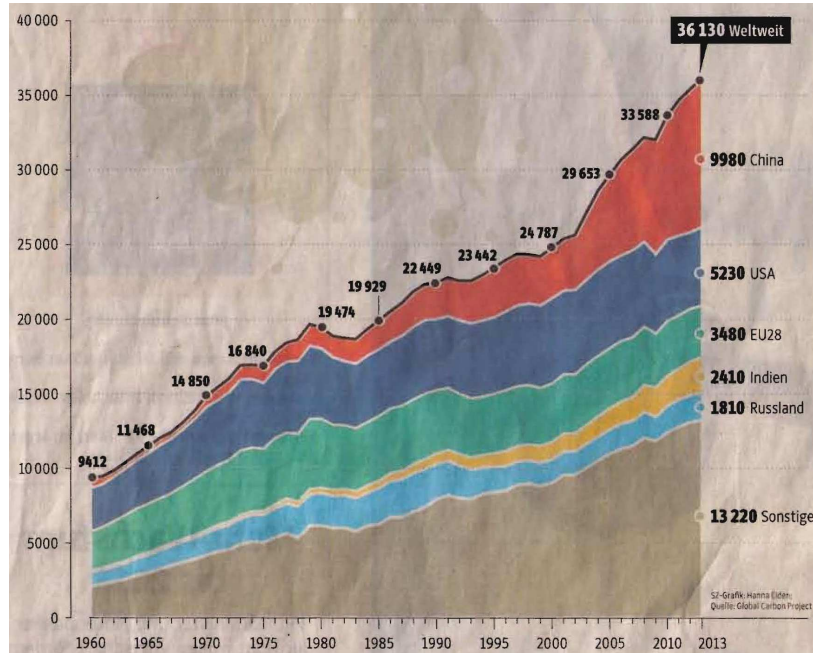
- Das Problem der globalen Erwärmung
  - In den Jahren 2013 und 2014 veröffentlichte der Weltklimarat IPCC (<http://www.ipcc.ch/>) den fünften Sachstandsbericht über die aktuelle Lage, die Folgen sowie mögliche Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels (<http://www.de-ipcc.de/de/200.php>)
  - Hauptursache: Freisetzung (durch menschliche Aktivitäten) von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlenstoffdioxid (IPCC, 2014, Summary for Policy Makers, p. 3)
  - “Human influence on the climate system is clear, and recent anthropogenic emissions of greenhouse gases are the highest in history. Recent climate changes have had widespread impacts on human and natural systems” (IPCC, 2014, Summary for Policy Makers, p1)
  - Folgen für Natur: Ozeanversauerung, Artensterben, Wasserknappheit, Erosionsgefährdung
  - Wirtschaftliche und soziale Folgen: Verschärfung von sozialer und wirtschaftlicher Ungleichheit, soziale Konflikte, Armut und Hunger

- Drei Beispiele
  - Aussterben von Amphibien durch Pilzbefall bei höheren Temperaturen (Pounds et al. 2006)
  - Der Meeresspiegel steigt (sicher) um 1,2 Meter in 300-400 Jahren (Mouginot, Rignot und Scheuchl, 2014a, b)



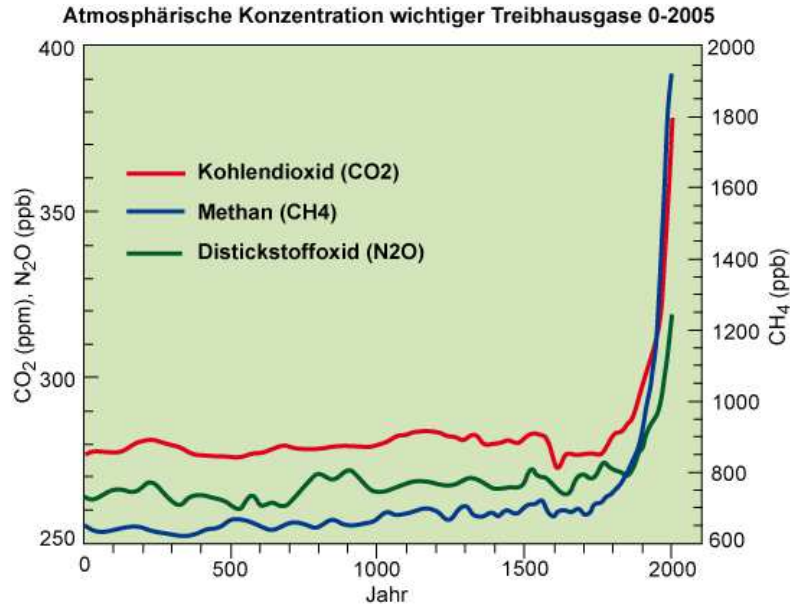
**Abbildung 72** *Globale Erwärmung und Abschmelzen des Eises in der Arktis*

### 16.1.3 Einige Zahlen



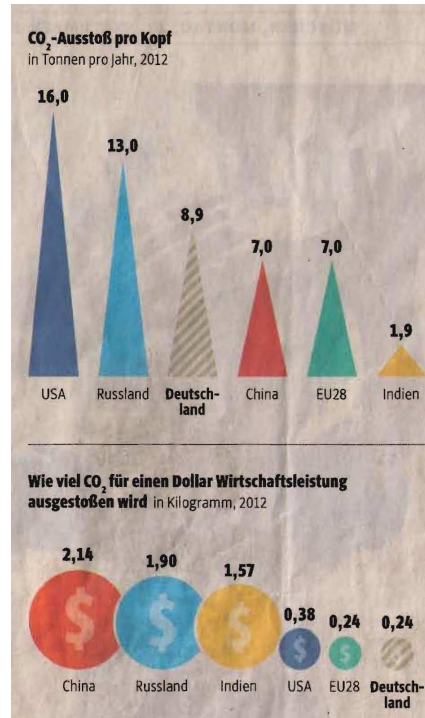
**Abbildung 73** Weltweite CO<sub>2</sub>-Emissionen in Millionen Tonnen, 1960 bis 2013. Quelle: Süddeutsche Zeitung September 2014 – Druckbare Version





**Abbildung 74** Konzentration von Treibhausgasen seit dem Jahr 0. Quelle: [wiki.bildungserver.de/klimawandel](http://wiki.bildungserver.de/klimawandel) nach IPCC (2007): *Climate Change 2007, Working Group I: The Science of Climate Change, FAQ 2.1, Figure 1*

- Vergleiche dazu Abbildung 13 zum Wirtschaftswachstum



*Abbildung 75 CO<sub>2</sub> Emissionen pro Kopf und pro produzierter Einheit Quelle: Süddeutsche Zeitung September 2014 – Druckbare Version*

#### 16.1.4 Technische Lösungen?

- Klimabeeinflussung ('climate engineering')
  - großskalige technische Eingriffe in das Klimasystem der Erde (Sondierungsstudie Climate Engineering Kiel-Earth-Institute, 2011)
  - Zwei zentrale Verfahren: CO<sub>2</sub>-Entfernung ('Carbon Dioxide Removal') und Strahlungsverwaltung ('Radiation Management') mit verschiedenen Ansätzen
- Überwiegend skeptische Einschätzung aktuell
  - siehe z.B. Ausschuß für Bildung, Forschung und Technikfolgeabschätzung des Bundestags (Pressemitteilung und Bericht, 2014)
  - Auch deswegen im folgenden nun die ökonomische Sichtweise

## 16.2 Die Fragen

- Die Endlichkeit des Systems Erde
  - Gibt es unendliches Wachstum in einer endlichen Welt?
  - Führt die Endlichkeit natürlicher Ressourcen zu einem Ende wirtschaftlichen Wachstums?
  - Welche Rolle spielen *nicht-erneuerbare* Ressourcen im Wirtschaftswachstum?
- Die globale Erwärmung
  - Was versteht man unter globaler Erwärmung und welche Rolle spielt das Wirtschaftswachstum?
  - Kann etwas gegen die globale Erwärmung unternommen werden?
  - Welche Rolle spielen *erneuerbare* Ressourcen im Wirtschaftswachstum?

