
Die Bedeutung europäischer Zusammenarbeit für eine kosten-effiziente Energiewende

Erkenntnisse aus der sektorübergreifenden
Energiesystemmodellierung

Swantje Möhle, APG
EnInnov 2026 Graz, 11.02.2026

TRÄNSNET BW

swissgrid

CBS  COPENHAGEN SCHOOL OF
ENERGY INFRASTRUCTURE



d-fine

analytical. quantitative. tech.

Kooperation von der Planung bis zur Umsetzung



TRÄNSNET BW

d-fine



swissgrid



CBS COPENHAGEN SCHOOL OF ENERGY INFRASTRUCTURE



Einleitung, Methodik & Szenarios



Slow-Wind: Reduced Expansion of Wind Energy



Szenario Rahmen



Anti-Flex: Low System Flexibility



Base: Collective Efforts



Zusammenfassung



Limited Transport Corridors: Independent Pursuit



Ausblick

Ableitung der Szenarien aus Thesen

Thesen & Szenarien



Die internationale
Koordination der
Energiewende in Europa führt
zu einem kosteneffizienteren
Energiesystem.



BS
Base
Collective Efforts




Der integrierte und koordinierte
Übergang zu einem
kosteneffizienten erneuerbaren
Energiesystem verringert die
Importabhängigkeit Europas und
vermeidet Kompensationskosten
in einzelnen Sektoren.



Slow-Wind
Reduced Expansion
of Wind Energy



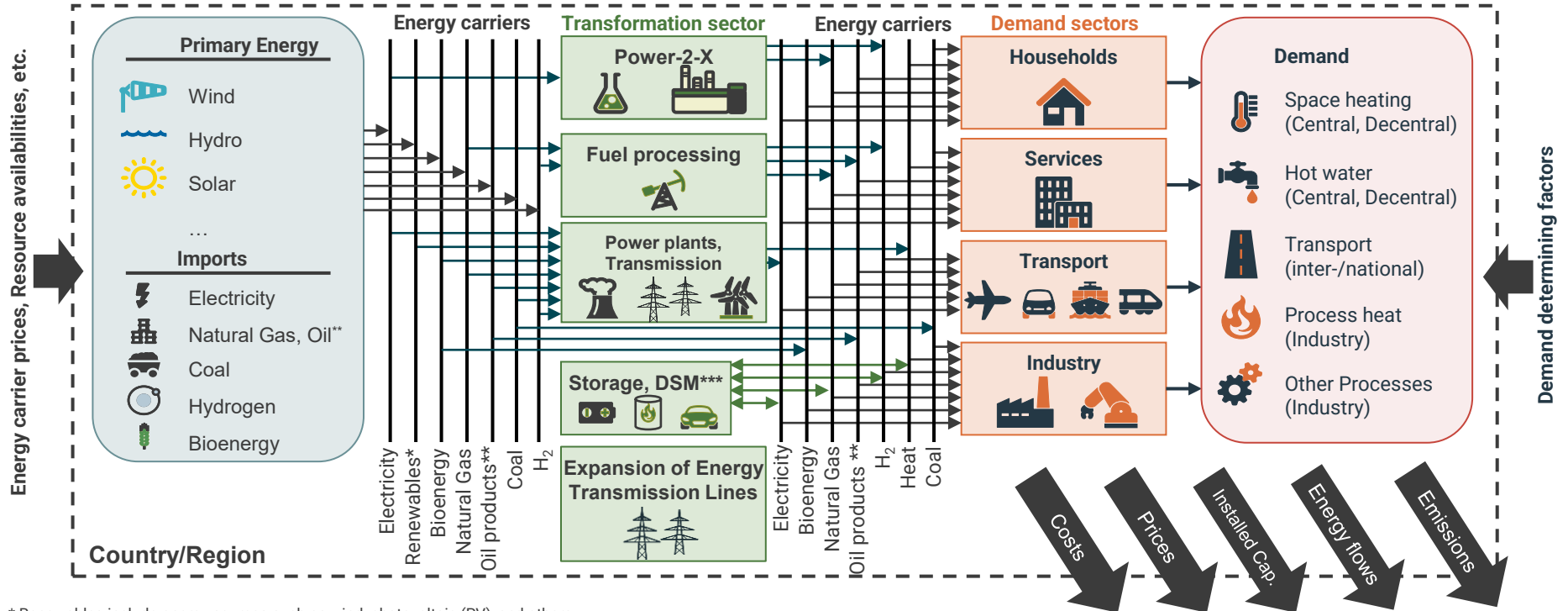
Ein auf erneuerbaren
Energien basierendes
Energiesystem benötigt
überregionale und lokale
Flexibilität.



