

# Umwelt- und Ressourcenökonomik

*Axel Schaffer*

Institut für Entwicklung zukunftsfähiger Organisationen /  
Professur für Nachhaltigkeit und Wandel





# Ressourcenökonomik



- Definitionen
- Bestandsaufnahme Energierohstoffe
- Bestandsaufnahme sonstige Rohstoffe
- Modelle zum Umgang mit erschöpfbaren Ressourcen
  - Sozial optimale Abbaurate
  - Gleichgewichtsabbaurate

# Definitionen aus dem Bereich Energierohstoffe



toe (oil equivalent)

Energie, die durch die Verbrennung einer Tonne Rohöl freigesetzt wird  
(41.868 GJ, 11.630 kWh)

t SKE (Steinkohleäquivalent)

Energie, die durch die Verbrennung einer Tonne Steinkohle freigesetzt wird  
(29.308 GJ, 8.141 kWh)

Reserven

Zu heutigen Preisen und mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Mengen nicht-regenerativer Energierohstoffe.

Höhe der Reserven abhängig von

aktuellen Preisen

Stand der Technik

Ressourcen

Nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene, aber geologisch mögliche, künftig gewinnbare Mengen an Energierohstoffen.

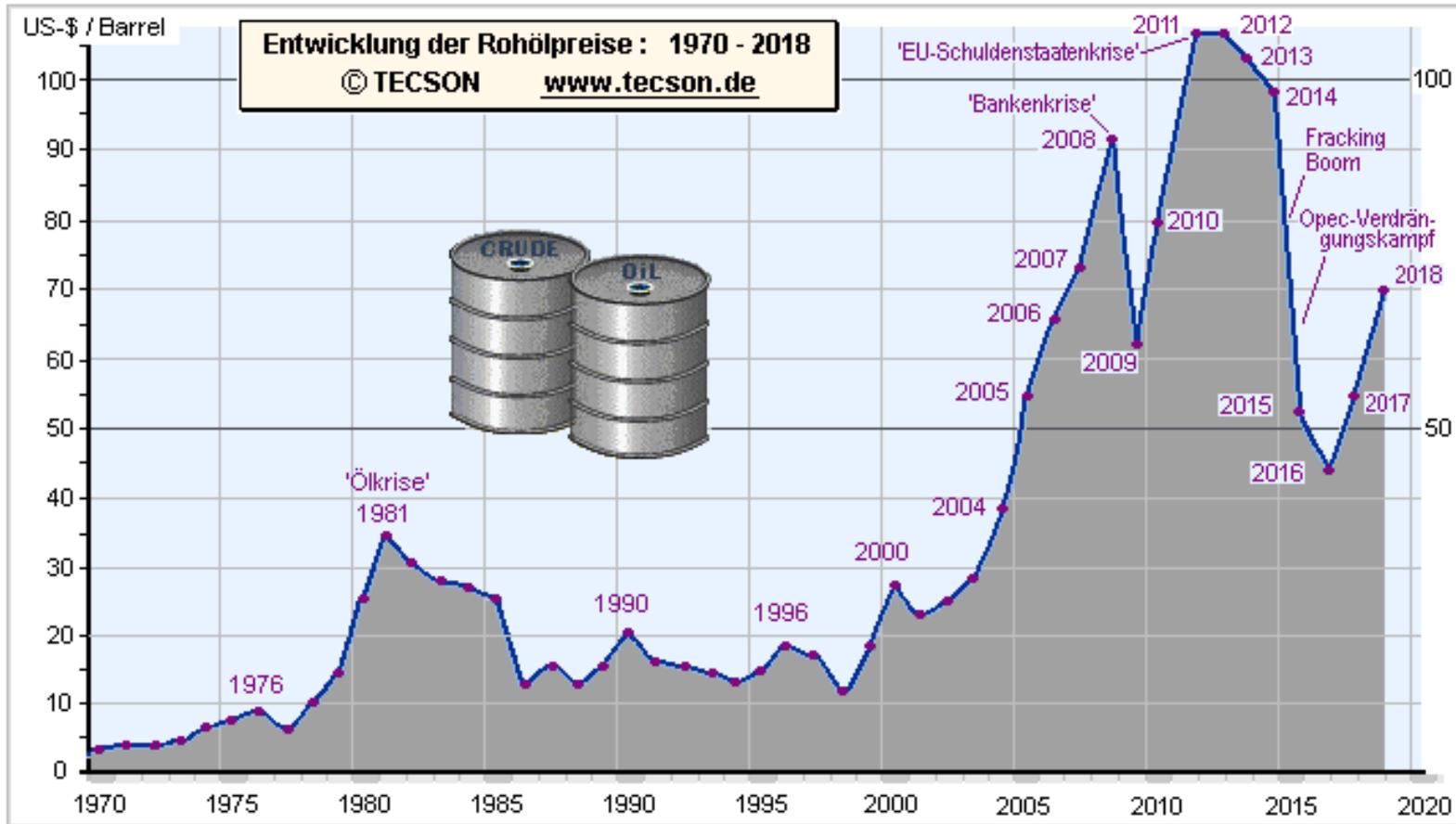
Erdöl konventionell

fließfähiges Erdöl in der Lagerstätte

Erdöl nicht-konventionell

Schweröl, Ölsand, Ölschiefer, bedingt oder nicht fließfähig

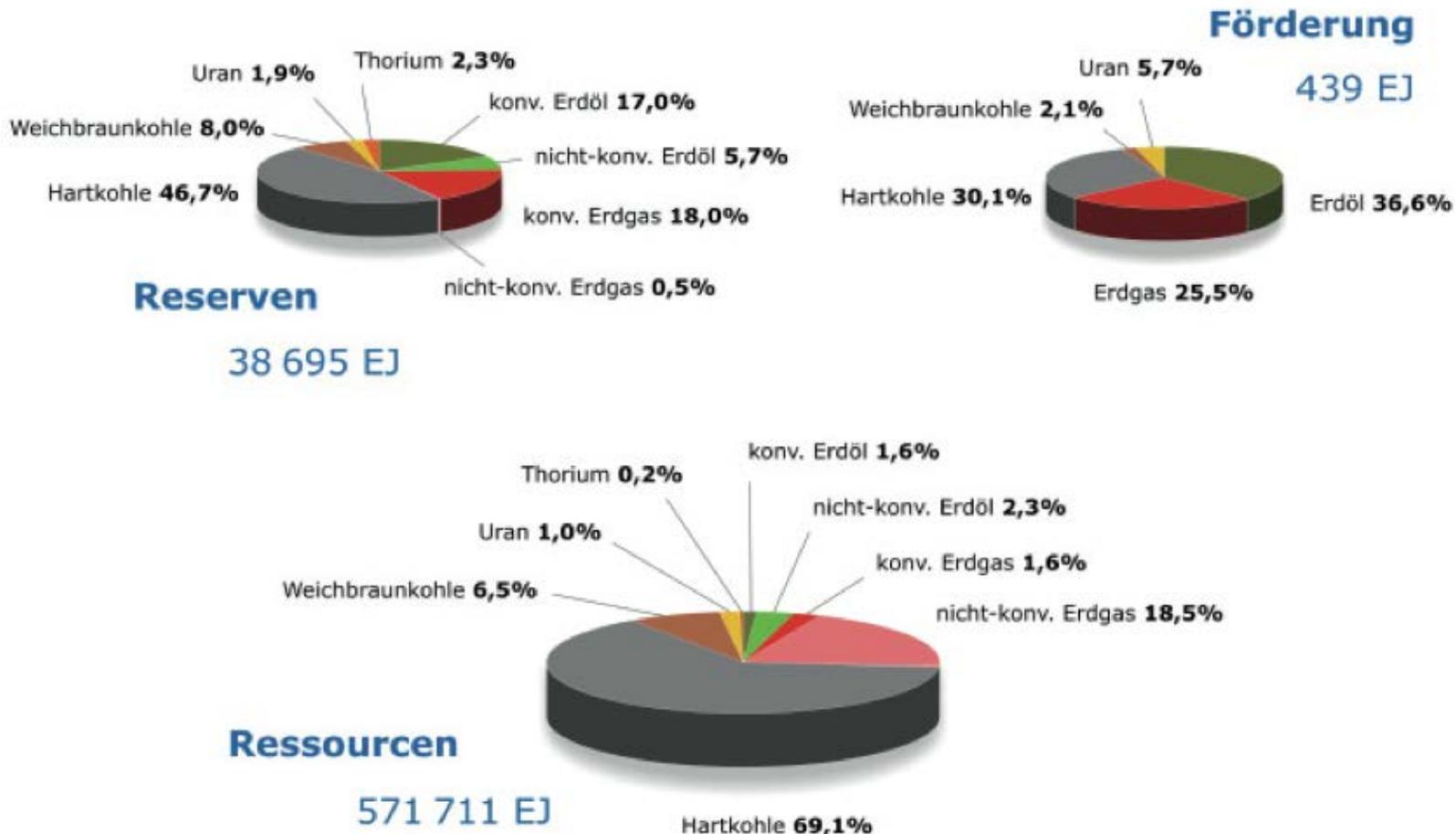
# Preisentwicklung Rohöl



Entwicklung der Erdölpreise / Rohölpreise im Jahresmittel

1 Barrel = 119,24 Liter

# Bestandsaufnahme Energierohstoffe Fördermenge, Reserven, Ressourcen 2007 in Exajoule



1 EJ =  $10^{18}$  J = 34,1 Mt Steinkohleeinheit (SKE)

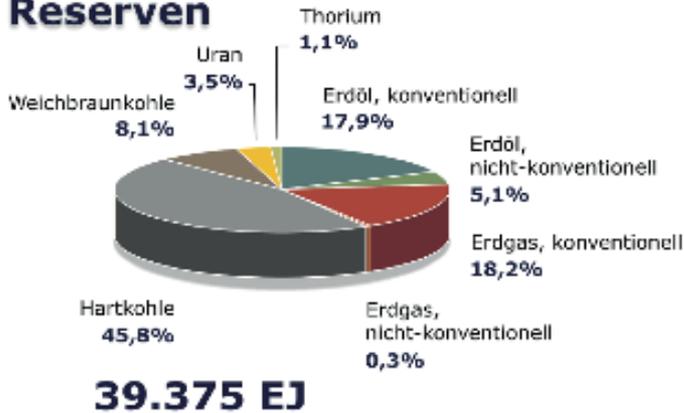
Thorium gehört wie Uran zur Gruppe der Actinoide und wird bei der Erzverarbeitung gewonnen. Im Gegensatz zu Uran ist es weniger effizient und kommt daher kaum zum Einsatz

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Energiestudie 2008

# Bestandsaufnahme Energierohstoffe Fördermenge, Reserven, Ressourcen 2010 in Exajoule

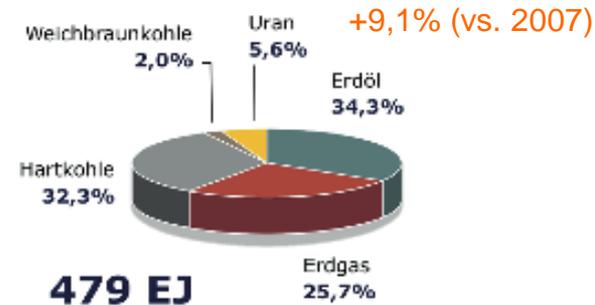


## Reserven



+1,8% (vs. 2007)

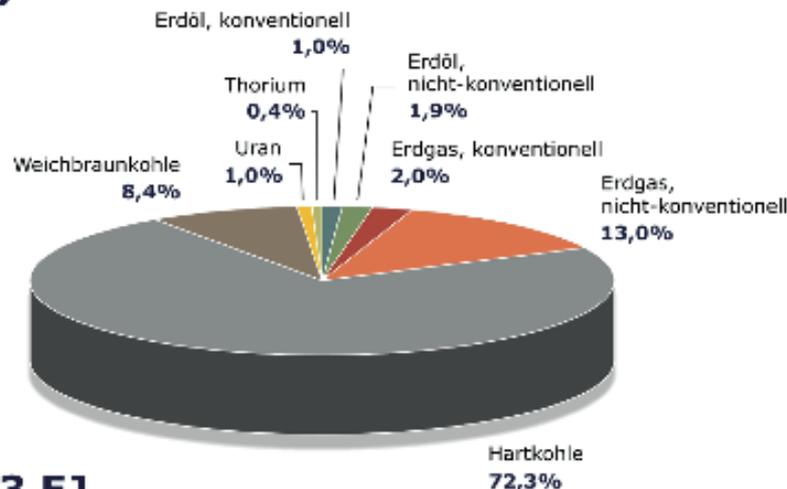
## Produktion 2010



## Ressourcen

+3,2% (vs. 2007)

**590.003 EJ**



1 EJ =  $10^{18}$  J = 34,1 Mt Steinkohleeinheit (SKE)

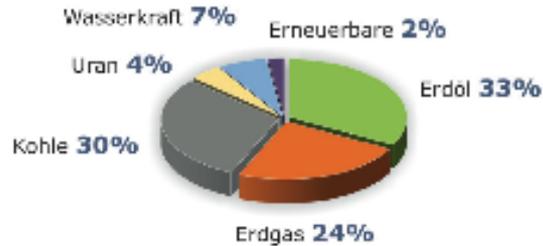
Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Energiestudie 2011

# Bestandsaufnahme Energierohstoffe Fördermenge, Reserven, Ressourcen 2013 in Exajoule



## Energieverbrauch

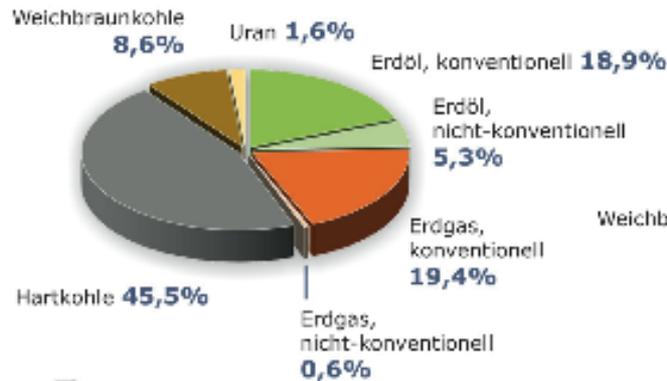
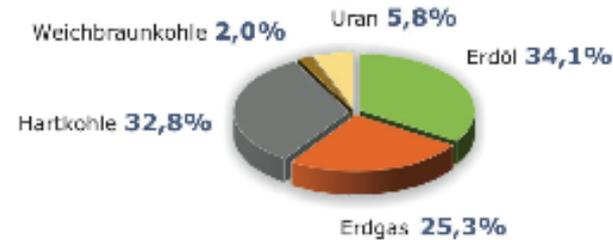
**532 EJ**



## Produktion

**515 EJ**

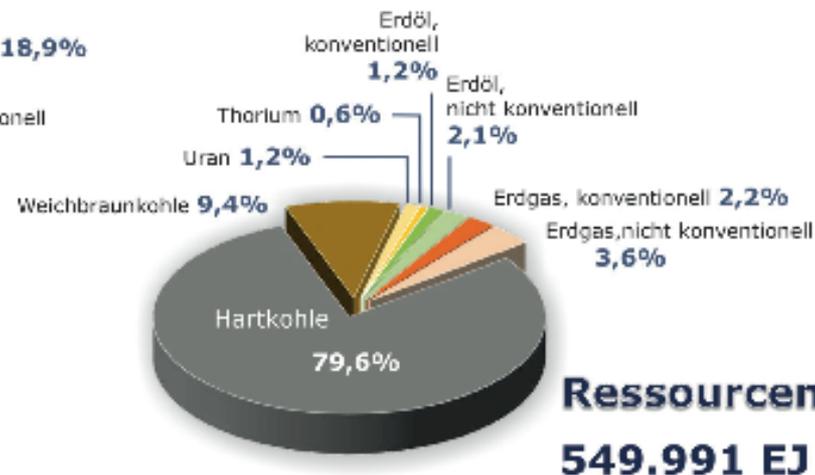
+7,5% vs. 2010 /  
+17,3% vs. 2007



## Reserven

**37.646 EJ**

-4,4% vs. 2010 / -  
2,7% vs. 2007



## Ressourcen

**549.991 EJ**

-6,8% vs. 2010 /  
-3,8% vs. 2007

1 EJ =  $10^{18}$  J = 34,1 Mt Steinkohleeinheit (SKE)

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Energiestudie 2014, S. 16

# Bestandsaufnahme Energierohstoffe Fördermenge, Reserven, Ressourcen 2016 in Exajoule



## Energieverbrauch

600 EJ

+12,8% vs. 2013



## Produktion

515 EJ

+/- 0% vs. 2013  
(gestiegener Verbrauch durch erneuerbare Energie möglich)



