

# Kapitel 4: Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Gliederung:

- 4.0 Einführung
- 4.1 Hotelling-Regel
- 4.2 Hartwick-Regel
- 4.3 Konsumententwicklung bei zinsabhängigem Sparen
- 4.4 Technischer Fortschritt

---

### Literatur:

- Bretschger, L. (1999), Growth Theory and Sustainable Development, Cheltenham: Edward Elgar
- Dasgupta, P.S./Heal, G.M. (1979), Economic Theory and Exhaustible Resources, Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanley, N./Shogren, J.F./White, B. (2001), Introduction to Environmental Economics, Oxford: Oxford University Press
- Bretschger, L. (2005), Economics of Technological Change and the Natural Environment: How Effective are Innovations as a Remedy for Resource Scarcity?, Ecological Economics, 54 (2-3): 148-163.

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### 4.0 Einführung

Nicht-erneuerbare Ressourcen:

- Gegebener, nicht-nachwachsender Bestand
- Frage: Wie sollte Bestand im Zeitablauf abgebaut werden (optimaler Abbaupfad)?

Nachhaltige Entwicklung bzgl. nicht-erneuerbarer Ressourcen:

- strong sustainability – im Sinne eines konstanten Bestandes – nur möglich, wenn kein Abbau der Ressourcen
- weak sustainability möglich, wenn Abbau des Bestandes durch Akkumulation anderer Arten von Kapital/Ressourcen kompensiert.
- Nachhaltigkeit als nicht-abnehmende Wohlfahrt/Konsum:
  - möglich unter bestimmten Annahmen (siehe 4.2 und 4.3)

### 4.1 Hotelling-Regel (Hotelling 1931)

- Beschreibt Entwicklung des Preises nicht-erneuerbarer Ressourcen im Zeitablauf:

$$\text{Wachstumsrate der Ressourcen-Rente } (g_{p_R^n}) = \text{Zinssatz } (r)$$

$$\begin{aligned} (\text{Ressourcen-Rente } (p_R^n) &= \text{Preis der Ressource } (p^R) - \text{marginale Extraktionskosten } (c^R) \\ &\rightarrow \text{Nettogewinn aus Abbau der Ressource}) \end{aligned}$$

#### No-Arbitragebedingung

- Wertzuwachs des Ressourcenstocks im Zeitverlauf entspricht der Verzinsung alternativer Anlageformen (Marktzinssatz)
  - Ressourcenbestand als Art der Kapitalanlage
  - Preis der nicht-erneuerbaren Ressource steigt im Zeitablauf

- Intuition:** Unternehmen haben 2 Alternativen:
- entweder: Abbau des Ressource heute und Anlage der Gewinne auf Kapitalmarkt  
 → Verzinsung der angelegten Mittel zum Marktzinssatz
- oder: Kein Ressourcenabbau heute, sondern Abbau zu späterem Zeitpunkt  
 → Kosten: entgangene Verzinsung durch Anlage auf Kapitalmarkt  
 → Nutzen: In der Zukunft erzielte Gewinne aus Ressourcenabbau

Im Gleichgewicht: Unternehmen indifferent zwischen Alternativen

→ Anstieg des Ressourcenpreises ( $g_{p_R^n}$ ) muss entgangene Verzinsung ( $r$ ) kompensieren

Denkbare Szenarien:

- $g_{p_R^n} > r$ : Ressource nicht heute abbauen, da Wertsteigerung des Ressourcenbestandes größer als Verzinsung
- $g_{p_R^n} < r$ : Ressourcenextraktion steigern und Anlage der Erträge auf Kapitalmarkt
- $g_{p_R^n} = r$ : Produzent indifferent zwischen Extraktion heute und Verschiebung des Ressourcenabbaus

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

Im Gleichgewicht: Verzinsung der Anlage des Gewinns aus dem Verkauf der abgebauten Ressource ( $p_R^n$ ) auf dem Kapitalmarkt muss der Verzinsung bei Anlage in alternative Vermögensformen entsprechen

$$p_{R1}^n (1 + r) = p_{R2}^n \quad \text{äquivalent zu:} \quad W_1^R (1 + r) = W_2^R$$

damit gilt:  $\frac{p_{R2}^n}{p_{R1}^n} = 1 + r \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{\frac{p_{R2}^n - p_{R1}^n}{p_{R1}^n} = g_{p_R^n} = r}$

$\Rightarrow$  wenn Periodenlänge gegen Null (zeitstetig):  $\Rightarrow p_{Rt}^n = p_{R0}^n e^{r \cdot t}$