Anti-Flex
Low System
Flexibility

Überblick über das Model

Ein Sektor gekoppeltes Energiesystem für Europa



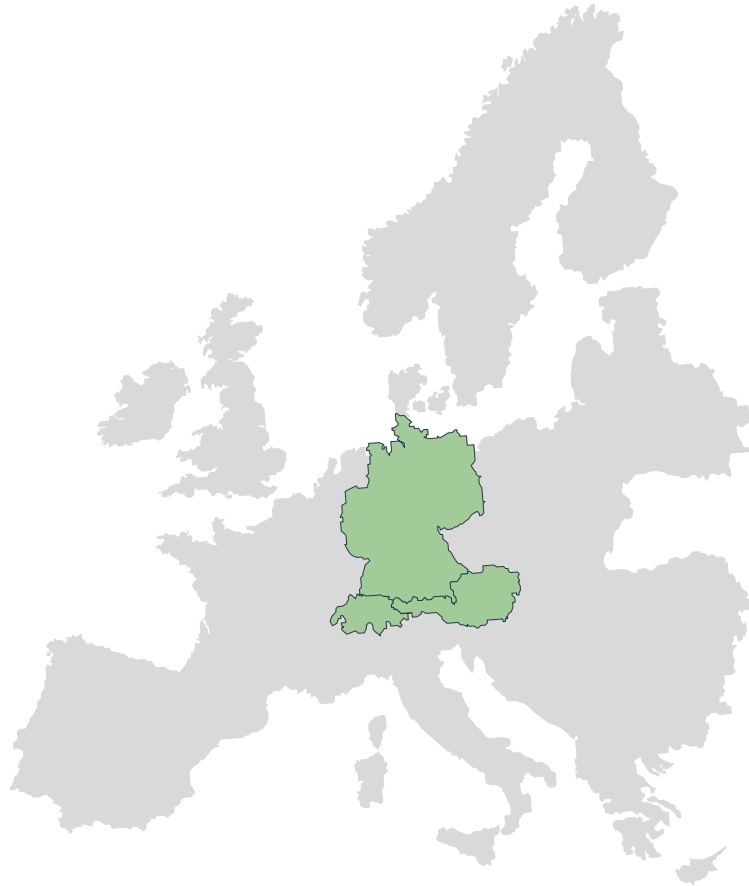
* Renewables include energy sources such as wind, photovoltaic (PV), and others.

** Oil products encompass petroleum (crude oil) as well as naphtha (used in the chemical industry) and kerosene (used in aviation) derived from the Fischer-Tropsch synthesis.

*** Demand-Side Management (DSM) covers the residential, industrial, and transportation sectors, including Vehicle-to-Grid (V2G) applications in the transportation sector.

Die Modellregion ist Europa mit Fokus auf DACH

Ein Sektor gekoppeltes Energiesystem für Europa



50 modellierte Regionen für Europa!



Auswertungsfokus liegt auf DACH.

Die wichtigsten Parametrisierungen und Annahmen

Szenario Rahmen

Fundamentale Daten

TYNDP-2022

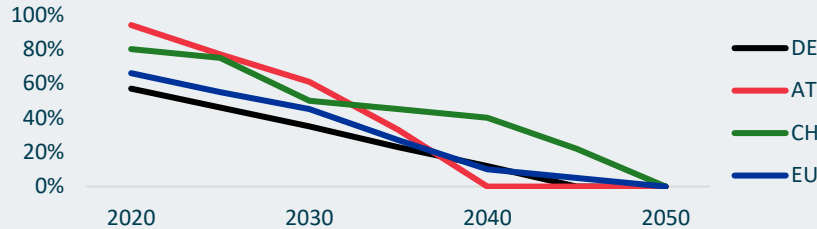
... mit nationalen Anpassungen

- NEP (DE)
- ÖNIP (AT)
- EP2050+ (CH)

...