## Reserven

39.530 EJ

+5% vs. 2013

## Ressourcen

550.690 EJ

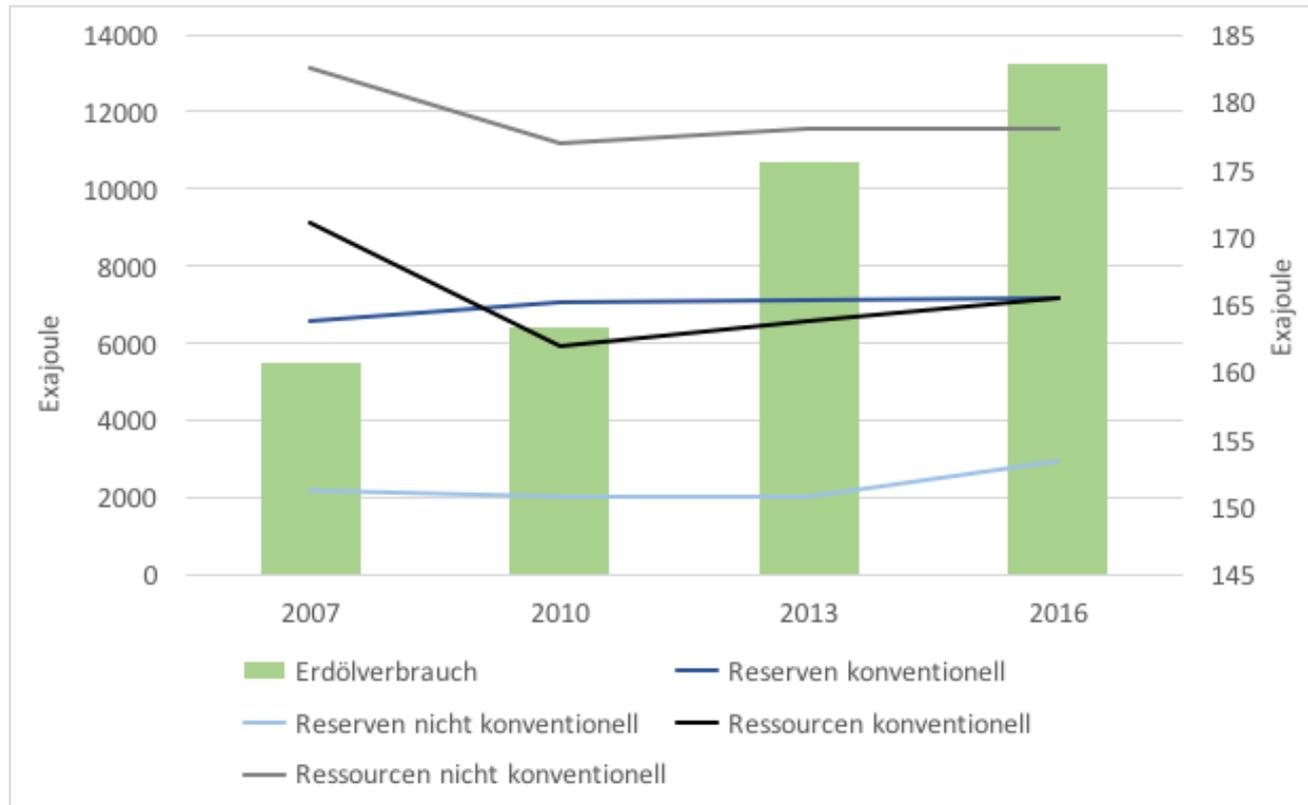


+0,1% vs. 2013

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Energiestudie 2017

1 EJ =  $10^{18}$  J = 34,1 Mt Steinkohleeinheit (SKE)

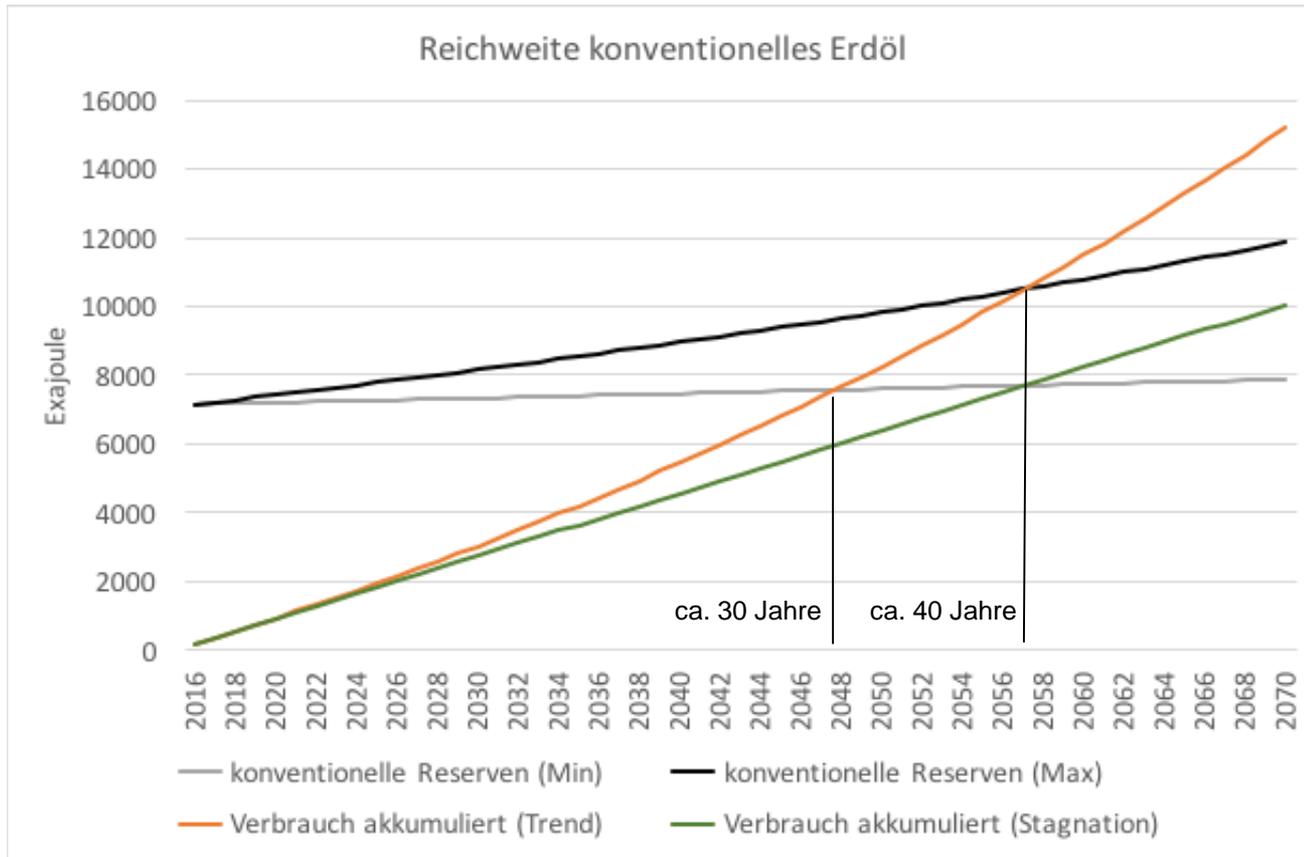
# Bestandsaufnahme Erdöl



Quelle: eigene Darstellung, Bundesanstalt für Geowissenschaften, Energiestudien

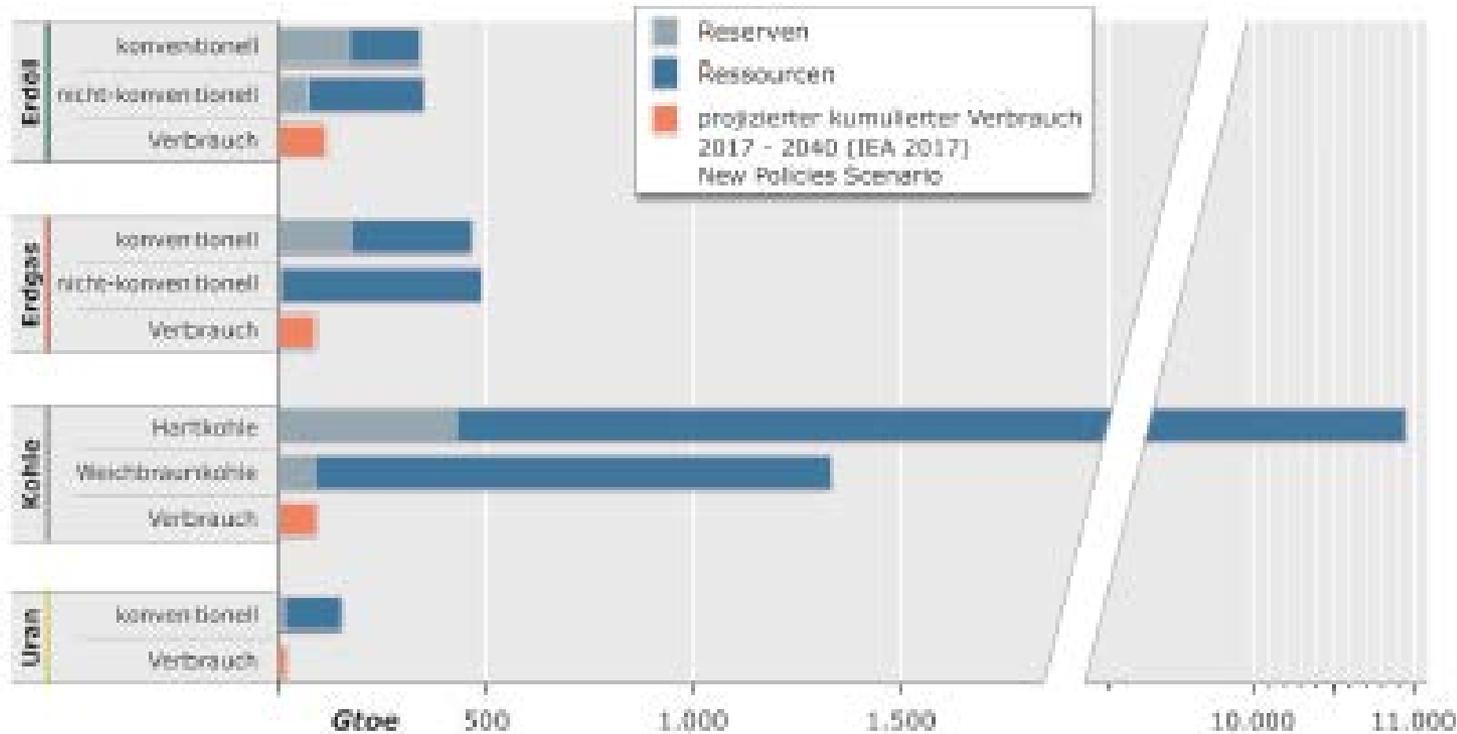
1 EJ =  $10^{18}$  J = 34,1 Mt Steinkohleeinheit (SKE)

# Bestandsaufnahme Erdöl



1 EJ =  $10^{18}$  J = 34,1 Mt Steinkohleeinheit (SKE)

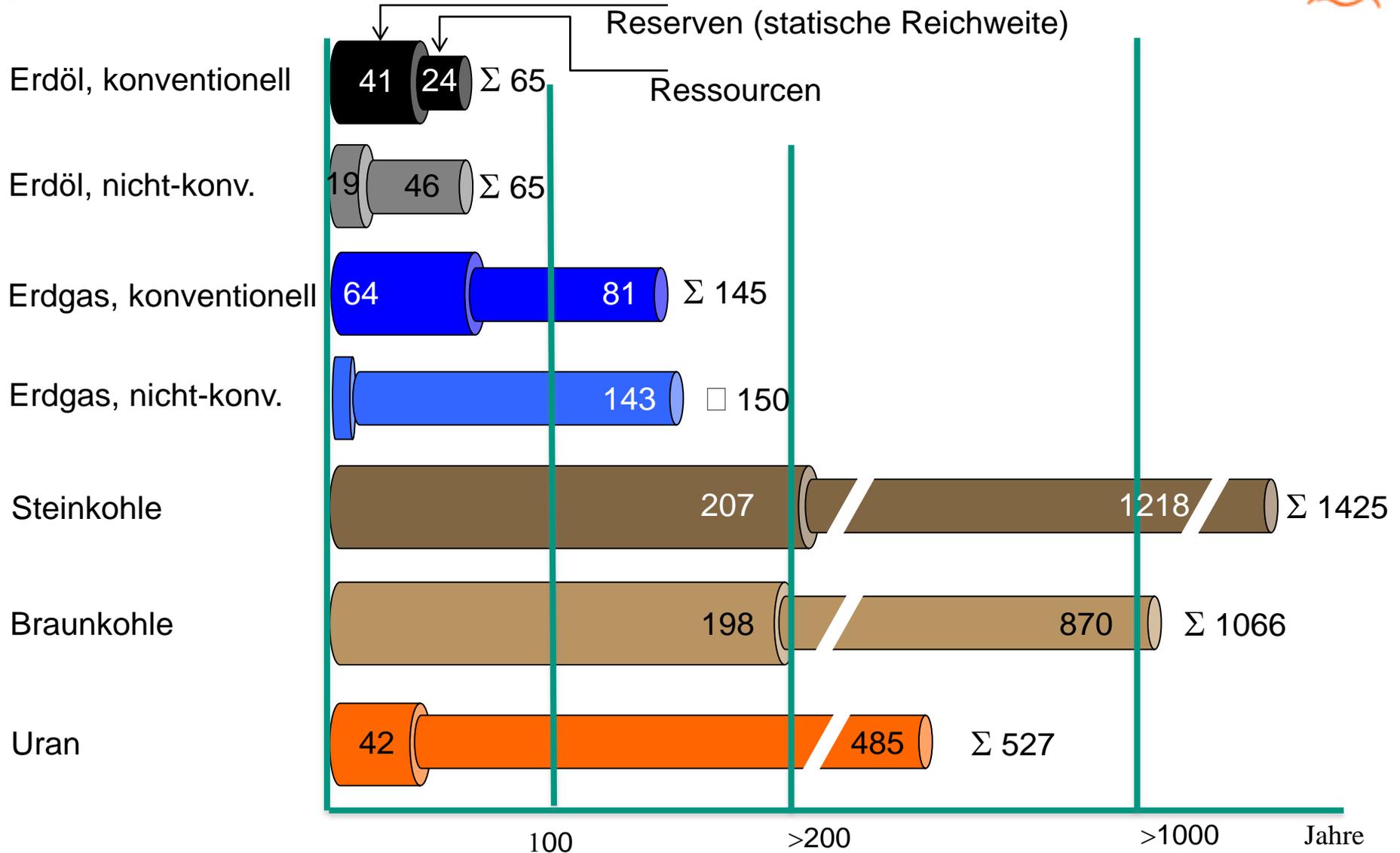
# Reserven, Ressourcen, Reichweite I (in Gtoe)



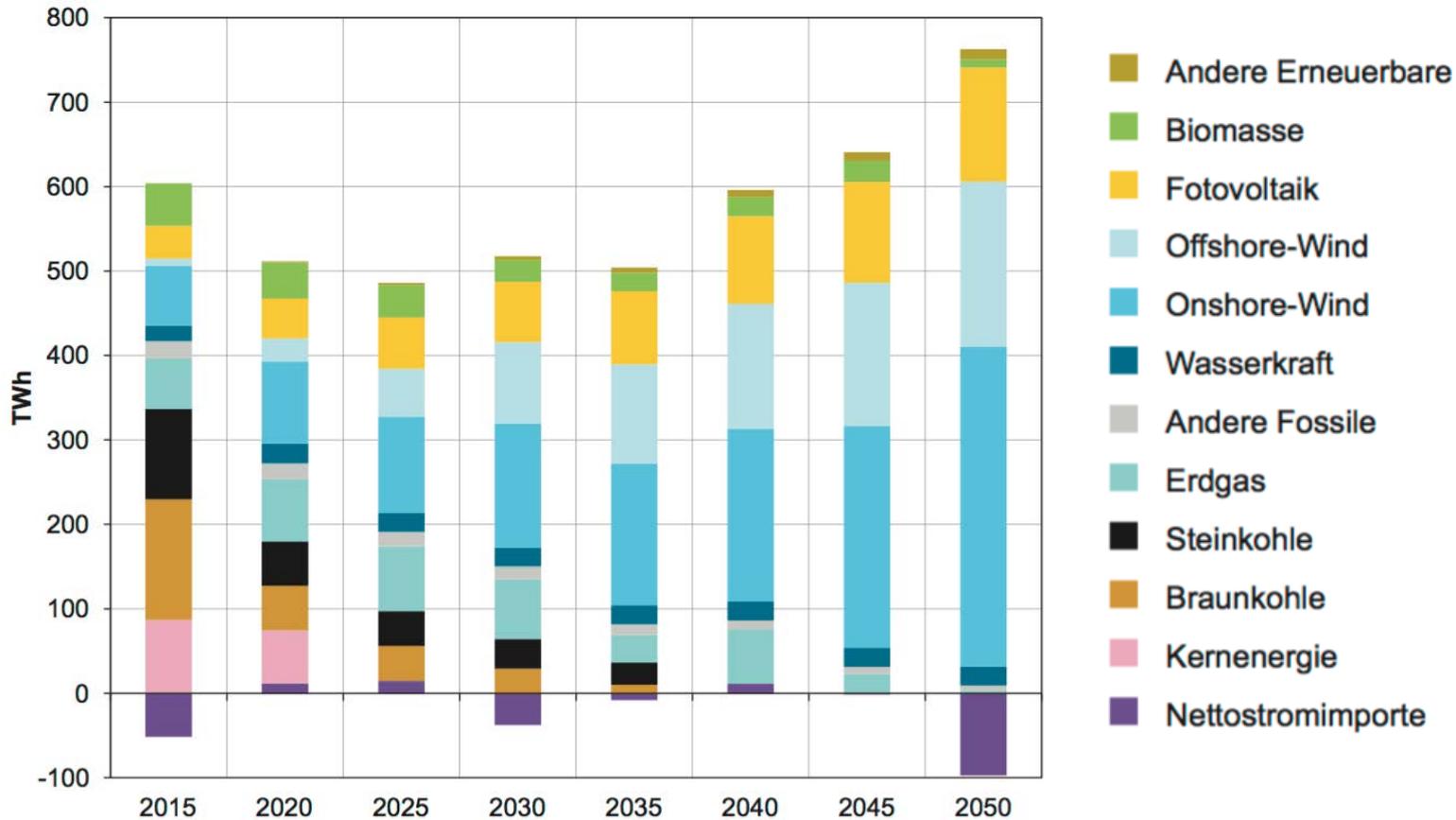
1 Gtoe = 1,428 Gt SKE

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Energiestudie 2017

# Reserven, Ressourcen, Reichweite II (in Jahren)



# Entwicklung Primärenergieträger für Verstromung (national)



Berechnungen Prognos AG, Öko-Institut

# Entwicklung Primärenergieträger für Verstromung (national)



- Politisch war der Kohleausstieg lange Zeit umstritten. Die Kohlekommission hat sich nun folgende Ziele gesetzt
  - Schaffung neuer Arbeitsplätze in Kohlerevieren (parallel bzw. im Vorgang zum Ausstieg). Hierzu sollen vom Bund in den nächsten 20 Jahren 40 Mrd. Euro in die betroffenen Regionen fließen
  - Sichere und bezahlbare Energieversorgung erhalten
    - Ausstieg aus der Kohle 2017: 42,6 GW, 2022: 30 GW, 2030: 17 GW, 2038: 0 GW
    - Ausstieg aus der Kernkraft
    - Stärkung erneuerbarer Energien
    - Gaskraftwerke zur Grundlastsicherung
  - Schutz des Klimas
    - Vereinbarte Klimaziele sollen zwar erreicht werden, jedoch werden Verzögerungen in Kauf genommen, um Strukturwandel zu bewerkstelligen

# Entwicklung Primärenergieträger für Verstromung (EU und global)

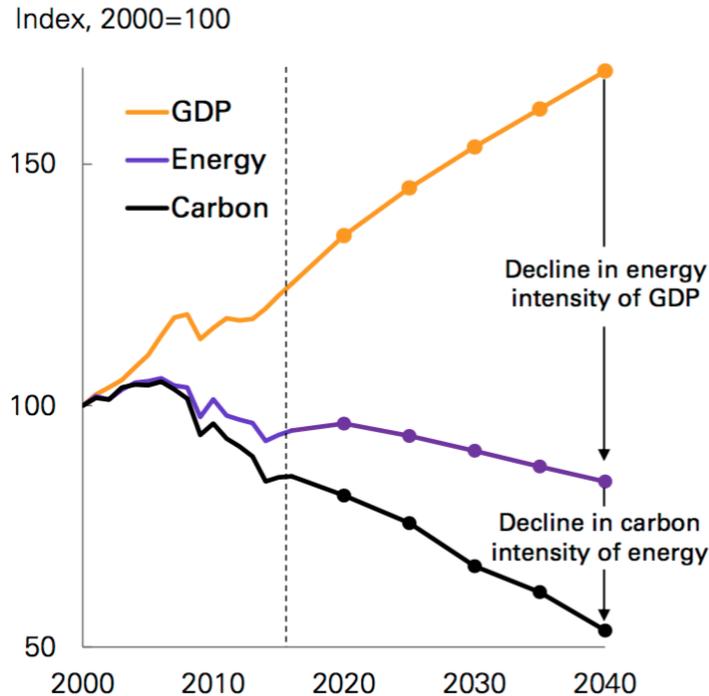


Regions: EU

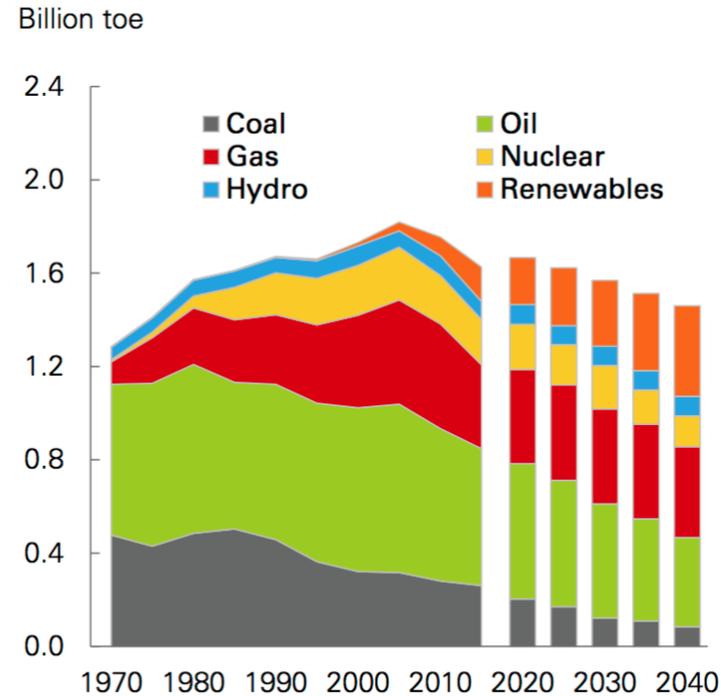


The EU leads the transition to a lower carbon economy...

### GDP, energy and carbon emissions



### Primary energy consumption



2018 BP Energy Outlook

# Entwicklung Primärenergieträger für Verstromung (EU und global)

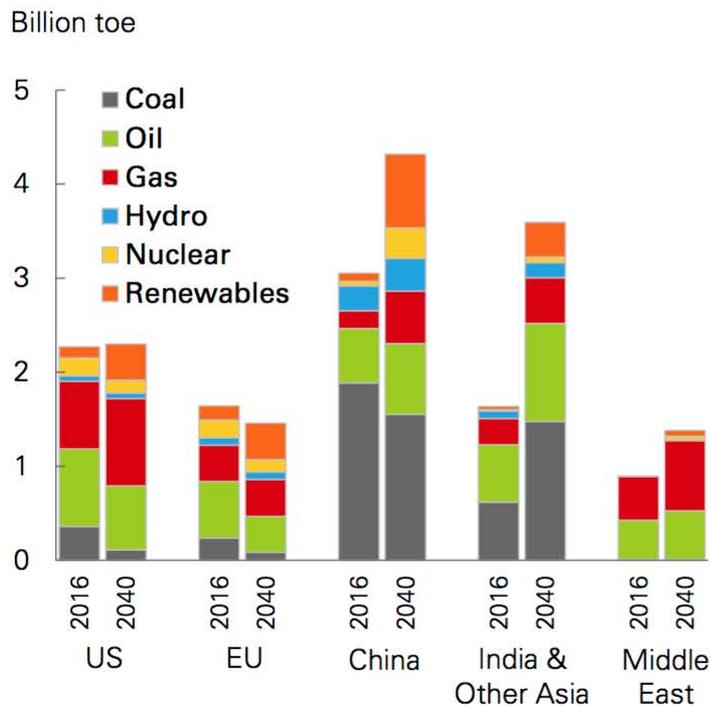


Regions

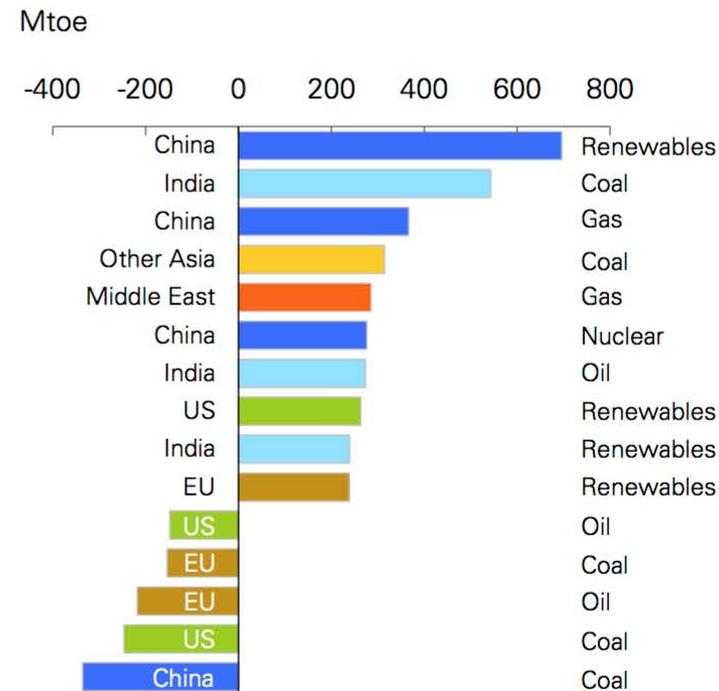


## Differences in the fuel mix across regions...

Primary energy demand by fuel and region



Changes 2016-2040<sup>†</sup> by fuel and region



<sup>†</sup>Ten largest increases and five largest declines

2018 BP Energy Outlook

# Bestandsaufnahme sonstige Rohstoffressourcen



Förderung, Reserven, Ressourcen und Reichweite von Basismetallrohstoffen

	Förderung	Reserven	Ressourcen	Reichweite in Jahren	
	in Mio. t		in Mio. t	Reserven	Ressourcen
Bauxit	159,0	25 000	>55 000	157	>346
Blei	3,15	67	>1.500	21	>476
Eisenerz	1 340,0	160 000	>800 000	119	>597
Kupfer	14,6	470	>2 300	32	>158
Nickel	1,4	62	140	44	100
Zink	9,4	220	1 900	23	202
Zinn	0,26	6,1	>11	23	>42

