



# Wirtschaftliche Grundlagen im Sommersemester 2024

## Klimawandel & Energie

Prof. Tom Brown

Fachgebiet [Digitaler Wandel in Energiesystemen](#) / TU Berlin



## Klimawandel & Energie: Fragen

Klimawandel und Energie vereinen viele Themen der Wirtschaftswissenschaften.

- Was sind die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels?
- Können wir uns als Gesellschaft eine Energiewende leisten?
- Können Märkte helfen, Anreize für saubere Technologien zu schaffen? Oder setzen wir lieber auf Verbote und Gebote (Ordnungsrecht)?
- Wie finanzieren wir die Investitionen für die Energiewende?
- Welche Rolle spielt Innovation?
- Wie gehen wir mit den Risiken um, dass das Klima gefährliche Kipppunkte erreicht?

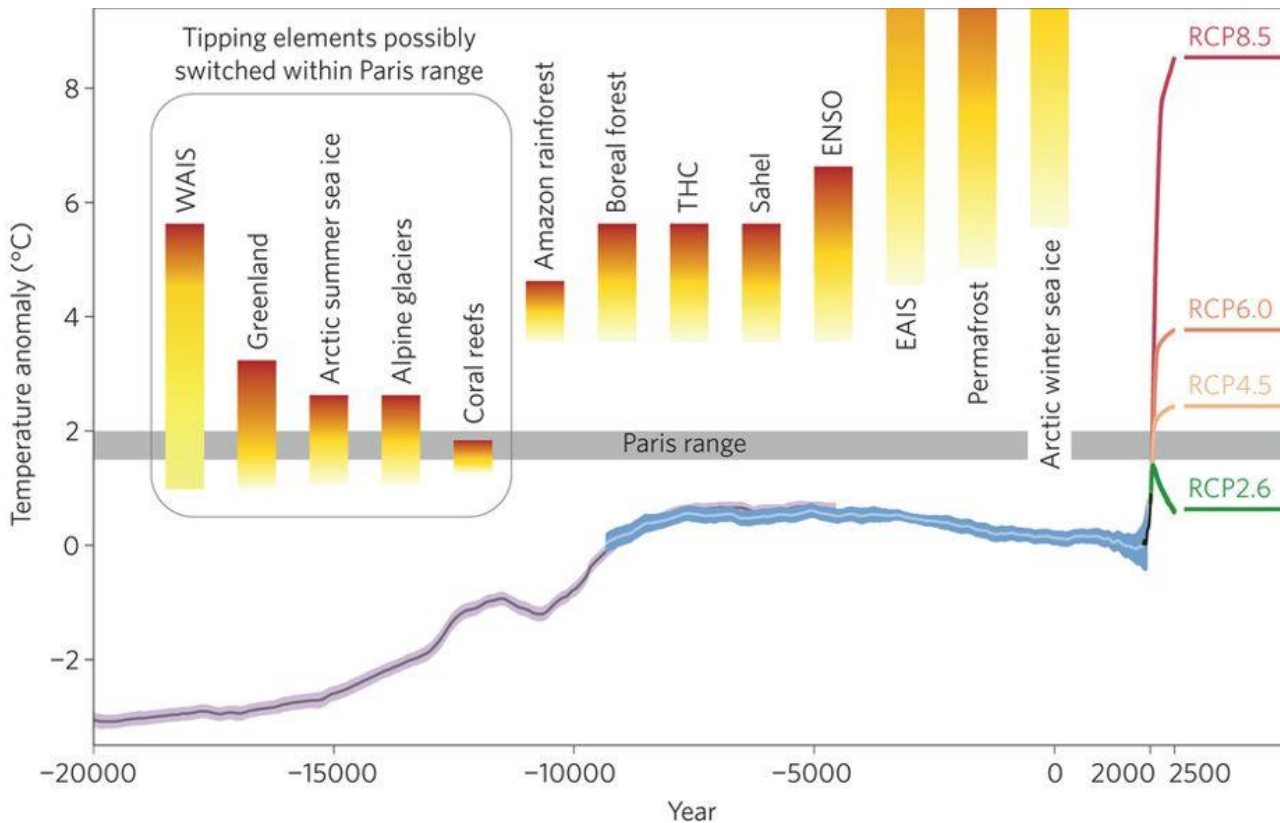


## Klimawandel: Was sind die Gefahren?

Das **Pariser Klimaabkommen** vom 12. Dezember 2015 wurde von 196 Staaten plus der Europäische Union vereinbart mit dem Ziel, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter **auf deutlich unter zwei Grad Celsius** zu begrenzen, **möglichst sogar auf unter 1,5 Grad**.

Durch die Eindämmung des Klimawandels unterhalb dieses Temperaturniveaus sollen Umweltfolgen wie Naturkatastrophen, Dürren und ein Anstieg der Meeresspiegel wirksam begrenzt werden.

# Klimawandel: Was sind die Gefahren?



## Kipppunkte:

- WAIS: West Antarctic Ice Sheet ( $\Rightarrow$  5m Meeresspiegelanstieg)
- Grönland (7m)
- EAIS: East Antarctic Ice Sheet (> 50 m)
- THC: thermohaline circulation (wärmt Europa)
- ENSO: El Niño–Southern Oscillation (nimmt zu, führt zu Extremwetterereignissen)



# Klimawandel: Was sind die Kosten?

Was sind die Kosten, die der Gesellschaft durch Treibhausgasemissionen und dem daraus resultierenden Klimawandel entstehen?

## Direkte Kosten

- Wetterextreme (Hurrikane, Hitzeperioden, Dürren, Hochwasser, Waldbrände)
- Erhöhung des Meeresspiegels
- Ernteauffälle
- Rückgang des verfügbaren Trinkwassers
- Verlust der biologischen Vielfalt
- Ausbreitung von Wüsten

## Anpassungskosten

- Deiche
- Klimaanlage
- Anpassung von Ackerkulturen



# Klimaschäden: Was kostet der Gesellschaft eine ausgestoßene Tonne CO<sub>2</sub>?

Hier kann der Diskontierungszinssatz eine große Rolle spielen!

## 1 Bewertung von Klimafolgeschäden

### 1.1 Kostensatz für Kohlendioxid- und andere Treibhausgasemissionen

Wir empfehlen die Verwendung eines Kostensatzes von 195 €<sub>2020</sub> / t CO<sub>2 äq</sub> für das Jahr 2020 bei einer Höhergewichtung der Wohlfahrt heutiger gegenüber zukünftigen Generationen und eines Kostensatzes von 680 €<sub>2020</sub> / t CO<sub>2 äq</sub> bei einer Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünftiger Generationen.<sup>1</sup> Zusätzlich empfehlen wir eine Sensitivitätsanalyse mit dem jeweils anderen Wert.

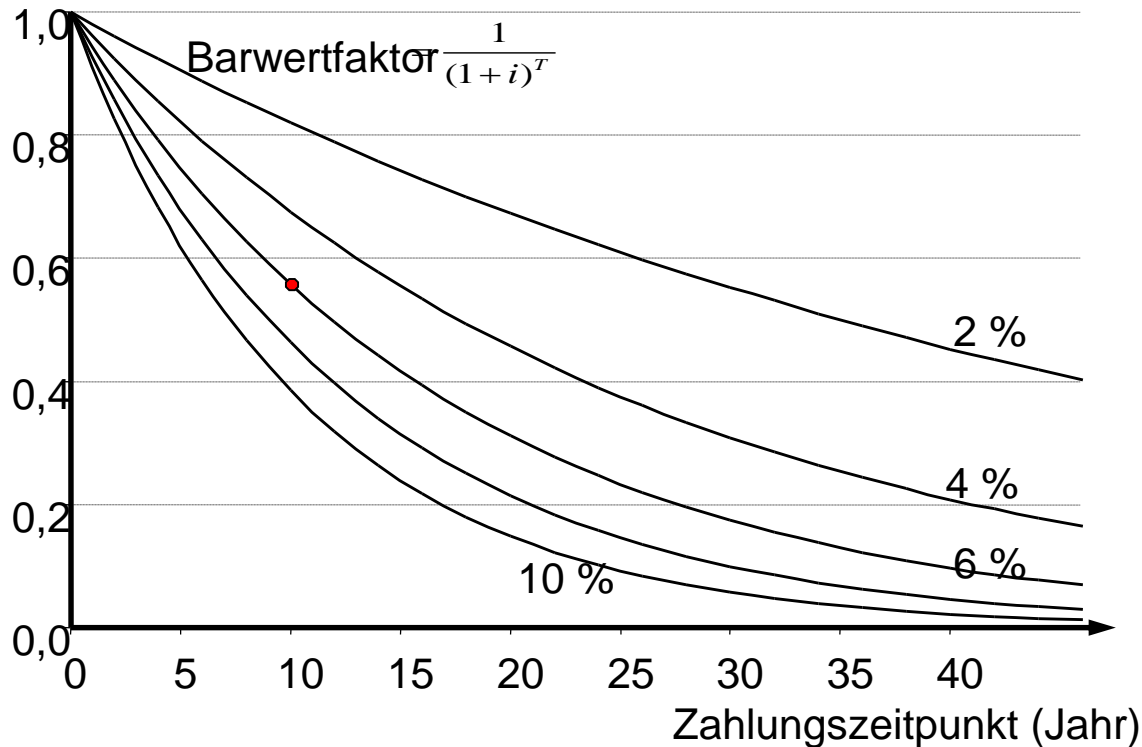
**Tabelle 1: UBA-Empfehlung zu den Klimakosten in €<sub>2020</sub> / t CO<sub>2 äq</sub>**

	Klimakosten in € <sub>2020</sub> / t CO <sub>2 äq</sub>		
	2020	2030	2050
1% reine Zeitpräferenzrate	195	215	250
0% reine Zeitpräferenzrate	680	700	765

Quelle: Eigene Darstellung.