# 17 Die ökonomische Analyse I: Endliche Ressourcen und unendliches Wachstum?

## 17.1 Das grundsätzliche Argument

- Die (vermeintlichen) Grenzen des Wachstums
  - Die Erde hat eine endliche Menge an natürlichen Ressourcen (Öl, Erdgas, Kohle, Wasser)
  - Solange Wirtschaftswachstum natürliche Ressourcen benötigt, muss Wirtschaftswachstum enden, sobald natürliche Ressourcen enden

- Das ökonomische Gegenargument I
  - Es gibt technologischen Fortschritt
  - Aus einer Einheit natürlicher Ressource wird immer mehr Input für den Produktionsprozess gewonnen
  - Ein Rückgang natürlicher Ressourcen kann durch Effizienzsteigerung bei deren Verwendung kompensiert werden
  - Kraftstoffverbrauch je 100 km nahm zwischen 2000 und 2008 von 8,3 auf 7,6 Liter ab (8,3%) – siehe Statistisches Bundesamt
  
- Das ökonomische Gegenargument II
  - Es gibt Substitutionsmöglichkeiten
  - Statt natürlicher (endlicher) Ressourcen werden erneuerbare Energiequellen verwendet
  - Statt Erdölheizungen gibt es Heizungen, die Holz (-pellets) verwenden
  - Statt Strom aus Kohlekraftwerken gibt es Solaranlagen

## 17.2 Ein Modell

### 17.2.1 Die grundsätzliche Problematik

- Produktion verlangt nach Energie (Ressourcen  $R(t)$ ) ...

- Die Produktionsfunktion lautet also

$$Y(t) = K(t)^\alpha L^\beta R(t)^{1-\alpha-\beta} \quad (25)$$

- $Y(\cdot)$  hat abnehmende Grenzerträge in Produktionsfaktoren

- neu aufgenommen in die Modellierung:  $R(t)$

- ... aber von den Ressourcen gibt es nicht unendlich viel

- Wir betrachten also nicht-erneuerbare Ressourcen (z.B. Erdöl, Kohle, Erdgas)

- im Gegensatz zu erneuerbaren Ressourcen (Holz, Meeresfische)

- Der Bestand an nicht-erneuerbaren Ressourcen ist  $S(t)$  (wie 'stock') und folgt

$$\dot{S}(t) = -R(t) \quad (26)$$

- Die Abnahme des Bestands ist also durch den Verbrauch  $R(t)$  gegeben

- Natürlich (im wahren Sinn des Wortes) gilt  $S(t) \geq 0$  für alle  $t$

- Kapitalakkumulation

- unveränderte Modellierung
- Kapital kann durch Ersparnis aufgebaut und vermehrt werden

$$\dot{K}(t) = Y(t) - \delta K(t) - C(t) \quad (27)$$

- Präferenzen der Haushalte

- Feste Sparquote  $s$ , d.h.  $C(t) = (1 - s)Y(t)$
- Konstanter Verbrauch der natürlichen Ressource

$$R(t) = R \quad (28)$$

- Die Fragen

- Wenn Ressourcen  $R(t)$  wesentlich sind, wird langfristig positive Produktion und damit Konsum möglich sein?
- Oder führt der Verbrauch der natürlichen Ressourcen zu einem “Ende des Wachstums” oder sogar Ende des Konsums?
- siehe Groth (2006, 2007, sect. 3) und die Referenzen dort



### 17.2.2 Die langfristige Produktionsmenge

- Wie entwickelt sich der Bestand an natürlichen Ressourcen?

- Der Bestand folgt  $\dot{S}(t) = -R$

- Damit ist der Bestand

$$S(t) = S_0 - Rt$$

und somit nach  $S_0/R$  Jahren aufgebraucht

- Wie hoch ist die Produktion bei  $S = 0$ ?

- Ohne natürliche Ressourcen ist auch der Verbrauch gleich Null,  $R = 0$

- Für die Cobb-Douglas Produktionsfunktion aus (25), d.h. für  $Y = Y(t) = K(t)^\alpha L^\beta R(t)^{1-\alpha-\beta}$  folgt

$$Y = 0$$

- Wenn Ressourcen *essentiell* sind für die Produktion, dann gibt es langfristig keine Produktion und damit keinen Konsum

### 17.2.3 Technologischer Fortschritt

- Was passiert, wenn Ressourcen sparsamer eingesetzt werden?
- Betrachten wir eine Produktionsfunktion

$$Y(t) = K(t)^\alpha L^\beta [A(t) R(t)]^{1-\alpha-\beta}$$

die Effizienzsteigerungen durch  $A(t)$  abbildet

- Die Produktivität des Ressourceneinsatzes wächst mit einer Rate von  $g$

$$A(t) = A_0 e^{gt}$$

- Effektiver Ressourcenverbrauch bleibt weiterhin bei  $R$ , wie oben in (28)

$$A(t) R(t) = R \tag{29}$$

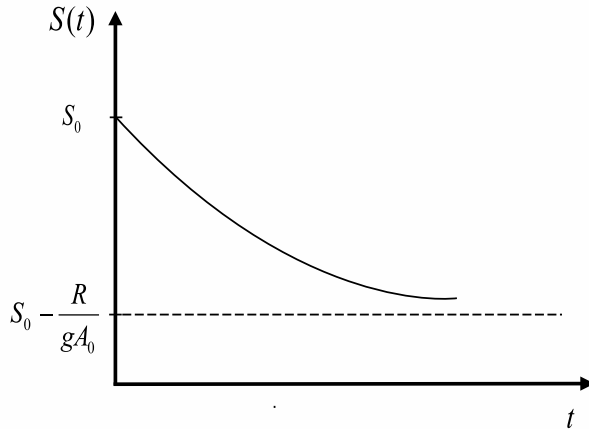
- Der Bestand an natürlichen Ressourcen entwickelt sich weiter wie in (26), d.h.

$$\dot{S}(t) = -R(t) = -\frac{R}{A(t)} = -\frac{R}{A_0} e^{-gt}$$

wobei nun allerdings die Entnahme  $R(t) = R/A(t)$  an Rohstoffen wegen (29) sinkt

- Lösung der Differentialgleichung ergibt

$$S(t) = S_0 + \frac{R}{gA_0} [e^{-gt} - 1]$$



**Abbildung 76** Der Bestand an natürlichen Ressourcen sinkt bei technologischem Fortschritt mit Rate  $g$  auf das Niveau  $S_0 - R/(gA_0)$

- Ist unendliches Wachstum bei endlichen Ressourcen möglich?
  - Ja, wenn  $S_0 - R/(gA_0) > 0$ , d.h.
  - wenn der langfristige Bestand positiv bleibt
- Dies ist der Fall, wenn
  - der Anfangsbestand  $S_0$  ausreichend hoch ist
  - technologischer Fortschritt ausreichend schnell stattfindet ( $g$  ausreichend hoch)
  - Das anfängliche Technologieniveau  $A_0$  ausreichend hoch ist
  - der Bedarf  $R$  ausreichend niedrig ist
- Aus endlichen Ressourcen werden also unendliche Ressourcen
- Unendliches Wachstum ist nicht möglich, wenn eine dieser Bedingungen nicht erfüllt ist

### 17.2.4 Die Substituierbarkeit natürlicher Ressourcen

- Bisherige Annahme der Cobb-Douglas Produktionsfunktion impliziert
  - eine Substitutionselastizität von 1
  - dass alle Produktionsfaktoren essentiell sind
- Produktionsprozesse werden empirisch besser beschrieben durch allgemeinere CES Produktionsfunktion
  - Die Produktionsfunktion hat dann eine Struktur wie die Nutzenfunktion (14) mit Konsum und Freizeit

$$Y = [\alpha K^\theta + \beta L^\theta + (1 - \alpha - \beta) R^\theta]^{1/\theta}, \theta < 1$$