Kupfer für Wicklungen in Elektromotoren

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Fraunhofer ISI, RWI Essen, 2006

# Bestandsaufnahme sonstige Rohstoffressourcen



Förderung, Reserven, Ressourcen und Reichweite von Stahlveredlern

	Förderung	Reserven	Ressourcen	Reichweite in Jahren	
	in 1 000 t	in 1 000 t		Reserven	Ressourcen
Chrom	17 460,0	810 000	12 000 000	46	687
Kobalt	52,4	7 000	15 000	134	286
Mangan	9 350,0	380 000	>5 100 000	41	>545
Molybdän	141,0	8 600	18 400	61	130
Nickel	1 400,0	62 000	>140 000	44	>100
Niob	34,0	4 400	5 200	129	153
Tantal	1,5	43	>150	28	>99
Titan	5 000,0	650 000	2 000 000	130	400
Vanadium	51,3	13 000	>63 000	323	>1 229
Wolfram	73,7	2 900	>6 200	39	>84

Kobalt: Rohstoff für Batterien

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Fraunhofer ISI, RWI Essen, 2006

# Bestandsaufnahme sonstige Rohstoffressourcen



Förderung, Reserven, Ressourcen und Reichweite von Edelmetallen

	<b>Förderung</b>	<b>Reserven</b>	<b>Ressourcen</b>	<b>Reichweite in Jahren</b>	
	<b>in t</b>		<b>in t</b>	<b>Reserven</b>	<b>Ressourcen</b>
Gold	2 430	42 000	>90 000	17	>37
Platinmetalle	402	71 000	100 000	177	249
Silber	19 700	270 000	>570 000	14	>29

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Fraunhofer ISI, RWI Essen, 2006

# Bestandsaufnahme sonstige Rohstoffressourcen



## Förderung, Reserven, Ressourcen und Reichweite von Elektronikmetallen

	Förderung	Reserven	Ressourcen	Reichweite in Jahren	
	in t	in t	in t	Reserven	Ressourcen
Cadmium	18 800	600 000	6 000 000	32	319
Gallium	63	k.A.	1 000 000	k.A.	15 873
Germanium	87	450	>500	5	>6
Indium	405	2 800	>6 000	7	>15
Tantal	1 510	43 000	150 000	38	99

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Fraunhofer ISI, RWI Essen, 2006

Germanium: Verwendung als Halbleiter, ersetzbar durch Silicium

Indium: Beschichtung von Stahl zum Schutz gegen Korrosion, **Displays**

# Bestandsaufnahme sonstige Rohstoffressourcen



- Mit Blick auf die geplante Erweiterung der Elektromobilität sind im Zuge der steigenden Nachfrage nach Batterien insbesondere die weltweiten Lithiumvorräte (Leichtmetall) von Interesse
- Szenario 1
  - Marktdurchdringung Elektrofahrzeuge: 50% bis 2050
  - Sekundärlithium: 25% des gesamten Bedarfs
  - Verbrauch der globalen Lithium Ressourcen: 20% (Reserven sind ausreichend)
- Szenario 2
  - Marktdurchdringung Elektrofahrzeuge: 85% bis 2050
  - Sekundärlithium: 25% des gesamten Bedarfs
  - Komplette Nutzung der Reserven, stark steigende Preise um Ressourcen weiter abzubauen.
- Kritisch ist zu sehen, dass ein Großteil der Vorräte in ökologisch sensiblen Regionen vorkommt (z.B. in bolivianischen Salzseen)

Quelle: Fraunhofer ISI 2015

# Bestandsaufnahme Rohstoffressourcen - Fazit



- Mit Blick auf die globalen Reserven und Ressourcen sind die meisten Energie- und Industrierohstoffe für die nahe Zukunft in ausreichender Menge verfügbar.
- Sowohl Reserven- als auch Ressourcenzahlen sind zudem nicht unveränderbar
  - Abnahme durch Verbrauch
  - Ausweitung der Ressourcen durch Explorationserfolge
  - Ausweitung der Reserven durch technologischen Fortschritt und steigende Preise

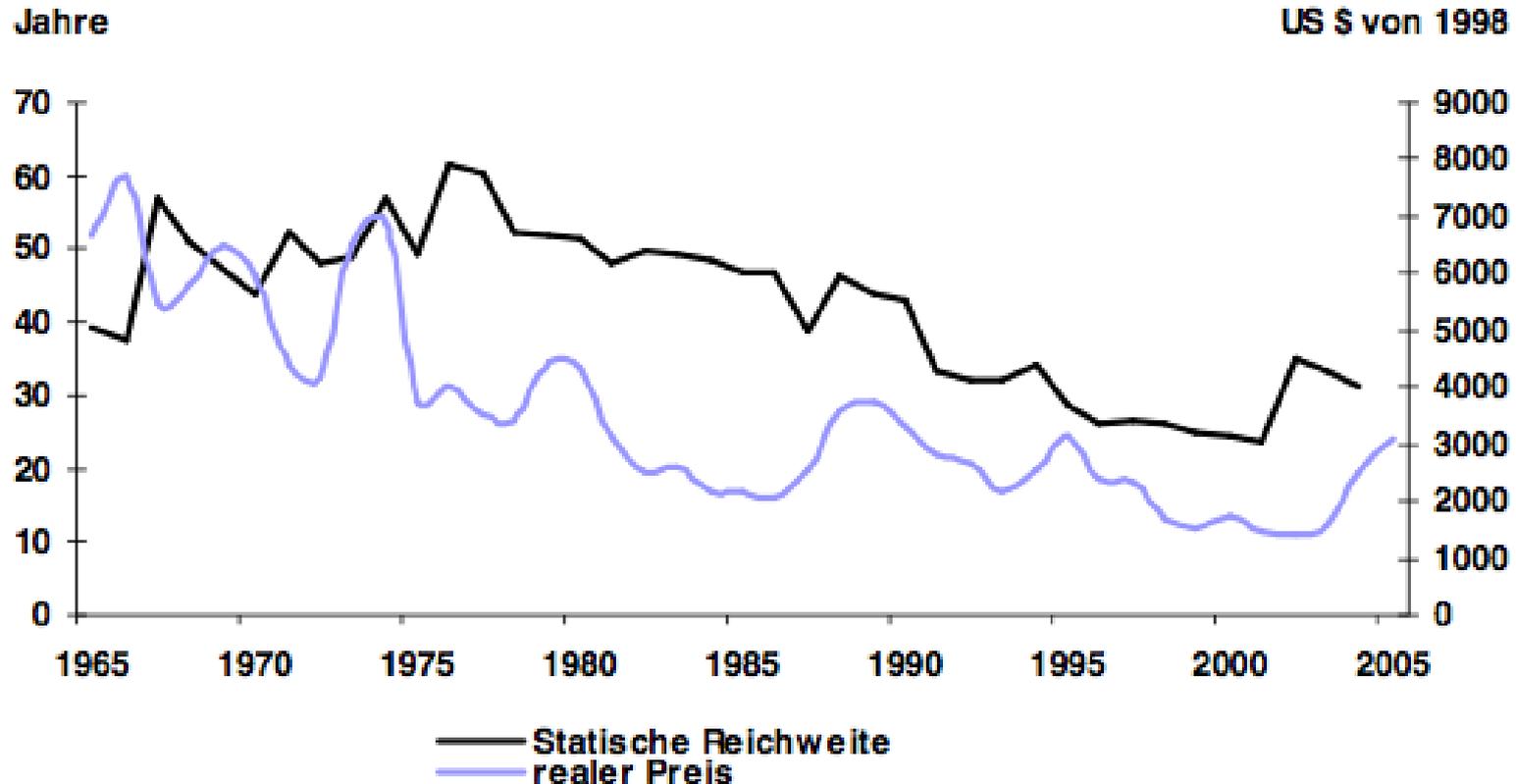
aber

- Fast alle Rohstoffe sind endlich. In einigen Fällen ist schon in wenigen Dekaden mit Engpässen zu rechnen
  - In manchen Fällen Beseitigung von Engpässen durch Substitution und Recycling denkbar
- Globale Vorkommen garantieren nicht globale Verfügbarkeit
- Preisentwicklung unklar (vgl. folgende Folien)

# Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe



## ■ Statische Reichweite und realer Preis von Kupfer

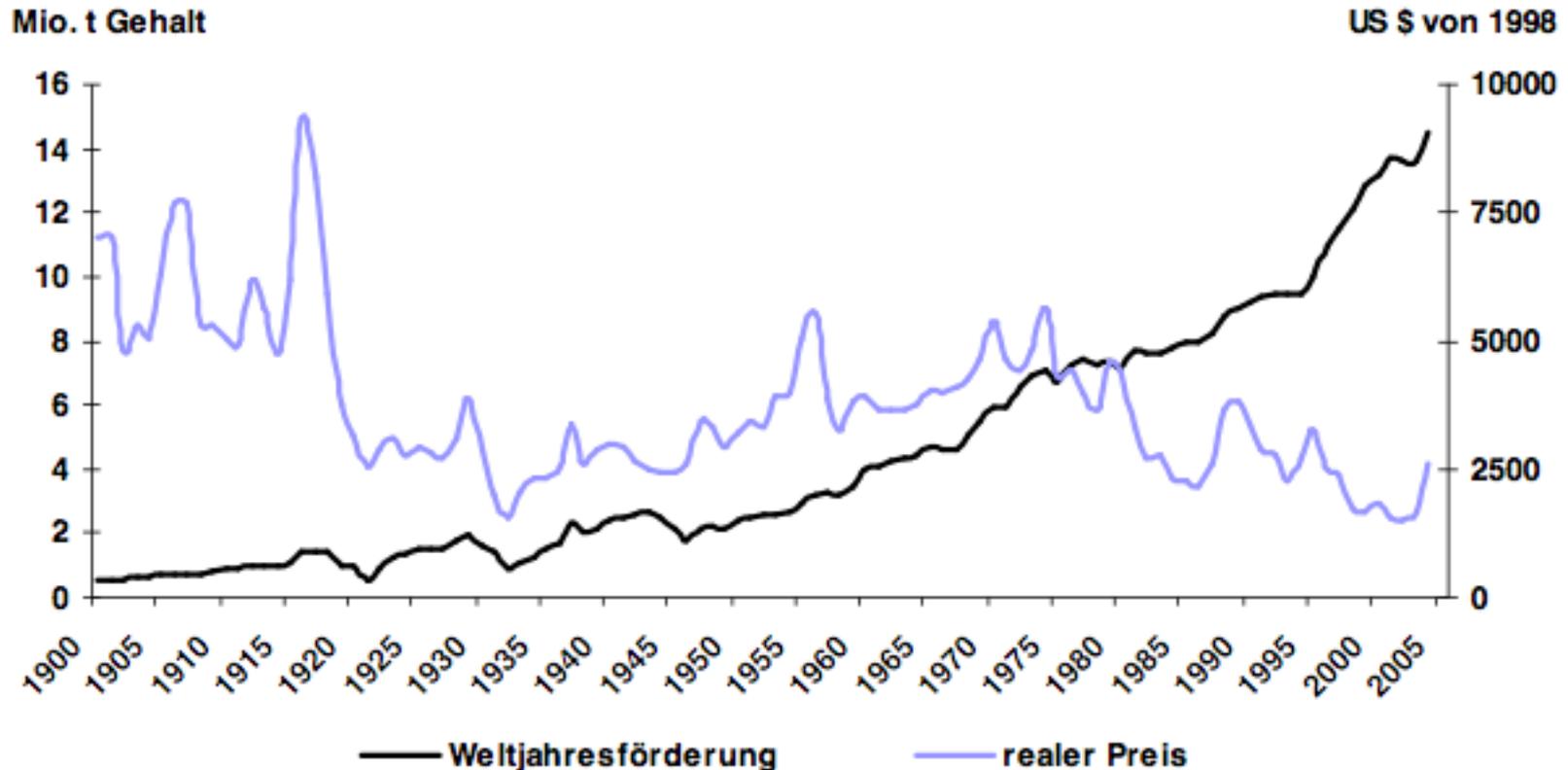


Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Fraunhofer ISI, RWI Essen, 2006

# Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe



## ■ Jährliche Förderung und realer Preis von Kupfer



Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Fraunhofer ISI, RWI Essen, 2006

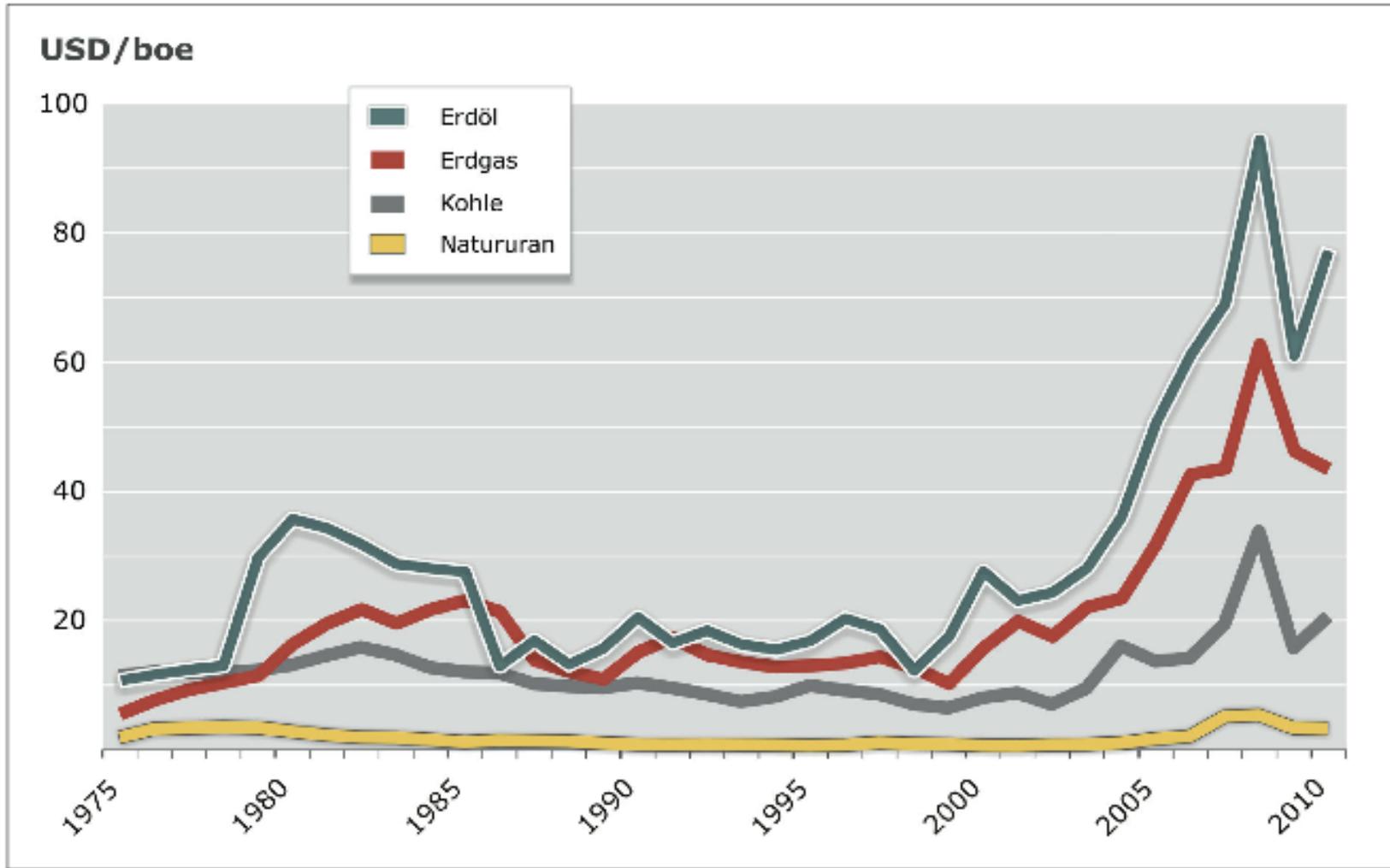
# Relation der Preise von Basisrohstoffen und Löhnen (für Deutschland)



	<b>1940</b>	<b>1950</b>	<b>1960</b>	<b>1970</b>	<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>1998</b>
Aluminium	100,00	43,37	40,61	30,25	36,88	24,17	17,13
Kupfer	100,00	85,76	81,88	99,19	79,77	65,13	33,33
Blei	100,00	117,26	66,84	59,50	74,19	53,93	42,60
Nickel	100,00	58,94	61,84	72,62	76,81	70,05	29,31
Zinn	100,00	87,91	59,47	68,88	154,24	47,27	36,65
Zink	100,00	101,12	60,29	47,87	53,89	72,18	39,90

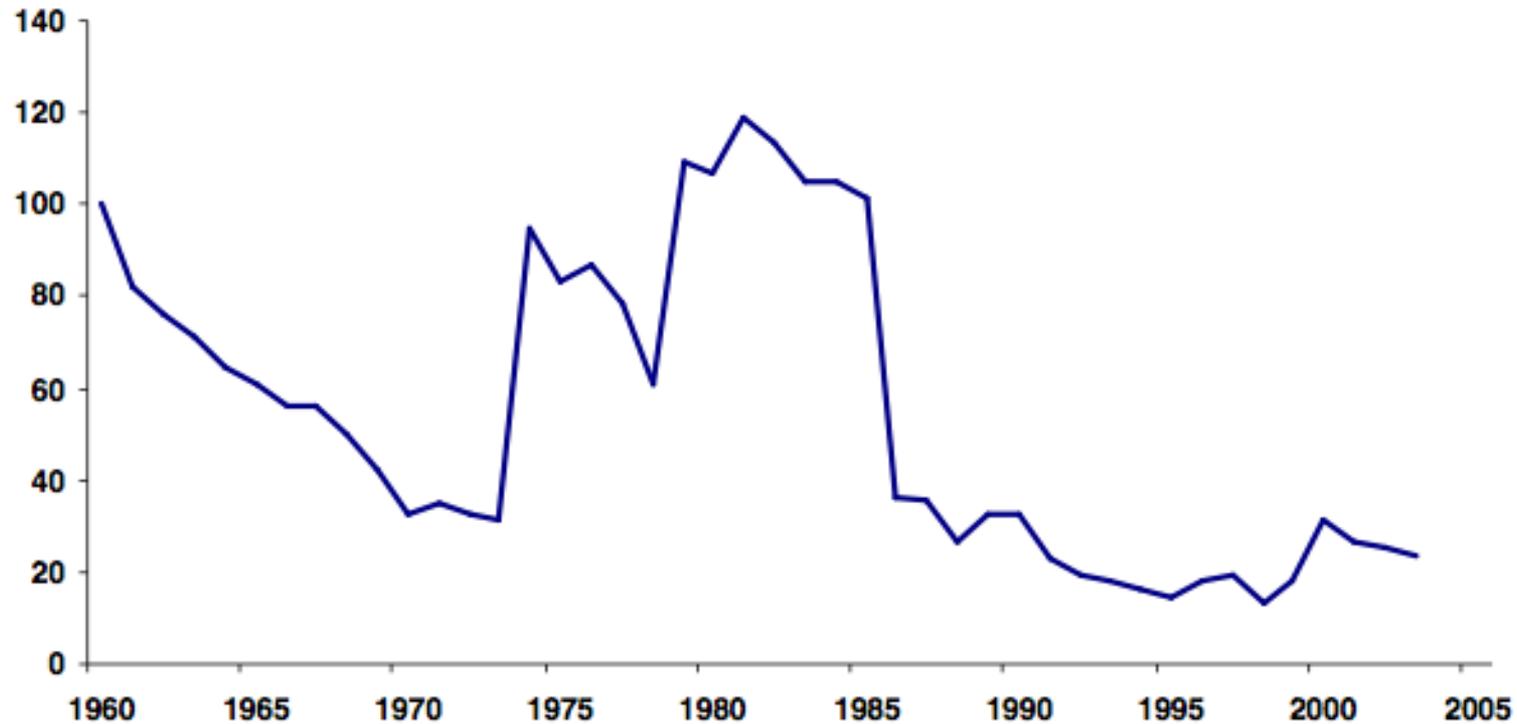
Quelle: Brown und Wolk, 2000

# Preisentwicklung für Primärenergieträger



Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, 2011

# Relation von Erdölpreisen und Löhnen für Deutschland



Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften, Fraunhofer ISI, RWI Essen, 2006



- Modellansatz basierend auf der Idee einer sozial optimalen Abbaurrate
- Modellansatz basierend auf der Idee einer Gleichgewichtsabbaurrate

# Modellansatz basierend auf sozial optimaler Abbaurrate



Bei endlichen Reserven und Ressourcen (in der Folge vereinfachend Ressourcen) stellt sich die Frage nach dem optimalen Abbaupfad

Demnach werden die Ressourcen in jeder Periode solange abgebaut bis die Grenznutzen (die eine Ressourceneinheit stiftet) mit den Grenzkosten (Abbaugrenzkosten + Gegenwartswert zukünftiger entgangener Nutzen aus einer Ressourceneinheit) übereinstimmen.

Um den Gegenwartswert zukünftiger Nutzen zu berechnen werden die entgangenen Nutzen abdiskontiert.

