



Wirtschaftliche Grundlagen

im Wintersemester 2024/5

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?

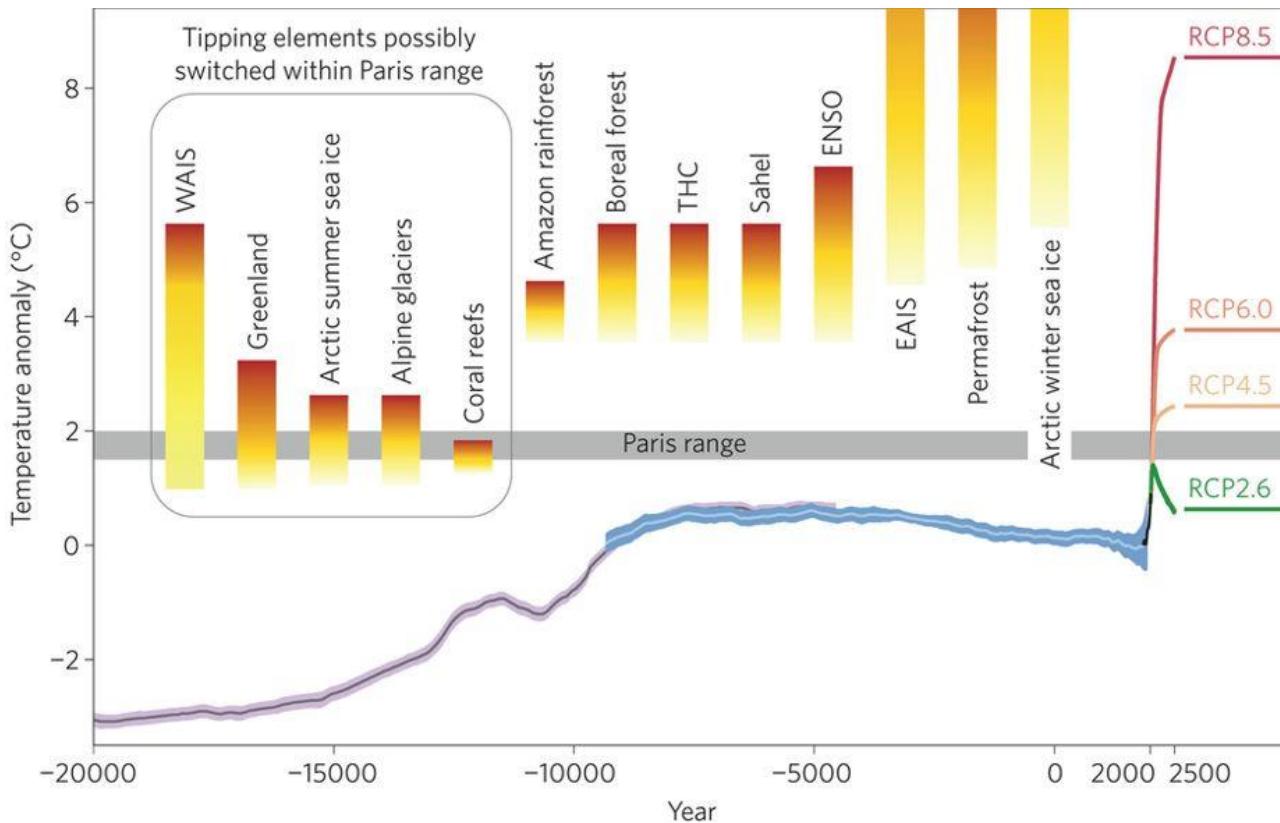


Klimawandel: Was sind die Gefahren?

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 CO₂?

Hier kann der Diskontierungszinssatz eine große Rolle spielen!

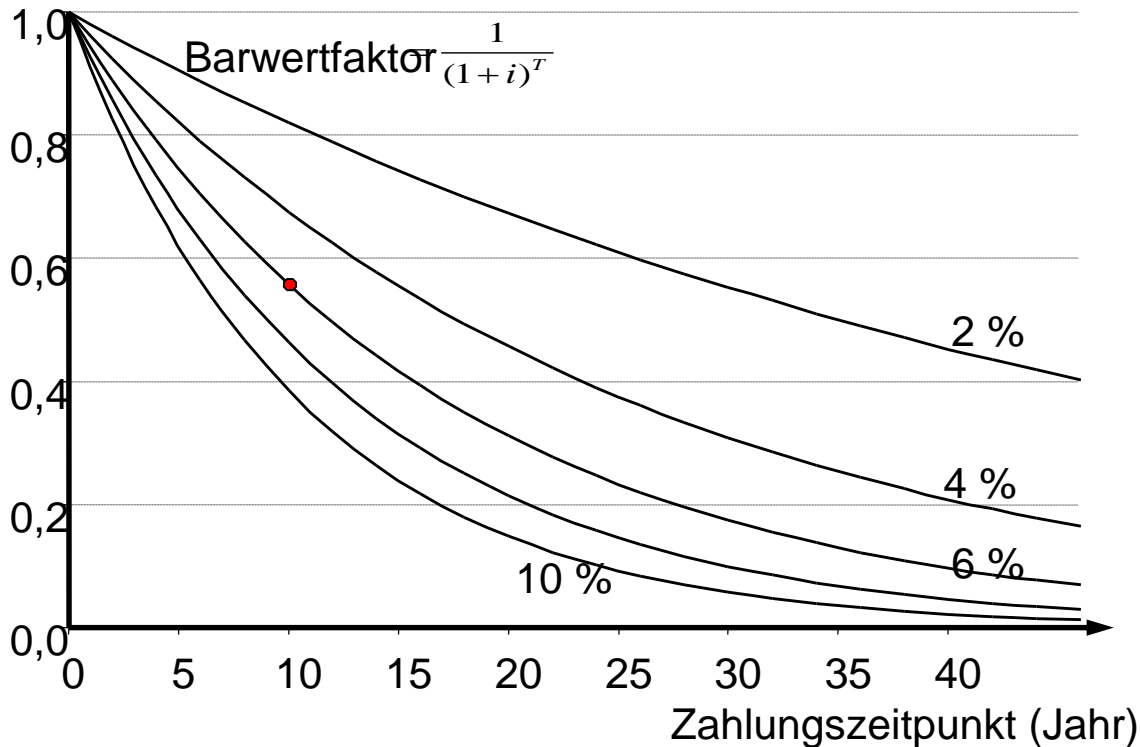
UBA-Empfehlung zu den Klimakosten

Klimakosten in Euro ₂₀₂₄ pro Tonne Kohlendioxid	2024	2030	2050
1 % reine Zeitpräferenzrate (Höhergewichtung der Wohlfahrt der heutigen Generation gegenüber der Wohlfahrt künftiger Generationen)	300	335	435
0 % reine Zeitpräferenzrate (Gleichgewichtung der Wohlfahrt der Generationen)	880	940	1.080

Quelle: Umweltbundesamt 2024, Methodological Convention 3.2 for the Assessment of Environmental Costs

Warnung: Diskontierung über lange Zeiten

Über lange Zeithorizonte kann die Diskontierung einen großen Effekt haben.