$p_{Rt}^n$  Gewinn aus Ressourcenverkauf zum Zeitpunkt  $t$ ,  $t=0,1,2$

$W_t$  alternative Vermögensanlage

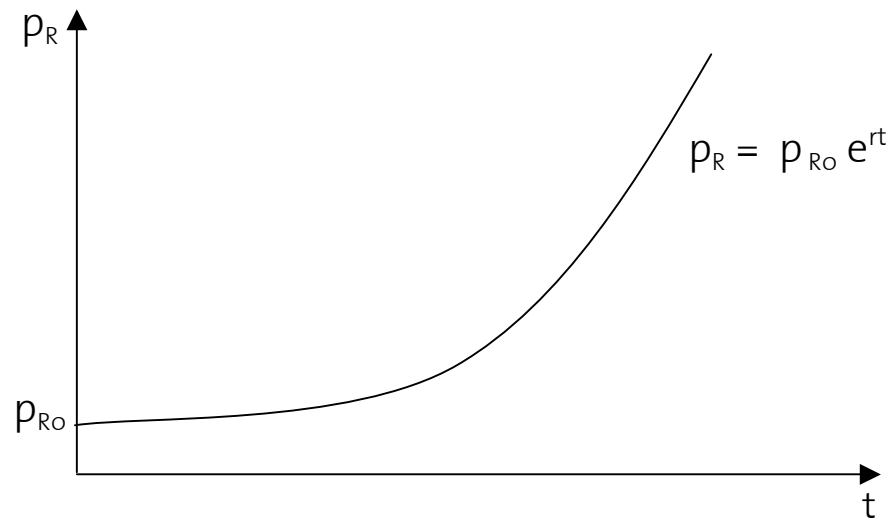
$r$  Marktzinssatz

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

Vereinfachende Annahme: Extraktionskosten vernachlässigbar gering ( $c^R = 0$ )

→ Gewinn aus Abbau der Ressource entspricht Preis der Ressource:  $p_R^n = p_R$

Graphische Darstellung des Hotelling-Preispfades:



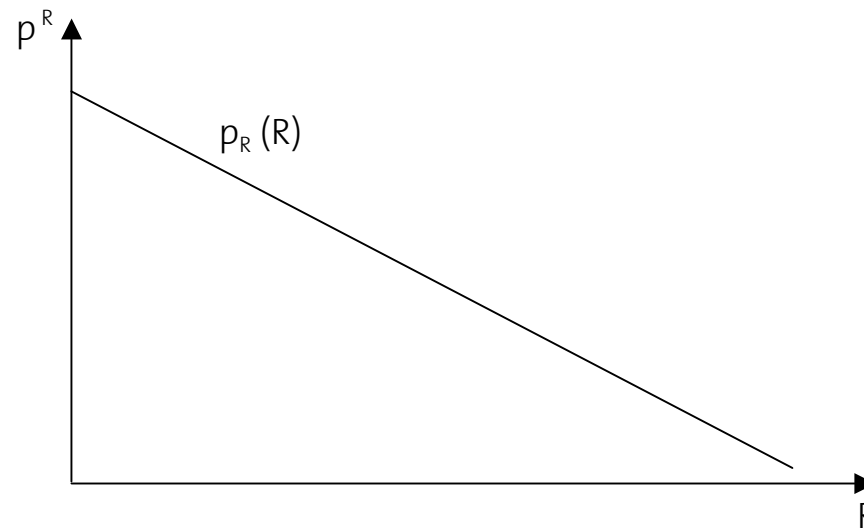
### Optimale Höhe und Entwicklung der Abbaumenge der Ressource:

bestimmt durch

1. Hotelling-Preispfad
2. Nachfrage
3. Bestand der Ressource

1. Hotelling-Preispfad: s.o.

2. Nachfrage:

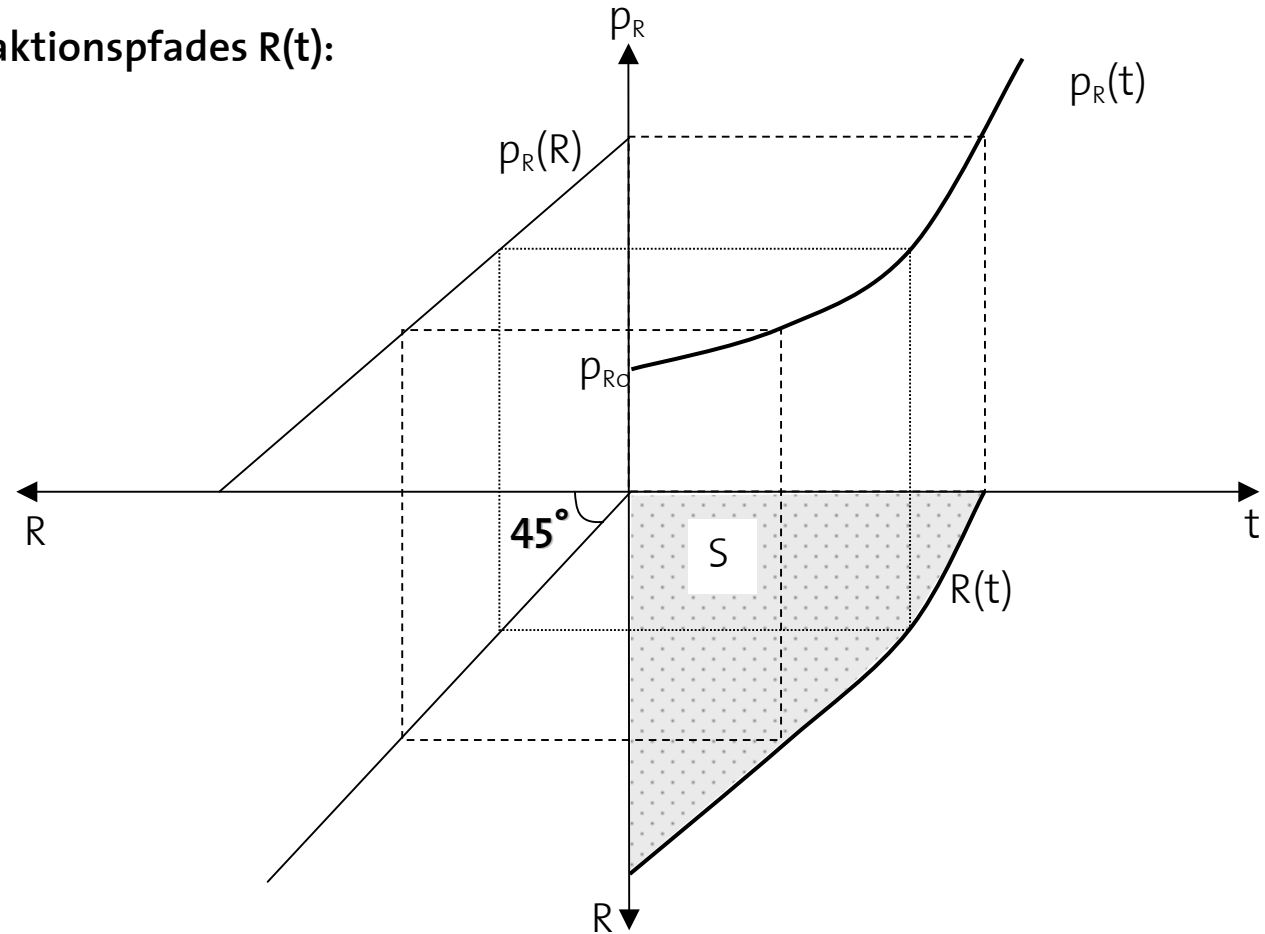


## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### 3. Bestand zu Beginn des Betrachtungszeitraumes: $S_0$

→ 1.-3. bestimmen simultan die Höhe und Entwicklung der Ressourcenextraktion

Ableitung des Ressourcenextraktionspfades  $R(t)$ :



$p_{Ro}$  : so gewählt, dass bei gegebener Nachfrage und gegebenem Zinssatz der gesamte Ressourcenbestand  $S_0$  abgebaut wird.

In Realität: Entwicklung des Preispfades häufig nicht wie durch Modell vorausgesagt

o Gründe z.B.:

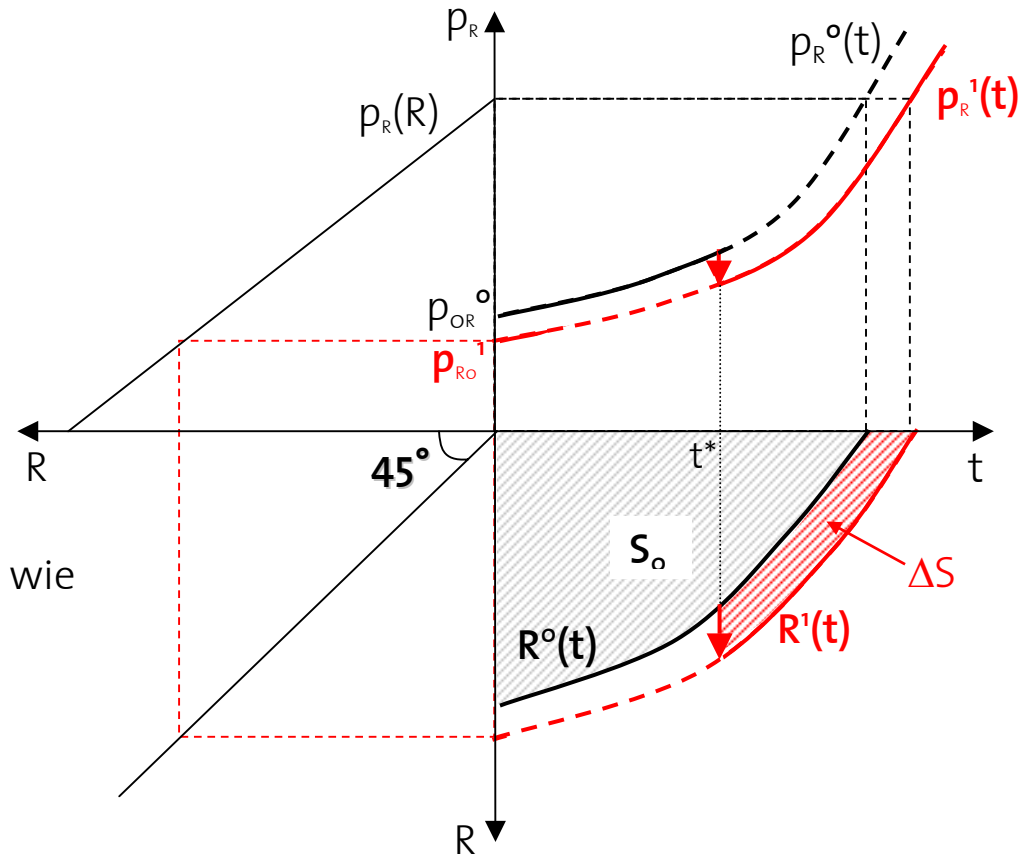
- Entdeckung neuer Vorkommen
- Änderung der für Unternehmen exogenen Parameter (z.B. des Marktzinssatzes)
- Existenz von Backstop-Ressourcen
- Reduktion der Abbaukosten durch technischen Fortschritt
- unsichere Eigentumsverhältnisse
- Änderung der Marktmacht



## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Beispiel 2: Entdeckungen neuer Vorkommen in $t^*$ ( $S_o^1 = S_o^o + \Delta S$ )

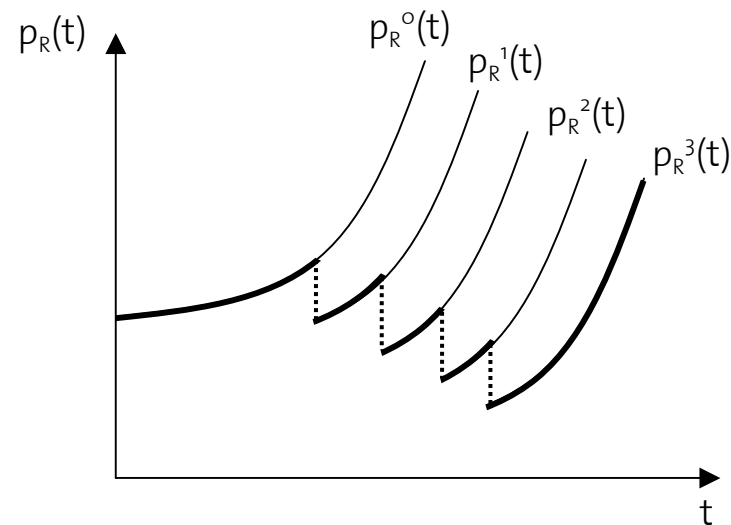
- Knappheit der Ressource sinkt
- Preis in  $t^*$  sinkt
- höhere Nachfrage bei geringerem Preis
- höhere Extraktion der Ressource
- rot schraffierte Fläche repräsentiert zusätzlichen Ressourcenabbau
- Steigung des Preispfades bleibt - ebenso wie Nachfrage - gleich



## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Mehrere neue Explorationen:

- jeweils Verschiebung des Preispfades nach unten
- Preispfad weist fallende Segmente auf
- potentielle Erklärung für empirische Beobachtungen

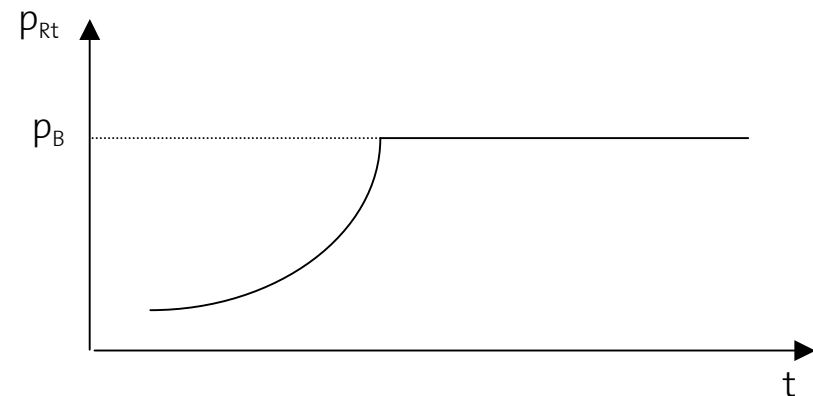


## Beispiel 3: Backstop-Ressource

- Ressource, die zu konstanten marginalen Kosten in unendlicher Menge zur Verfügung steht.
- Konsequenz für Preisentwicklung bei nicht-erneuerbarer Ressource:

Preisobergrenze  
=  
Grenzkosten der Backstop-Technologie

( $p_B$ : Preis der Backstopressource)



### 4.2 Hartwick-Regel

- Abschnitt 3.1 zeigte: Einsatz der Ressource sinkt im Zeitablauf
- Frage: Kann dies kompensiert werden, so dass Konsum im Zeitablauf konstant?
- Antwort: unter bestimmten Voraussetzungen ja, solange in ausreichender Menge produzierbares Kapital akkumuliert wird
- Voraussetzung: Substitutionselastizität zwischen Ressource und anderen Kapitalarten:  $\sigma \geq 1$

- Substitutionselastizität  $\sigma$ 
    - $\sigma > 1$ : Ressourcen können gut substituiert werden
    - $\sigma < 1$ : Ressourcen können schlecht substituiert werden
    - $\sigma = 1$ : Ressourcen können substituiert werden, aber beide Produktionsfaktoren sind notwendig für die Produktion (Cobb Douglas-Fall)
- 

- Frage: Was heißt in ausreichender Menge akkumuliert?

Einfaches **Modell vom Solow-Typ** (vgl. Kapitel 2.2)

- Annahmen:
  - vollständige Konkurrenz
  - konstante Sparquote
  - Vereinfachung: keine Abschreibungen

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

- Produktionsfunktion:

$$\circ Y = F(K,R) = K^\alpha R^{1-\alpha} \quad \text{mit } 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$\text{Wachstumsrate des Outputs:} \quad g_Y = \alpha g_K + (1-\alpha)g_R = g_K + (1-\alpha)(g_R - g_K)$$

- Entwicklung des Kapitalstocks:

$$\dot{K} = sY \quad \Leftrightarrow \quad g_K = \frac{\dot{K}}{K} = s \frac{Y}{K}$$

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

- Optimaler Einsatz der Inputfaktoren:

Gewinnmaximierung der Unternehmen:  $\max \Pi = y - rK - p_R R \quad (p_y = 1)$   
 $= K^{1-\alpha} R^\alpha - rK - p_R R$

- $\frac{\partial \Pi}{\partial R} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad p_R = \frac{\partial Y}{\partial R}$   
 $= (1-\alpha) K^\alpha R^{-\alpha} = (1-\alpha) \left(\frac{K}{R}\right)^\alpha$

Ressourcenpreis = Grenzprodukt des Ressourceneinsatzes

→ Wachstumsrate des Ressourcenpreises:  $g_{p_R} = \alpha(g_K - g_R)$

- $\frac{\partial \Pi}{\partial K} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad r = \frac{\partial Y}{\partial K}$   
 $= \alpha K^{\alpha-1} R^{1-\alpha} = \alpha \frac{Y}{K}$

Zinssatz = Grenzprodukt des Einsatzes physischen Kapitals

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

- Hotelling-Regel: Wachstumsrate des Ressourcenpreises = Zinssatz

$$\alpha(g_K - g_R) = \alpha \frac{Y}{K}$$

$$\Leftrightarrow g_K - g_R = \frac{Y}{K}$$

- Einsetzen in Wachstumsrate von Y:

$$g_Y = g_K - (1-\alpha)(g_K - g_R) \quad \text{wobei } g_K - g_R = \frac{Y}{K} \text{ und } g_K = s \frac{Y}{K}$$

$$= s \frac{Y}{K} - (1-\alpha) \frac{Y}{K}$$

$$= (s - (1-\alpha)) \frac{Y}{K}$$

→ konstantes Einkommen ( $g_Y = 0$ ), wenn

$$\boxed{s = 1 - \alpha} \quad \text{(Hartwick-Regel)}$$

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

- Sparquote von  $1 - \alpha$  impliziert:

Wert des aggregierten Bestandes aus physischem Kapital und Ressourcen im Zeitablauf konstant

→ schwache Nachhaltigkeit

(Erträge aus Einsatz der natürlichen Ressource in Aufbau des Kapitalstocks investiert)

Wert der Nettoinvestition:	Wert der Investition in physisches Kapital:	$\dot{K} = sY = (1 - \alpha)Y$
	Wert der Investition in Naturkapital:	$-p_R R = -(1 - \alpha)Y$
		$\sum = 0$