Pfad zur CO₂-Neutralität verglichen zu 1990



Der European Green Deal und die Effort Sharing Regulation müssen eingehalten werden.
Der treibende Faktor hinter der Energiewende.

Das Wetterjahr ist 2012

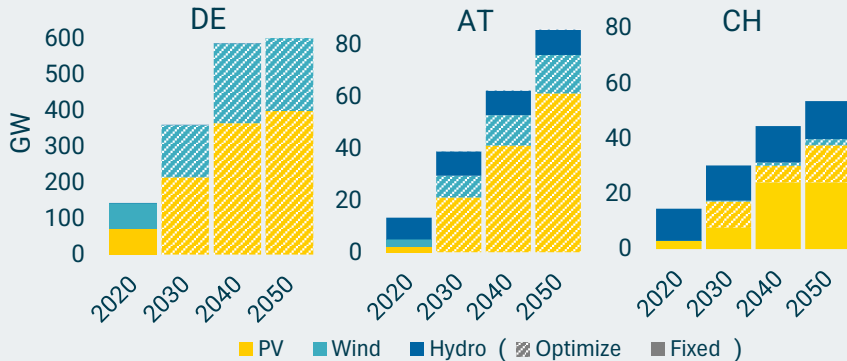
es diktiert Erneuerbare Potenziale



und gibt Wärmebedarfe vor.



Erneuerbare Ausbaupfad



Ambitionierte Ziele.

Großzügige Optimierungsspielräume.

Erneuerbare Energieträger & Carbon Capture

Die Kombination aus Biomasse und CC erlaubt negative CO₂ Emissionen



Unvermeidbare Emissionen in dem Industrie-, dem Wärme- und dem Transportsektor machen diese Technologie essenziell.

Die wichtigsten Parametrisierungen und Annahmen

Szenario Rahmen

Flexible Kraftwerke werden nach Bedarf gebaut.



Jedes Szenario hat einen unterschiedlichen Bedarf.

Speicher können frei ausgebaut werden.



Erneuerbare benötigen hohe Flexibilitäten.

- Batterien
- Pumpspeicher
- Wasser Speicher
- Wasserstoff Speicher

Der Ausbau von Transport Korridoren wird optimiert.



Strom Transport Korridore sind frei zur Optimierung nach 2030.

Wasserstoff Pipelines können von Gas Pipelines getrofitted oder neu gebaut werden.

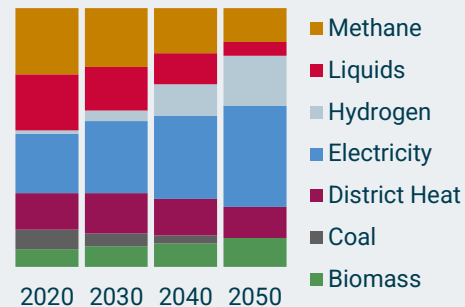
Dekarbonisierung des Transportsektors

wird hauptsächlich durch einen Wechsel zu Strom und H₂ geschafft.

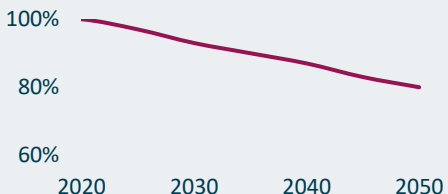


Wandel in der Industrie

in Richtung mehr Strom und weg von fossilen Brennstoffen

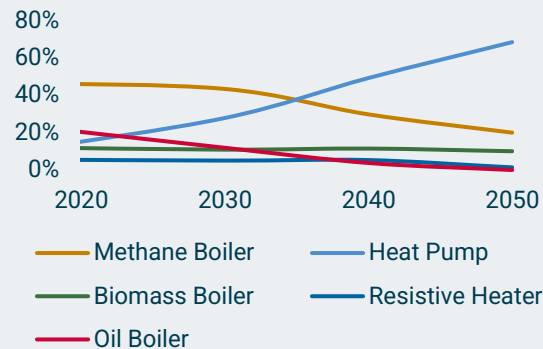


Wärmebedarfe verringern sich durch Sanierung



Individuelle Ziele für die einzelnen Länder.