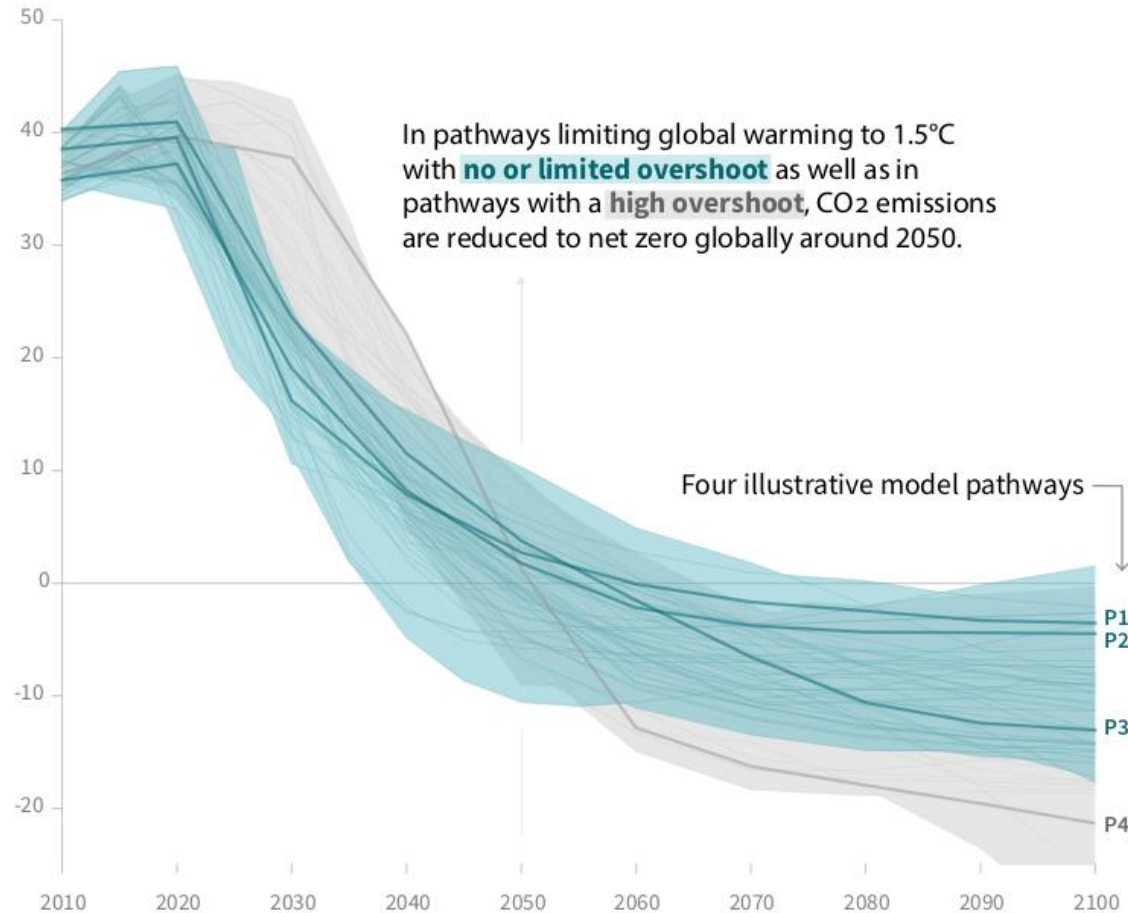
- Langfristige Vorteile werden nicht gesehen, z.B. Einnahmen von langlebigen Kraftwerken oder Effizienzmaßnahmen
- Langfristige Kosten werden auch verborgen, z.B. Rückbau, Entsorgung, Klimaschäden

• **Umstrittenes Thema!**

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

Global total net CO₂ emissions

Billion tonnes of CO₂/yr



Um das 1,5C Ziel zu erreichen, müssen wir bis ungefähr 2050 aufhören, CO₂ auszustößen, und andere Treibhausgase (wie Methan, Lachgas) auch reduzieren. Nach 2050 müssen wir sogar CO₂ aus der Luft holen (Negative Emission Technologies).



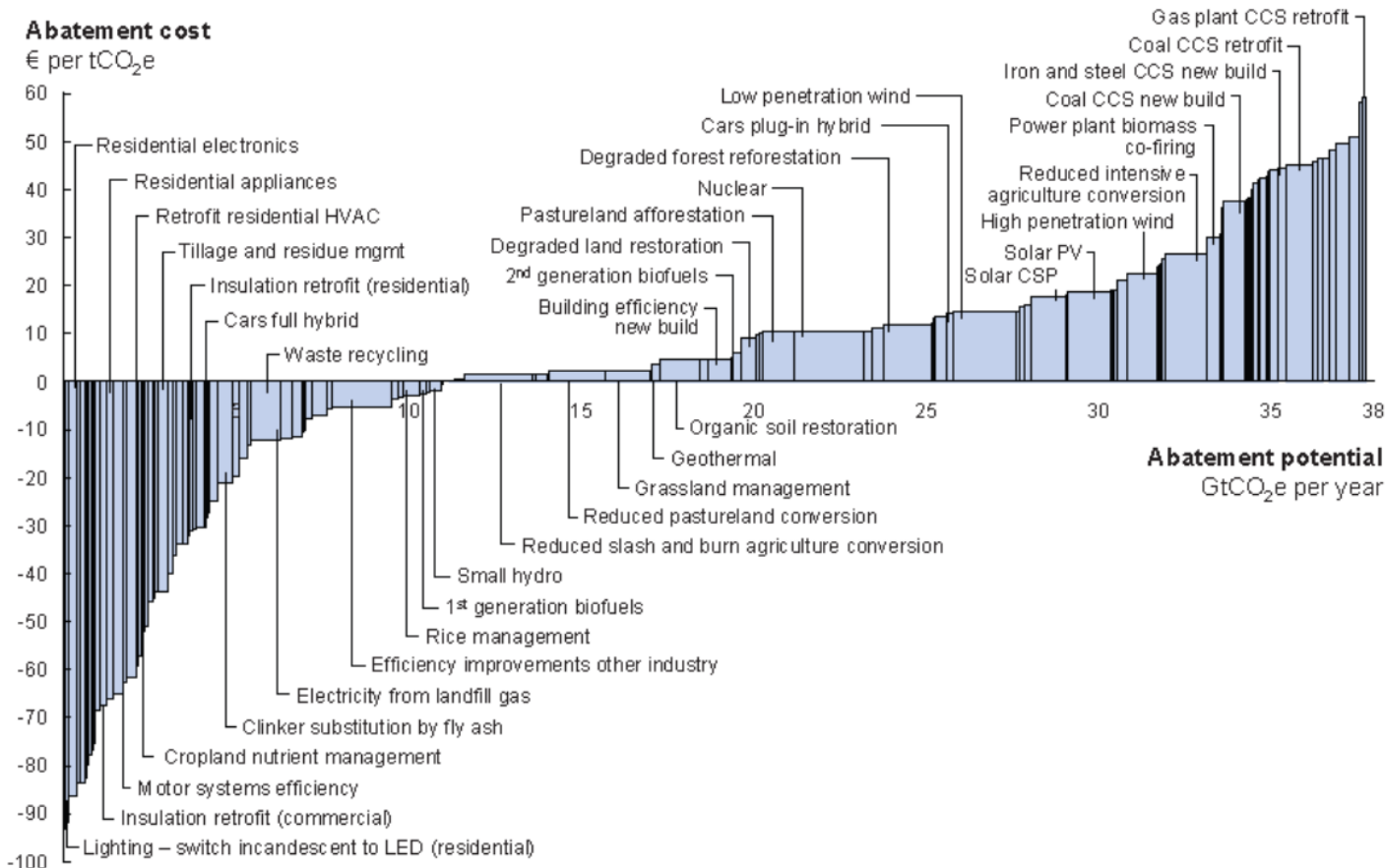
Merkmale des Treibhausproblems

- **Globalität:** Der Ort der Emissionen spielt keine Rolle. Tendenziell werden Regionen im global Süden härter von Klimawandel betroffen.
- **Zeitliche Verschiebung der Konsequenzen:** Schäden betreffen künftige Generationen, die verursachende Generation bleibt vergleichsweise 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



Spezifische Kosten (€/tCO₂-äquivalent) und Potenziale (Volumen) für die Vermeidung von globalen Treibhausgasemissionen in 2030, die weniger als 60 €/tCO₂-äq kosten.

Vergleichen Sie die Vermeidungskosten mit den Kosten von Klimawandel.