Abdiskontierung abhängig von

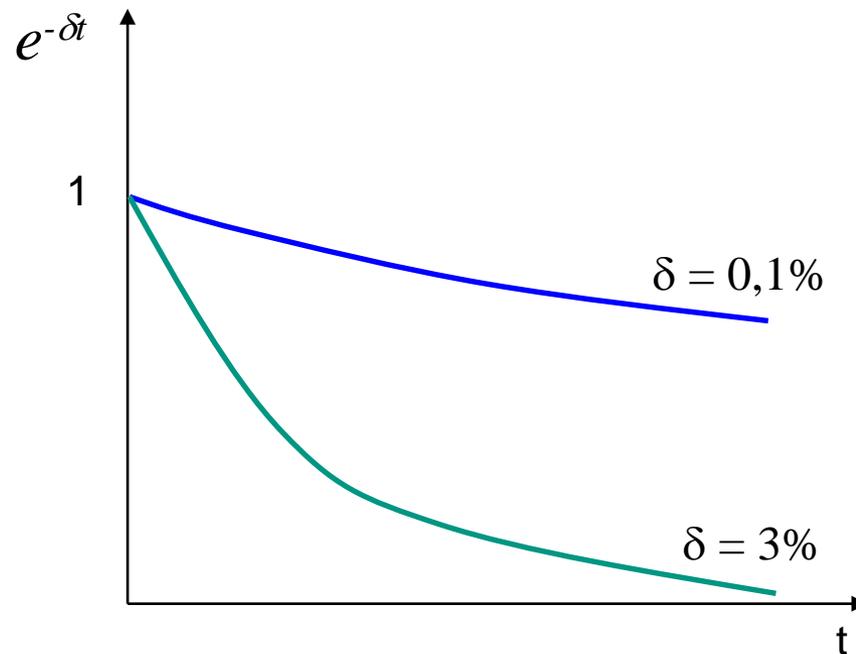
- technologischer Entwicklung
- unterstelltem Nutzenverlauf
- Zeitpräferenzrate



- Individuen sind in der Regel nicht bereit ihren Nutzen von heute auf morgen zu verschieben, ohne dafür eine Entschädigung zu erhalten.
- In marktlichen Systemen spiegelt sich diese Entschädigung im Zins wider. Anstelle einer Auszahlung von heute 1000 Euro sind wir bei einem Zins von 5% bereit ein Jahr lang zu warten um dann 1050 Euro ausgezahlt zu bekommen. Bei einer Wartezeit von zwei Jahren erhöht sich die Auszahlungssumme auf 1.102,5 Euro (Zinseszins)
- Bei einer Abdiskontierungsrate von 5% wäre ein Nutzen von 1.000 Euro in zwei Jahren ist aus heutiger Sicht somit „nur“ mit 902 Euro zu bewerten. Fällt der gleiche Nutzen in 10 bzw. 20 Jahren, so beläuft sich der abdiskontierte Nutzen auf 599 bzw. 358 Euro.
- Die Wahl der Zeitpräferenz kann entweder aus beobachtetem Verhalten resultieren oder normativ gewählt werden. Letzteres ist sinnvoll, falls sich individuelle und gesellschaftliche Präferenzen unterscheiden.



$$W = \int_{t=0}^{\infty} u(c) e^{-\delta t} dt$$





## ■ Modellergebnisse

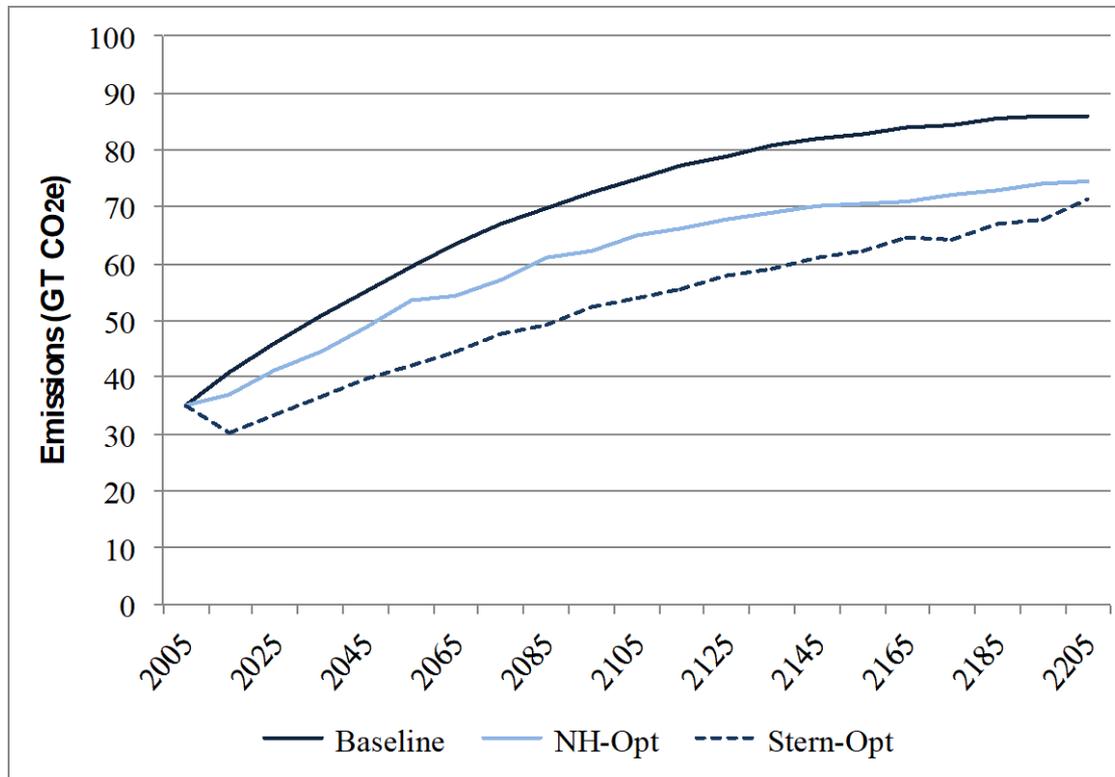
- Die Abbaugeschwindigkeit hängt im wesentlichen von der sozialen Diskontierungsrate ab.
- Je höher die Diskontierung, desto geringer der Gegenwartswert zukünftiger Nutzen und desto schneller erfolgt der Abbau
- Entscheidende Faktoren
  - Entwicklung des Grenznutzens
    - je schneller der Grenznutzen fällt, desto höher die Diskontierungsrate (Nutzenzuwächse je zusätzlicher Outputeinheit fallen bei reicheren Generationen geringer aus als bei ärmeren)
  - Entwicklung der Ressourcenproduktivität
    - je schneller der technologische Wandel voranschreitet, desto höher die Diskontierungsrate (je Outputeinheit werden weniger Ressourceneinheiten benötigt)
  - reine Zeitpräferenzrate
    - je höher die Zeitpräferenzrate, desto höher die Diskontierungsrate



- Beispiel: CO<sub>2</sub> Aufnahmekapazität der Atmosphäre
  - DICE Klimamodel (William Nordhaus)
    - Technologische Fortschrittsrate: 2,0 abnehmend
    - Elastizität des Grenznutzens: 1,0 (Wertebereich in der Literatur liegt zwischen 0,5 und 3)
    - Zeitpräferenz: 3,0 (langfristiger Zins)
  - PAGE Klimamodell (Sir Nicholas Stern)
    - Technologische Fortschrittsrate: 2,0 abnehmend
    - Elastizität des Grenznutzens: 1,0 (Wertebereich in der Literatur liegt zwischen 0,5 und 3)
    - Zeitpräferenz: 0,1 (normativer Ansatz)



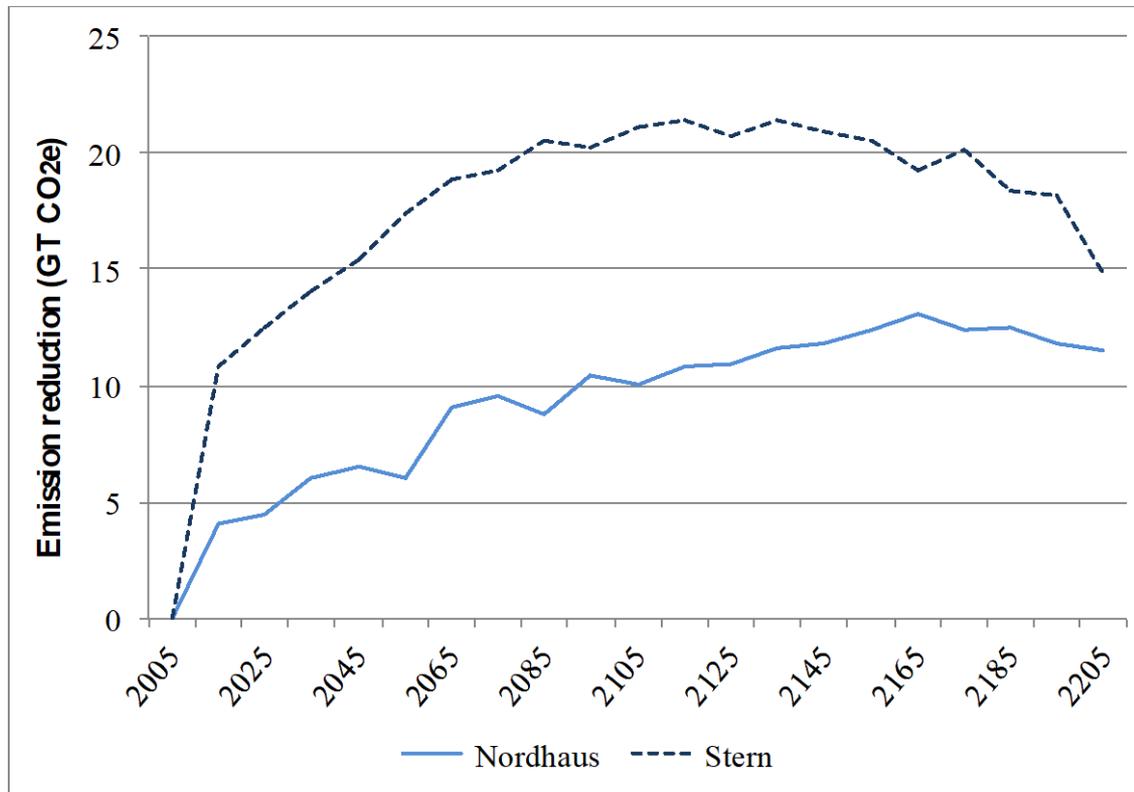
- Optimaler Emissionspfad (Optimaler „Abbau der CO<sub>2</sub> Aufnahmekapazität“ durch Produktion von Emissionen)



Quelle: Schaffer und Moellendorf 2014



## ■ Optimale Vermeidungspfade



Quelle: Schaffer und Moellendorf 2014

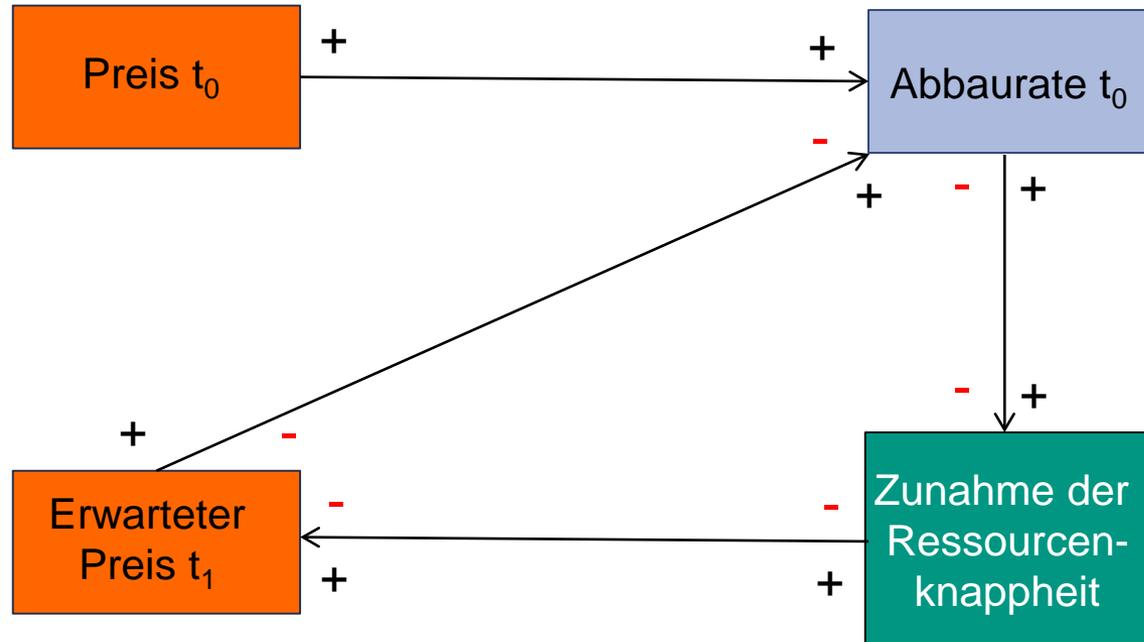


- Dem Modell liegt die Idee des Walrasianischen Auktionators zugrunde, der für Ressourcen einen Preis ausruft, bis der Gleichgewichtspreis und damit die Gleichgewichtsmenge gefunden ist.
- Das zentrale Problem der Zeitdimension wäre gelöst, falls sich das Auktionatorprinzip auch auf zukünftige Märkte anwenden ließe.
- In diesem Fall können die Wirtschaftsakteure für den gegenwärtigen und alle zukünftige Märkte Kontrakte auf Basis der jeweils geltenden Gleichgewichtspreise abschließen.
- Da auf jedem Markt das Angebot auf die Nachfrage trifft, sollen beide Perspektiven zunächst separat betrachtet werden.



- Anbieter entscheidet wie er den Ressourcenabbau über die Zeit verteilen möchte.
- Dabei strebt er an, den Wert der Gewinne über die Zeit zu maximieren. Insbesondere muss er berücksichtigen, dass heute abgebaute Ressourcen zwar gegenwärtig Gewinne bringt, zukünftige Gewinne jedoch schmälert.
- Der heutige Gewinn kann am Kapitalmarkt gewinnbringend zum Zins  $r$  angelegt werden. Um den Gegenwartswert der Gewinne aus dem zukünftigen Abbau der Ressourcen zu ermitteln, müssen die zukünftig zu erwartenden Gewinne gerade mit dem Zins  $r$  abdiskontiert werden.
- Die damit verbundene geringere Gewichtung zukünftiger Gewinne spricht für einen raschen Abbau der Ressource.
- Der rasche Abbau führt umgekehrt jedoch zu einer kontinuierlichen Verknappung der Ressource und somit zu höheren Preisen und Gewinnen in der Zukunft. Dies spricht für einen langsamen Abbau der Ressource.

# Feedback Mechanismus mit dämpfender Wirkung



# Modell mit Gleichgewichtsabbaurate - Anbieter



- Frage nach gewinnmaximalem Abbaupfad ist somit eine Frage nach dem Ausgleich von Abdiskontierung (durch Zinsverlust) und Wertsteigerung (durch Ressourcenverknappung)

## Annahme

- Zwei diskrete Perioden 0 und 1,
- Grenzgewinn: Gegenwartswert des Grenzgewinns ( $p-c'$ ) in Periode 0 + Gegenwartswert des Grenzgewinns in Periode 1

## Fall 1: „Oil in the ground appreciates faster than money in the bank“

- Anbieter haben einen Anreiz den Abbau der Ressourcen zu verzögern, da der Gegenwartswert des Grenzgewinns in Periode 1 den Gegenwartswert des Grenzgewinns in Periode 0 übersteigt.
- Durch Verknappung der Ressource in Periode 0 wird der Preis in Periode 0 solange ansteigen, bis sich die Identität der gegenwartsbezogenen Grenzgewinne einstellt.

$p_t$ : Preis in Periode  $t$ ,  $c_t'$ : Abbaugrenzkosten in  $t$ ,  $r$ : Diskontierungsrate (Zins)

# Modell mit Gleichgewichtsabbaurate - Anbieter



Fall 2: Gewinne aus Zinsen sind höher als Preissteigerungen durch Verknappung der Ressourcen

- Anbieter haben einen Anreiz den Abbau der Ressourcen zu beschleunigen, da der Gegenwartswert des Grenzgewinns in Periode 0 den Gegenwartswert des Grenzgewinns in Periode 1 übersteigt.
- Durch zunehmende Verknappung der Ressource in Periode 1 wird der erwartete Preis für Periode 1 solange ansteigen, bis sich die Identität der gegenwartsbezogenen Grenzgewinne einstellt.

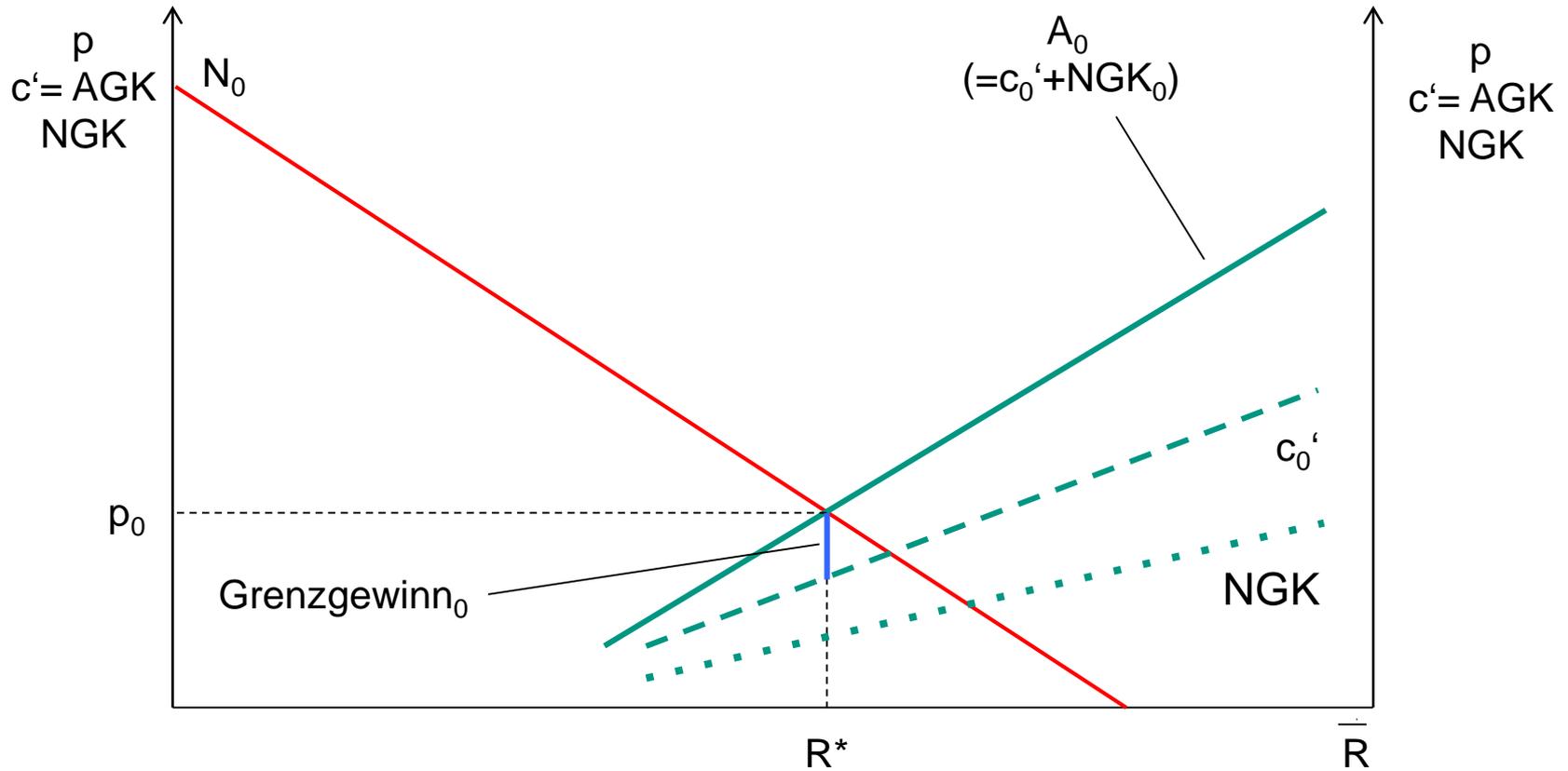
■ Die Anbieter werden Ressourcen in Periode 0 gerade solange abbauen, bis der Grenzgewinn mit dem abdiskontierten Grenzgewinn aus Periode 1 identisch ist.

■ Die Bedingung eines für alle Perioden gleichen diskontierten Grenzgewinns ist erfüllt, falls der Grenzgewinn, der sich alleine unter Berücksichtigung der Preise und der Abbaugrenzkosten im Laufe der Zeit mit der Rate des Diskontierungsfaktors (Zins  $r$ ) ansteigt.