Die dezentrale Wärme ist vorgegeben.



Individuelle Ausbaupfade für die einzelnen Länder.

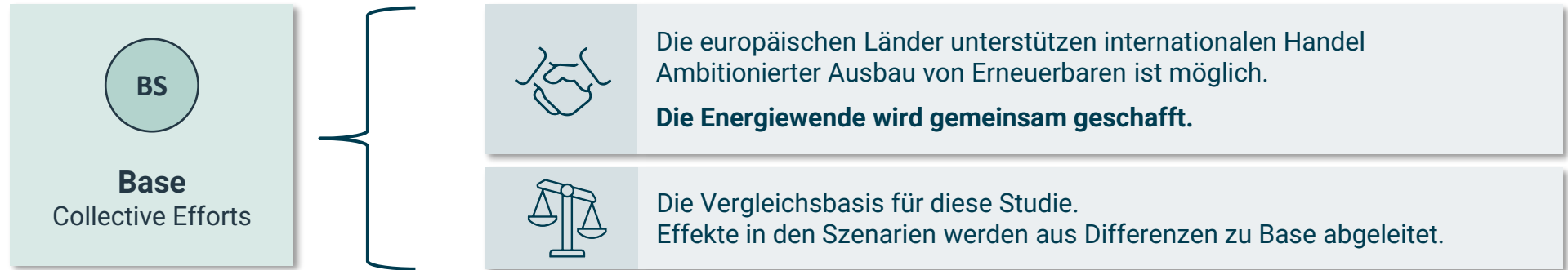
Der Fernwärme Ausbau wird optimiert.



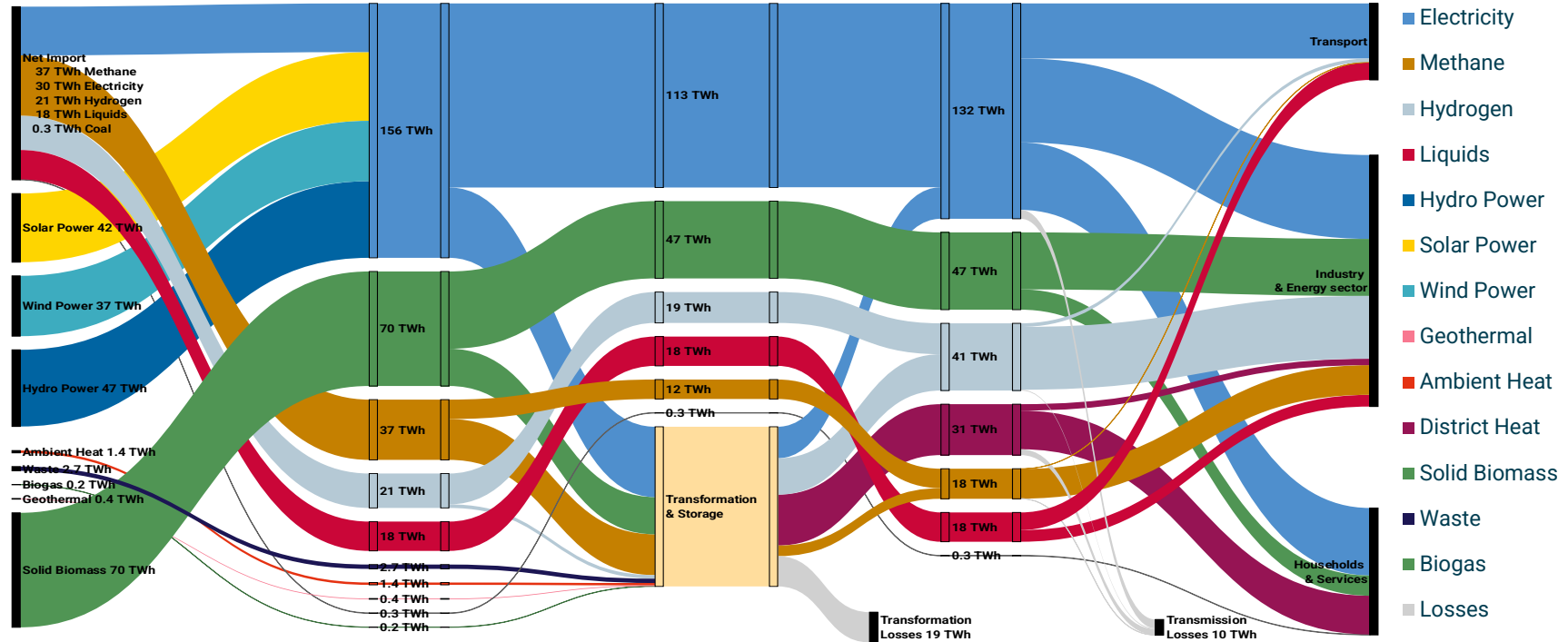
KWKs erlauben Sektor Kopplung zwischen Wärme und Strom.