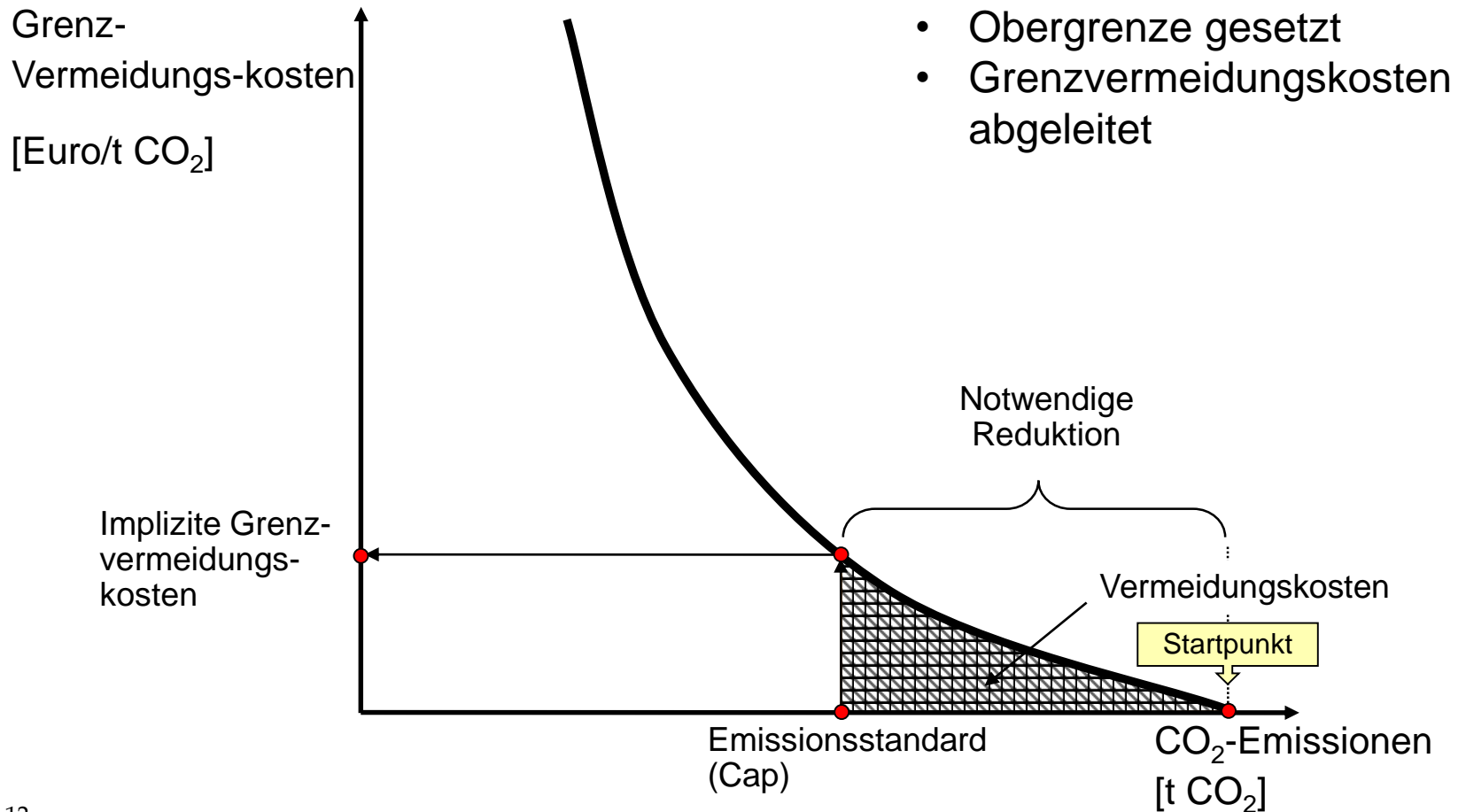
Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €60 per tCO₂e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.



Instrumente zur CO₂-Vermeidung - Steuern oder anderes Instrument?

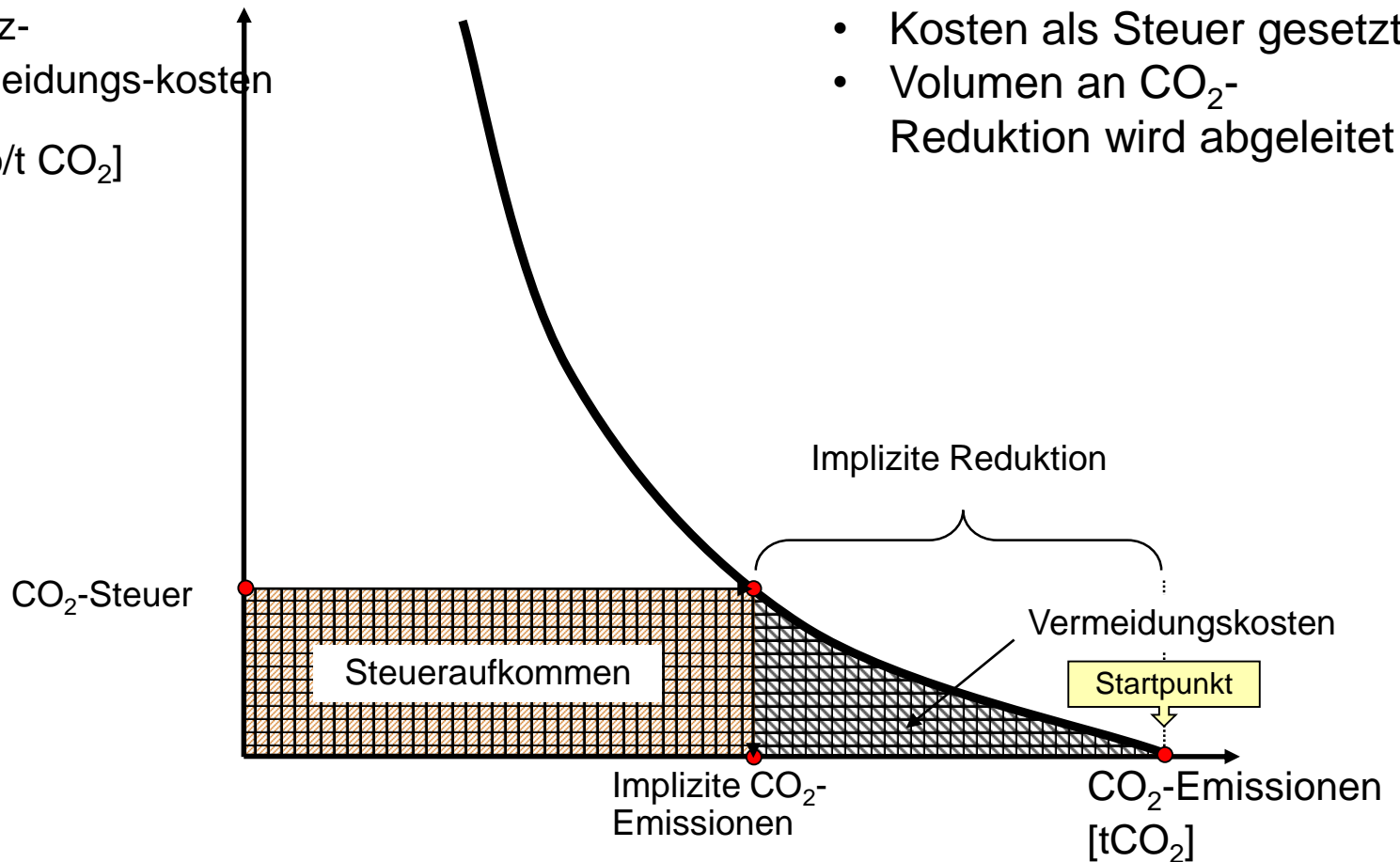
- **Emissionsstandard/Normen** (Cap = Obergrenze)
 - Beispiel: Die EU-Verordnungen zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Straßenfahrzeugen: Seit 2020 (vollumfänglich ab 2021) gilt ein Flottengrenzwert für Pkw von 95 gCO₂/km
- **CO₂-Steuer** (Pigou-Steuer)
 - Ziel: Lenkung des Verhaltens (weniger ein Fiskalzweck) zur Internalisierung externer Effekte (Soziale Kosten werden von den Verursachern getragen)
 - Beispiel: Seit 2021 deutsche CO₂-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

CO₂-Vermeidungskosten Emissionsstandard/Normen



CO₂-Vermeidungskosten Pigou-Steuer

Grenz-
Vermeidungs-kosten
[Euro/t CO₂]