## Warnung: Diskontierung über lange Zeiten

Über lange Zeithorizonte kann die Diskontierung einen großen Effekt haben.



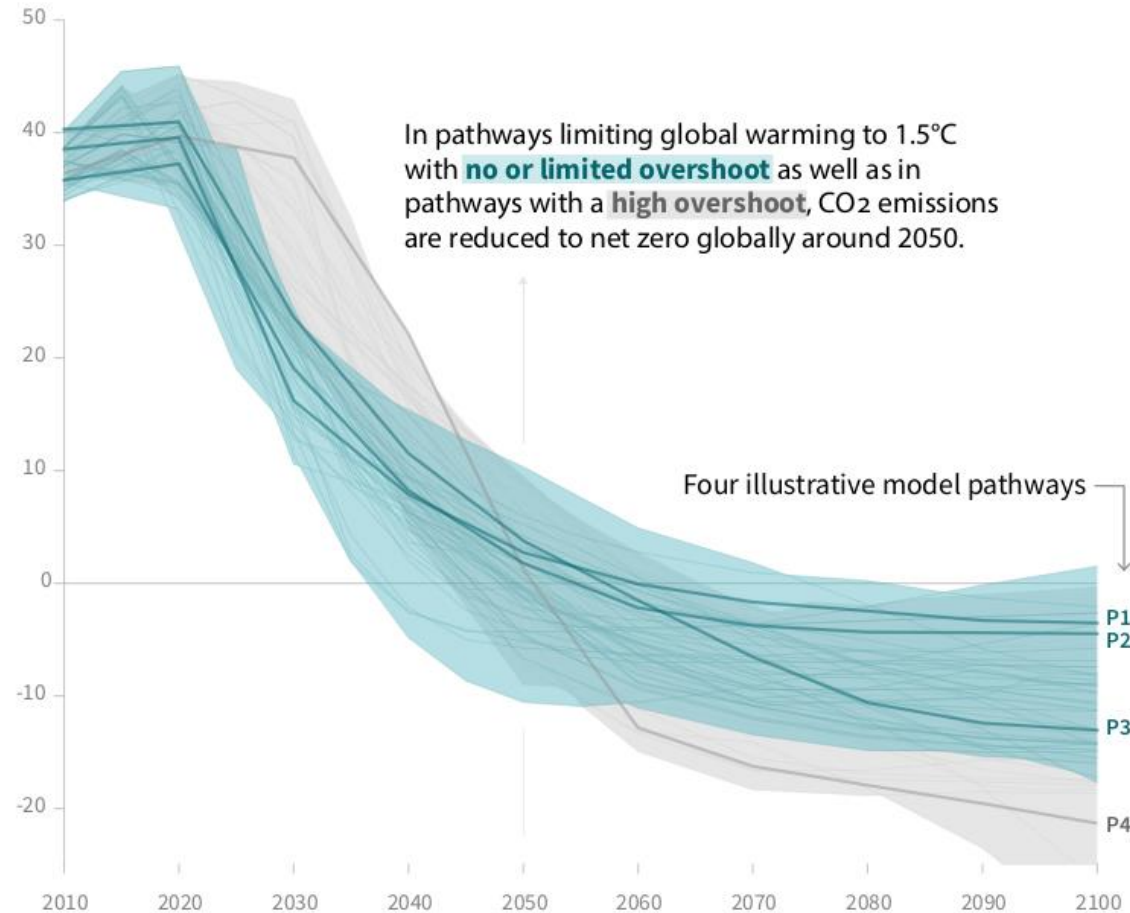
- Langfristige Vorteile werden nicht gesehen, z.B. Einnahmen von langlebigen Kraftwerken oder Effizienzmaßnahmen
- Langfristige Kosten werden auch verborgen, z.B. Rückbau, Entsorgung, Klimaschäden

• **Umstrittenes Thema!**

# Wie viel dürfen wir noch ausstoßen, um mit Paris konsistent zu bleiben?

## Global total net CO<sub>2</sub> emissions

Billion tonnes of CO<sub>2</sub>/yr



Um das 1,5C Ziel zu erreichen, müssen wir bis ungefähr 2050 aufhören, CO<sub>2</sub> auszustößen, und andere Treibhausgase (wie Methan, Lachgas) auch reduzieren. Nach 2050 müssen wir sogar CO<sub>2</sub> aus der Luft holen (Negative Emission Technologies).



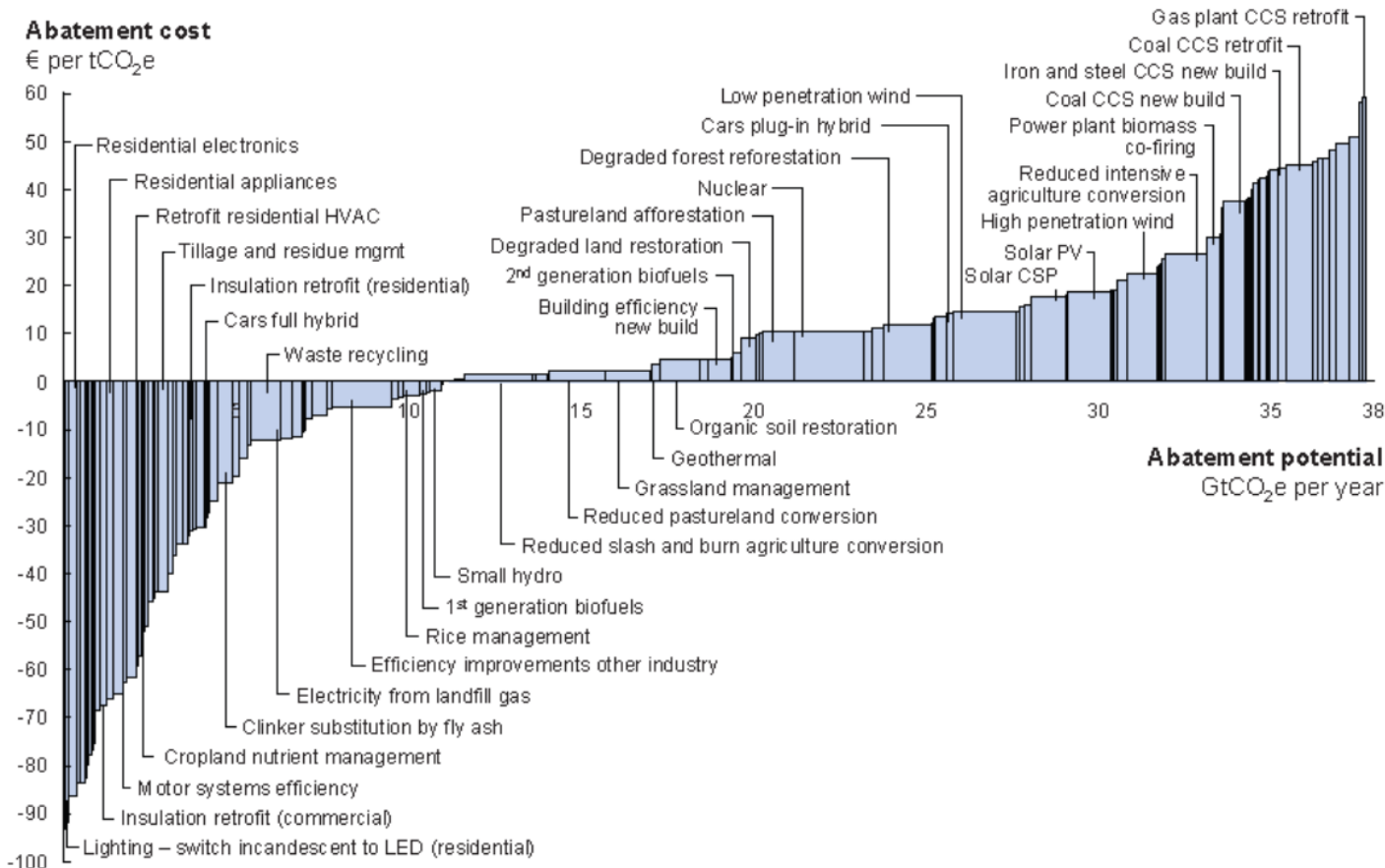


## Merkmale des Treibhausproblems

- **Globalität:** Der Ort der Emissionen spielt keine Rolle.
- **Zeitliche Verschiebung der Konsequenzen:** Schäden betreffen künftige Generationen, die verursachende Generation bleibt weitgehend ohne Beeinträchtigungen.
- Lösungen nur bei international koordiniertem Vorgehen:  
Wer soll welche Beiträge liefern?