Das Idealszenario als Referenz

Base: Collective Efforts



Beispiel für Energieumwandlungen in 2050



Ein Beispiel für Energieumwandlungen im Jahr 2050. Das dargestellte Land ist Österreich. Links ist der Primärenergiebedarf dargestellt, rechts der Endenergiebedarf.

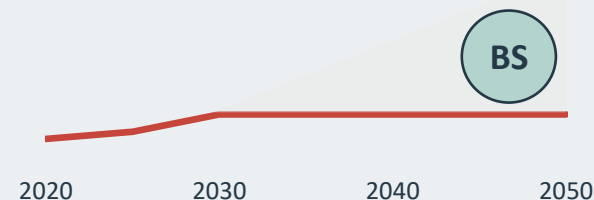
Importe stellen vollständig dekarbonisierte Energieträger dar (grüne Kraftstoffe oder durch Kohlenstoffmanagement dekarbonisiert). Der Transportbereich umfasst die Nachfrage des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs. Die hier dargestellte Umgebungswärme umfasst nur leistungsstarke zentrale Wärmepumpen aus der Fernwärmeerzeugung, nicht solche aus dezentralen Anlagen in Haushalten und Industrie.



Strom Transport Korridore

Kein Ausbau von Transport Korridoren nach 2030.

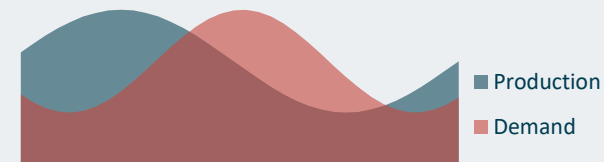
Im Base Szenario wird frei optimiert. (BS)



Selbstversorgungsgrade

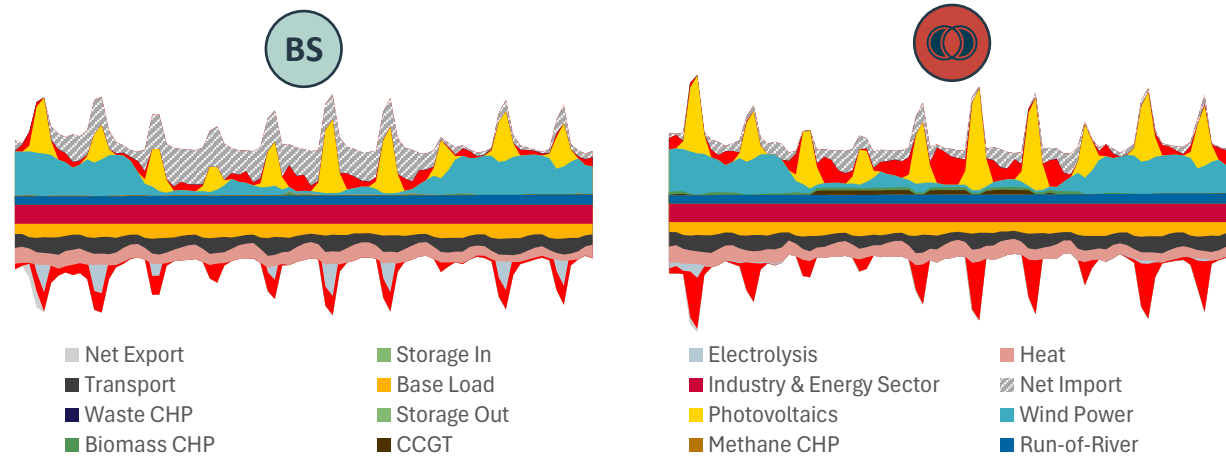
Steigende Selbstversorgung der Primärenergieträger bis 2050.