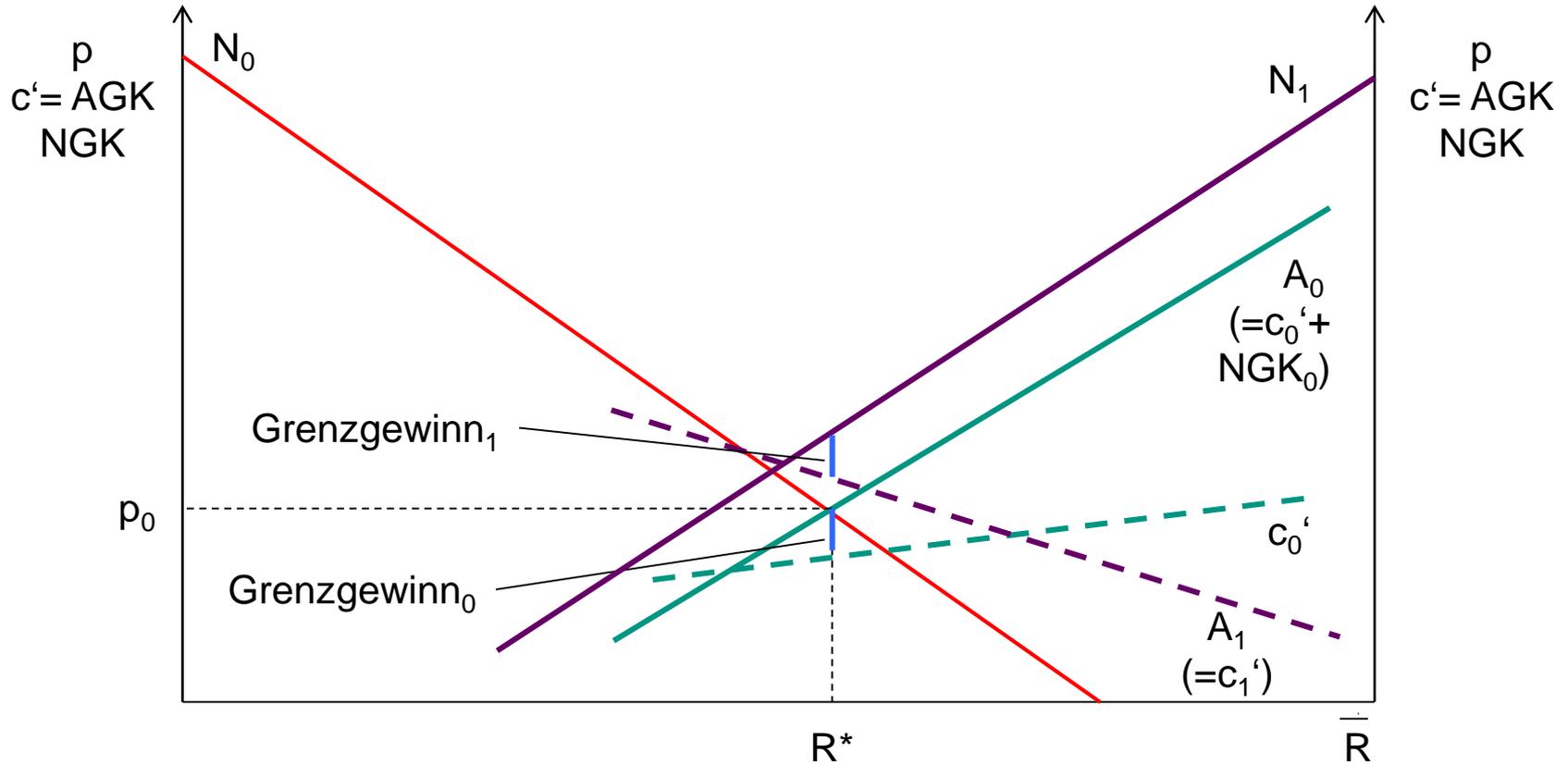
$$(p_t - c_t') = (p_{t+1} - c_{t+1}') / (1+r)$$

$p_t$ : Preis in Periode  $t$ ,  $c_t'$ : Abbaugrenzkosten in  $t$ ,  $r$ : Diskontierungsrate (Zins)

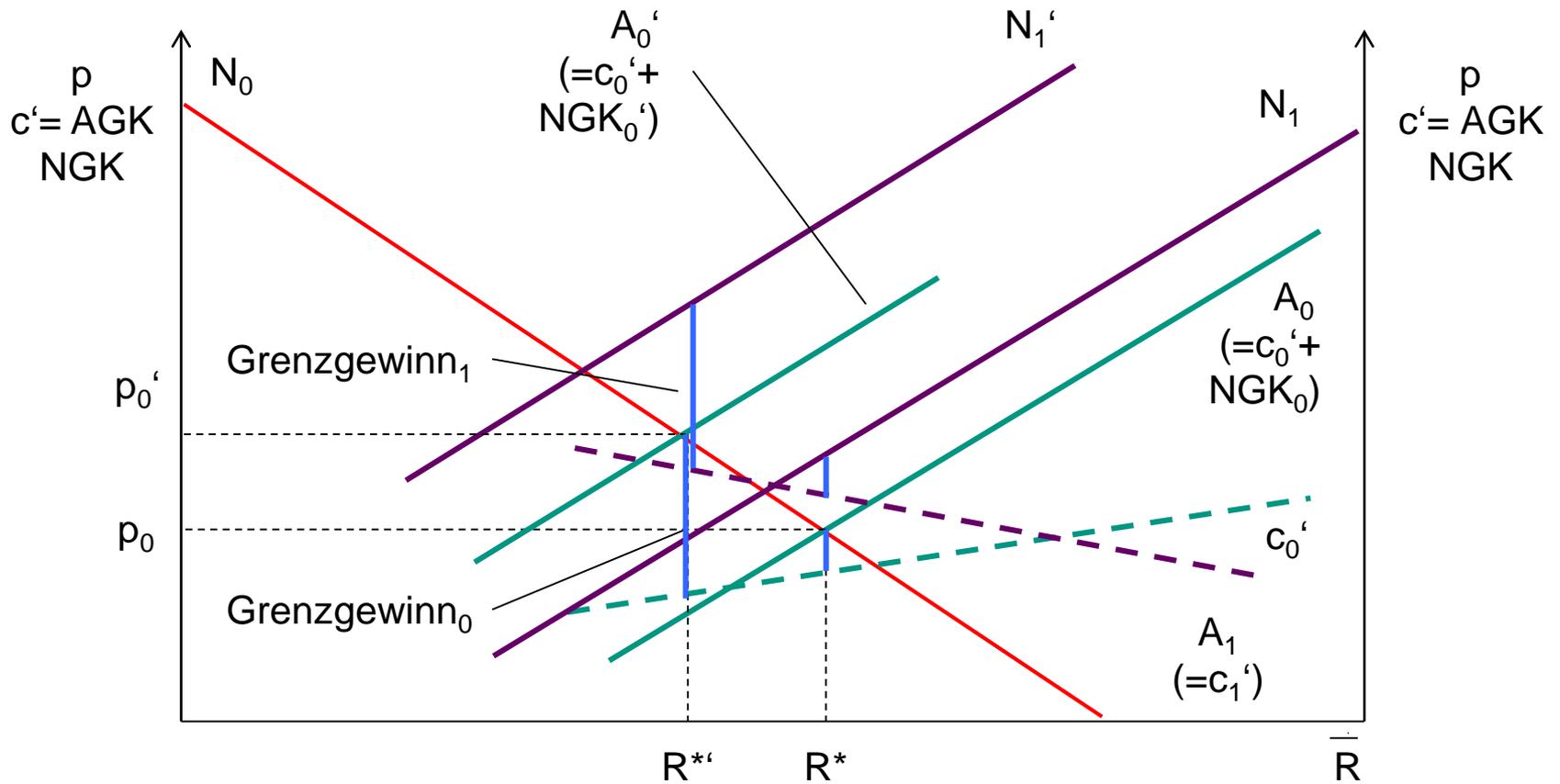
# Modell mit Gleichgewichtsabbaurate



# Modell mit Gleichgewichtsabbaurate



# Modell mit Gleichgewichtsabbaurate





- Auf dem gleichgewichtigen Zeitpfad des Ressourcenabbaus wächst der Grenzgewinn mit einer dem Zinssatz gleichen Rate.
- Der Anbieter ist indifferent gegenüber der Alternative, die letzte Einheit einer Ressource im Boden zu lassen (und aufgrund der zunehmenden Verknappung in der Zukunft in den Genuss der Wertsteigerung zu kommen) oder die Ressource abzubauen (und damit einen Zins zu erwirtschaften).
- Diese Regel wurde bereits 1931 von Hotelling hergeleitet und ist in der Literatur auch als „Hotelling-Regel“ bekannt.
- Die Nachfrage entscheidet über den Grad der Verknappung und bestimmt die absolute Fördermenge.

# Herleitung des Abbaupfades unter Berücksichtigung der Hotelling-Regel

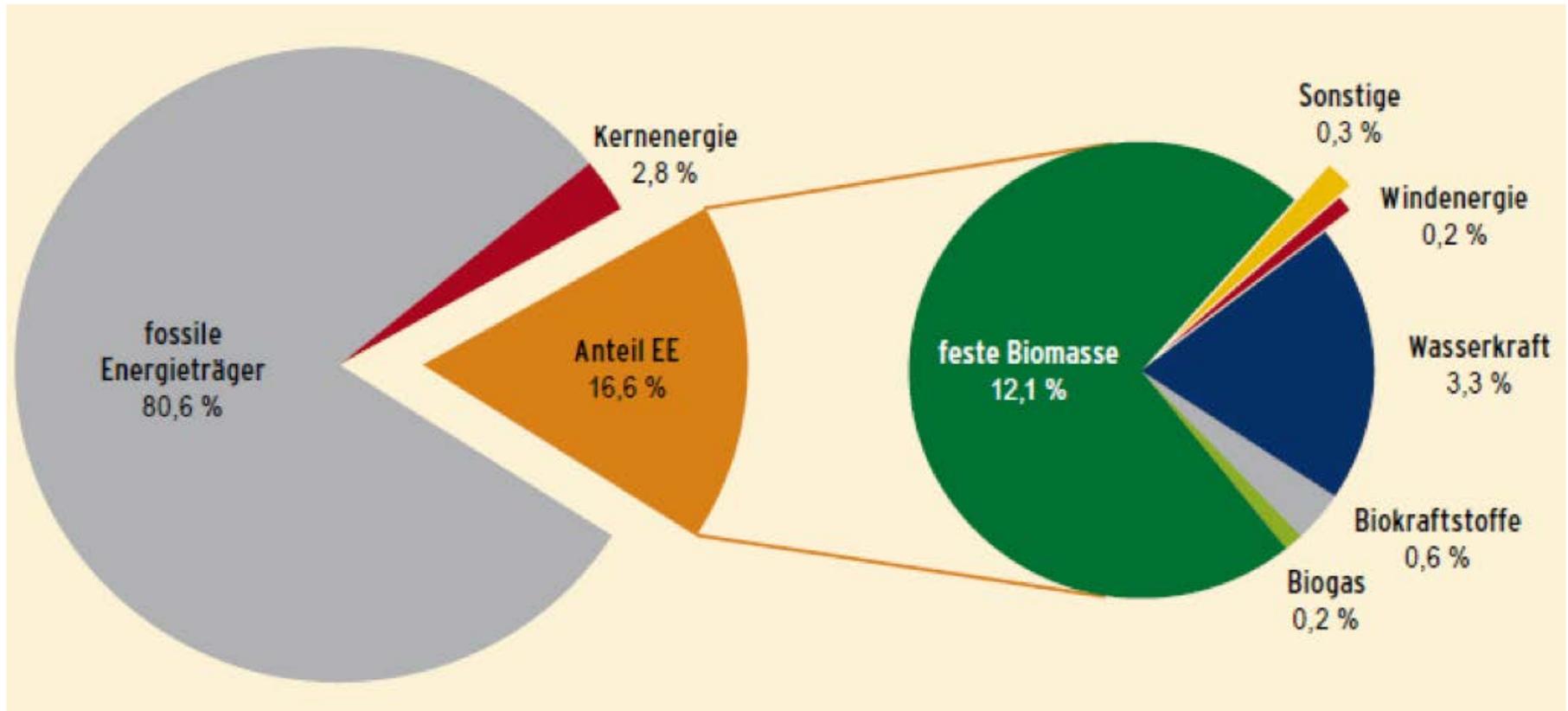


- Siehe Vorlesung



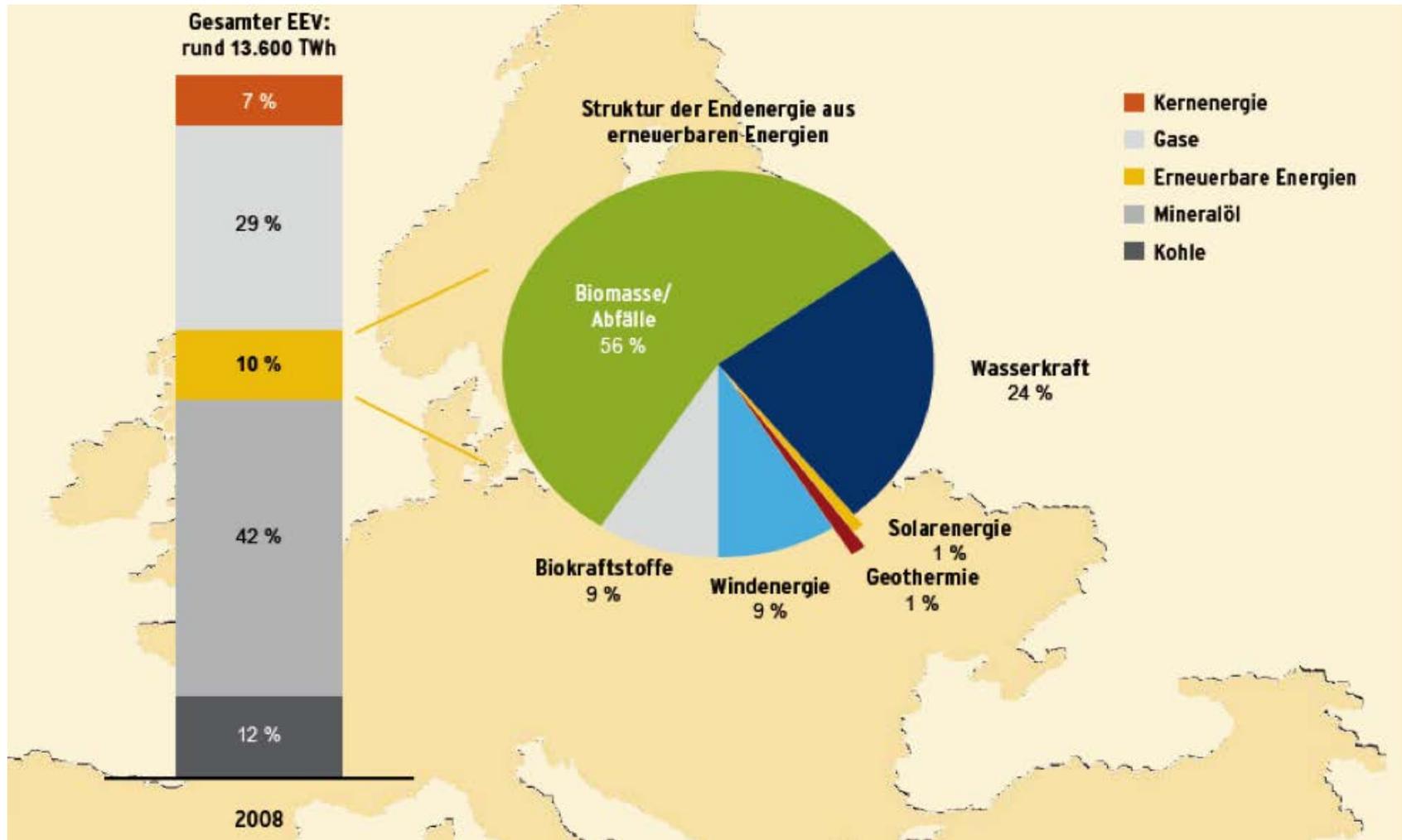
- Motivation und Entwicklung
- Chancen, Risiken und Herausforderungen
- Modell zum Umgang mit erneuerbaren Ressourcen

# Struktur des globalen Endenergieverbrauchs 2008



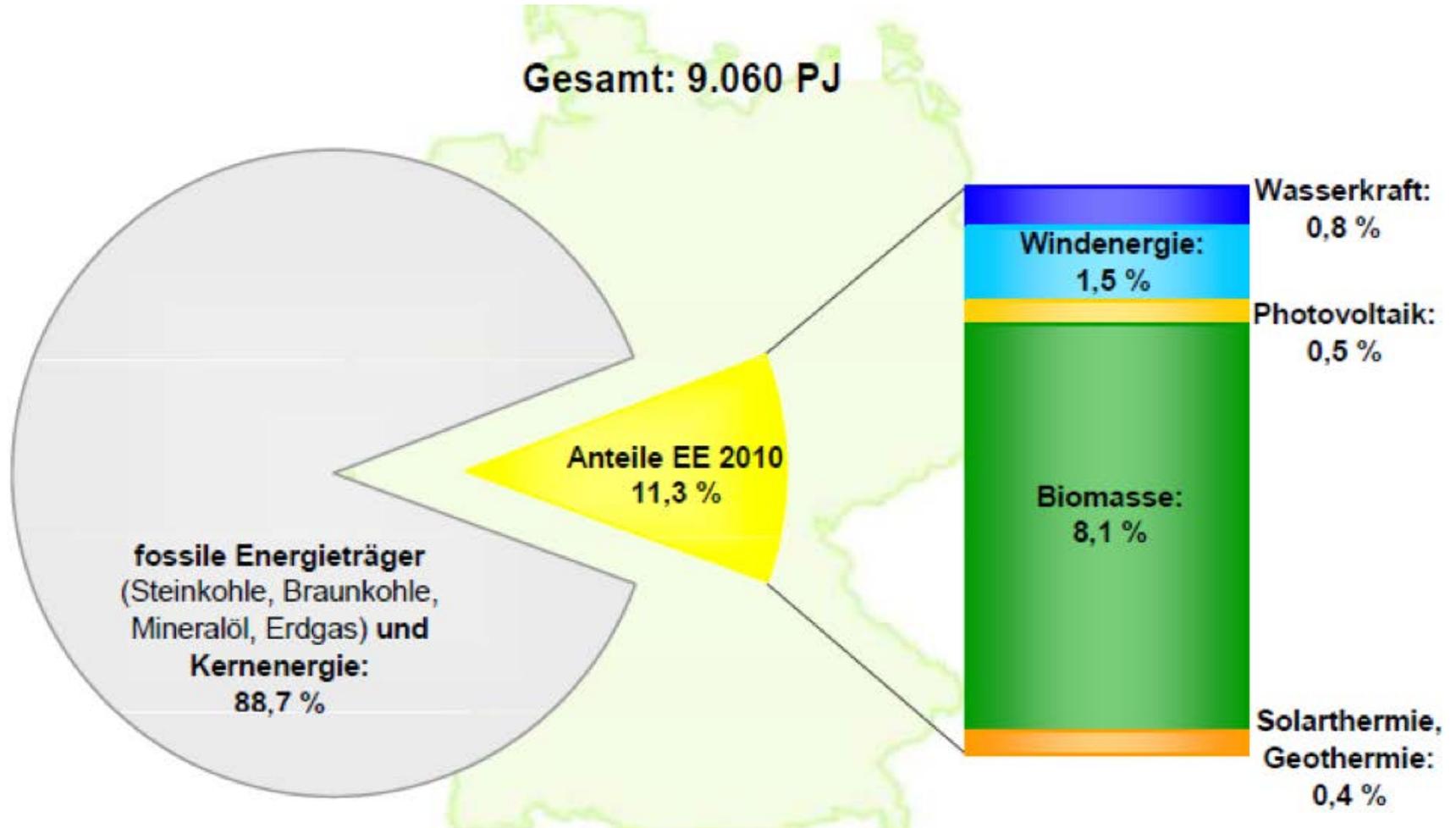
Quelle: BMU, Erneuerbare Energien in Zahlen, nationale und internationale Entwicklung 2011;  
Wittkopf, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 2012

# Struktur des Endenergieverbrauchs der EU, 2008



Quelle: BMU, Erneuerbare Energien in Zahlen, nationale und internationale Entwicklung 2011; Wittkopf, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 2012

# Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland 2010

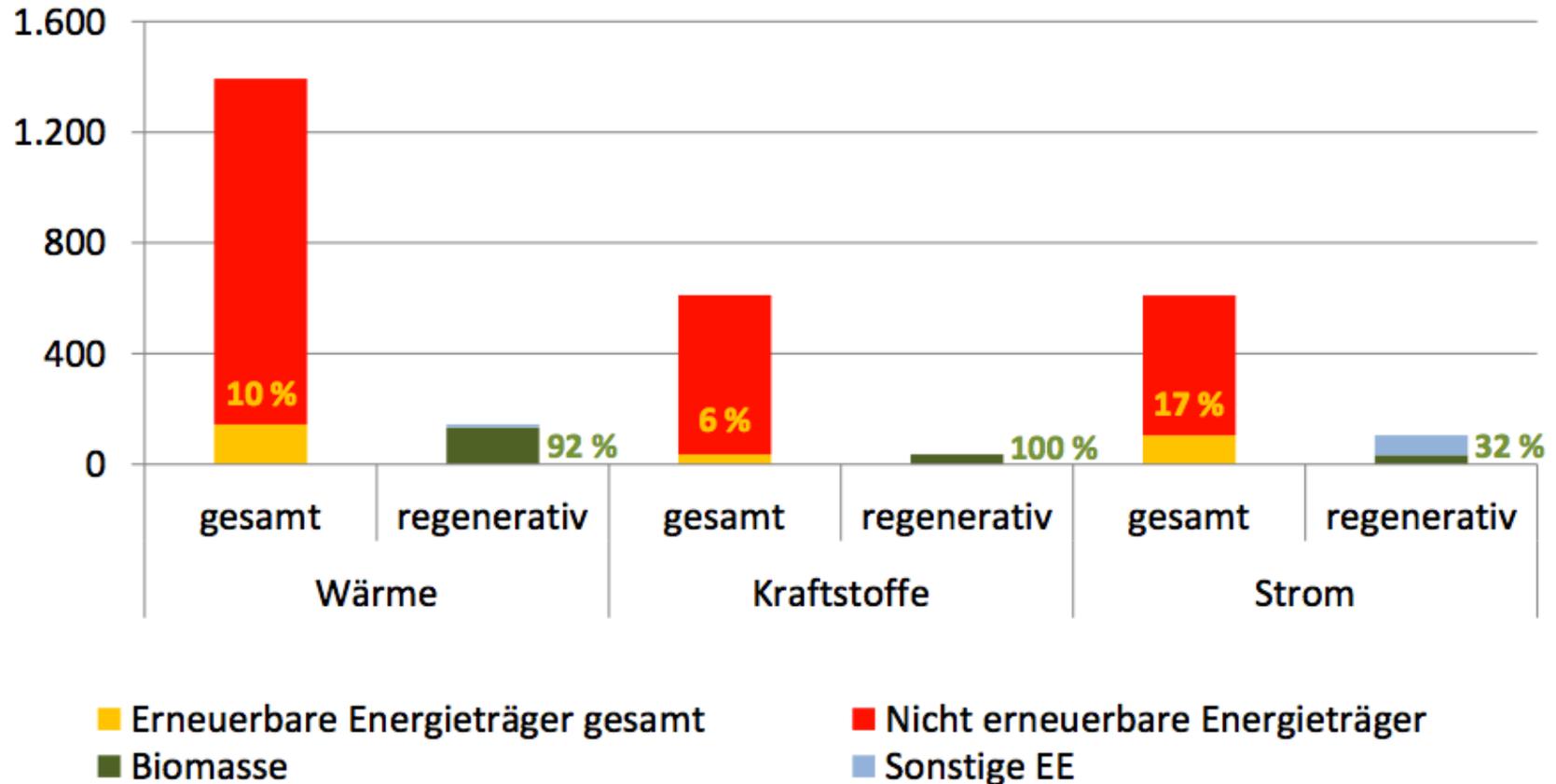


Quelle: BMU, Erneuerbare Energien in Deutschland 2010;  
Wittkopf, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 2012