# Was sind die Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen?

FIG. 1: MCKINSEY'S GLOBAL COST CURVE FOR THE YEAR 2030



Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €60 per tCO<sub>2</sub>e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.

Spezifische Kosten (€/tCO<sub>2</sub>-äquivalent) und Potenziale (Volumen) für die Vermeidung von globalen Treibhausgasemissionen in 2030, die weniger als 60 €/tCO<sub>2</sub>-äq kosten.

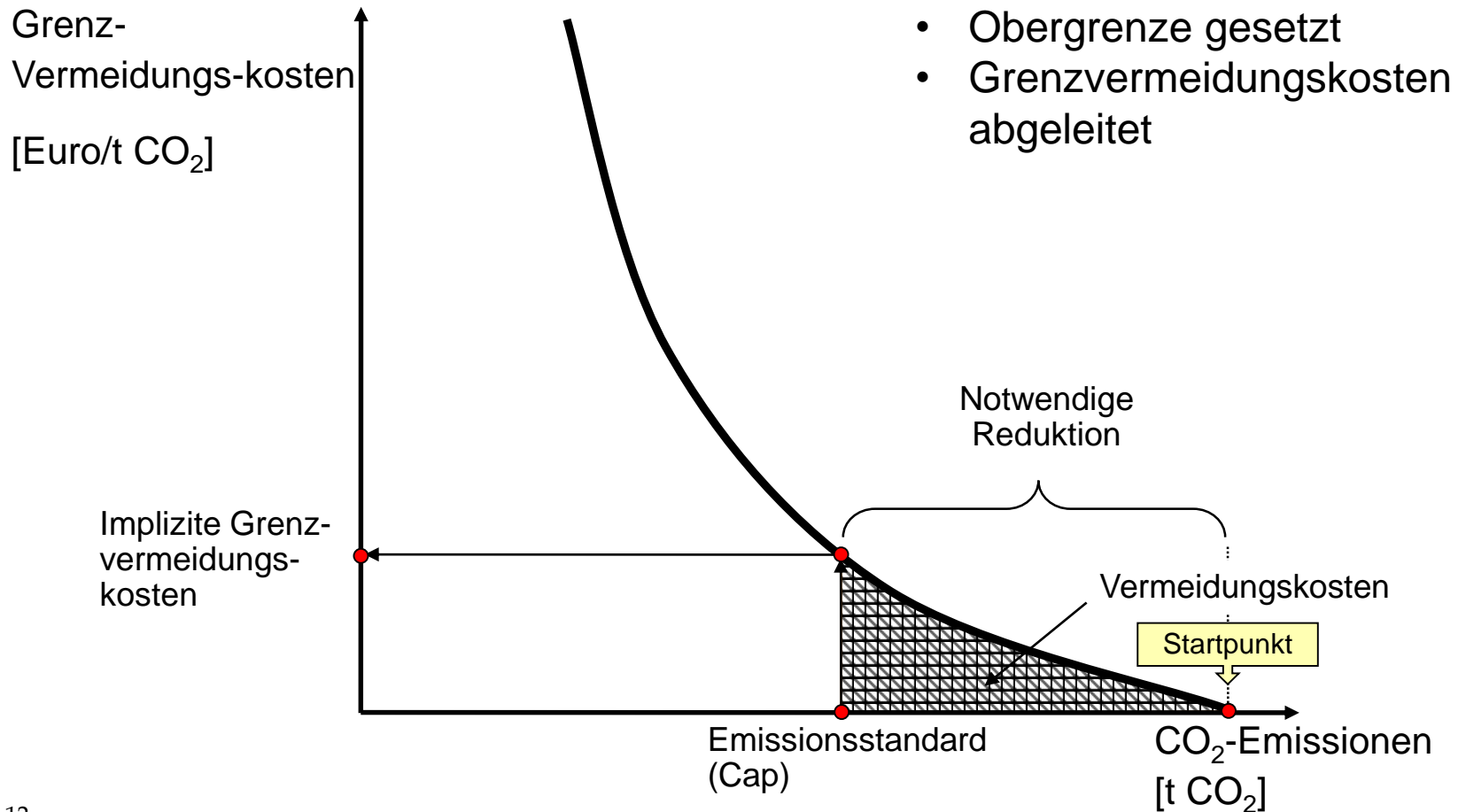
Vergleichen Sie die Vermeidungskosten mit den Kosten von Klimawandel.



# Instrumente zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung - Steuern oder anderes Instrument?

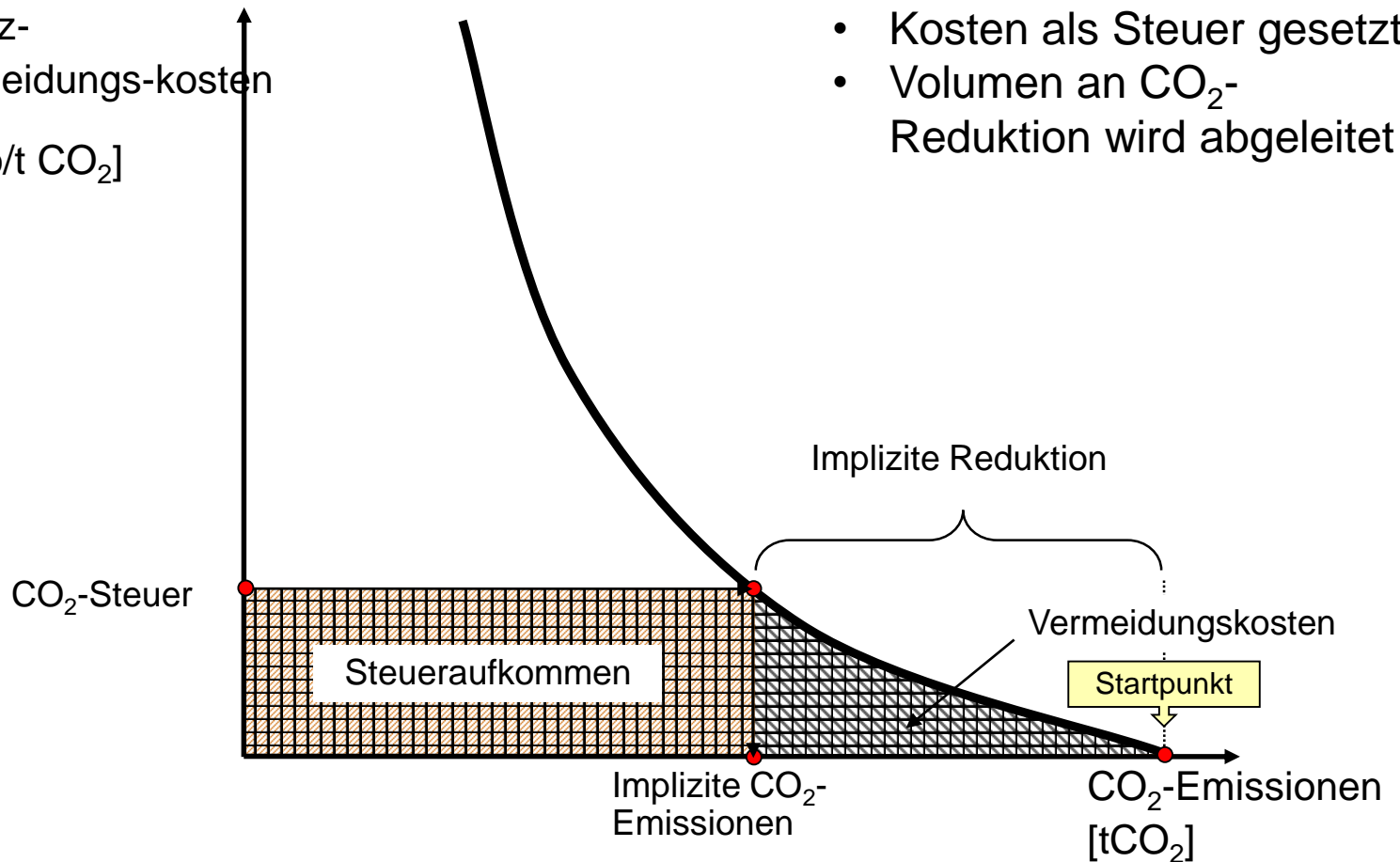
- **Emissionsstandard/Normen** (Cap = Obergrenze)
  - Beispiel: Die EU-Verordnungen zur Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Straßenfahrzeugen: Seit 2020 (vollumfänglich ab 2021) gilt ein Flottengrenzwert für Pkw von 95 gCO<sub>2</sub>/km
- **CO<sub>2</sub>-Steuer** (Pigou-Steuer)
  - Ziel: Lenkung des Verhaltens (weniger ein Fiskalzweck) zur Internalisierung externer Effekte (Soziale Kosten werden von den Verursachern getragen)
  - Beispiel: Seit 2021 deutsche CO<sub>2</sub>-Steuer auf Öl und Gas
- **Cap-and-Trade-System** (Handelsystem)
  - Beispiel: Europäisches Emissions Trading System (ETS) für ~40% aller europäischer Emissionen (Energiewirtschaft, Flugverkehr innerhalb Europas und Industrie)
- **Technologie-Förderung**
  - Beispiel: Einspeisevergütung für PV, H2Global für Wasserstoff

# CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten Emissionsstandard/Normen



# CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten Pigou-Steuer

Grenz-  
Vermeidungs-kosten  
[Euro/t CO<sub>2</sub>]

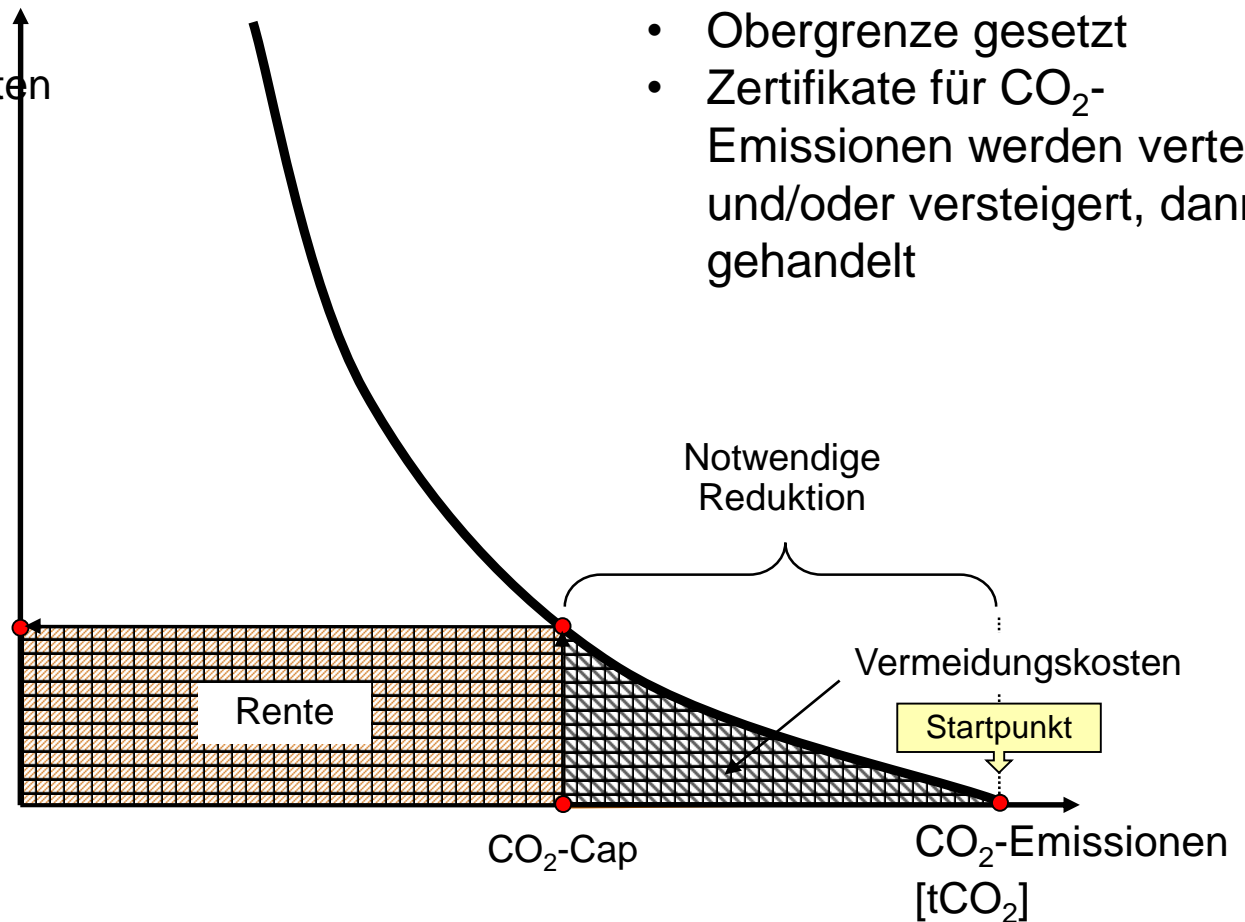


- Kosten als Steuer gesetzt
- Volumen an CO<sub>2</sub>-Reduktion wird abgeleitet

# CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten Cap-and-Trade-System

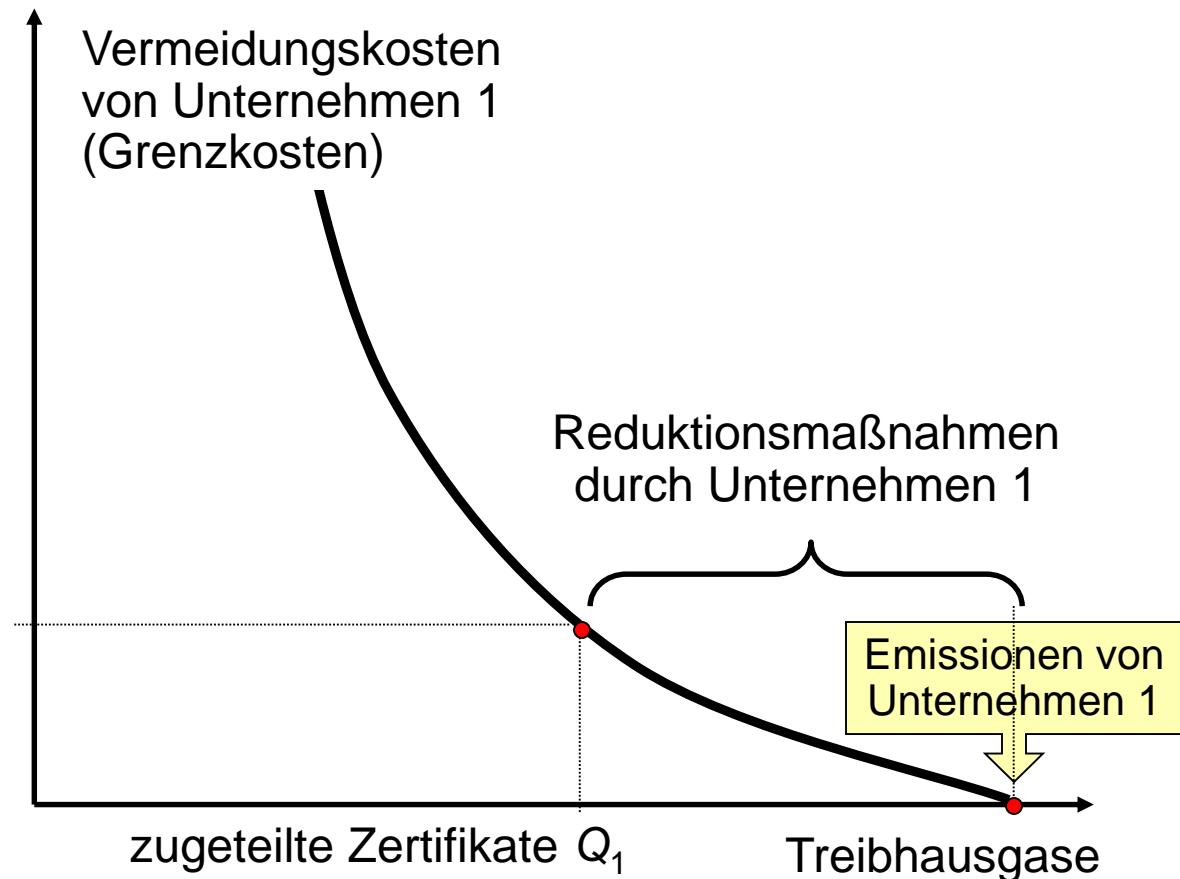
Grenz-  
Vermeidungs-kosten  
[Euro/t CO<sub>2</sub>]