(zur Erinnerung: Bedingung erster Ordnung:  $p_R = (1 - \alpha) \frac{Y}{R} \Leftrightarrow R = (1 - \alpha) \frac{Y}{p_R}$ )

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

**Annahmen, die entscheidend sind für das Ergebnis:**

- kein technologischer Fortschritt
- kein Bevölkerungswachstum
- nicht-erneuerbare Ressourcen
- Substitutionselastizität = 1

**Bei Änderung dieser Annahmen:** → Modifikation der Regel notwendig (vgl. Kapitel 1)

---

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Beispiel: technischer Fortschritt

(z.B. Verbesserung der Effizienz des Ressourceneinsatzes)

- Produktionsfunktion:  $Y = F(K,R) = K^\alpha (AR)^{1-\alpha}$  mit  $g_A > 0$

- Wachstumsrate des Outputs:  $g_Y = \alpha g_K + (1-\alpha)(g_A + g_R)$   
 $= g_K + (1-\alpha)(g_A + g_R - g_K)$

$$\text{mit } g_K = s \frac{Y}{K} \text{ und } g_K - g_R = \frac{Y}{K}: \quad = (s - (1-\alpha)) \frac{Y}{K} + (1-\alpha) g_A$$

Aus  $g_Y = (s - (1-\alpha)) \frac{Y}{K} + (1-\alpha) g_A$  folgt:

$$\rightarrow \text{wenn } s = 1 - \alpha: \quad g_Y = (1-\alpha) g_A > 0$$

→ d.h., wenn Erträge aus Ressourcenabbau vollständig reinvestiert

→ langfristiges Wachstum möglich

→ Langfristig konstanter Output möglich ohne vollständige Reinvestition der Ressourcenerträge

### 4.3 Konsumententwicklung bei zinsabhängigem Sparen

- Frage: Langfristig konstanter Konsum möglich, wenn HH zukünftigen Nutzen diskontieren?
- Unternehmen: gleiche Produktionstechnologie in 4.2
- Haushalte: maximieren intertemporalen Nutzen (vgl. Kapitel 2.3)
  - Keynes-Ramsey-Regel

$$g_c = \frac{1}{\gamma}(r - \rho) \quad \Leftrightarrow \quad g_c = \frac{1}{\gamma}(F_K - \rho) \quad \Leftrightarrow \quad g_c = \frac{1}{\gamma} \left( \alpha \left( \frac{R}{K} \right)^{1-\alpha} - \rho \right)$$

→ langfristig konstantes Konsumniveau ( $g_c = 0$ ) möglich?

→ abhängig von Entwicklung des Grenzproduktes des Kapitals  $\alpha \left( \frac{R}{K} \right)^{1-\alpha}$ , d.h.

→ abhängig von Entwicklung von R und K

- Entwicklung des Einsatzes von R und K:
  - R: sinkt im Zeitverlauf
  - K: steigt, bleibt konstant oder fällt:

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

1. Fall: K steigt/bleibt konstant  $\rightarrow \alpha \left( \frac{R}{K} \right)^{1-\alpha}$  fällt
2. Fall: K fällt  $\rightarrow \alpha \left( \frac{R}{K} \right)^{1-\alpha}$  kann steigen (ABER: langfristig  $c \rightarrow 0$ )

- Entwicklung des Konsums bei zunächst steigendem/konstanten K:

- kurzfristig: Konsum kann steigen ( $g_c > 0$ )

(solange Grenzprodukt des Kapitals  $>$  Diskontrate:  $\alpha \left( \frac{R}{K} \right)^{1-\alpha} > \rho$ )

- langfristig: Konsum geht gegen Null ( $g_c < 0$ )

(Grenzprodukt fällt unter Diskontrate:  $\alpha \left( \frac{R}{K} \right)^{1-\alpha} < \rho$ )

- Langfristig kein konstantes Konsumniveau möglich

- Grund:

- Diskontierung des Nutzens

$\rightarrow$  Sparen zu gering, um langfristig konstanten Konsum zu erreichen

- damit langfristig konstanter oder sogar steigender Konsum möglich

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

→ technischer Fortschritt notwendig

→ z.B.  $Y = F(K,R) = K^\alpha (AR)^{1-\alpha}$

$$\rightarrow g_c = \frac{1}{\gamma} \left( \alpha \left( \frac{AR}{K} \right)^{1-\alpha} - \rho \right)$$

→ Ausgleich des Rückgangs des Ressourceninputs durch Steigerung der Effizienz des Ressourceneinsatzes

### 4.4 Technischer Fortschritt

- Wie viel technischer Fortschritt ist nötig für das Erreichen der Nachhaltigkeit?
- Welche Art des technischen Fortschritts ist nötig für das Erreichen der Nachhaltigkeit?
- Wie viel technischer Fortschritt resultiert unter freien Marktbedingungen?
- Wie stark wird durch steigende Ressourcenpreise zusätzlicher technischer Fortschritt induziert?