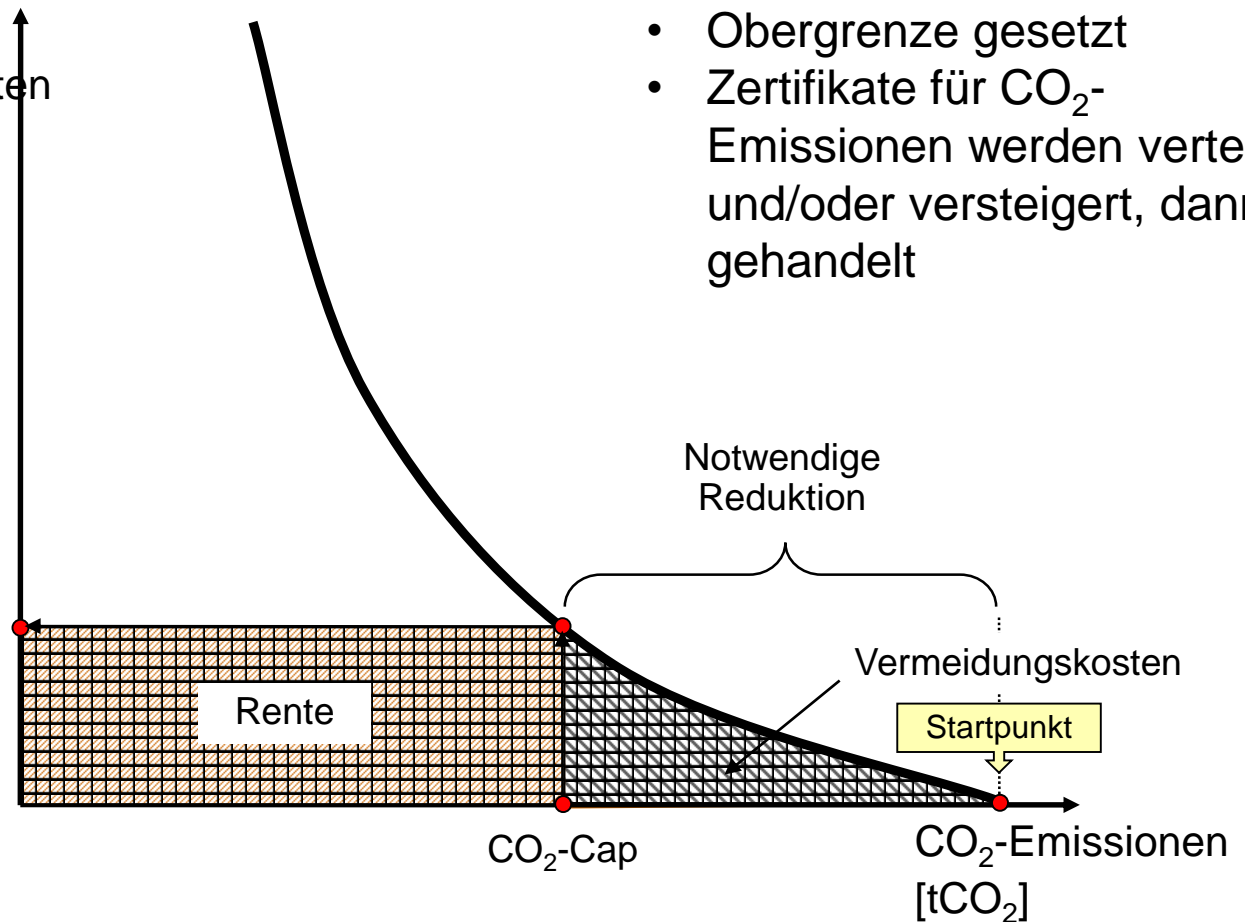


- Kosten als Steuer gesetzt
- Volumen an CO₂-Reduktion wird abgeleitet

CO₂-Vermeidungskosten Cap-and-Trade-System

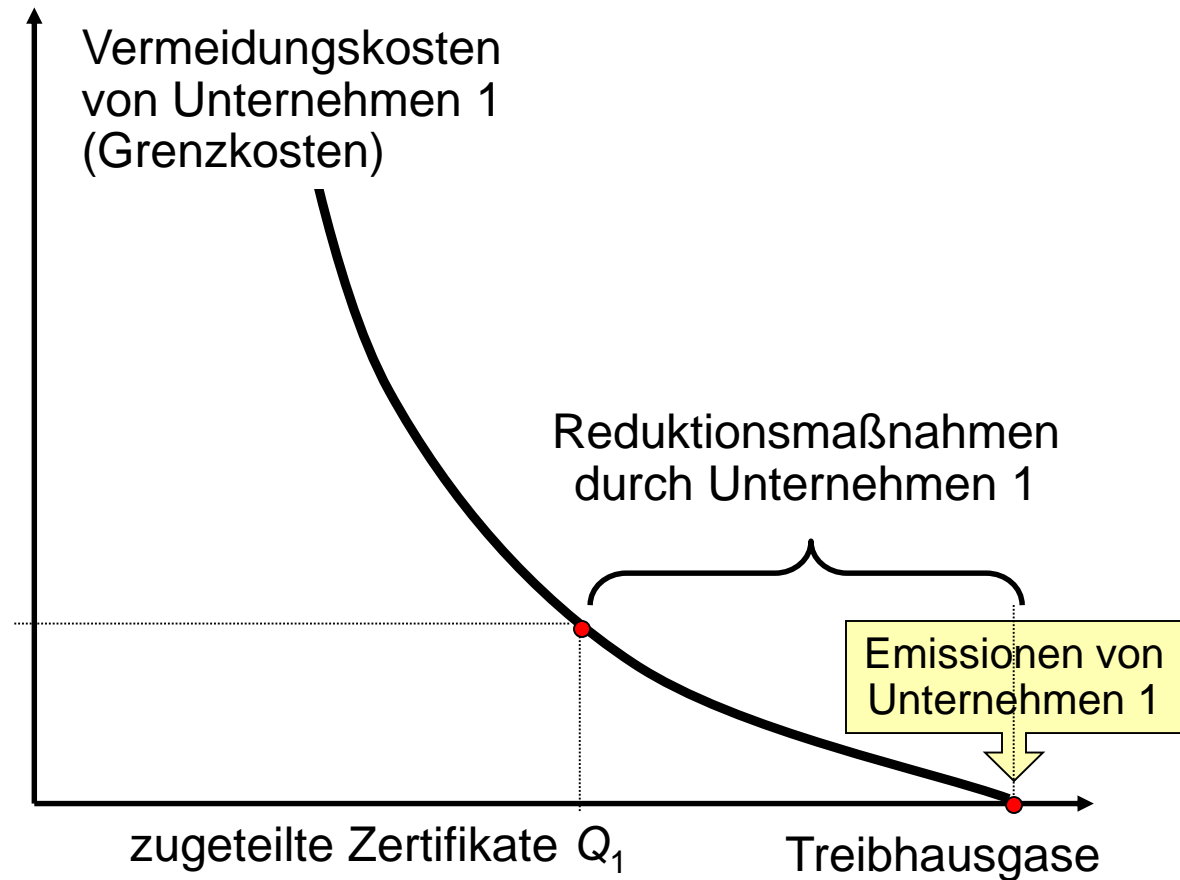
Grenz-
Vermeidungs-kosten
[Euro/t CO₂]