Impliziter  
Zertifikate-preis

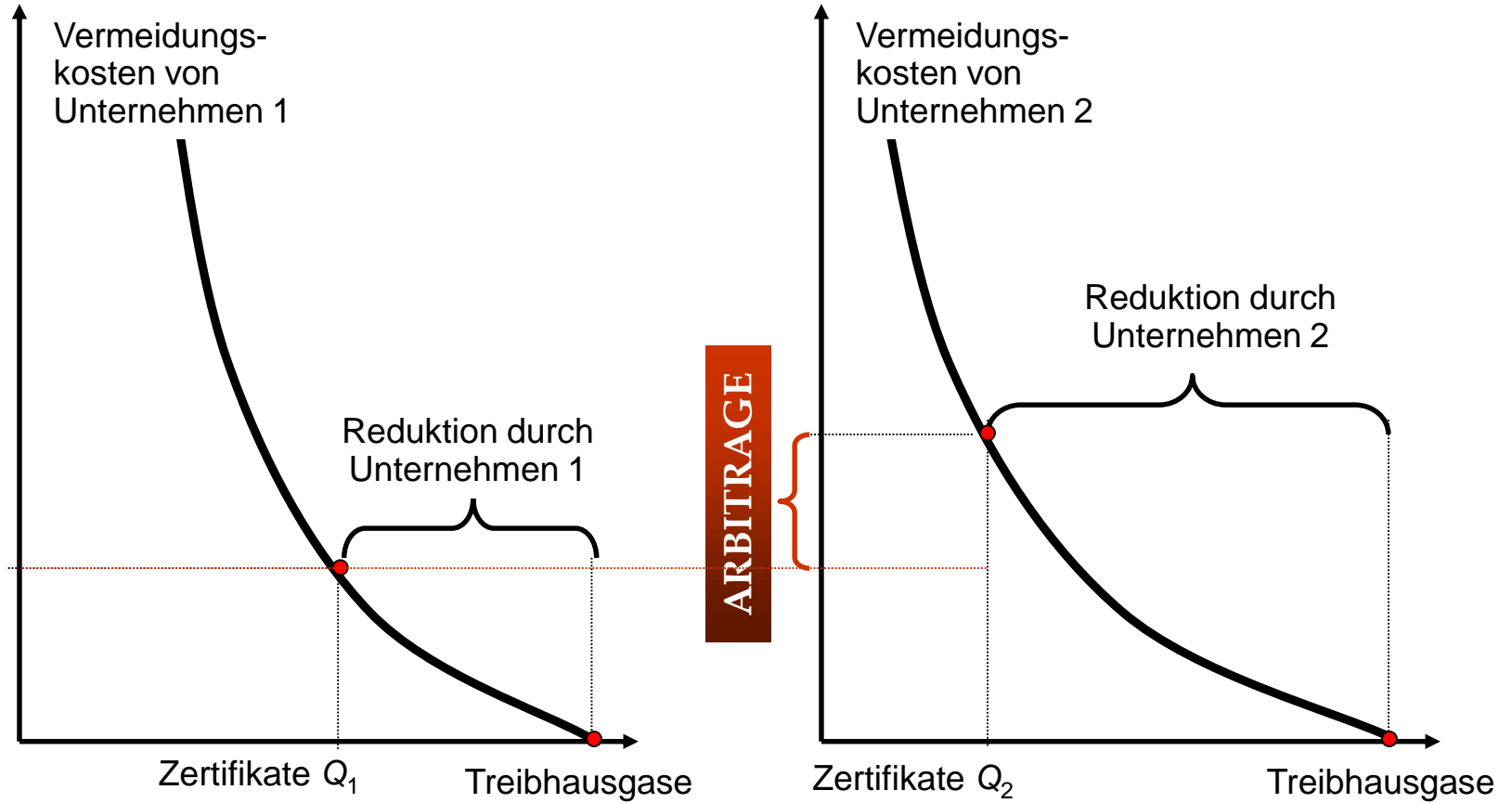


- Obergrenze gesetzt
- Zertifikate für CO<sub>2</sub>-Emissionen werden verteilt und/oder versteigert, dann gehandelt

# Unternehmenssicht -Zertifikate und Vermeidungskosten

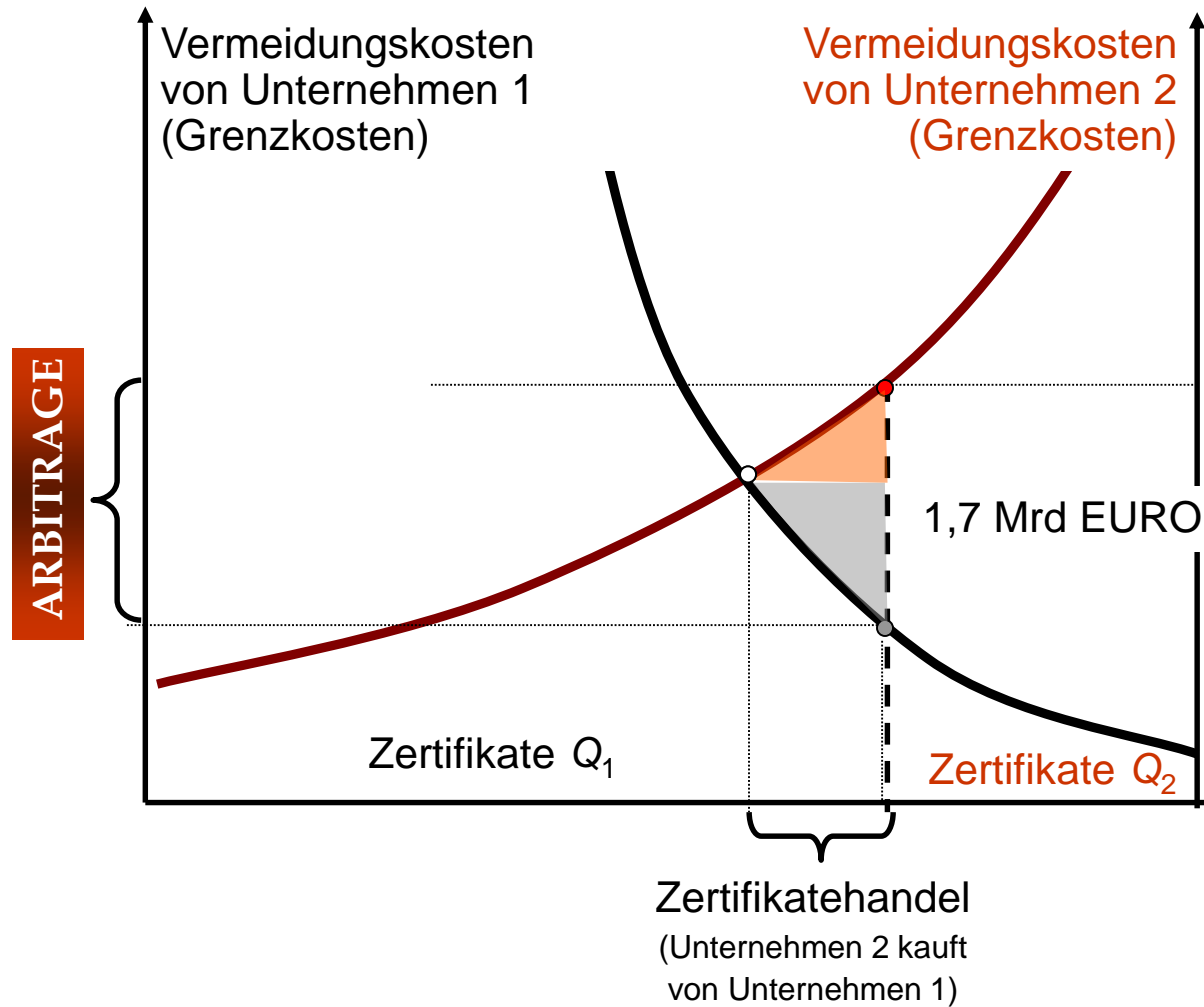


# Prinzip des Zertifikatehandels





# Prinzip des Zertifikatehandels



# Aktuelle CO<sub>2</sub>-Preise

In 2021-3 ist der ETS-Zertifikat-Preis auf über €90/tCO<sub>2</sub> gestiegen. Das BEHG setzt einen CO<sub>2</sub> Preis für Verkehr und Gebäude von €30/tCO<sub>2</sub> in 2023. Wohin jetzt?