- Die Substitutionselastizität  $\varepsilon$  kann dann zwischen 0 und Unendlich liegen

$$\varepsilon = \frac{1}{1 - \theta} > 0$$

- Wenn  $R = 0$  folgt

$$Y = [\alpha K^\theta + \beta L^\theta]^{1/\theta} > 0$$

- Grundsätzlich ist es vorstellbar, dass die Produktion fortschreitet, wenn natürliche Ressourcen aufgebraucht sind

### 17.3 Zusammenfassung: Grenzen des Wachstums?

- Grenzen sind vorstellbar
- Verschwinden der Grenzen sind auch vorstellbar
  - Effizientere Verwendung endlicher natürlicher Ressourcen
  - Substitution endlicher natürlicher Ressourcen
- Gegenargumente
  - “Ökologische Ökonomen” (vgl. Jackson 2009, Bartmann, 1996) argumentieren, dass auf Grund physikalischer Grenzen ein Subsystem innerhalb eines endlichen Systems nicht unendlich wachsen kann
  - Allein das Entropiegesetz mache unendliches Wachstum unmöglich (vgl. Georgescu-Roegen, 1986)

- Nächste Schritte (schöne Bachelorarbeiten)
  - Empirische Untersuchung effizienterer Verwendung endlicher Ressourcen – ist die Effizienzsteigerung ausreichend schnell?
  - Konkret: Sinkt also die geförderte Menge an Erdöl wie in (29), wenn Erdöl effizienter eingesetzt wird?
  - Empirische Untersuchung zur Substitutierbarkeit – erfolgt diese ausreichend schnell?
  - Welches Potential haben Solarzellen oder Windkraft im Vergleich zur Verbrennung endlicher natürlicher Ressourcen?
  - Findet die Substitution und Effizienzsteigerung schnell genug statt? Wenn nicht, warum nicht?

# 18 Die ökonomische Analyse II: Globale Erwärmung und Wirtschaftswachstum

## 18.1 Das grundsätzliche Argument

- Grenzen des Wachstums
  - aufgrund von knappen Ressourcen scheint also kein Problem
  - wie vom Club of Rome (1972) beschrieben erscheinen also zu pessimistisch
- Vielmehr scheint das Problem in der Umweltverschmutzung an sich zu liegen
  - Kann sich die Umweltqualität ausreichend schnell erneuern, gegeben menschliche Emissionen?
  - Das Problem sind also nicht die endlichen sondern die *erneuerbaren* Ressourcen
  - Kann das ökologische System den durch Menschen verursachten Ausstoß von Treibhausgasen verkraften oder kommt es zu irreversiblen Schäden an der Umwelt (und damit am Menschen)?



- Sichtweise der Ökonomen: Es liegt ein Problem vor
  - “Recently however it has become clear that limits to growth may not only arise from nature’s finite source of raw minerals, but instead from nature’s limited ability to act as a sink for human wastes” (Brock & Taylor 2005)
  - “there is far less concern over the ultimate exhaustion of oil or magnesium, and far more concern over air quality, global warming, and the emissions of industrial production” (Brock & Taylor 2005)
  - Im Gegensatz zur Endlichkeit der Ressourcen werden Emissionen als ökonomisches Problem wahrgenommen

- Warum akzeptieren Ökonomen globale Erwärmung so leicht als ökonomisches Problem?
  - Es liegt ein klares Marktversagen vor (vgl. Harms - Einführung VWL - 6. Märkte zwischen Effizienz und Marktversagen)
  - Quelle des Marktversagens hier: die negative Externalität durch die Emission von Treibhausgasen
  - Definition Externalität: Externalitäten sind Auswirkungen von Konsum- oder Produktionsaktivitäten auf einen anderen Wirtschaftsteilnehmer (also nicht auf den Verursacher), die nicht durch das Preissystem wirken (nach J.J. Laffont, Externalities, New Palgrave Dictionary of Economics)
  - Beispiele: Autoabgase (negativ), Flugzeug- /Bahn- /Auto- /Verkehrslärm (negativ), Impfung gegen ansteckende Krankheit (positiv), Bienenzucht (positiv)
  - Hier: Es fehlt ein Markt für den Ausstoß von Treibhausgasen

- Die ökonomische Lösung: Internalisierung externer Effekte
- Wie funktioniert Internalisierung? Durch optimale Steuern (im Sinne von Pigou) oder Verhandlungen (im Sinne von Coase) → klassische Finanzwissenschaft
  - Verhandlungen hier nicht möglich, da Eigentum nicht eindeutig zuordenbar
  - Steuern auf Güter, die negative Externalitäten hervorrufen, erhöhen deren Preis, damit sinkt die Nachfrage nach diesem Gut (fossile Brennstoffe) und verschiebt sich zu anderen Gütern (Solarenergie)
  - Individuen verhalten sich mit optimalen Steuern so, als wären ihre Präferenzen identisch zur sozialen Wohlfahrtsfunktion
  - Einschränkung bzw. Besteuerung verschmutzender Aktivitäten (Steuer auf Kraftstoffe) wünschenswert
- Phantastische politische Probleme
  - Meinungsverschiedenheiten bezüglich der Bedeutung der Umweltqualität (Elastizitätsparameter  $\beta$  in der Nutzenfunktion (35) weiter unten)
  - Unsicherheit bezüglich der tatsächlichen Effekte von Emissionen
  - Unterschiedliche Ausprägungen des Altruismus (andere Länder, andere Lebewesen)
- Die zentrale Frage: wird ausreichend viel in Emissionsreduktion investiert?

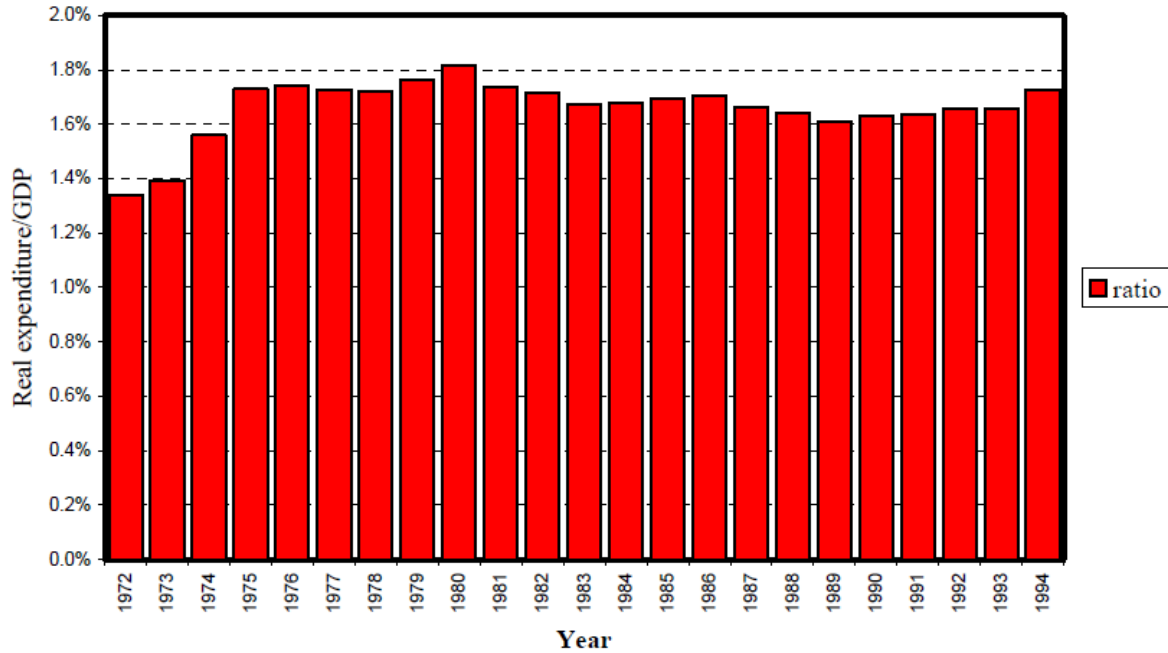


Abbildung 77 *Pollution abatement costs in the U.S. 1972 - 1994 as share of GDP. Source: Brock & Taylor (2005), Abb. 2*

## 18.2 Ein Modell

### 18.2.1 Grundstruktur: endogenes Wachstum

Wachstumstheorie aus Part I

- Langfristiges Wachstum des BIP pro Kopf durch exogenen technologischen Fortschritt
- (vgl. “Wie wird langfristiges Wachstum erklärt (jenseits des obigen Modells)?” im Abschnitt 3.4.3)
- Keine Erklärung von Wachstumsprozessen über Jahrzehnte
- Fundamentale Frage: Woher kommt das Wachstum  $A(t) = A_0 e^{gt}$  das in der neoklassischen Wachstumstheorie einfach so angenommen wird?