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

Wie viel technischer Fortschritt ist nötig?

Beispiel: Nordhaus (1992)

Integration von technischem Fortschritt und Ressourcenverbrauch in ff. Produktionsfunktion:

$$Y = A \cdot K^\alpha \cdot R^\theta \cdot L^\omega \cdot O^\zeta$$

wobei:

$A$  - Stand des technischen Wissens

$K$  - Kapital

$R$  - erschöpfbare Ressource

$L$  - Arbeit

$O$  - Land (= konstant)

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Dynamik und Nachhaltigkeit

Unter Annahme realistischer Parameterwerte und einer optimalen Abbaugeschwindigkeit für  $R$  ergibt sich:

$$g_Y > 0 \quad \text{falls} \quad g_A > 0.0025$$

1/4 Prozent an technischem Fortschritt pro Jahr reicht in diesem Fall aus, um Nachhaltigkeit zu erreichen.

### Kritik

- Substitutionselastizitäten zwischen natürlichen Ressourcen und Kapital sind (in gewissen Sektoren der Wirtschaft) kleiner Eins.
- Keine Erklärung des Ursprungs des technischen Fortschritts.

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

Beispiel: AK-Einsektoren-Modell

$$Y = A \cdot K \cdot R^{1-\alpha}$$

$$MPK = A \cdot R^{1-\alpha}$$

Sobald Einsatz von  $R$  zurückgeht, sinkt  $MPK$  und damit das Wachstum.

Hört die Ersparnisbildung auf, bleibt  $K$  konstant.

Da  $R$  weiter abnimmt, sinkt das Einkommen im Zeitablauf

→ keine Nachhaltigkeit trotz „AK-Annahme“

→ auch  $A$  muss sich verändern (=techn. Fortschritt)

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Innovationscharakteristiken

1. Ein grosser Anteil der Forschung wird durch profitmaximierende Firmen betrieben.
2. Firmen profitieren von ihrer Forschung, weil
  - neue Erfindungen patentiert werden können und so einen Zufluss an Monopolrenten generieren, bis die Patente verfallen.
  - es einen Vorteil bedeutet, die erste Firma auf dem Markt zu sein („First Mover Advantage“).
3. Innovationen produzieren Externalitäten, welche die Kosten von zukünftigen Innovationen senken.

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Fragestellungen für theoretische Analyse:

- Prognose der Entwicklung von Technologie (Graduelle Innovation, Mehrzwecktechnologien)
- Langfristige Konsequenzen von Energiepolitik auf Technologie und Wissensformation
- Interaktion von Sektoren, Regionen und Ländern in Bezug auf eine nachhaltige Entwicklung

### Methodisches Vorgehen:

- dynamische makroökonomische Modelle
- aus konsequenter Mikrofundierung hergeleitet
- Schätzgleichungen für empirische Forschung

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

Wissenswachstum determiniert durch

- Menge an Ressourcen, welche im F&E Sektor verwendet werden
- Intensität der Spillover (inländisch, ausländisch)
- relativer Preis *Konsumgüter/Kapitalgüter*
- Produktivität der Forschung
- Ausstattung mit qualifizierter Arbeit
- Diskontrate (negativer Zusammenhang)

### F&E-Entscheidungen

- F&E als gewinnmotivierte Aktivität vs. Faustregeln, Routinen
- Firmen beschränkt rational, aber im Durchschnitt systematische Reaktion der Investoren auf Anreize, z.B. relative Preise und Marktgrösse
- F&E Investitionen gekennzeichnet durch:
  - Hohe Variabilität der erwarteten Erträge
  - Verzerrte Verteilung des Ertrags
  - Generierung eines spezialisierten und nicht greifbaren Aktivums

### Wissensakkumulation

Erfindung, Innovation (Markt), Diffusion

Lernexternalitäten → Wissensakkumulation

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Arten von F&E

Endogener, induziertes F&E → Aggregierte Betrachtung

verzerrendes F&E (“Bias”) → Richtung bzgl Faktorproduktivität, Tendenz

Hicks (1932):

*„a change in the relative price of the factors of production is itself a spur to innovation, and to invention of a particular kind – directed to economizing the factor which has become relatively expensive.“*

### Wirkungen des Strukturwandels

- Sektorale Verschiebungen von Ressourcen und Produktivitäten können Wachstum unterstützen
- Verschiebungen von Ressourcen:
  - Inputverschiebung der Ressourcen aus Produktion in F&E und Bildung
  - Mehr Bildungszeit auf Kosten der Freizeit
- Veränderte Produktivitäten:
  - Z.B. Lernleistungen im Bildungssektor