# Struktur des globalen Energieverbrauchs 2008

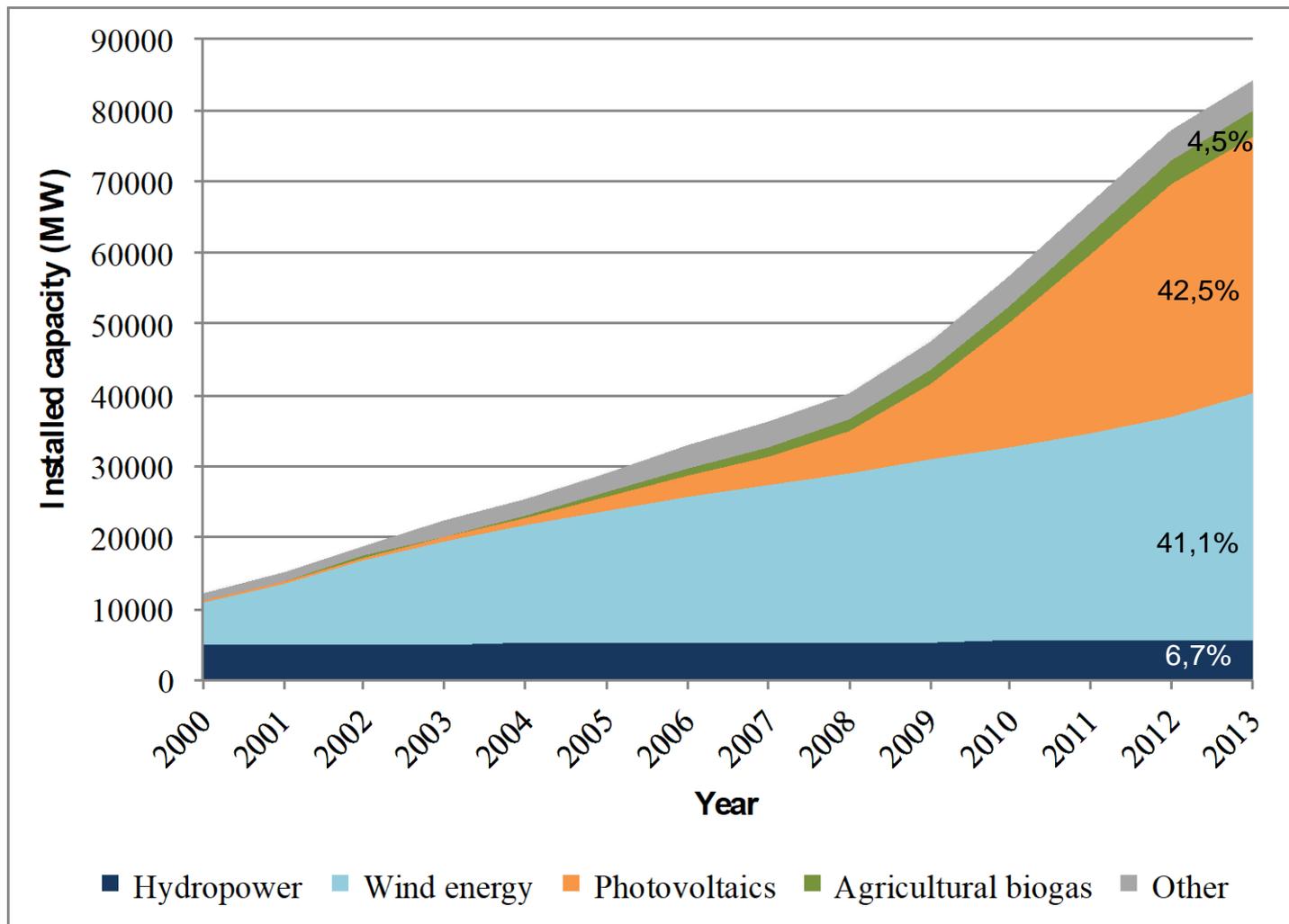


Endenergie-  
verbrauch  
[TWh/a]

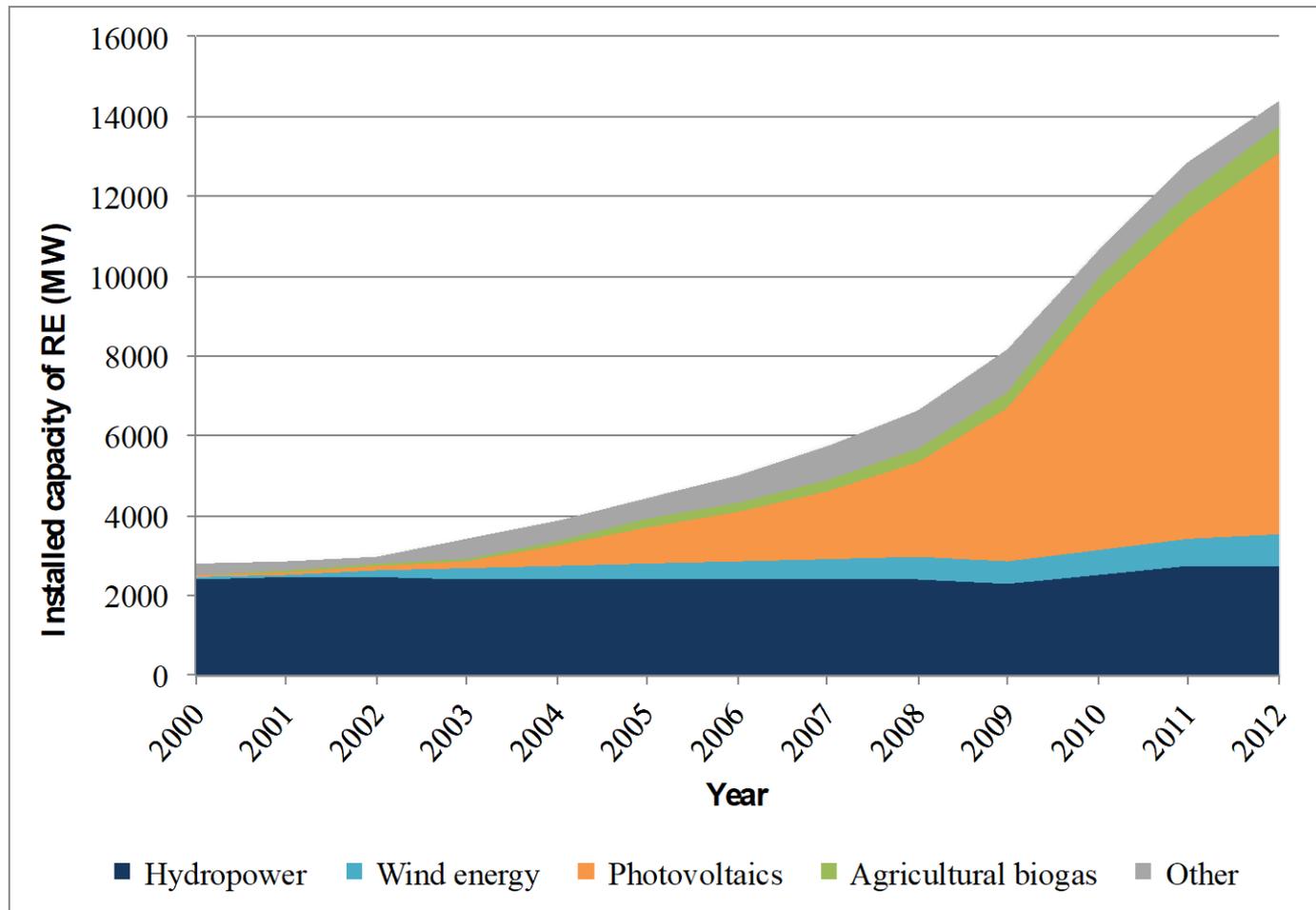


Quelle: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien, In: Deutschland. Bundesumweltministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2011; Wittkopf, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, 2012

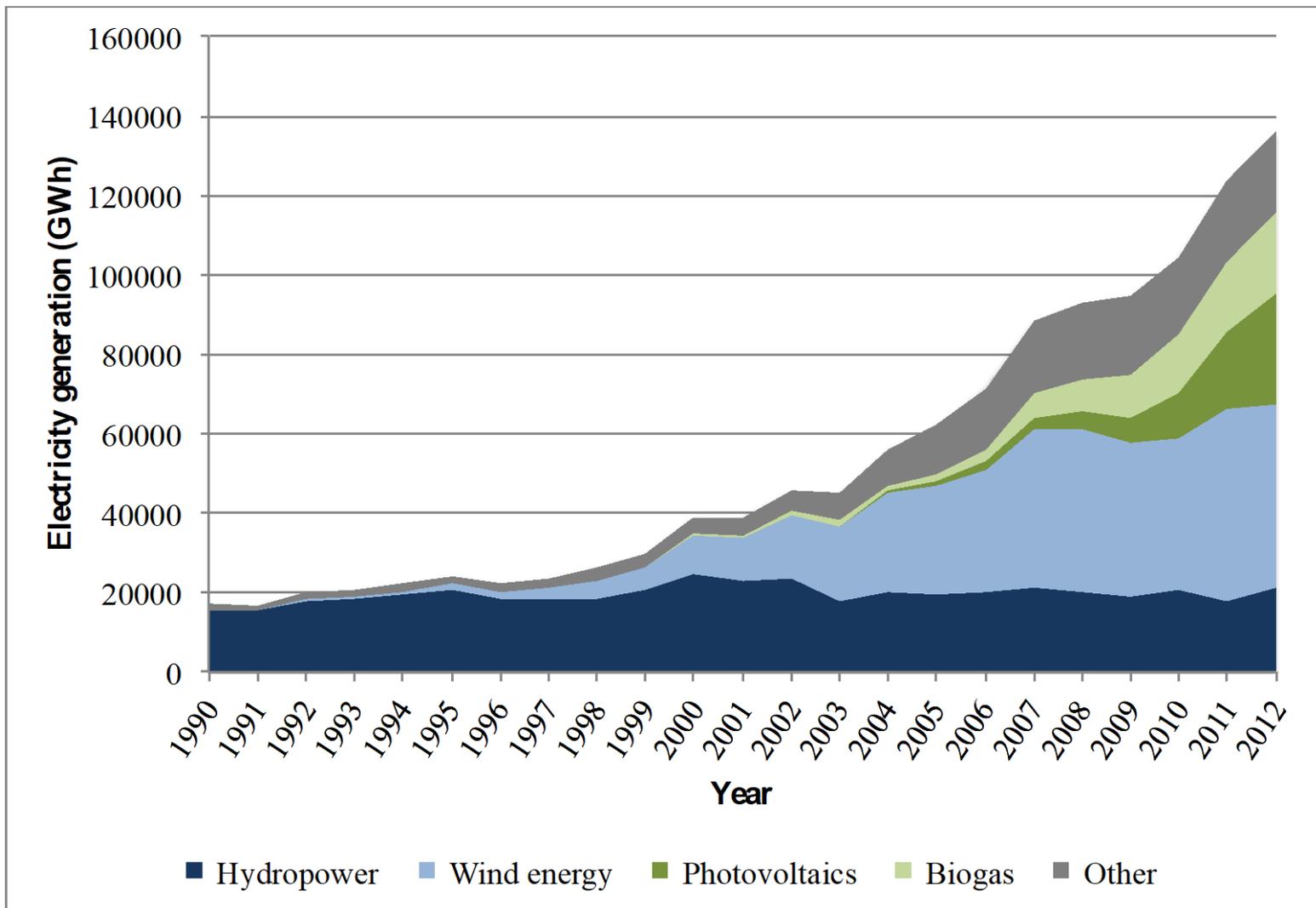
# Stromerzeugung aus regenerativen Energieträgern in Deutschland (installierte Leistung in MegaWatt)



# Stromerzeugung aus regenerativen Energieträgern in Bayern (Installierte Leistung in Megawatt)



# Stromerzeugung aus regenerativen Energieträgern in Deutschland (Stromproduktion in GigaWattstunden 2012: )





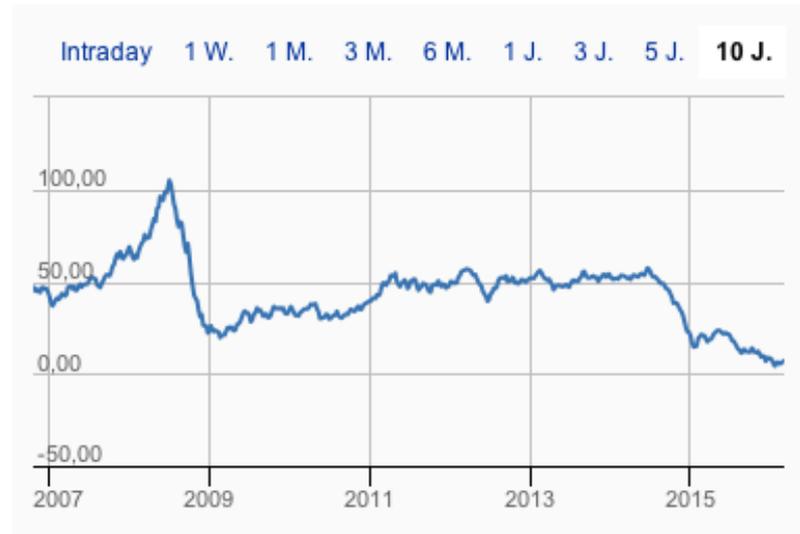
- Technologische Risiken in der Regel kleiner als bei Nutzung konventioneller Energieträger (Gas, Kernkraft)
- Hohe Akzeptanz in der Bevölkerung (politische Durchsetzbarkeit)
- Rückgang der Importe fossiler Energieträger (somit geringere Abhängigkeit der EU von energiereichen Regionen)

# Chancen und Risiken – Wachstumsmarkt regenerative Energie



Renewable Energy Industrial Index

UK Brent Crude Oil Future, €

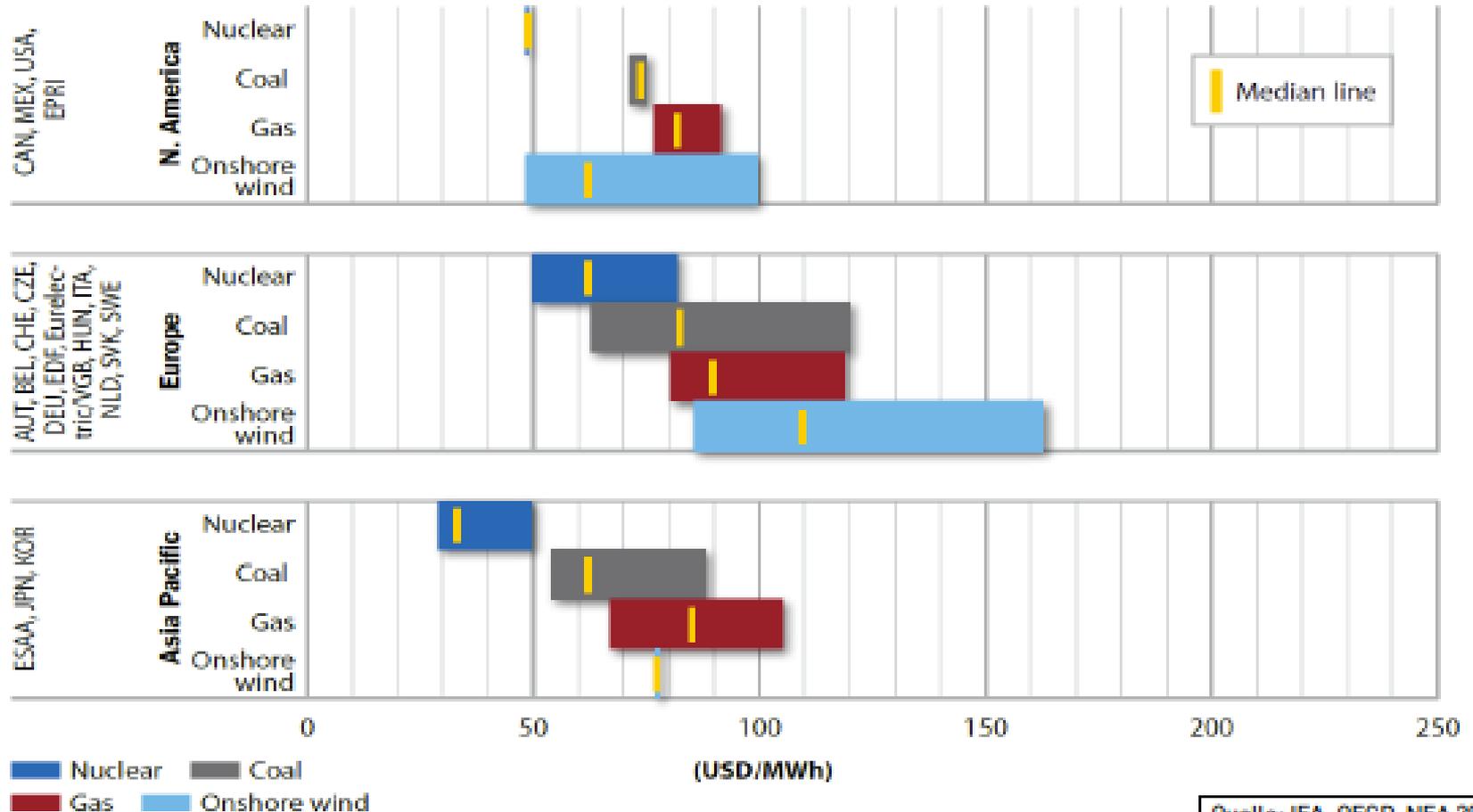


zur Chartanalyse

# Grenzen und Herausforderungen - Wirtschaftlichkeit



Regionale Energie-Erzeugungskosten (Diskontierungsfaktor: 5%)



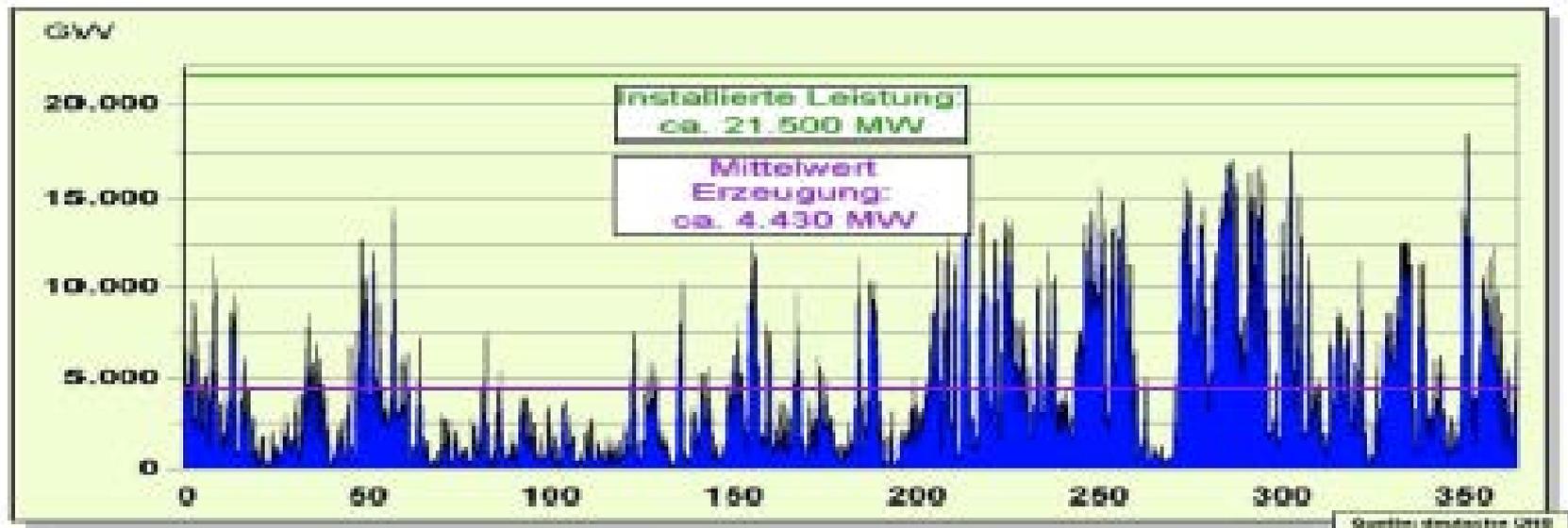
Quelle: IEA, OECD-NEA 2010

# Grenzen und Herausforderungen – Installierte und gesicherte Leistung



- Hohe Volatilität mit geringer Speicherkapazität erneuerbarer Energieträger stellen besondere Herausforderungen an die Stromnetze.