Neue Wachstumstheorie

- Entwicklung neuer Ansätze (Ende der 1980er, Anfang der 1990er) zum Verständnis langfristiger Wachstumsprozesse
- Ein solches Modell wird hier verwendet als Analyserahmen für globale Erwärmung
  - Nächster Schritt: Endogenes Wachstum
  - Übernächster Schritt: (Rückkehr zur) Analyse globaler Erwärmung

Das Modell endogenen Wachstums (vergleiche Shell, 1966)

- Produktion des Konsumgutes erfolgt unter Verwendung von Arbeit  $L_Y(t)$

$$C(t) = A(t) L_Y(t)$$

- Was erhöht die Arbeitsproduktivität  $A(t)$ ?
- Investitionen in F&E, d.h. Beschäftigung von “Ingenieuren”  $L_A(t)$

$$\dot{A}(t) = \psi A(t) L_A(t) \tag{30}$$

deren Produktivität durch  $\psi A(t)$  gegeben ist

- Arbeitsmarktgleichgewicht

$$L = L_A(t) + L_Y(t)$$

- Intertemporale Nutzenfunktion (wie immer) eines zentralen Planers

$$U(t) = \int_t^\infty e^{-\rho[\tau-t]} u(C(\tau)) d\tau$$

mit instantaner Nutzenfunktion (fast wie immer, die “-1” fehlt)

$$u(C(\tau)) = \frac{C(\tau)^{1-\sigma}}{1-\sigma} \tag{31}$$

- Zielkonflikt: Konsum ( $L_Y$ ) vs Investition ( $L_A$ )

## Der Wachstumsprozess

- Wie hoch ist die optimale Wachstumsrate des Konsums? (siehe Tutorium)

$$g = \frac{\psi L - \rho}{\sigma} \quad (32)$$

- Die Arbeitsproduktivität wächst im Optimum ebenfalls mit der Rate  $g$

$$A(\tau) = A_t e^{g[\tau-t]}$$

- Das Konsumniveau ist gegeben durch

$$C(\tau) = \frac{\psi L - g}{\psi} A(\tau)$$

- Das BIP wächst und auch das BIP pro Kopf wächst langfristig *ohne* exogenen technologischen Fortschritt
- Die Wachstumsrate  $g$  hängt von Entscheidungen der Investoren und damit von wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen ab (fundamental andere Sichtweise als im Solow Modell)
- (Frage für fortgeschrittenen Veranstaltungen: Wie ist dies dezentral möglich?)

### 18.2.2 Wachstum und Emissionen: globale Erwärmung

Die Erweiterung des obigen Modells

- Kehren wir nun zurück zur Frage der globalen Erwärmung
- Ursache der globalen Erwärmung: Emissionen  $W(t)$  (wie “waste”, Müll)

$$W(t) = \bar{B}C(t) \quad (33)$$

in Abhängigkeit vom Konsumniveau  $C(t)$  und von dem (in diesem Abschnitt konstanten) Parameter  $\bar{B}$

- Emissionen (z.B. CO<sub>2</sub>) sind ein Nebenprodukt des Produktionsprozesses (negative Externalität)
- Der Parameter  $\bar{B}$  bildet die Verschmutzungsintensität ab (vgl. Abb. 75 “Wieviel CO<sub>2</sub> wird für einen Dollar Wirtschaftsleistung ausgestoßen?”  $\bar{B} = W(t) / C(t)$ )



- Grundsätzliches Problem: Emissionen und Umweltqualität  $Q(t)$

$$\dot{Q}(t) = g(Q(t), W(t)) \quad (34)$$

- Umweltqualität ändert sich in Abhängigkeit einer Funktion  $g(\cdot)$  (s.u. für genaue Spezifikation)
- Umwelt regeneriert sich (eine erneuerbare Ressource) in Abhängigkeit von  $Q(t)$
- Emissionen  $W(t)$  schaden der Umwelt

- Problem für Menschheit: Umwelt hat einen gewissen Wert

$$u(C(\tau), Q(\tau)) = \frac{C(\tau)^{1-\sigma}}{1-\sigma} Q(\tau)^\beta \quad (35)$$

- ideeller Wert (“Natur ist nur geschenkt”)
- materieller Wert (Ernährung)
- Schäden durch Wirbelstürme (“hurricane Katrina”, 2005, USA), Hochwasser, Dürren
- Grosse Heterogenität der Auswirkungen ( $\beta$  unterscheidet sich zwischen Individuen), vor allem zwischen Industrie- und Entwicklungsländern

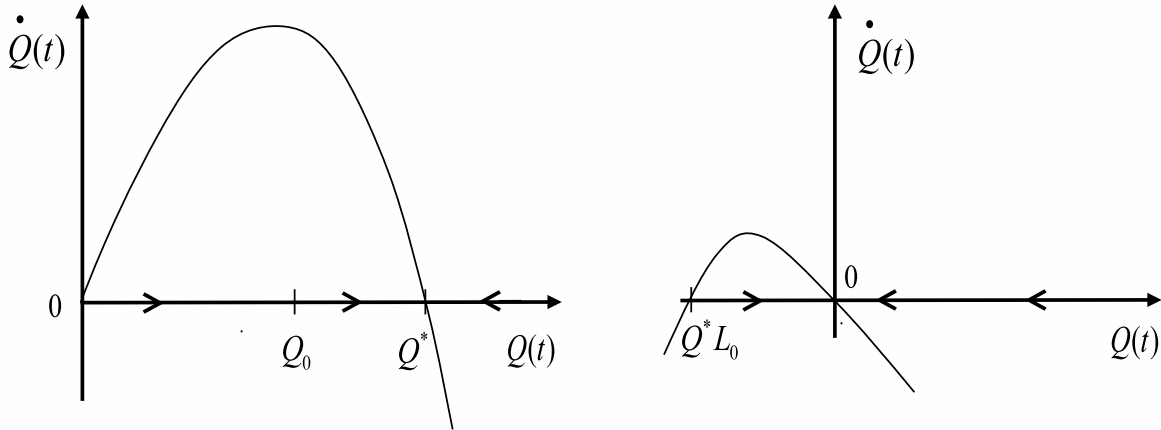
- Emissionen und Umweltqualität: die Details der Funktion  $g(\cdot)$ 
  - Studium Meteorologie, Biologie, Geographie ...
  - Was ist Umweltqualität? Qualität für den Menschen, Qualität der Umwelt an sich? Artenvielfalt? Pflanzen pro Quadratmeter? → Definitionsfragen
  - Wie entwickelt sich die Umwelt in Abwesenheit des Menschen? Wächst sie unendlich, konvergiert sie zu einer oberen Grenze?
- Emissionen und Umweltqualität: die Modellierung

$$\dot{Q}(t) = Q(t) [Q^{\max} - W(t) - Q(t)] \quad (36)$$

- Umweltqualität entwickelt sich in Abhängigkeit von ihrem aktuellen Niveau (Regeneration), einem maximal erreichbaren Wert  $Q^{\max}$  und in Abhängigkeit der Emissionen  $W(t)$
- Die Umweltqualität bleibt unverändert, wenn sie Null ist oder, für einen Emissionswert  $\bar{BC}(t)$  bei  $Q^*$

$$\dot{Q}(t) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} Q = 0 \\ Q^* = Q^{\max} - \bar{BC}(t) \end{cases} \quad (37)$$