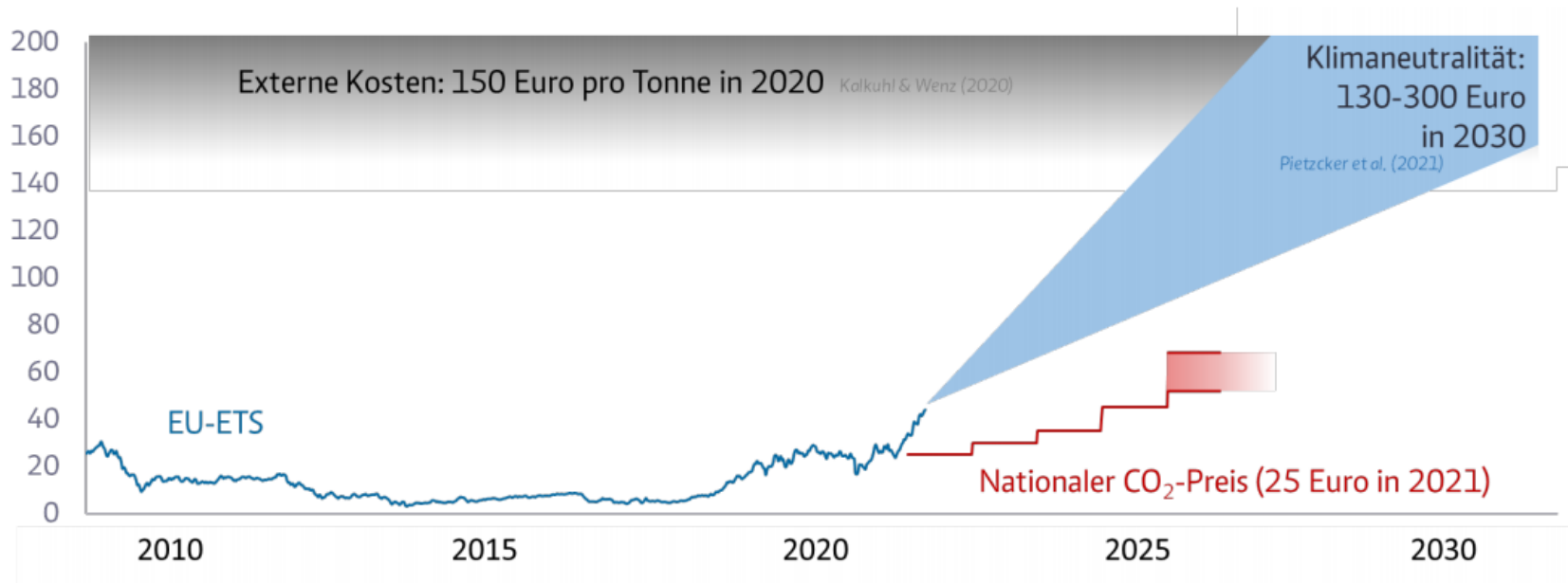
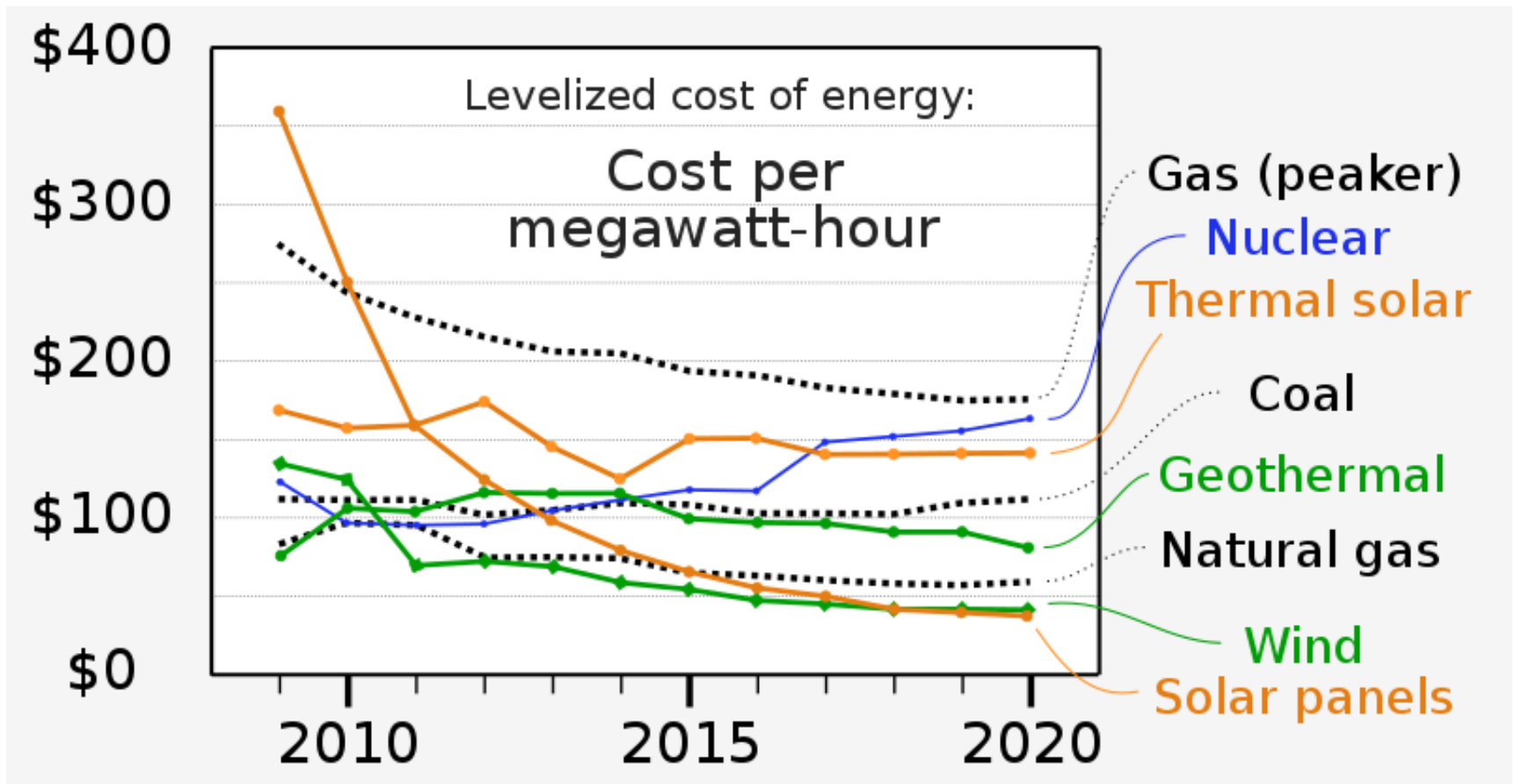


Abbildung 2: Aktuelle und nötige CO<sub>2</sub>-Preise im Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS, in blau) für die Sektoren Energiewirtschaft und Teile der Industrie und im nationalen Brennstoffemissionshandel (in rot) für die Sektoren Verkehr und Wärme und Teile der Industrie. Eigene Darstellung basierend auf sandbag.org, Kalkuhl & Wenz (2020)<sup>2</sup> (externe Kosten) und Pietzcker et al. (2021)<sup>3</sup> (CO<sub>2</sub>-Preise für EU Green Deal).



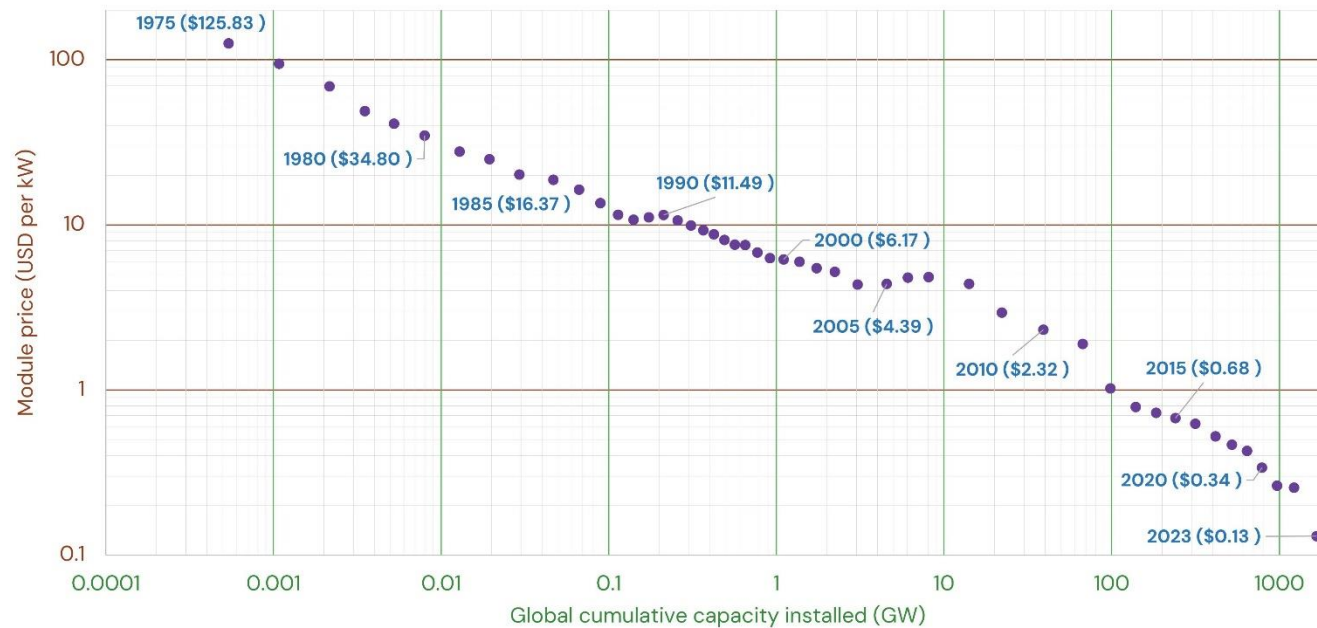
## Andere Strategie: Innovation fördern

Technologie-Förderung hat neue Märkte geschaffen, Produktionsvolumen erhöht, was zu Kostenreduktionen geführt hat (Lerneffekt = Learning-By-Doing)



# Lerneffekte und Lernkurven

## Solar PV Module Cost Learning Curve: 1975–2023



Ember. (2024). *Global Electricity Review 2024*.