Impliziter
Zertifikate-preis

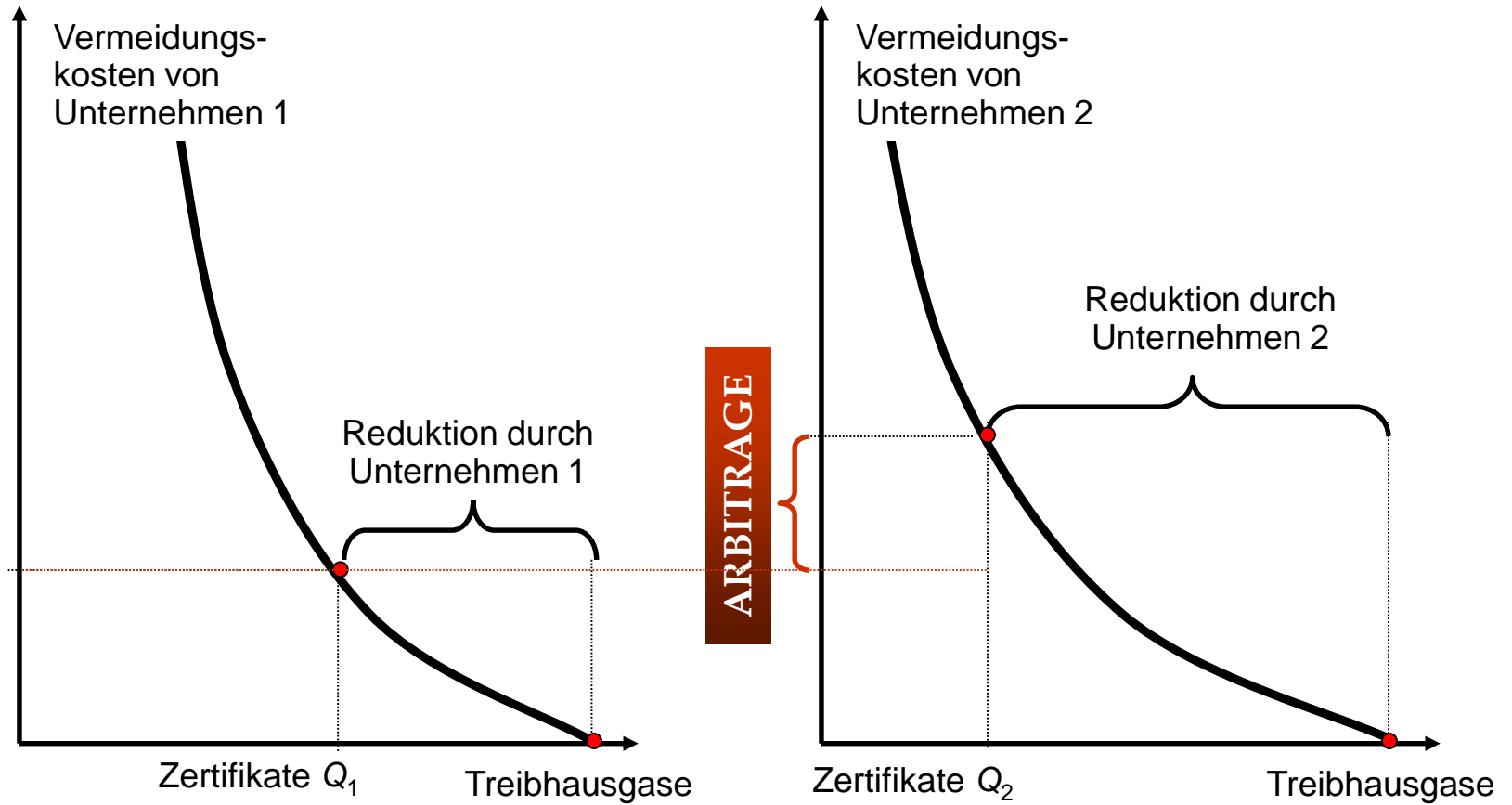


- Obergrenze gesetzt
- Zertifikate für CO₂-Emissionen werden verteilt und/oder versteigert, dann gehandelt

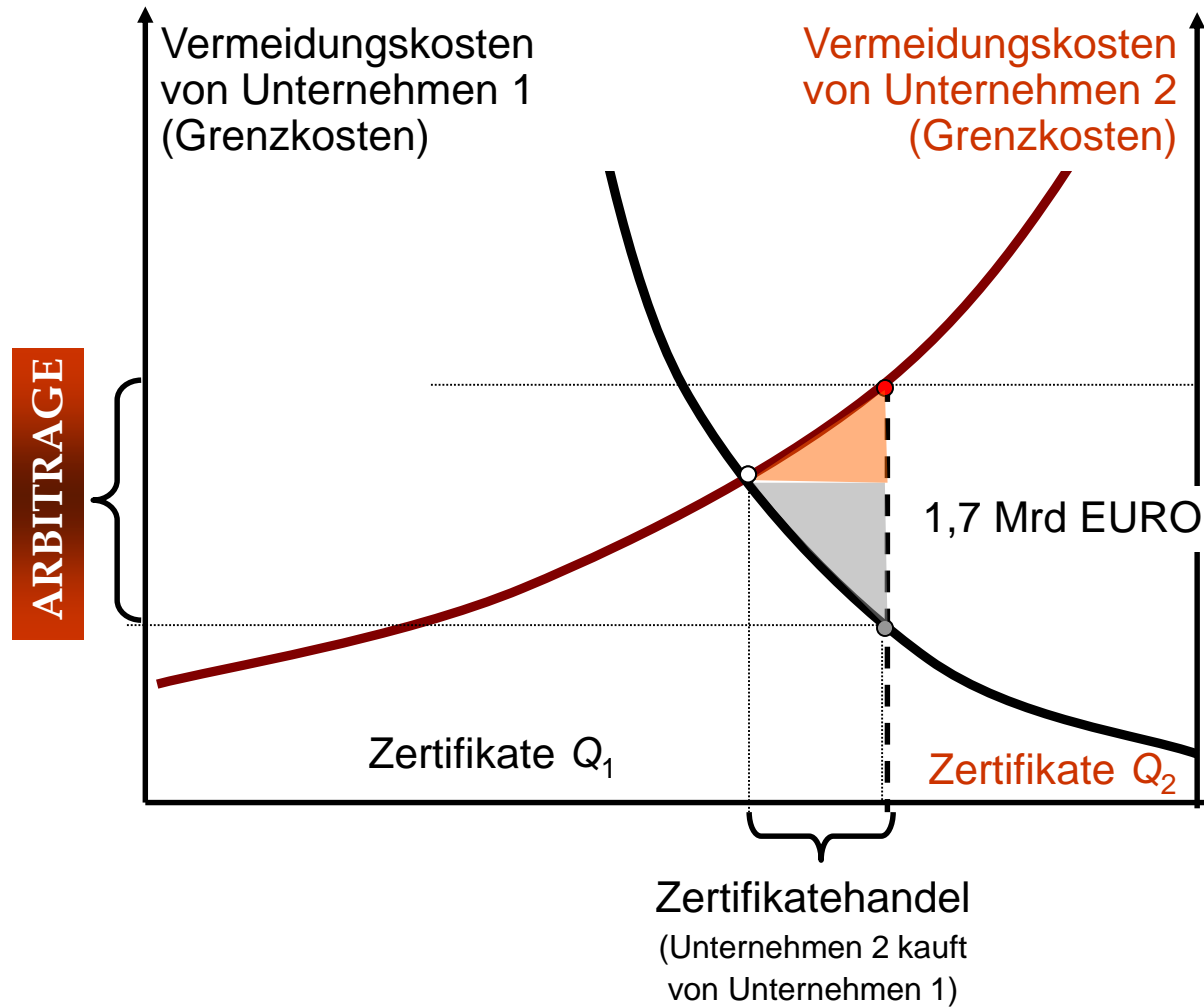
Unternehmenssicht -Zertifikate und Vermeidungskosten



Prinzip des Zertifikatehandels



Prinzip des Zertifikatehandels



Aktuelle CO₂-Preise

In 2025 ist der ETS-Zertifikat-Preis auf über €80/tCO₂ gestiegen. Das BEHG setzt einen CO₂ Preis für Verkehr und Gebäude von €55/tCO₂ in 2025. Wohin jetzt?