- Die stationäre Umweltqualität  $Q^*$  kann je nach Emissionsintensität  $\bar{BC}(t)$  positiv oder negativ sein



**Abbildung 78** Die Dynamik der Umweltqualität in Abhängigkeit der Verschmutzung  $W^*$ : Das “nachhaltige Szenario” links ( $Q^* > 0$ ) und das “Katastrophenszenario” rechts ( $Q^* < 0$ )

- Emissionen und Umweltqualität: die Intention hinter der Modellierung

- $Q^{\max}$  ist die maximale Umweltqualität, die erreicht werden kann, wenn keine Emissionen stattfinden, d.h.  $W(t) = 0$  (“die Welt ohne die Menschheit”). Die Umweltqualität folgt dann

$$\dot{Q}(t) = Q(t) [Q^{\max} - Q(t)]$$

und ist langfristig durch  $Q(t) = Q^{\max}$  gegeben

- Wenn Emissionen in  $W(t)$  in (36) steigen, dann wandert  $Q^*$  nach links und wird negativ (vom nachhaltigen zum Katastrophenszenario)
- Grundsätzliche Annahme des Modells (d.h. der Modellierung in (36)): Wenn zuviele Emissionen erfolgen, dann geht die Umweltqualität eines Tages auf Null zurück

## Wachstum und globale Erwärmung

- Wie kann nun der Prozess der globalen Erwärmung verstanden werden?
  - Konsum- und Investitionsverhalten der Haushalte als gäbe es keine Emissionen
  - Die Effekte der Emissionen auf die Umwelt werden also vernachlässigt (oder zumindest nicht ausreichend berücksichtigt)
  - Optimales Verhalten folgt dem Modell endogenen Wachstums vom Abschnitt 18.2.1
  - Die Wachstumsrate von Konsum und Arbeitsproduktivität ist also  $g = \frac{\psi L - \rho}{\sigma}$  aus (32)
- Wie entwickelt sich die Umweltqualität?
  - Mit (33) und (36) folgt sie

$$\begin{aligned}\dot{Q}(\tau) &= Q(\tau) [Q^{\max} - \bar{B}C(\tau) - Q(\tau)] \\ &= Q(\tau) [Q^{\max} - \bar{B}C_t e^{g[\tau-t]} - Q(\tau)]\end{aligned}\tag{38}$$

- Aus dieser Gleichung wie auch aus Abbildung 78 folgt, dass ab einem ausreichend hohen Konsumniveau die Umweltqualität sicher sinkt
- Die Ökonomie befindet sich dann im “Katastrophenszenario” von Abbildung 78

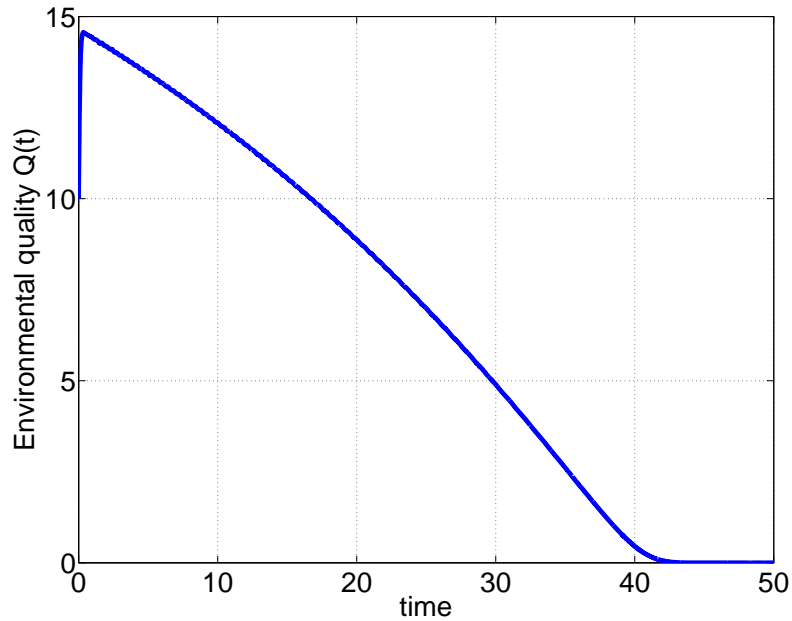


Abbildung 79 Die Entwicklung der Umweltqualität bei Vernachlässigung der externen Effekte

Warum steigt die Umweltqualität zunächst, um dann aber auf Null zu fallen?

- Das Steigen der Umweltqualität
  - Betrachten wir Abbildung 78 und nehmen an, wir starten bei einer Umweltqualität von  $Q_0$  (sagen wir die Umweltqualität kurz vor der industriellen Revolution) in der linken Abbildung
  - Ab dem Zeitpunkt der industriellen Revolution (ca 1750) wächst Konsum und Produktion (siehe Abb. 13 zu ökonomischen Wachstum von 0 bis 2000) und damit die Emissionen (siehe Abb. 74 zu Treibhausgasen von 0 bis 2000)
  - Gegeben das geringe Konsumniveau zu diesem Zeitpunkt und die geringen Emissionen ergibt sich zunächst das nachhaltige Szenario mit wachsender Umweltqualität

Warum steigt die Umweltqualität zunächst, um dann aber auf Null zu fallen? (Fortsetzung)

- Die Umweltqualität kippt
  - Bei exponentiell wachsendem Konsumniveau erhöhen sich die Emissionen in (33) ebenfalls exponentiell, gegeben die konstante Verschmutzungsintensität  $\bar{B}$
  - Die Ökonomie bewegt sich also vom nachhaltigen Szenario hin zum nicht-nachhaltigen Szenario
  - Ab dem Zeitpunkt, wo die Umweltqualität rechts von  $Q^*$  liegt, fällt die Umweltqualität
  - (schwer zu datieren, weiteres Denken und empirische Arbeit notwendig, eine Forschergruppe schlägt 1945 vor)
  - Im weiteren Verlauf sinkt  $Q^*$  immer weiter und rutscht ins negative ab
  - Die Umweltqualität  $Q(t)$  folgt und nähert sich der Null

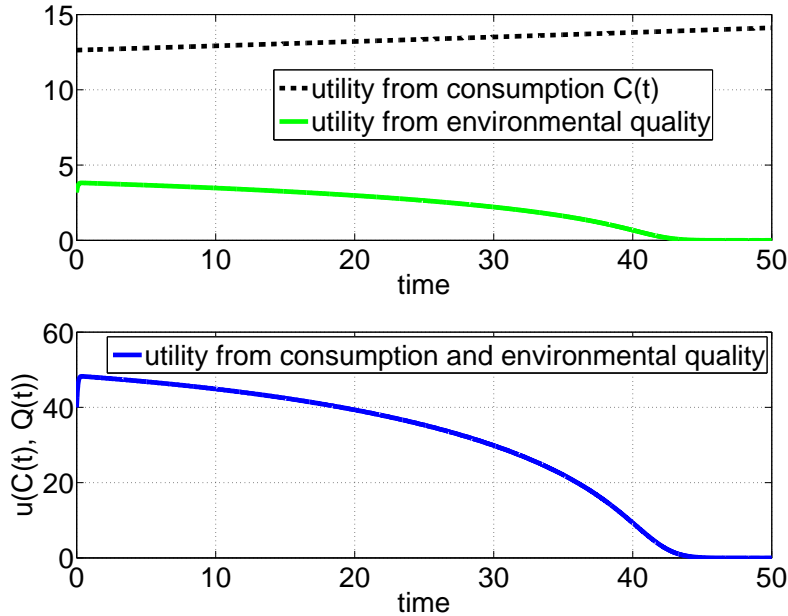


- Was passiert mit dem Nutzen  $u(C(\tau), Q(t))$  der Haushalte aus (35)?
  - Der Nutzen aus Konsum steigt exponentiell

$$\frac{C(\tau)^{1-\sigma}}{1-\sigma} = \frac{(C_t e^{g[\tau-t]})^{1-\sigma}}{1-\sigma} = \frac{C_t^{1-\sigma} e^{(1-\sigma)g[\tau-t]}}{1-\sigma}$$

wobei  $g$  die Konsumwachstumsrate aus (32) ist

- Die Umweltqualität sinkt (siehe vorherige Abbildung)
- Was passiert also mit dem Gesamtnutzen  $u(C(\tau), Q(\tau))$ ?