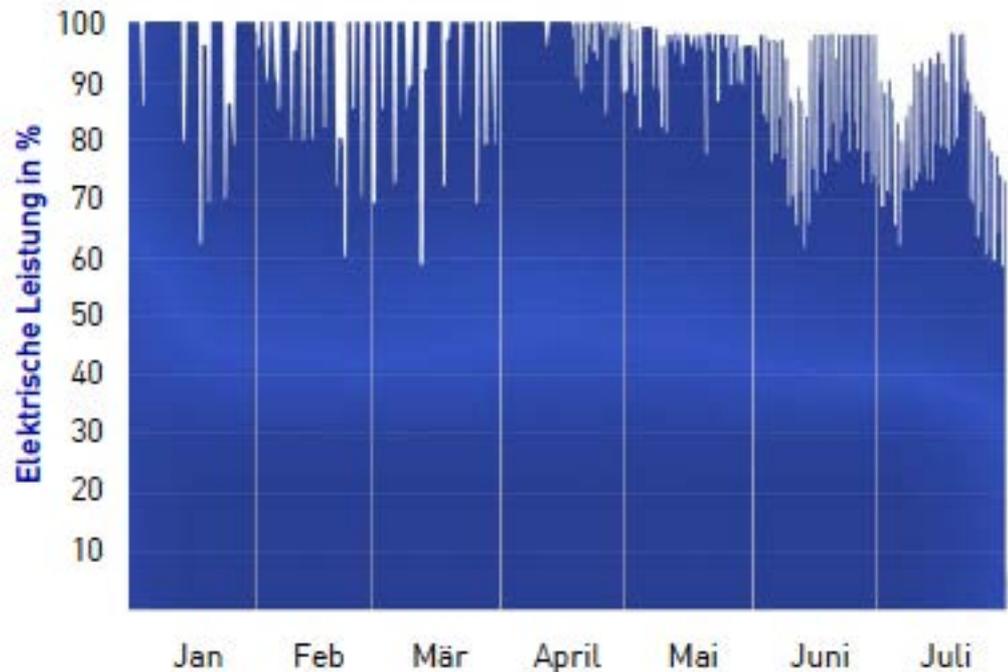
Bundesweite Windeinspeisung 01.04.2006 bis 31.03.2007



# Grenzen und Herausforderungen – Installierte und gesicherte Leistung



Die Einspeiseschwankungen z.B. der Windenergie müssen von den übrigen zur Verfügung stehenden Erzeugungskapazitäten flexibel kompensiert werden (z.B. moderne konventionelle Kraftwerke)



Leistungsdiagramm einer kerntechnischen Anlage im Lastfolgebetrieb

Quelle: EnBW Kernkraft



- Der Anteil am erneuerbaren Endenergieverbrauch beträgt in Deutschland aktuell ca. 10 bis 12%
- Den größten Anteil davon stellt die Biomasse (insbesondere zur Erzeugung von Wärme)
- Im Rahmen der Stromerzeugung spielen Wind- und Wasserkraft eine entscheidende Rolle. Eine wichtige Herausforderung stellt die Anpassung der gesicherten an die installierte Leistung dar.
- Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist nicht ohne (teilweise gravierende) bauliche Maßnahmen möglich.
- Um die Akzeptanz in der Bevölkerung für solche Maßnahmen zu erhöhen ist eine neue Kultur der bürgerlichen Partizipation notwendig (moderne Governance Konzepte)
  - Grundlegende Fachkenntnisse
  - Aktive Beteiligung von unten
  - Einplanen bürgerlicher Beteiligung in den Planungsablauf

# Modell zum Umgang mit erneuerbaren Ressourcen



Definition: Bei erneuerbaren Ressourcen handelt es sich um Ressourcen, die in der Lage sind eine vergleichsweise rasche, nicht von menschlichem Zutun abhängige Bestandsausweitung (Regenerierung) zu leisten.

Wird der komplette Bestand vom Menschen abgebaut, so findet keine Regeneration mehr statt, d.h. das Wachstum ist Null.

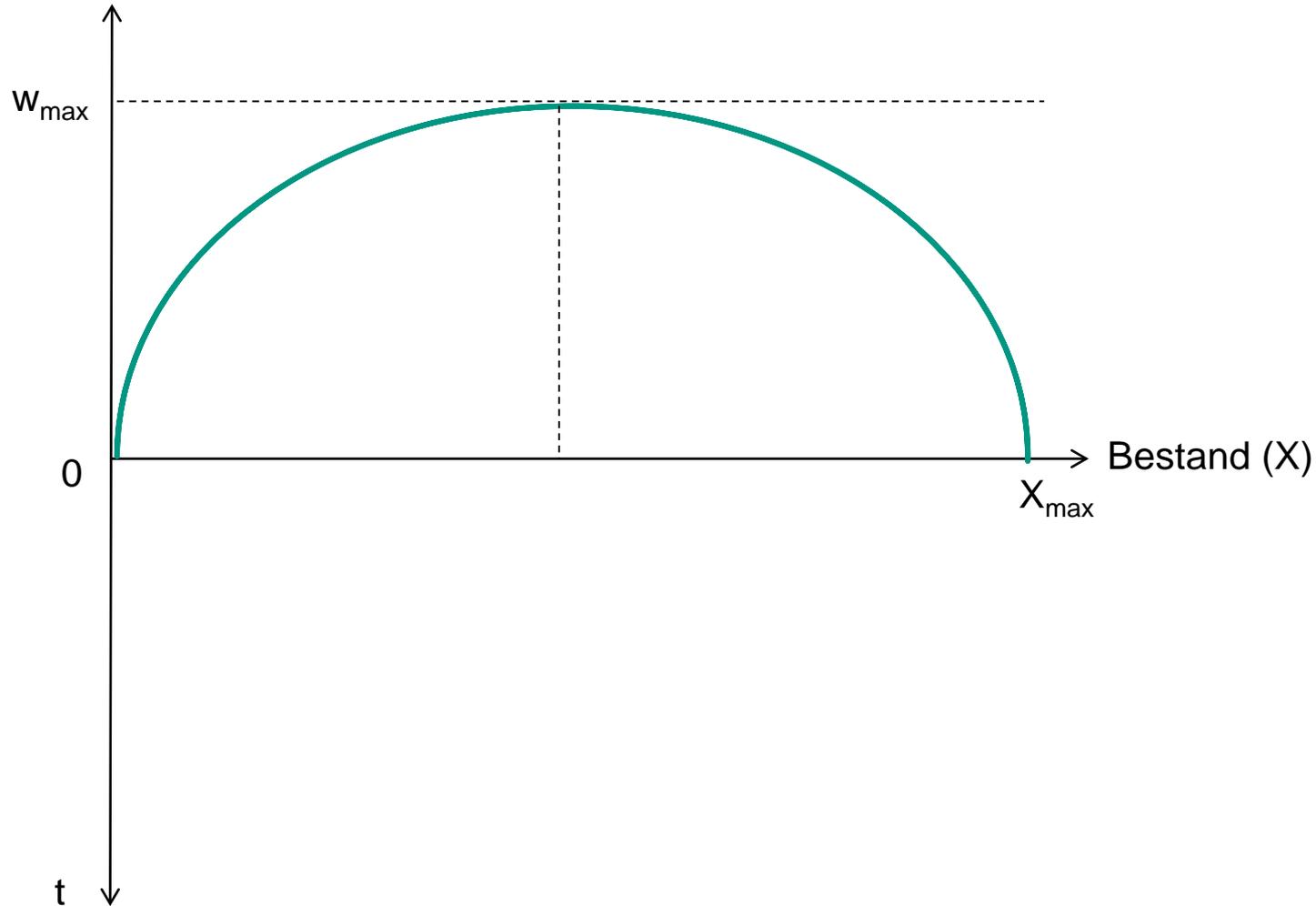
Ohne Eingriffe des Menschen wächst der Bestand bis zu seiner biologischen Sättigungsmenge.

Unterstellt man einen parabolischen Zusammenhang von Bestand und Wachstum, lässt sich ein logistischer Bestandsverlauf über die Zeit ableiten (Schaefer-Modell)

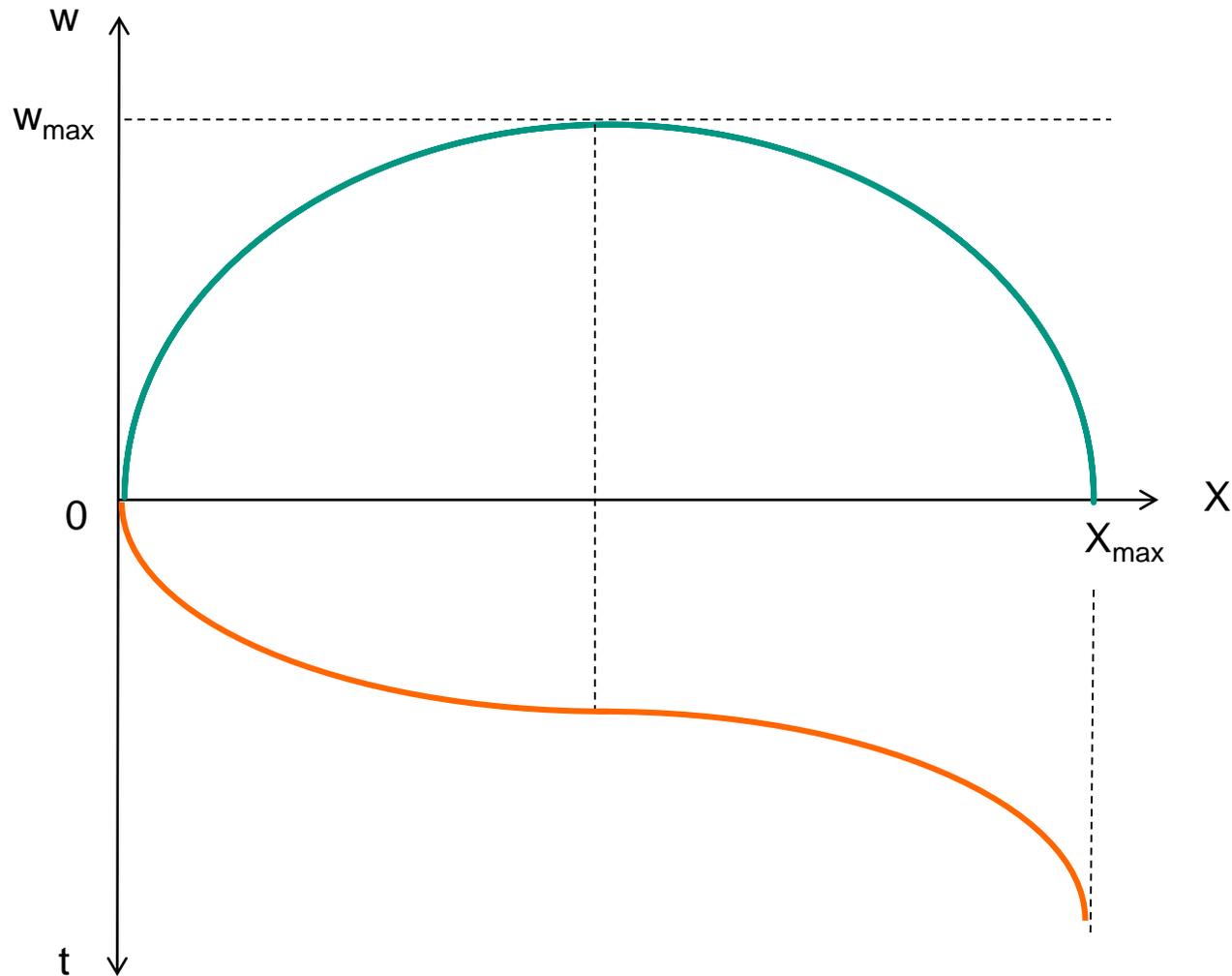
# Logistisches Wachstum des Bestandes



Wachstum (w)



# Logistisches Wachstum des Bestandes



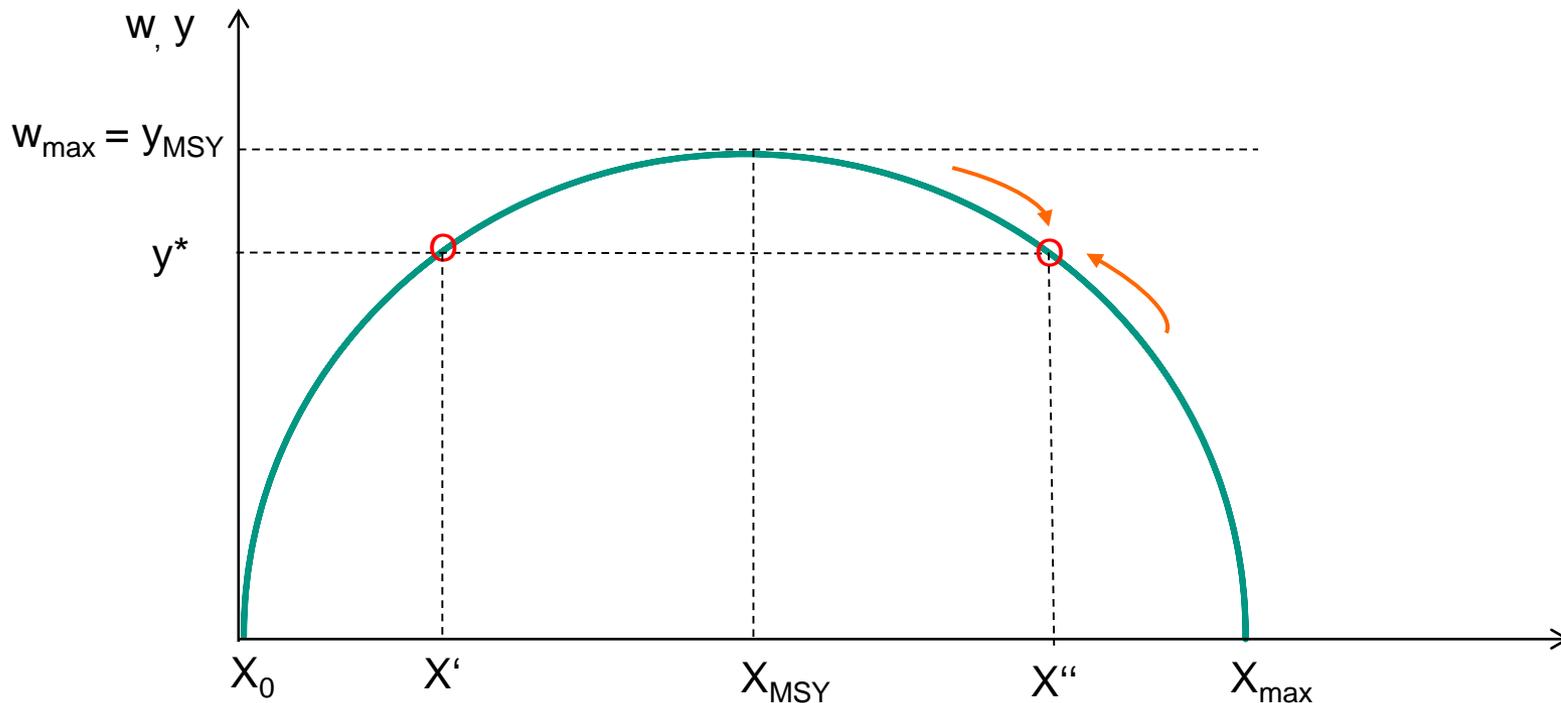


- Bei zwei Perioden 0 und 1 ergibt sich der Bestand zu Beginn der Periode 1 ( $X_1$ ) in Abhängigkeit des Bestandes zu Beginn von Periode 0 ( $X_0$ ), der jährlichen Regeneration ( $w(X_0)$ ) sowie der Ernte am Ende der Periode 0 ( $y_0$ ). Es gilt:

$$X_1 = X_0 + w(X_0) - y_0$$

- Der Bestand bleibt unverändert, falls die jährliche Ernte gerade der jährlichen Regeneration entspricht.
- Dies trifft für alle Erntemengen entlang der Wachstumsparebel aus der vorigen Abbildung zu.
- Die in einem biologischen Gleichgewicht maximal abbaubare Erntemenge ist durch  $w_{\max}$  gegeben. Diese Erntemenge wird in der Literatur als *maximum sustainable yield* (MSY) bezeichnet.

# Abbau erneuerbarer Ressourcen – Stabile Gleichgewichte



Fall 1, Ressourcenbestand  $X'' > X_{MSY}$

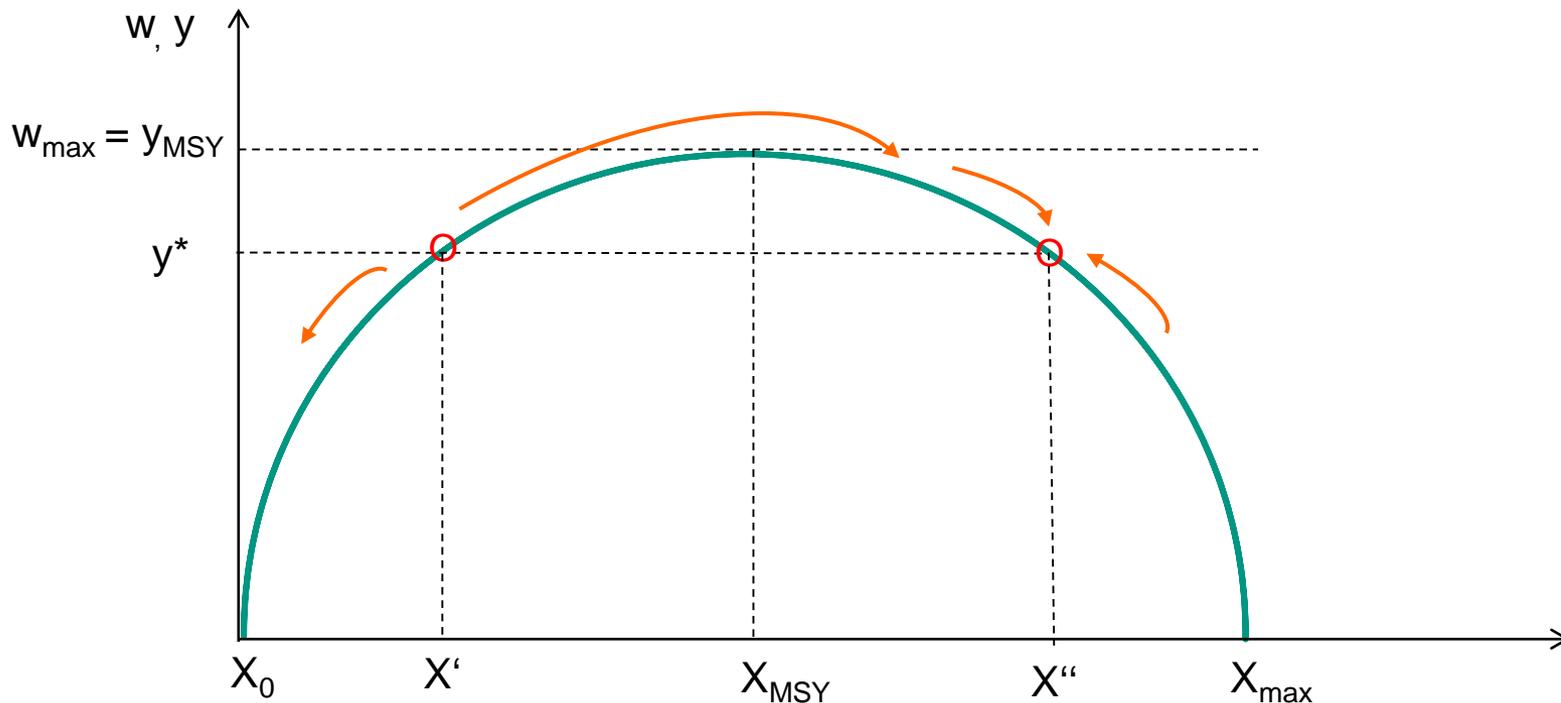
Ressourcenbestand bleibt stabil bei  $X''$ , einmalige (zufällige geringe) Überschreitung der gleichgewichtigen Ernte führt zu einem Bestand geringfügig  $< X''$ .

⇒ Wachstum  $w$  übersteigt Ernte  $y^*$  in den Folgeperioden bis  $X''$  wieder erreicht ist.

Sinkt die Ernte einmalig unter das Niveau  $y^*$ , erhöht sich der Bestand geringfügig.

⇒ Ernte  $y^*$  übersteigt Wachstum  $w$  bis  $X''$  wieder erreicht ist.

# Abbau erneuerbarer Ressourcen – Stabile Gleichgewichte



Fall 2, Ressourcenbestand  $X' < X_{MSY}$

Fall 2.1, einmalige (geringe zufällige) Überschreitung der gleichgewichtigen Ernte führt zu Bestandsrückgang und zu geringerer Regeneration. Wird in den nachfolgenden Perioden jeweils die ursprüngliche Menge  $y^*$  geerntet kommt es zu einer zunehmenden Reduktion des Bestandes.

Fall 2.2, einmalige Unterschreitung der gleichgewichtigen Ernte führt zu Aufbau des Bestandes und zu höherer Regeneration. Bestand wächst bis Bestand  $X''$  erreicht wird.