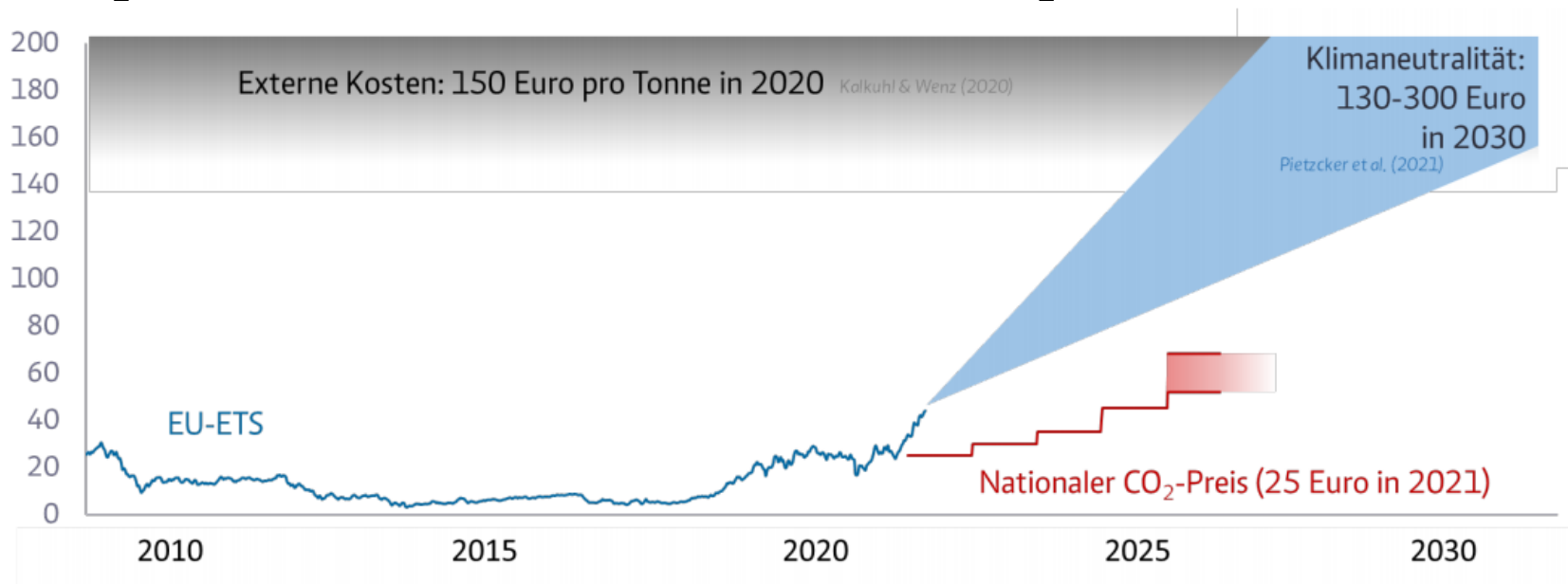
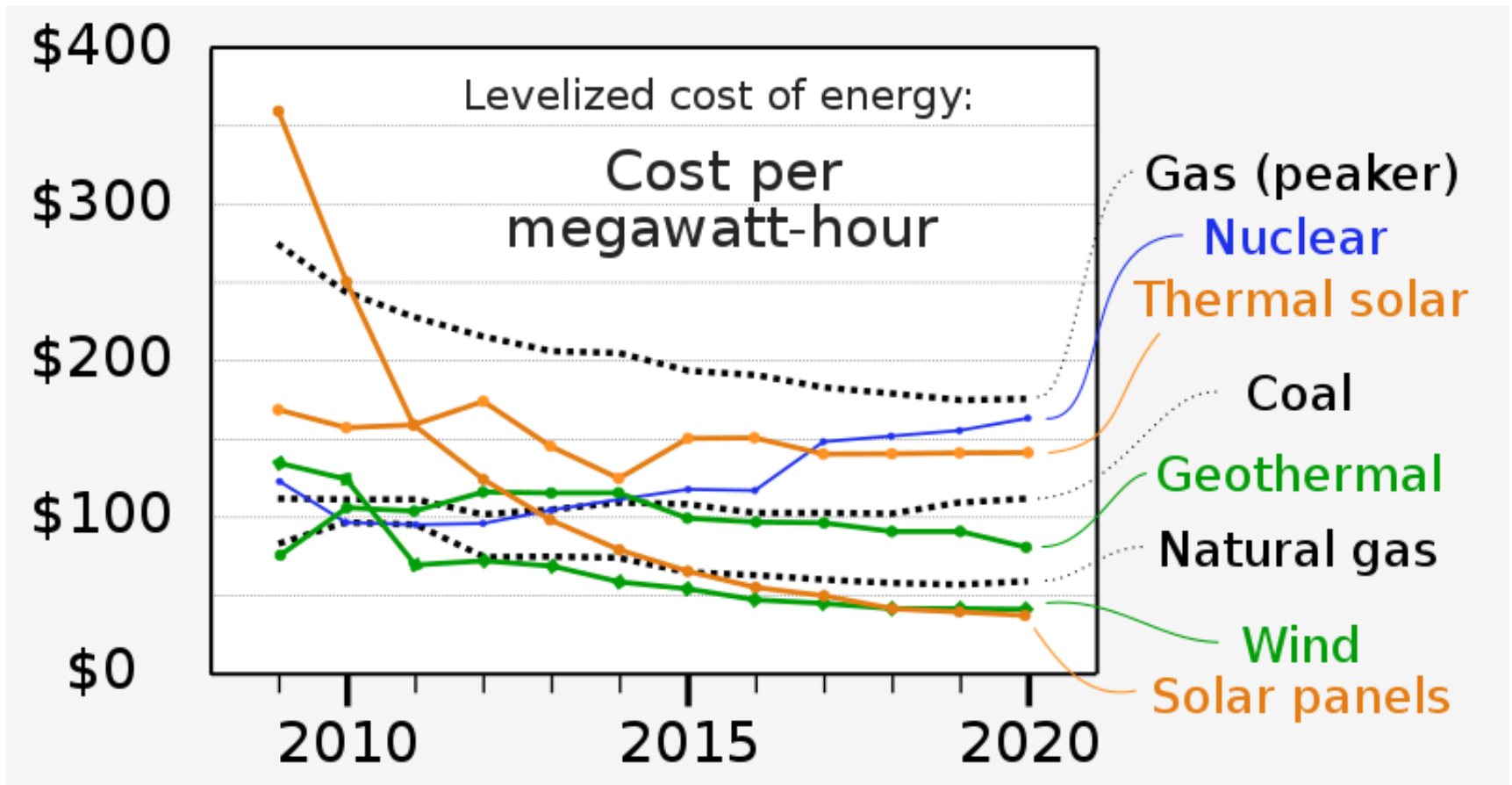


Abbildung 2: Aktuelle und nötige CO₂-Preise im Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS, in blau) für die Sektoren Energiewirtschaft und Teile der Industrie und im nationalen Brennstoffemissionshandel (in rot) für die Sektoren Verkehr und Wärme und Teile der Industrie. Eigene Darstellung basierend auf sandbag.org, Kalkuhl & Wenz (2020)² (externe Kosten) und Pietzcker et al. (2021)³ (CO₂-Preise für EU Green Deal).

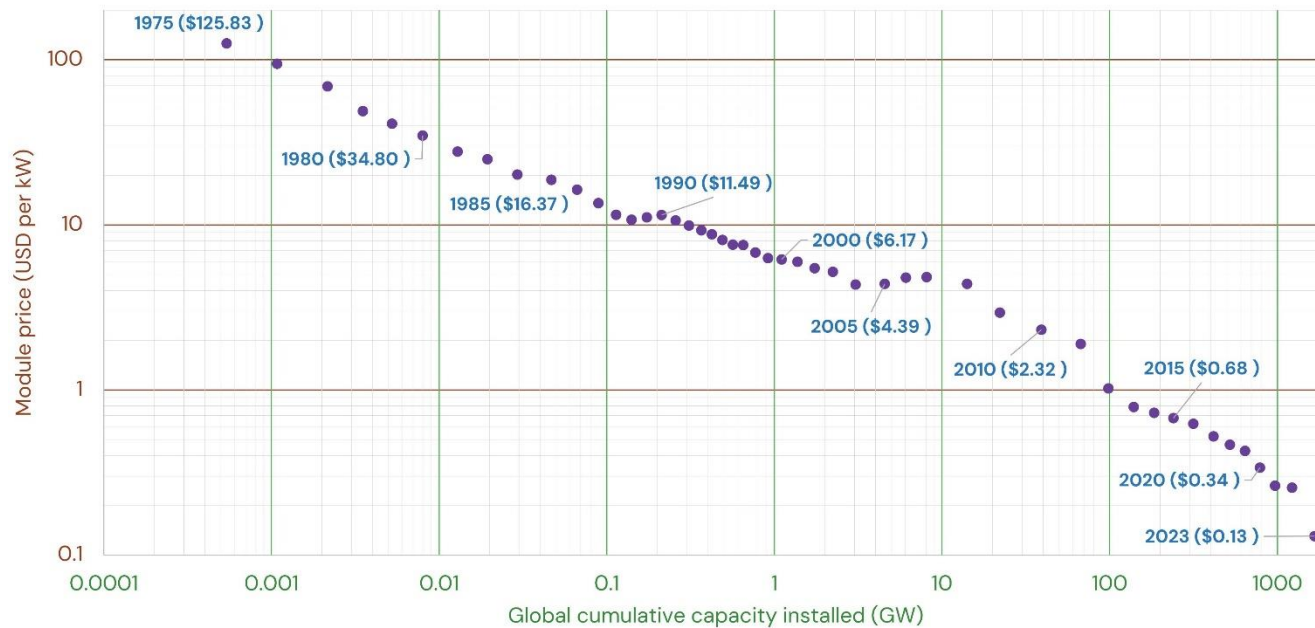


Andere Strategie: Innovation fördern

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



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 :