**Abbildung 80** *Der materielle Nutzen aus Konsum, der Nutzen aus der Umweltqualität und der kombinierte Nutzen  $u(C(t), Q(t))$  bei Nicht-Internalisierung externer Effekte*

Wo befindet sich die Welt aktuell?

- Die Umweltqualität scheint schon zu fallen (siehe Diskussion oben)
- Die Wirtschaftsleistung (sprich Konsum  $C(t)$ ) wächst
- Die Umweltqualität sinkt
- Allgemeine Interpretation hier: Die Welt aktuell internalisiert negative externe Effekte nicht ausreichend, der kombinierte Nutzen sinkt
- Es wird zu viel Wert gelegt auf materiellen Wohlstand, Umweltqualität wird nicht ausreichend berücksichtigt
- [die Welt “geht unter”]

### 18.2.3 Wachstum und Umweltschutz: Internalisierung externer Effekte

- Wir haben nun verstanden, wie wir die Umwelt an die Wand fahren
- Wir ignorieren alle externen Effekte, feiern Party wie auf der sinkenden Titanic und sind überrascht, dass materieller Reichtum nicht einhergeht mit allgemeinen Wohlempfinden
- Geht es auch besser?
- Klar: Alle externen Effekte werden internalisiert und es finden ausreichend Investitionen in Emissionsreduktion statt (vgl. Pigou-Steuern oben)
- Das Problem der globalen Erwärmung wäre gelöst
- Wie kann dies im Detail funktionieren?

Der Modellrahmen (fast identisch zum vorherigen Abschnitt 18.2.2)

- Konsumgut (wie vorher)

$$C(t) = A(t) L_Y(t) \quad (39)$$

- Arbeitsproduktivität (wie vorher)

$$\dot{A}(t) = \psi A(t) L_A(t)$$

- Die Arbeitsnachfrage resultiert aus drei Aktivitäten

- Produktion des Konsumgutes ( $L_Y$ ) und Forschung und Entwicklung ( $L_A$ ) (wie vorher)
- und Emissionsreduktion ( $L_B$ ) (neu)
- Die Gleichheit von Arbeitsangebot  $L$  und Arbeitsnachfrage verlangt also

$$L = L_A(t) + L_B(t) + L_Y(t)$$

- Entwicklung der Umweltqualität (wie vorher)

$$\dot{Q}(t) = Q(t) [Q^{\max} - B(t) C(t) - Q(t)]$$

- Produktionsexternalität (wie vorher)

$$W(t) = B(t) C(t)$$

- Gleiche funktionale Form wie in (33)
- Entscheidender Unterschied: endogene Verschmutzungsintensität  $B(t)$

- Investition in Emissionsreduktion von Treibhausgasen (neu)

$$\dot{B}(t) = -\phi B(t) L_B(t) \tag{40}$$

- Beschäftigung von Arbeitnehmern  $L_B(t)$  führt zu einem Rückgang der Verschmutzungsintensität  $B(t)$
- alles von Müllvermeidung bis hin zu Produktverboten wie FCKW (Montreal-Protokoll von 1987)
- Produktivität bei Reduktion der Verschmutzungsintensität ist  $\phi$

- Präferenzen der Haushalte (wie oben)

$$U(t) = \int_t^{\infty} e^{-\rho[\tau-t]} u(C(\tau), Q(\tau)) d\tau$$

mit

$$f(C(\tau), Q(\tau)) = \frac{C(\tau)^{1-\sigma}}{1-\sigma} Q(\tau)^\beta$$

## 18.2.4 Der optimale Wachstumspfad

- Drei Grundsatzfragen
  - Wie bekommen wir ihn technisch?
  - Was sind die Zielkonflikte beim optimalen Wachstumspfad?
  - Was bedeutet er ökonomisch?
- Wie bestimmen wir den optimalen Wachstumspfad?
  - Wir betrachten ein (großes) Maximierungsproblem
  - Die Zielfunktion sind die Präferenzen der Haushalte, die Nebenbedingungen sind die Technologien und die Arbeitsmarktbeschränkung
  - Formal: Maximiere  $U(t)$  unter den Nebenbedingungen

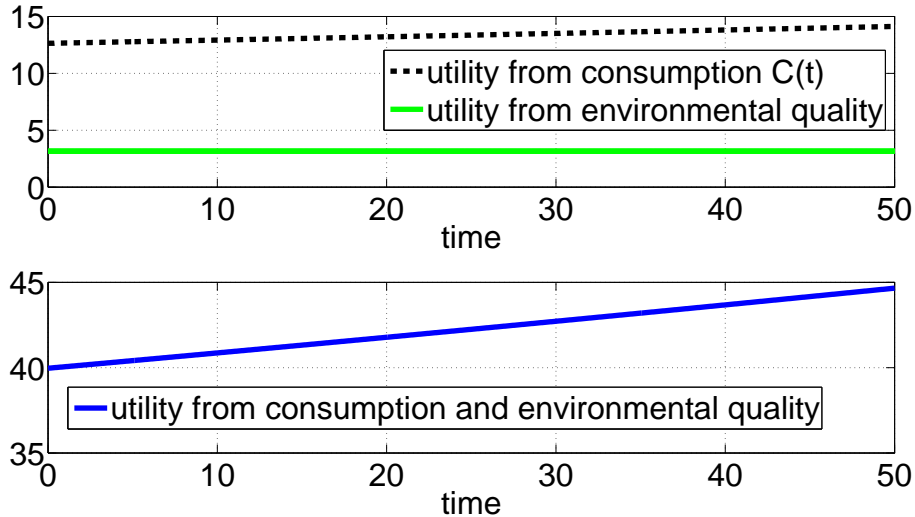
$$\begin{aligned}\dot{A}(\tau) &= \psi [A(\tau) [L - L_B(\tau)] - C(\tau)] \\ \dot{B}(t) &= -\phi B(t) L_B(t) \\ \dot{Q}(t) &= Q(t) [Q^{\max} - B(t) C(t) - Q(t)]\end{aligned}$$

durch die Wahl des Zeitpfades von  $C(t)$  und von  $L_B(t)$



- Was sind die Zielkonflikte?
  - Konsum ( $L_Y$ ) vs Investition ( $L_A$ ) vs. Umweltqualität ( $L_B$ )
  - F&E ( $L_A$ ) vs. Emissionsreduktion ( $L_B$ )
  - Zielkonflikt zweifach komplexer: Berücksichtigung von  $L_B$  bei Konsumententscheidung ( $L_Y$ ) und bei Investitionsentscheidung ( $L_A$ )
  
- Was bedeutet der optimale Wachstumspfad ökonomisch?
  - Die Zielfunktion repräsentiert die soziale Wohlfahrtsfunktion, die durch den zentralen Planer maximiert wird (vgl. Abschnitt 3.3.3)
  - Die Produktionsfaktoren (also  $L_B(t)$  vs.  $L_Y(t)$  oder  $L_B(t)$  vs.  $C(t)$ , vgl. (39)) werden gewählt, so dass das soziale Optimum erreicht wird
  - Alle externen Effekte (vgl. Definition externer Effekt auf S. 322 und Lösungsmöglichkeiten) werden internalisiert
  - Gegeben die Eigenschaften der optimalen Faktorallokation kann dann empirisch untersucht werden, wie weit die Welt entfernt ist von einem optimalen Wachstumspfad
  - Es kann z.B. der optimale Anteil der Ausgaben am BIP für Emissionsreduktion im Modell (Kosten  $wL_B$  für Beschäftigte  $L_B$  relativ zum BIP) verglichen werden mit tatsächlichen Ausgaben (siehe Abb. 77)

- Was passiert mit den verschiedenen Nutzenniveaus?