### Innovationsbasierte Modelle

Wachstumsmechanismus:

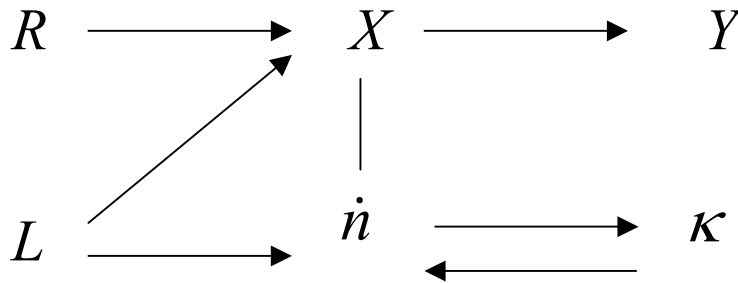
Erfindung neuer differenzierter Varianten durch F&E (“Designs”)

- Angebot differenzierter Güter unter monopolistischer Konkurrenz
- Positive Spillover auf Wissen
- produktiveres F&E etc.

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### F&E-Basismodell

#### Schema



$R$	Ressourcen
$L$	Arbeit
$X$	Aggregat der differenzierten Kapitaldienstleistungen
$n$	Zahl der Designs/ differenzierte Dienstleistungen
$Y$	Endprodukt
$k$	Wissen

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

*Abnahme von  $R$*

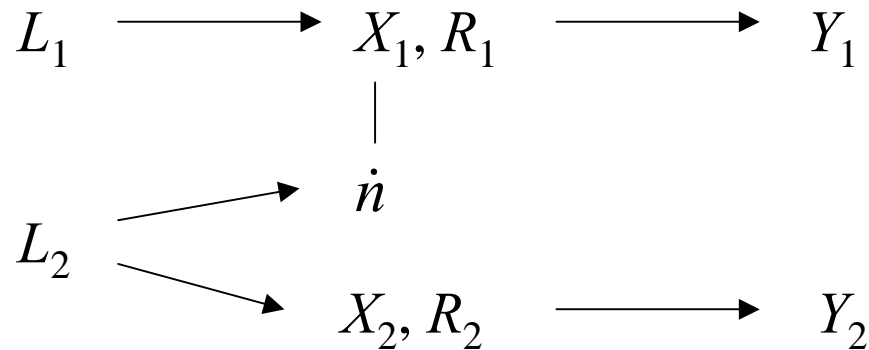
- $R$  wird relativ teurer, was  $L$  zu  $X$ -Produktion hinzieht. (SE)
- $X$  wird teurer, was  $L$  von der  $X$ -Produktion befreit. (OE)
- Insgesamt wird mehr  $L$  in F&E gebraucht *falls*  $OE > SE$ .

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

- Ergebnis:
  - Geringe Substitutionsmöglichkeiten (im X-Sektor) fördern Wissenswachstum!
  - Auch bei „realistischen“ (d.h. tiefen) Werten für die Substitutionselastizität ist nachhaltiges Wachstum möglich
  - Der Strukturwandel unterstützt die Entwicklung Richtung Nachhaltigkeit

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### F&E: Zweisektorenmodell



Spillovers in Abbildung  
nicht berücksichtigt

- Zwei Konsumsektoren 1, 2
- $X$  sektorspezifisch,  $R$  mobil
- $X_1$  ist wie  $X$  oben,  $X_2$  ist homogen
- Fokus auf Kapital-Ressourcen Substitution

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

*Abnahme von  $R$*

Der Preis der  $X$ -Güter steigt, wenn  $X_1$  und  $R_1$  gute Substitute sind.

Die Kosten für Kapitalgüter sinken, wenn  $X_2$  und  $R_2$  schlechte Substitute sind.

Schlechte Substituierbarkeit ist nicht zwingend ein Problem für Wissens- und Wirtschaftswachstum!

Es hängt vom Sektor ab!

## 4. Wirtschaftswachstum bei Nicht-erneuerbaren Ressourcen

### Effizienz und Nachhaltigkeit

- Positive Spillover von F&E scheinen hoch zu sein (→ zu wenig Innovationen unter Marktbedingungen).
- Diversifikationsvorteile variieren sehr stark zwischen den Sektoren.
- Geschwindigkeit der Wissensdiffusion: Rolle von komplementären „Faktoren“ wie Bildung, Kapital und Handel
- Ob Nachhaltigkeit unter Marktbedingungen oder bei optimaler Höhe der Innovationen erreichbar ist bleibt letztlich eine empirische Frage.