Lernkurven: je mehr gebaut wird, desto mehr lernt man, wie man Kosten reduzieren kann (effizienter, weniger Material, andere Materialien, bessere Herstellungsverfahren)

Kosten reduzieren in Abhängigkeit von der kumulativen Produktionsmenge  $Q$ :

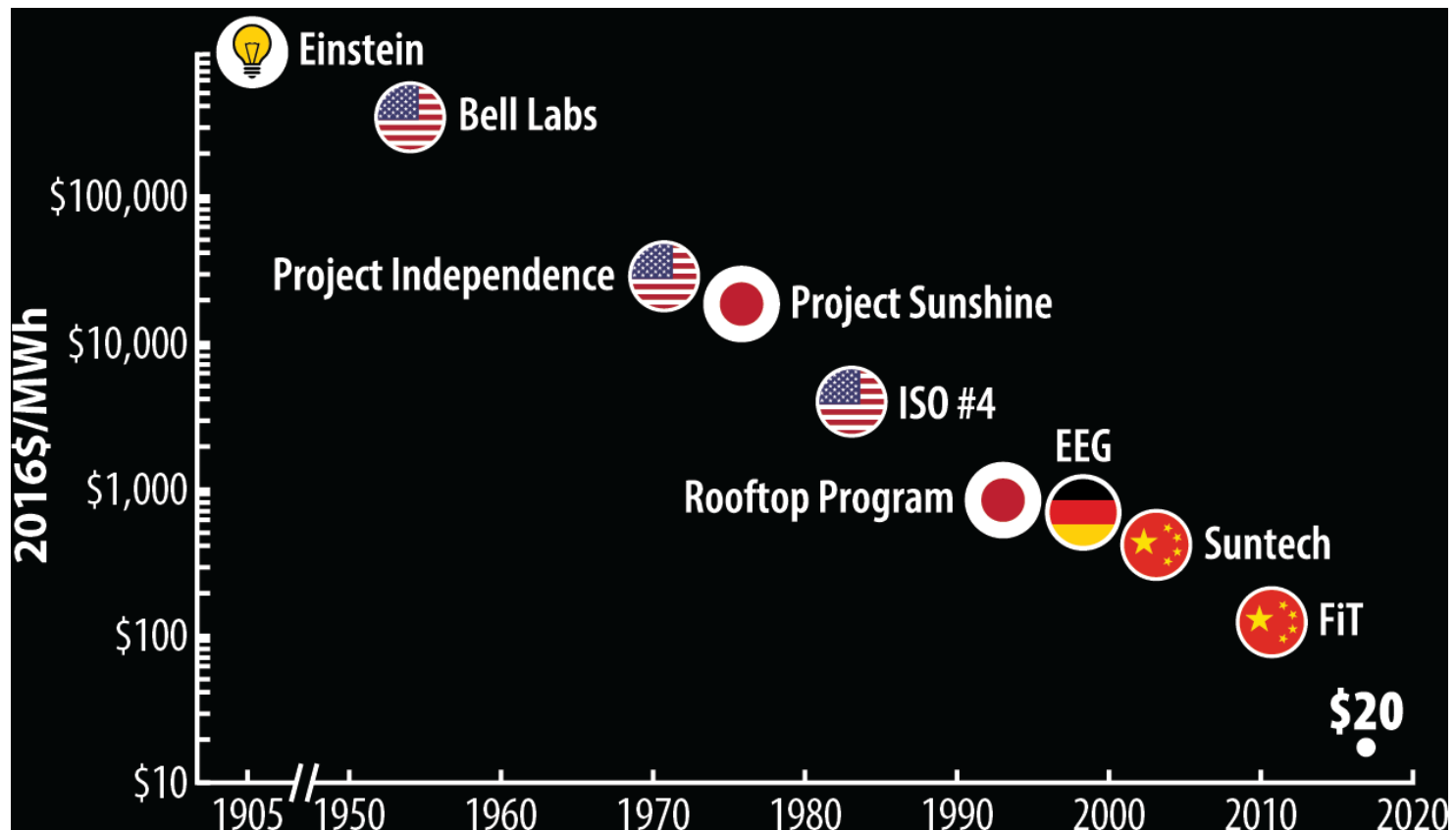
$$K = Q^{-\gamma}$$

Für Solar-PV:  $\gamma = 0.3$ .

Ähnliche Effekte in Auto-Industrie, Flugzeuge, usw.

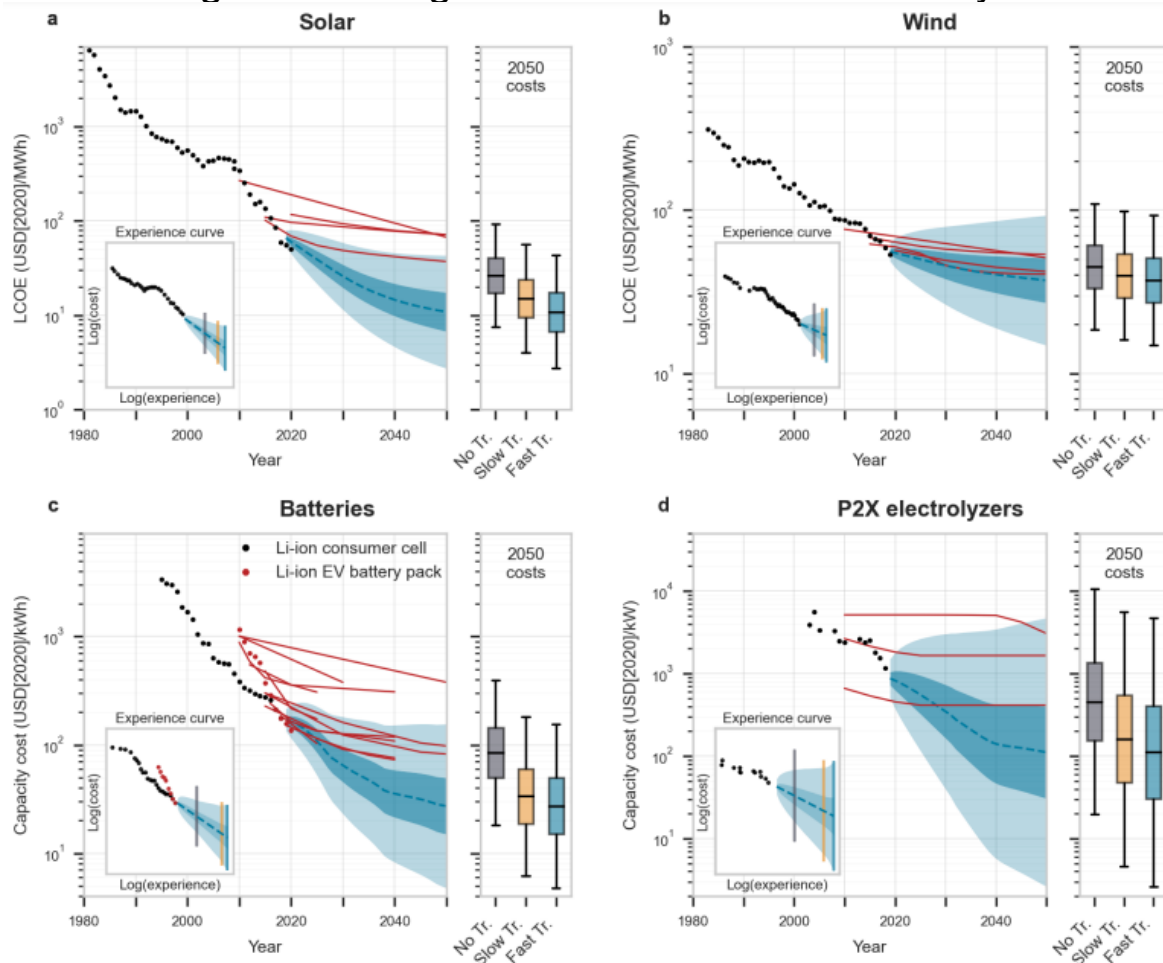
## Lerneffekte und Lernkurven

Viele Länder haben dazu beigetragen, darunter auch Deutschland mit dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG, 2000).