**Abbildung 81** *Der materielle Nutzen aus Konsum, der Nutzen aus der Umweltqualität und der kombinierte Nutzen  $u(C(t), Q(t))$  bei Internalisierung externer Effekte (vgl. Abb. 80)*

- Eigenschaften optimalen Wachstums

- Wie hoch ist die Wachstumsrate, wie hoch ist der Konsum, wie viel wird investiert in Emissionsreduktion?
- Die Wachstumsrate beträgt nun

$$g^{\text{opti}} = \phi \frac{\psi L - \rho}{\psi + \sigma \phi} \quad (41)$$

(vergleiche dazu die Wachstumsrate  $g = \frac{\psi L - \rho}{\sigma}$  im Modell ohne Internalisierung der externen Effekte)

- Es gibt einen neuen Parameter  $\phi$  und der Parameter  $\psi$  erscheint nun zweimal - was bedeutet das?

- Emissionsreduktion und Wachstum

- Im Gegensatz zu vorher wird nun auch in Emissionsreduktion investiert,  $L_B = \frac{g}{\phi} > 0$
- Der Parameter  $\phi$  in (40) erfasst die Effizienz der Technologie zur Reduktion der Emissionen: umso höher  $\phi$ , umso schneller sinkt  $B(t)$  *ceteris paribus* über die Zeit
- **Ergebnis 1:** Wäre dieser Parameter gleich Null, wäre das langfristige Wachstum gleich Null. Dies zeigt, dass ein beständiges Wachstum eine beständige Verbesserung der Umweltverträglichkeit verlangt
- Warum ist bei konstantem  $\bar{B}$  im Modell mit Emission aus Abschnitt 18.2.2 das Wachstum nicht gleich Null? Weil dort die externen Effekte der Emissionen ignoriert werden. Das positive Wachstum dort ist also nicht optimal
- **Ergebnis 2:** Wenn der Parameter  $\phi$  steigt, dann steigt die Wachstumsrate  $g$  in (41)
- Was ist das Kalkül dahinter? Bei höherem  $\phi$  kann weniger Arbeit  $L_B$  verwendet werden zur gleichen Verringerung der Verschmutzungsintensität  $B(t)$
- Somit ist mehr Arbeit für den Innovationsprozess (30) vorhanden und die Wachstumsrate steigt

- Innovation und Wachstum

- Was bewirkt die Produktivität  $\psi$  des Innovationsprozesses (30) für die Wachstumsrate?
- **Ergebnis 3:** Die Wachstumsrate  $g^{\text{opti}}$  steigt weiterhin in der Produktivität  $\psi$  (siehe Tutorium)

$$\frac{d}{d\psi}g^{\text{opti}} > 0$$

- Warum steigt die Wachstumsrate in  $\psi$ ? Wenn Konsum verschoben wird in die Zukunft, also eine Sparentscheidung getroffen wird, dann erfasst  $\psi L$  den Ertrag dieser Konsumverschiebung
- (Vergleiche die klassische Keynes-Ramsey Regel (1) im Abschnitt 3.5 zu optimalen Sparen, dort war der Ertrag durch  $\partial Y(K, L) / \partial K - \delta$  gegeben)
- umso höher der Ertrag der Konsumverschiebung, umso höher die Wachstumsrate

- Innovation und Wachstum (Fortsetzung)

- **Ergebnis 4:** Die Wachstumsrate steigt nun langsamer in der Produktivität  $\psi$  als in einer Welt, wo Externalitäten ignoriert werden

$$\frac{d}{d\psi}g^{\text{opti}} < \frac{d}{d\psi}g$$

Einfach ausgedrückt: eine höhere Produktivität  $\psi$  bringt nicht mehr so viel Wachstum

- Wieso? Wenn in einer Welt mit internalisierten auf Konsum verzichtet wird, dann erlaubt dies im Prinzip höhere Investitionen in Wachstum. Ein Teil davon geht aber in die Reduktion der Verschmutzungsintensität. Somit ist Ertrag aus Konsumverzicht nur noch  $\psi [L - L_B^*]$

- Ein Vergleich der optimalen Wachstumsrate  $g^{\text{opti}}$  mit der Wachstumsrate  $g$  ohne Internalisierung
  - **Ergebnis 5:** Die optimale Wachstumsrate ist kleiner als die nicht-internalisierende Wachstumsrate (siehe Tutorium)

$$g^{\text{opti}} < g$$

- Eine höhere Umweltqualität kommt nur auf Kosten des materiellen Wachstums
- Aber dafür steigt der Nutzen aus Umwelt und der kombinierte Nutzen steigt über die Zeit
- Der zentrale Planer gibt also Konsumwachstum auf, um dadurch die Umweltqualität zu erhalten
- Ein Teil der Arbeitnehmer (eben  $L_B$ ) wird verwendet, um die Emissionen auf ein nachhaltiges Niveau (sprich, die Umweltqualität bleibt gleich) zu senken

## 18.3 Zusammenfassung: Wachstum, globale Erwärmung und Umweltschutz

Wir haben drei Modelle bzw. drei Varianten eines Modelles betrachtet

- Endogenes Wachstum
- Nicht-internalisierte Externalitäten
- Internalisierte Externalitäten

Das Modell endogenen Wachstums

- Endogenes langfristiges Wachstum (im Gegensatz zu exogenem Wachstum bei Solow) resultiert aus Investitionen in bessere Technologien (Ingenieure, Manager, ...)
- Im Rahmen eines Modells mit zentralem Planer bekommen wir die optimale Wachstumsrate (32) für die Ökonomie,  $g = \frac{\psi L - \rho}{\sigma}$
- Dies hat mit Emissionen, Umweltverschmutzung und globaler Erwärmung (erstmal) nichts zu tun



## Das Modell mit nicht-internalisierten Externalitäten

- Nun betrachten wir einen (realistischeren) Rahmen, wo der Produktionsprozess auch zu Emissionen (33) führt,  $W(t) = \bar{B}C(t)$
- Die Wachstumsrate ist also weiterhin  $g = \frac{\psi L - \rho}{\sigma}$ , da die Externalitäten nicht internalisiert werden
- Die Verschmutzungsintensität  $\bar{B}$  ist konstant, so dass die Emissionen  $W(t)$  bei steigendem Konsum ebenfalls steigen
- Dies führt zu einem Rückgang der Umweltqualität  $Q(t)$  (das “Katastrophenszenario”)
- Der materielle Wachstum steigt zwar, aber de facto geht es Individuen immer schlechter, vgl. Abbildung 80
- Dies beschreibt aktuelle Entwicklung der Welt möglicherweise am besten

## Das Modell mit internalisierten Externalitäten

- Hier betrachten wir einen zentralen Planer, der alle Effekte wirtschaftlicher Aktivität berücksichtigt
- Insbesondere werden die Effekte der Emissionen  $W(t)$  auf die Umweltqualität  $Q(t)$  berücksichtigt
- Die optimale Lösung beinhaltet eine Investition (Beschäftigung von  $L_B > 0$ ) in die Reduktion der Emissionsintensität  $B(t)$
- Als Folge davon bleibt die Umweltqualität erhalten, das Konsumwachstum ist allerdings (leicht) geringer
- Insgesamt steigt der kombinierte Nutzen aus Konsum und Umwelt allerdings schneller als in einer Welt, in der Externalitäten ignoriert werden
- Internalisierung externer Effekte ist wünschenswert (in diesem Modell und auch allgemein gesprochen)
- Weitere Referenzen: Bovenberg und Smulders (1995), Nordhaus (1992, 2007), van der Ploeg und Withagen (2013) und viele andere

## 19 Die Antworten aus makroökonomischer Sicht

### 19.1 Was waren die Fragen?

- Die Endlichkeit des Systems Erde: Gibt es unendliches Wachstum in einer endlichen Welt (*nicht-erneuerbare* Ressourcen)?
- Die globale Erwärmung (*erneuerbare* Ressourcen): Was versteht man unter globaler Erwärmung und welche Rolle spielt das Wirtschaftswachstum?
- Kann etwas gegen die globale Erwärmung unternommen werden?