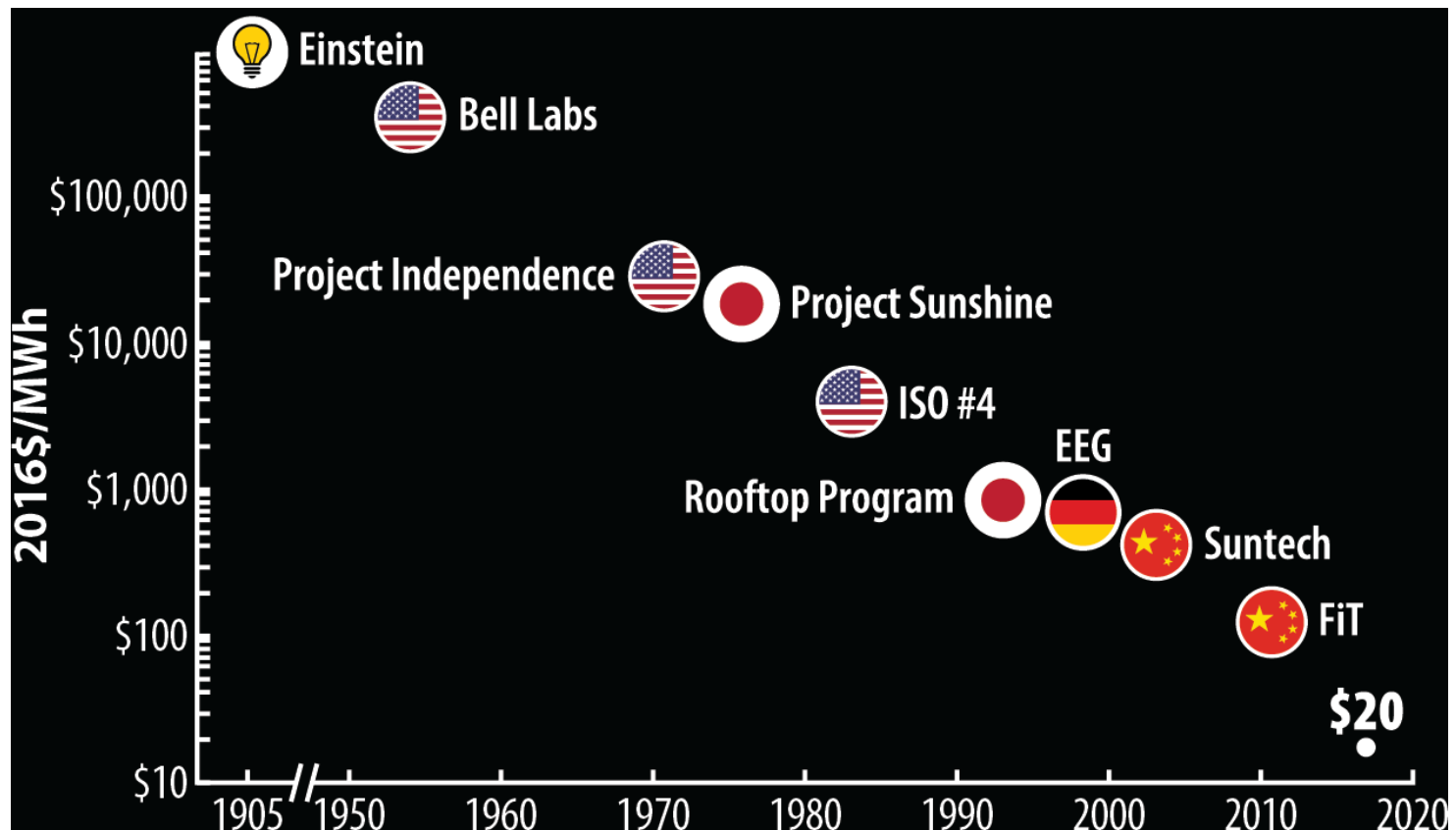
$$K = Q^{-\gamma}$$

Für Solar-PV: $\gamma = 0.3$.

Ähnliche Effekte in Auto-Industrie, Flugzeuge, usw.