# Die sozial optimale Abbaurrate von erneuerbaren Ressourcen



- Modellansatz folgt der Herleitung einer sozial optimalen Abbaurrate für erschöpfbare Ressourcen. Erneut ist die Wohlfahrt  $W$  über die Zeit zu maximieren. Dabei gilt:

$$W = \int_{t=1}^{\infty} u(c) e^{-\delta t} dt \quad \text{mit } u'(c) > 0 \text{ und } u''(c) < 0$$

- Wiederum werden die Ressourcen in jeder Periode solange abgebaut bis die Grenznutzen mit den Grenzkosten (Abbaugrenzkosten + Gegenwartswert zukünftiger entgangener Nutzen) übereinstimmen.
- Erneut sind zwei gegenläufige Trends zu beobachten
  - Elastizität des Grenznutzens: „Geschwindigkeit“ mit der der Nutzen innerhalb einer Periode abnimmt
  - Zeitpräferenzrate: „Geschwindigkeit“ mit der der Nutzen über die Zeit abnimmt (Abdiskontierung)

# Die sozial optimale Abbaurrate von erneuerbaren Ressourcen



Im Unterschied zum optimalen Abbaupfad erschöpfbarer Ressourcen gilt es folgende Nebenbedingungen zu beachten:

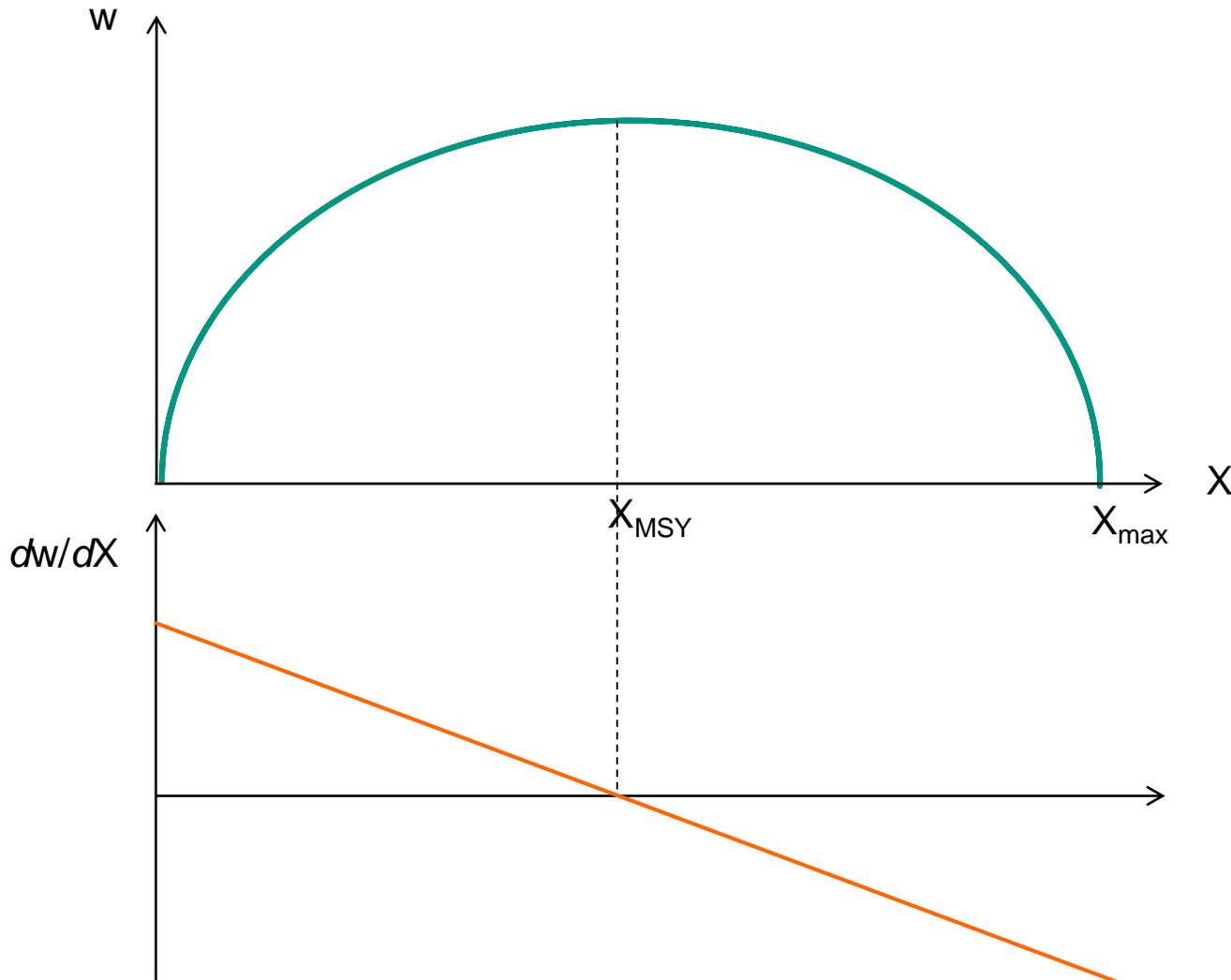
1.  $dX_t / d_t = w(X_t) - y_t$
2.  $0 \leq X_t \leq X_{max}$

# Die sozial optimale Abbaurrate von erneuerbaren Ressourcen



- Die Ernte einer Einheit am Ende von Periode  $t$  führt zu einer Veränderung des Anfangsbestandes  $X_{t+1}$  in Periode  $t+1$  um  $-1$ .
- Außerdem beeinflusst die Ernte einer Einheit in Periode  $t$  auch das von  $X_{t+1}$  abhängige Wachstum  $w(X_{t+1})$  in Periode  $t+1$ .
- Der marginale Beitrag der letzten in Periode  $t$  geernteten Einheit auf das Wachstum in Periode  $t+1$  bezeichnet man als marginalen Regenerationseffekt  $dw/dX_{t+1}$ .
- Der marginale Regenerationseffekt stellt den entgangenen zukünftigen Bestand aufgrund fehlender Basis für die Bestandsvermehrung dar. Er ist positiv bei geringen Beständen (gefallter Baum kann nicht wachsen) und negativ bei hohen Beständen (gefallter Baum verbessert Wachstumschancen anderer Bäume).

# Marginaler Regenerationseffekt



# Die sozial optimale Abbaurrate von erneuerbaren Ressourcen – ökonomisch optimaler Erntepfad



■ Die Entscheidung eine Einheit in Periode  $t$  und nicht in Periode  $t+1$  zu ernten, führt in Periode  $t$  zu einem Nutzenzuwachs gemäß Nutzenfunktion.

■ Betrachtet man den Nettonutzen, so lässt sich der Grenznutzen der letzten noch geernteten Einheit  $y_t$  durch die Differenz aus Marginaler Zahlungsbereitschaft (MZB) abzüglich Abbaugrenzkosten (AGK) definieren

$$\text{Nutzenzuwachs}_t(y_t) = \text{MZB}(y_t) - \text{AGK}(y_t)$$

■ Gleichzeitig resultiert daraus ein zukünftig entgangener Nutzen in Höhe von

$$\text{Entgangener Nutzen}_{t+1}(y_{t+1}) = (\text{MZB}(y_{t+1}) - \text{AGK}(y_{t+1})) (1 + dw/dX_{t+1})$$

■ Im gesellschaftlich optimalen Fall wird die Ressource in jeder Periode solange abgebaut, bis der Gegenwartswert des zukünftig entgangenen Nutzens (in  $t+1$ ) mit dem Nettonutzenzuwachs in Periode  $t$  identisch ist:

$$\text{MZB}(y_t) - \text{AGK}(y_t) = (\text{MZB}(y_{t+1}) - \text{AGK}(y_{t+1})) (1 + dw/dX_{t+1}) / (1 + r)$$

# Die sozial optimale Abbaurate von erneuerbaren Ressourcen – ökonomisch optimaler Erntepfad



- Beim Abbau erschöpfbarer Ressourcen muss der Verzicht auf die Ernte einer Einheit in Periode  $t$  alleine durch einen Preisanstieg der geernteten Einheit in  $t+1$  kompensiert werden.
- Im Fall erneuerbarer Ressourcen kann der Konsumaufschub dank des marginalen Regenerationseffektes einen Mehrkonsum ermöglichen. Der lohnende Preisanstieg aus dem Aufschub der Ernte einer Einheit kann daher geringer ausfallen, als beim Abbau erschöpfbarer Ressourcen.
- Dem Eigner der erneuerbaren Ressource wird es somit leichter fallen auf heutigen Abbau zu verzichten. Dies gilt um so mehr, je geringer der Anfangsbestand  $X$  und je höher der damit einhergehende Regenerationseffekt ausfällt.
- Selbst bei konstanten Preisen - im biologischen GG erfährt das Gut ja keine Verknappung - kann ein Aufschub des Konsums sinnvoll sein.

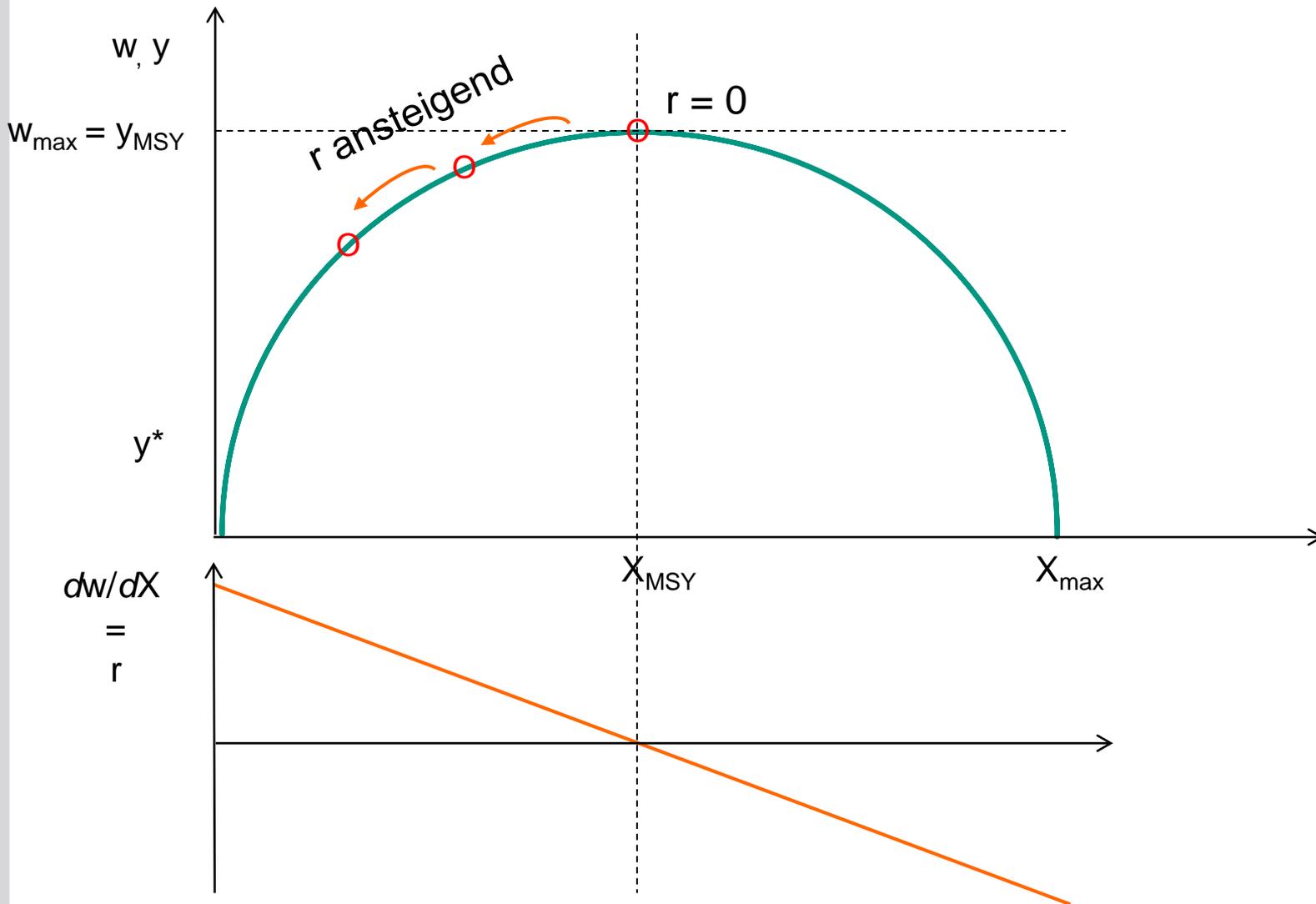
# Zusammenfallen von biologischem Gleichgewicht und ökonomisch optimalen Erntepfad



- Damit das biologische Gleichgewicht mit dem ökonomisch optimalen Erntepfad zusammenfallen kann, muss (bei konstanter MZB und AGK) die Abdiskontierung zukünftiger Grenznutzen gerade mit dem marginalen Regenerationseffekt übereinstimmen.

$$(1 + dw/dX_{t+1}) = (1+r)$$

# Zusammenfallen von biologischem Gleichgewicht und ökonomisch optimalen Erntepfad



# Zusammenfallen von biologischem Gleichgewicht und ökonomisch optimalen Erntepfad



- Falls von einer positiven Diskontierungsrate ausgegangen wird, so muss die Ernte zwar auf der Wachstumsparabel jedoch (links) unterhalb des Niveaus von  $y_{MSY}$  liegen (Es handelt sich somit um ein instabiles biologisches Gleichgewicht).
- Der *maximum sustainable yield* würde erreicht, falls zukünftige Nutzenzuwächse nicht abdiskontiert würden ( $r = 0$ ). In diesem Fall würden heutige Generationen auf einen Teil der Ernte verzichten, bis der Bestand auf  $X_{MSY}$  ansteigen und sich ein maximaler Regenerationseffekt ( $dw/dX_{t+1} = 0$ ) einstellen würde.
- Der *maximum sustainable yield* könnte auch durch einen Anstieg der Preise (in Höhe des unterstellten Zins) erreicht werden.

# Übungsaufgabe Fischzucht



- Sie betreiben eine Fischzucht. Die Population regeneriert sich in Abhängigkeit der Bestandsgröße wie folgt

$$w(X) = (-(X-5.000)^2+25.000.000)/10.000$$

- Auf welche Bestandsgröße wächst die Population ohne exogene Eingriffe?
  - Wie groß ist der *maximum sustainable yield*?
- Ihr aktueller Bestand liegt bei 1000 Fischen. Sie vereinbaren mit einem Fischrestaurant für dieses, das kommende sowie das übernächste Jahr die Lieferung von frischem Fisch zu einem Preis von 11 € je Fisch. Die Fangkosten liegen konstant bei 1 €
- Wie hoch ist der Gegenwartswert Ihres Gewinns, falls Sie die Liefermenge an Ihrem aktuellen biologischem GG ausrichten und Sie mit einer Abdiskontierungsrate von 5% rechnen?
  - Lohnt es sich, im ersten Jahr auf 20% der biologisch nachhaltigen Ernte zu verzichten, um dann in den Folgejahren eine höhere (biologisch nachhaltige) Rente zu erzielen?

# Übungsaufgabe Fischzucht - Lösung



Sie betreiben eine Fischzucht. Die Population regeneriert sich in Abhängigkeit der Bestandsgröße wie folgt

$$w(X) = (-(X-5.000)^2+25.000.000)/10.000$$

Auf welche Bestandsgröße wächst die Population ohne exogene Eingriffe?

Die Population wächst bis:

$$w(X) = 0$$

Dies ist erfüllt, falls gilt:

$$(-(X-5.000)^2+25.000.000)=0$$

$$\Leftrightarrow (X-5.000)^2 = 25.000.000$$

$$\Leftrightarrow X = 10.000$$

# Übungsaufgabe Fischzucht - Lösung



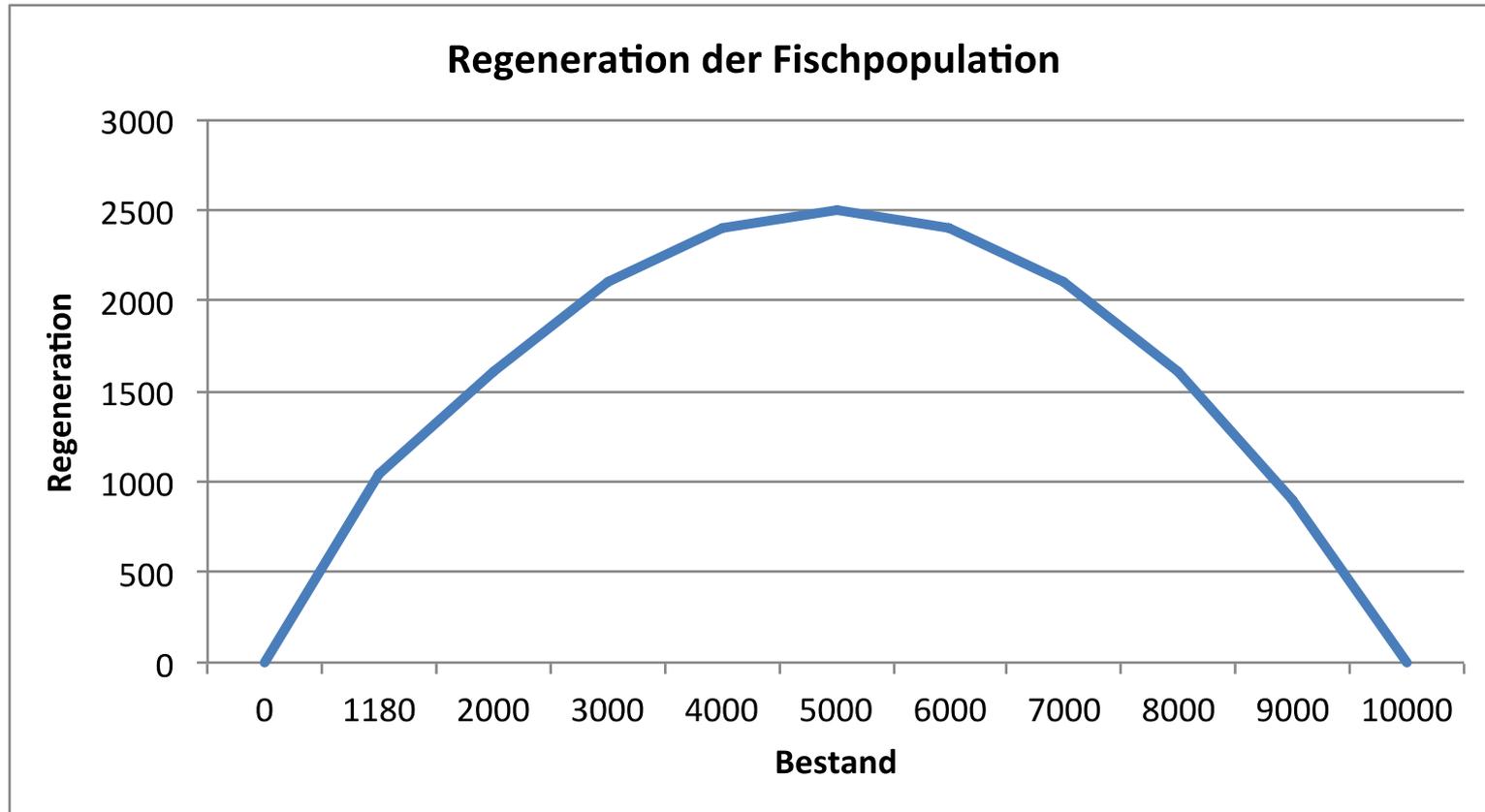
- Sie betreiben eine Fischzucht. Die Population regeneriert sich in Abhängigkeit der Bestandsgröße wie folgt

$$w(X) = (-(X-5.000)^2+25.000.000)/10.000$$

- Wie groß ist der *maximum sustainable yield*?

Maximum sustainable yield wird erreicht, falls Zähler maximal wird, dies gilt für  $X = 5.000$

$$w(5.000) = 25.000.000/10.000 = 2.500$$





- Ihr aktueller Bestand liegt bei 1000 Fischen. Sie vereinbaren mit einem Fischrestaurant für dieses, das kommende sowie das übernächste Jahr die Lieferung von frischem Fisch zu einem Preis von 11 € je Fisch. Die Fangkosten liegen konstant bei 1 €
- Wie hoch ist der Gegenwartswert Ihres Gewinns, falls Sie die Liefermenge an Ihrem aktuellen biologischem GG ausrichten und Sie mit einer Abdiskontierungsrate von 5% rechnen?

Nachhaltige Ernte für  $X=1.000$

$$\begin{aligned}w(1000) &= (-16.000.000 + 25.000.000) / 10.000 \\ &= 9.000.000 / 10.000 = 900\end{aligned}$$

Gegenwartswert des Gewinns:

$$\begin{aligned}G &= 900 * 10 \text{ €} + 900 * 10 \text{ €} * 1/1,05 + 900 * 10 \text{ €} * 1/1,05^2 \\ &\approx 25.735 \text{ €}\end{aligned}$$



- Lohnt es sich, im ersten Jahr auf 20% der biologisch nachhaltigen Ernte zu verzichten, um dann in den Folgejahren eine höhere (biologisch nachhaltige) Rente zu erzielen?

Ernte im ersten Jahr:  $900 * 0,8 = 720$

Bestandszuwachs: 180

Bestand zu Beginn des 2. Jahres: 1180

Nachhaltige Ernte im 2. und 3. Jahr: 1040,8

$$G = 720 * 10\text{€} + 1040,8 * 10\text{€} * 1/1,05 + 1040,8 * 10\text{€} * 1,052 \\ \approx 26.552 \text{ €}$$

Der Gegenwartswert kann durch die Zurückhaltung im ersten Jahr von 25.735€ auf 26.552€ (3,2%) gesteigert werden.



■ Soweit nicht anderweitig vermerkt, basieren die vorgestellten Ansätze auf

Endres, Alfred, (2007). Umweltökonomie, 3. Auflage, Stuttgart: Kohlhammer

Endres, Alfred und Immo Querner, (2000), Die Ökonomie natürlicher Ressourcen, 2. Auflage, Stuttgart: Kohlhammer