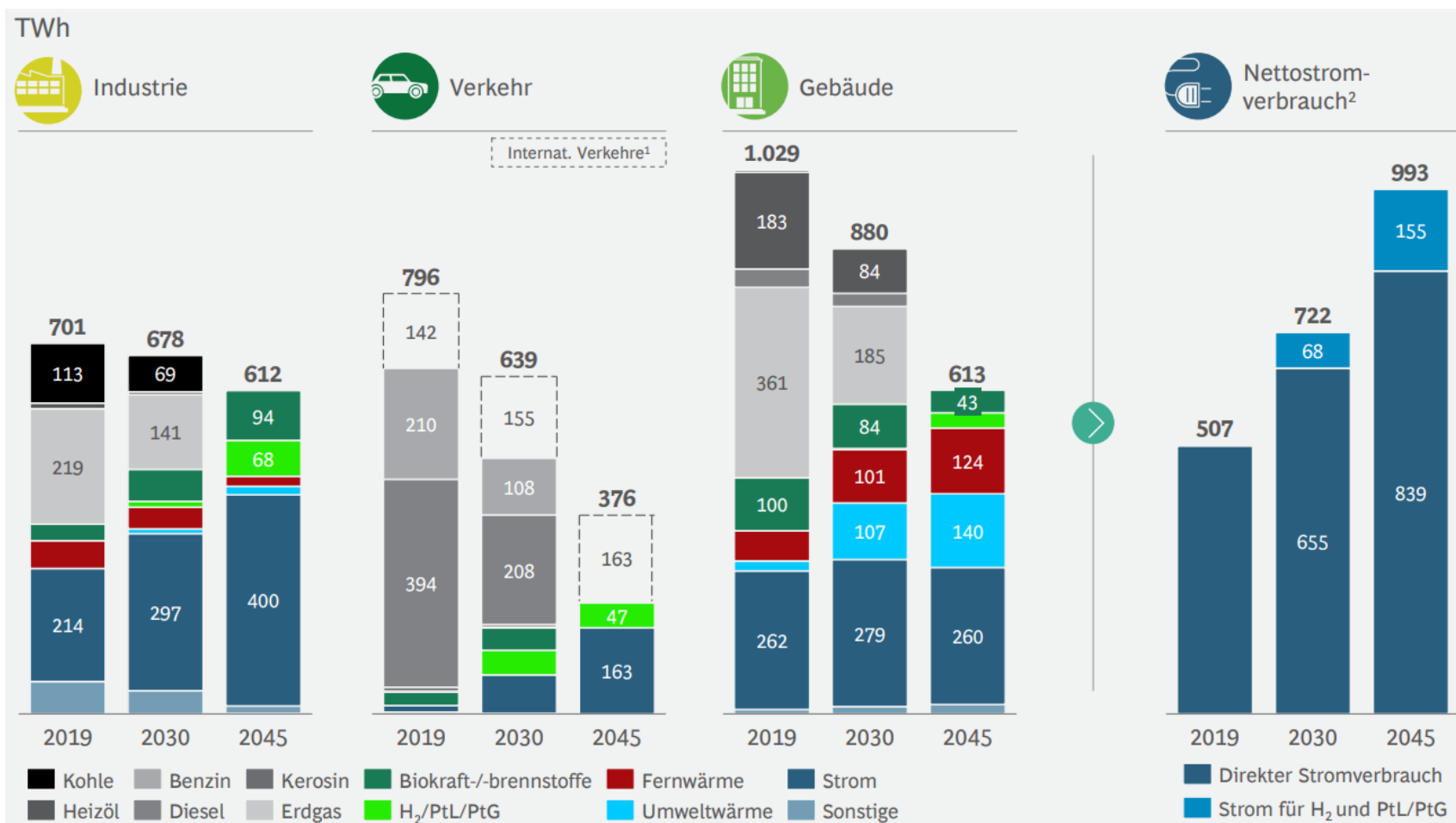


# Lerneffekte und Lernkurven

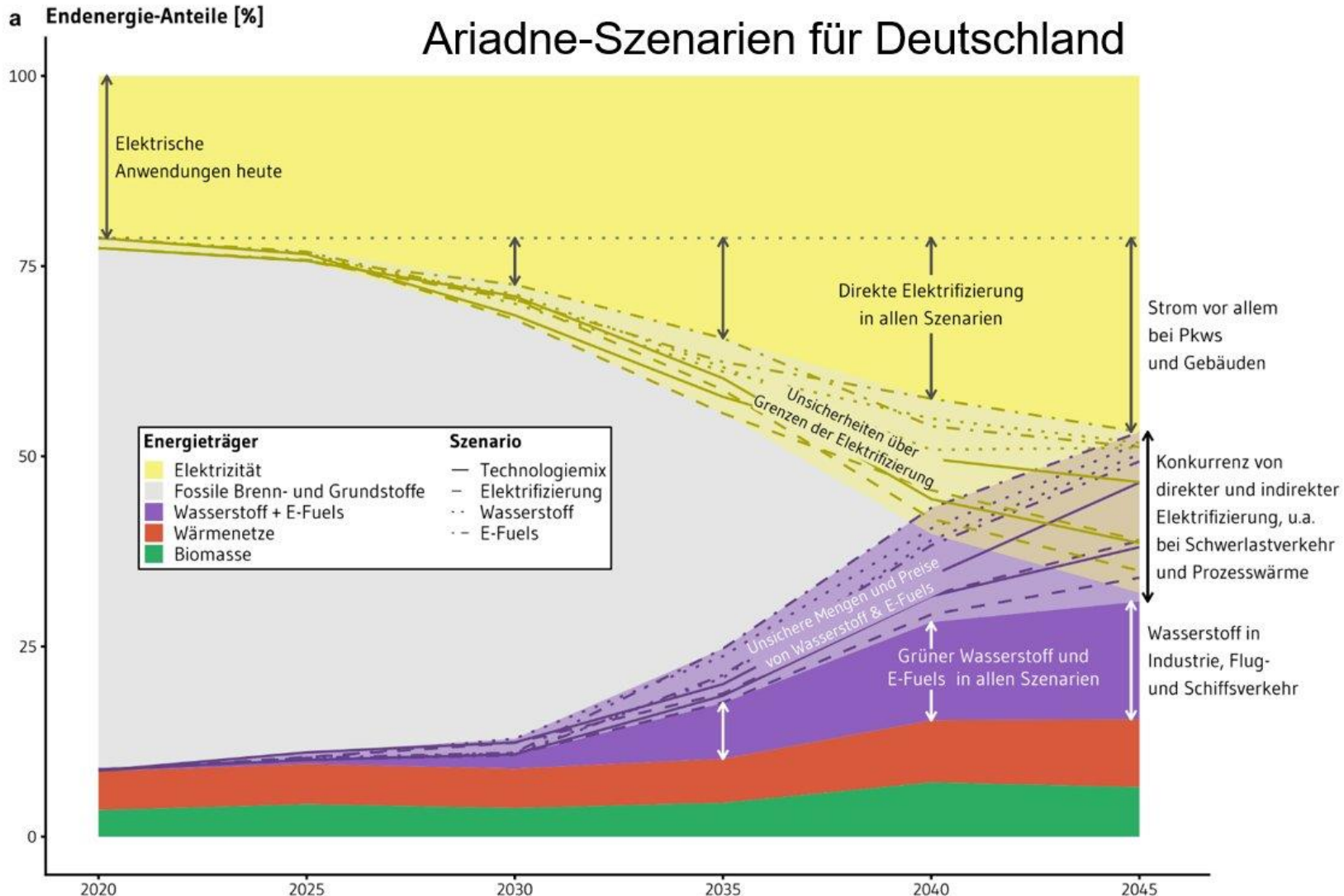
Ähnliche Effekte sieht man auch bei Batterien für Elektro-Autos und erwartet man für andere wichtige Technologien wie Wasserstoff-Elektrolyse.



# Endenergieverbrauch: Strom ist zentraler Energieträger der Transformation



# Endenergieverbrauch: Anteil von Strom gegenüber Wasserstoff ist noch unsicher







## Klimawandel: Steuern, Innovation und Regulierung

In der Tat werden alle Instrumente benötigt und eingesetzt. Die richtige Mischung wird heftig umstritten (Debatte um Deployment versus Innovation).

- **Steuern / Cap-Trade:** Erfolge: Ausstieg aus Kohle in Großbritannien und bald in Europa; Sulfurdioxidreduktion, um sauren Regen zu bekämpfen
- **Normen und Standards:** Erfolge: Auto-emissionen, Effizienzmaßnahmen für Kühlschränke, Gebäudesanierung, usw.
- **Technologie-Förderung:** Erfolge: Solarenergie, Windenergie, Batterien, Elektro-Autos, Kernenergie, Wasserstoff?

## Literatur-Empfehlungen