## 19.2 Die ökonomische Antwort

- Nicht-erneuerbare Ressourcen (Öl, Kohle)
  - Don't worry, be happy
  - Das Wirtschaftssystem weiß, wie es mit knappen Ressourcen umgehen muss
  - (Vielleicht nicht das politisch-militärische System)
  - Höhere Preise führen zu
    - \* Investitionen in bessere Verwendung knapper Ressourcen (3-Liter Auto)
    - \* Substitution von knappen Ressourcen (Solarenergie)

- Erneuerbare Ressourcen (globale Erwärmung)
  - Grundproblem: Emissionen stellen einen externen Effekt dar, der über den freien Markt nicht angemessen berücksichtigt wird
  - Lösung: Internalisierung der externen Effekte
  - Vorlesung: Zwei bis drei Modelle kennengelernt, die veranschaulichen, was der Unterschied zwischen nicht-internalisierten und internalisierten externen Effekten bedeutet
  - Auch kennengelernt: Möglichkeit empirisch zu messen, ob aktuell tatsächlich ausreichend Internalisierung stattfindet

- Und was kann nun gegen die globale Erwärmung unternommen werden?
  - “Green growth”, also grünes Wachstum (siehe Modell oben mit ausreichend technologischem Wandel zur Reduktion der Emissionen)
  - Wachstumsprozess an sich wird etwas abgedämpft aber nicht fundamental verändert
  - Entkopplung von Wirtschaftsleistung und Umweltauswirkungen soll ein nachhaltiges Wachstum ermöglichen ohne dabei das Klima und die Umwelt zu gefährden

- Was würde grünes Wachstum zur Erreichung des “Zwei-Grad-Zieles” benötigen?

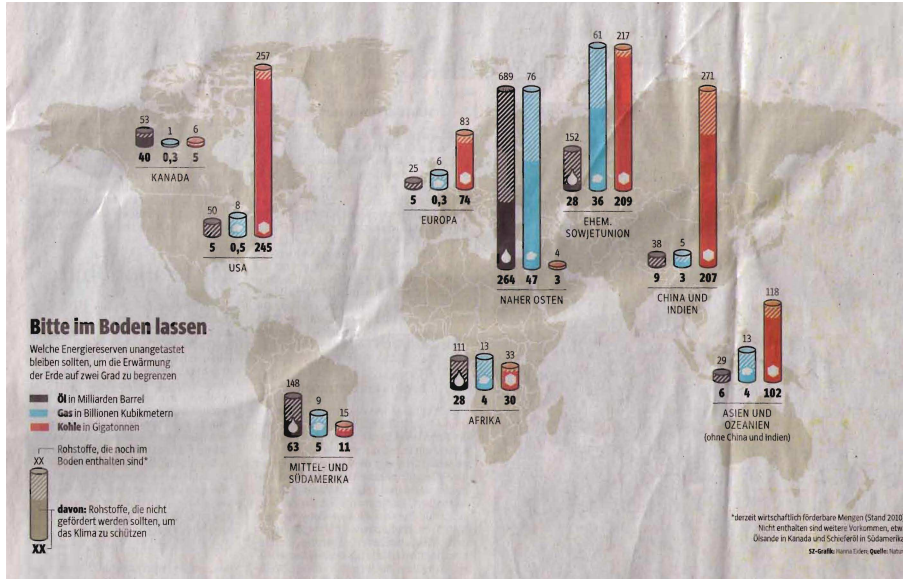


Abbildung 82 Natürliche Rohstoffe, die nicht verwendet werden sollten. Quelle: Süddeutsche Zeitung vom 8. Januar 2015

- Ist grünes Wachstum möglich?
  - Empirische Frage, ob es bisher gelungen ist (großer Zweifel, sonst gäbe es keine globale Erwärmung) bzw. ob die Welt ausreichend schnell auf dem Pfad des grünen Wachstums kommt (offene Frage, berechtigter Zweifel)
  - Einige glauben, dass sich das Energie- und Klimaproblem nicht allein mit Effizienz und neuer Technologie lösen lässt und fordern stattdessen eine Abkehr vom ökonomischen Prinzip des Wachstums
  - Vertreter der Postwachstumsökonomie (vgl. Brand 2012, Paech 2012, Welzer 2011) untersuchen alternative Entwicklungsmöglichkeiten für Ökonomie und Gesellschaft, die nicht auf Wachstum im Sinne eines steigenden Bruttoinlandsproduktes, angewiesen sind



## 19.3 Die ökonomisch-psychologisch-politische Antwort

### 19.3.1 Was fehlt zu einem nachhaltigen Wirtschaften?

- Ergebnis einer typischen ökonomischen Analyse
  - Aufzeigen von Handlungsoptionen
  - Es ist Aufgabe der Politik, diese umzusetzen (z.B. durch Steuergesetzgebung a la Pigou)
- Dieser Abschnitt geht etwas weiter und fragt, warum bisher die Umsetzung nicht stattgefunden hat, die obiges Modell mit Internalisierung vorschlägt
- Es gibt keinen weltweiten zentralen Planer ...
  - Die Welt besteht aus einer Vielzahl von selbständigen Staaten
  - die wiederum aus einer viel größeren Vielzahl von Individuen besteht
  - der Koordinationsprozess zwischen diesen Individuen ist nicht machbar und wird deswegen (in einigen Staaten) delegiert an gewählte Vertreter
  - Im Prinzip übernehmen die Regierungen die Aufgaben des zentralen Planers für einen Staat

- ... aber wir kommen dem teilweise relativ nah
  - Auf den Klimakonferenzen treffen sich um die 180 Staaten, die (mehr oder weniger) gemeinsam die Weltklimapolitik festlegen
  - Internationale Externalitäten sollten so stärker berücksichtigt werden, als wenn jeder einzelne Wähler bei der Stimmabgabe an alle Konsequenzen denken muss
  
- Ein idealistisches Szenario
  - Nehmen wir an, alle nationalen Partialinteressen spielten keine Rolle
  - Nehmen wir weiter an, auf den Klimagipfeln fände eine perfekte Internalisierung statt
  - Was ist dann das Problem?

- Die Wähler zuhause
  - Eine Kommission der “American Psychological Association” (Swim et al, 2011) arbeitete die psychologischen Aspekte der globalen Erwärmung aus
  - Die Fragen lauteten u.a.
    - \* Wie verstehen Individuen das Risiko durch die globale Erwärmung?
    - \* ...
    - \* Welche psychologischen Barrieren beschränken Umkehrmaßnahmen?
  - Individuen müssten u.a. (i) sich der Risiken besser bewusst sein und dies auch emotional erfahren (Angst), (ii) Empathie mit den Hauptgefährdeten globalen Wandels entwickeln, (iii) persönliche Handlungsoptionen identifizieren und (iv) die Thematik präsent halten
  - Ansonsten sind Entscheidungen eines beinahe zentralen Planers politisch nicht vermittelbar
  - Somit: die Lösung des Problems der globalen Erwärmung liegt in den Händen eines jeden Einzelnen