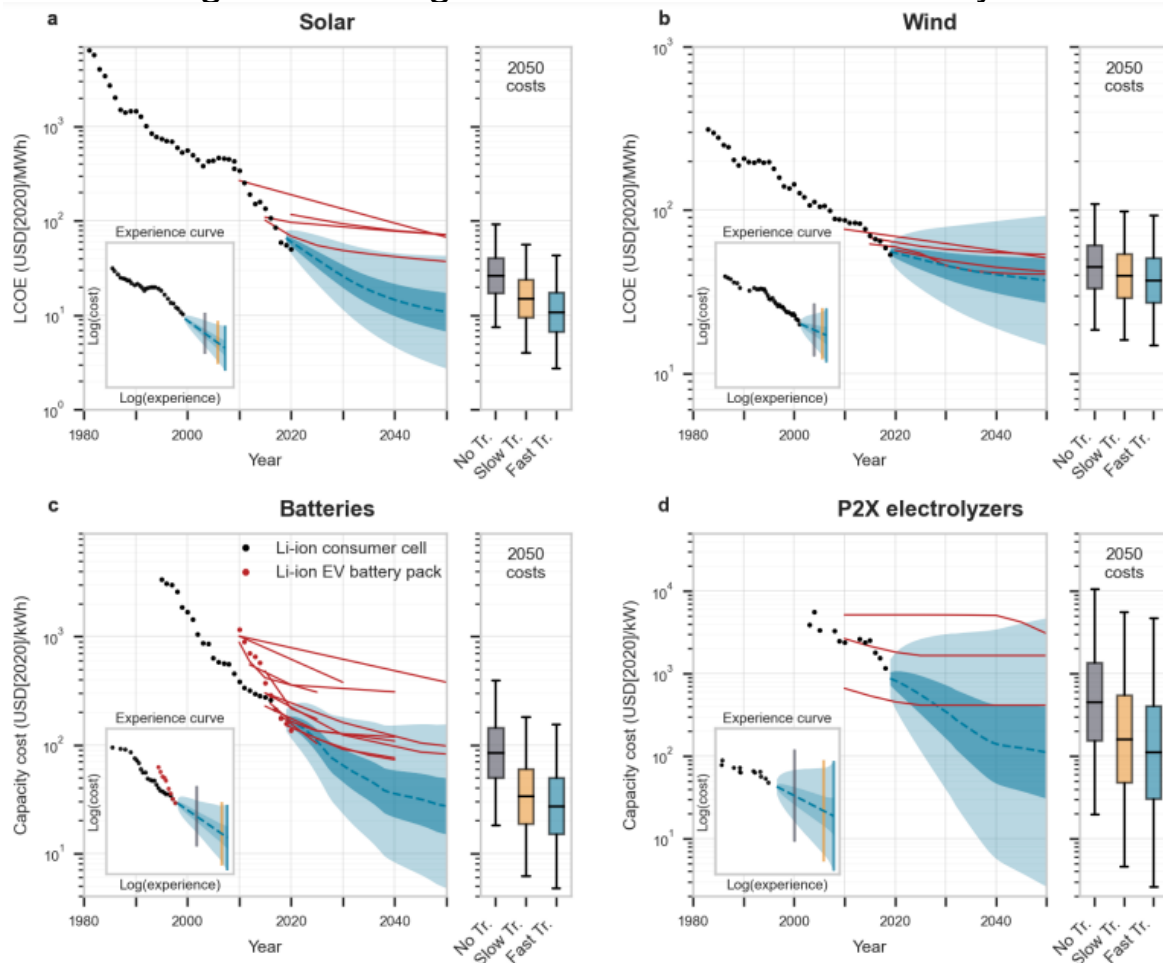
Lerneffekte und Lernkurven

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

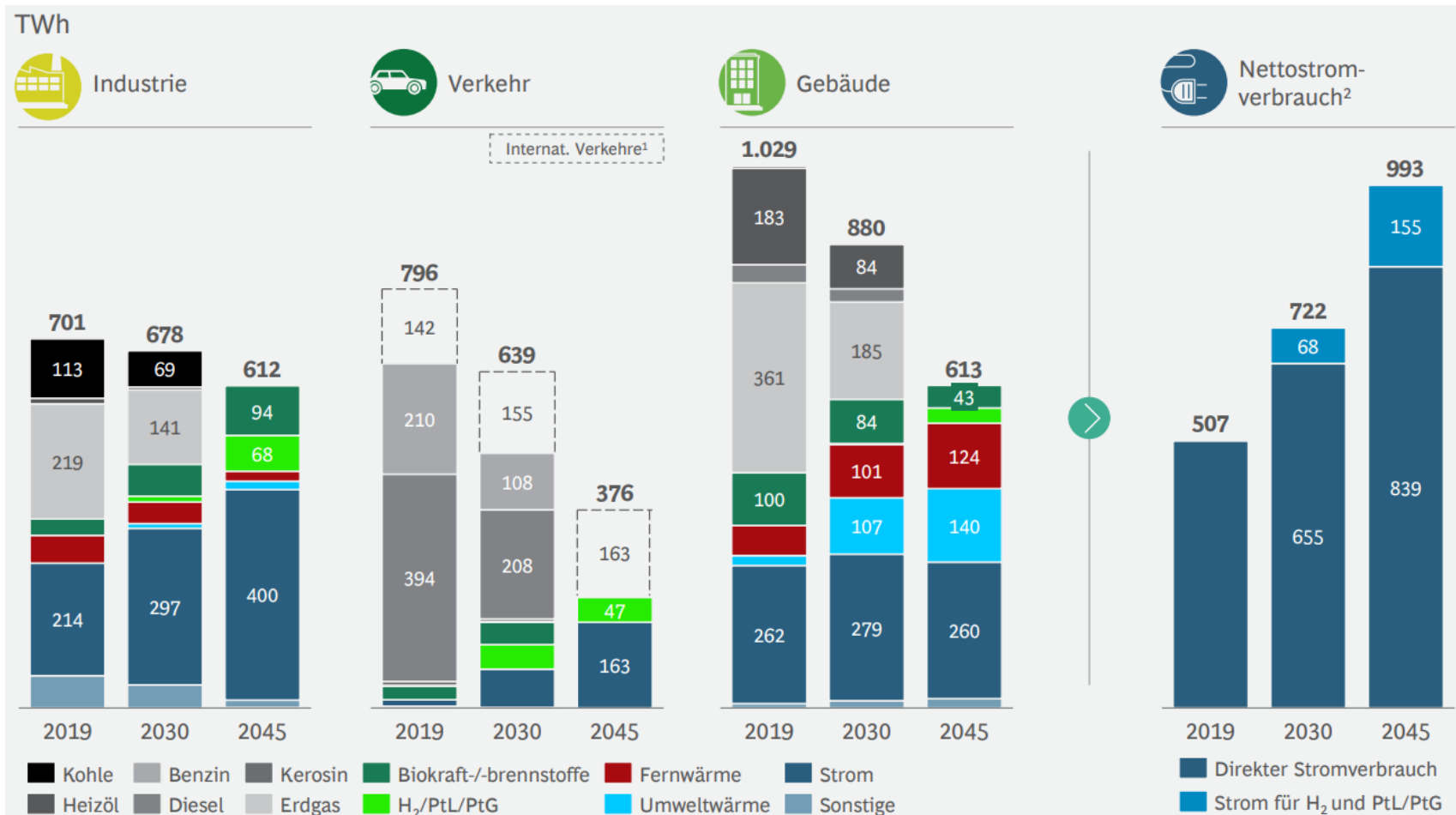


Lerneffekte und Lernkurven

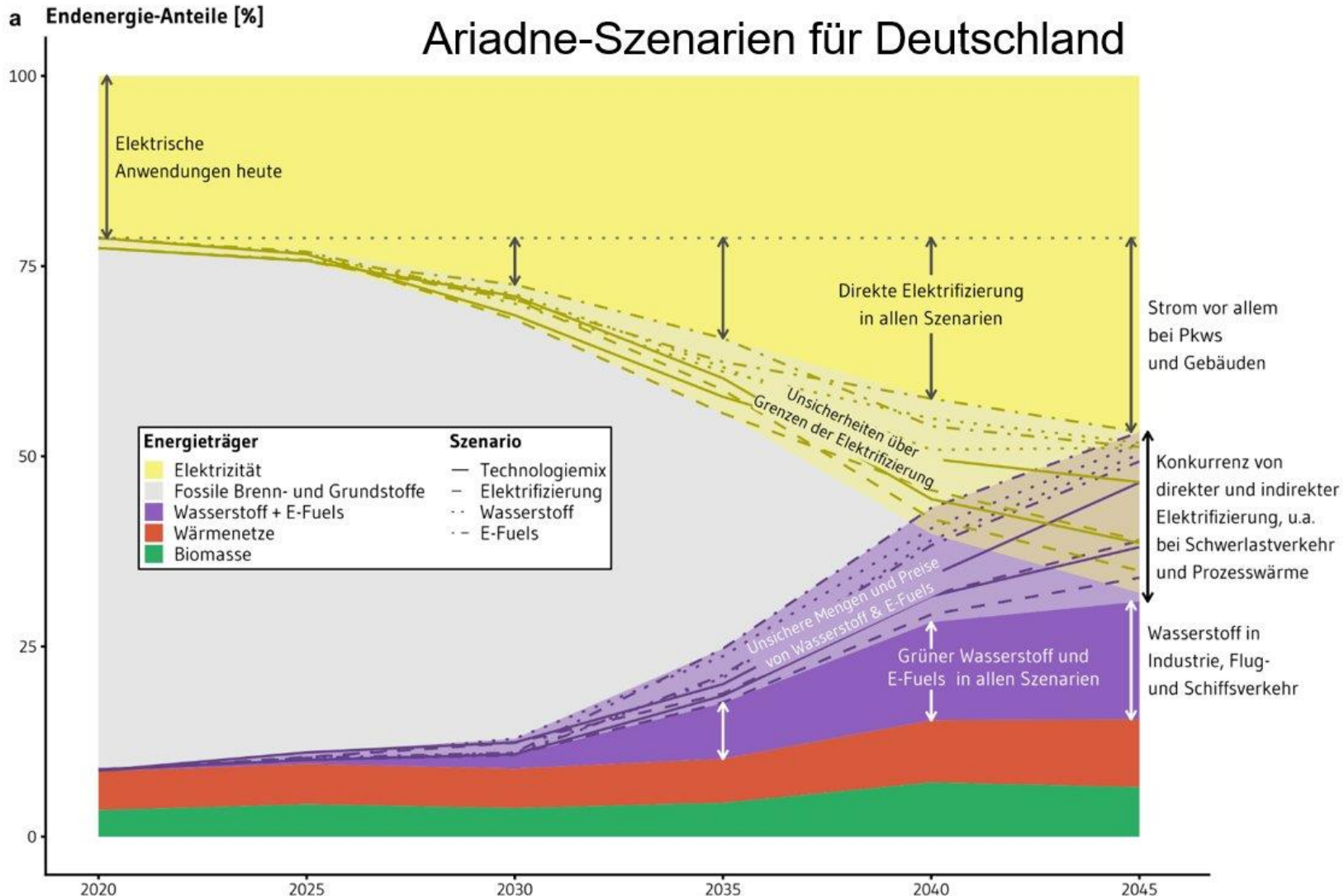
Ähnliche Effekte sieht man auch bei Batterien für Elektro-Autos und erwartet man für andere wichtige Technologien wie Wasserstoff-Elektrolyse.



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