2030	2040	2050
35%	60%	80%



Die Selbstversorgung ist als jährliche Bilanz definiert. Temporäre Unterschreitungen sind erlaubt.

Strom Zeitserie – Österreich in 2050 vom 16.02. bis 26.02.



1.

Residuallastspitzen können nur teilweise durch Importe abgedeckt werden.
Außerdem kann Überschussenergie nur begrenzt exportiert werden.

2.

Folgendermaßen muss Energie lokal erzeugt werden.
Flexible Kraftwerke werden vermehrt eingesetzt.

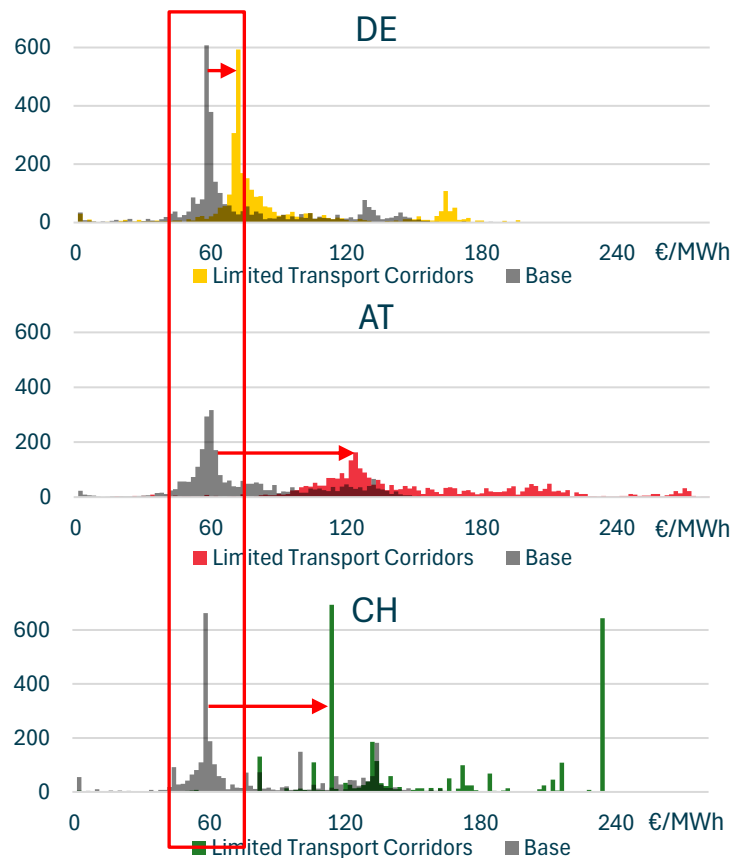
3.

Speichertechnologien als zeitliche Flexibilitäten werden stärker ausgebaut.
Sie sind notwendig, um die erneuerbare Energie effektiv ausnutzen zu können.

Auswirkungen auf die Marginalkosten in 2050

Limited Transport Corridors: Independent Pursuit

Marginalkosten für Strom – Histogramme



1. **Allgemein höhere Kosten im Vergleich zu "Base".**
Ein Indikator für ein teureres Energiesystem.

2. **Die häufigsten Preise der Länder sind gleich in "Base"**
Dies unterstreicht den ausgleichenden Effekt von Handel auf die Marginalkosten.

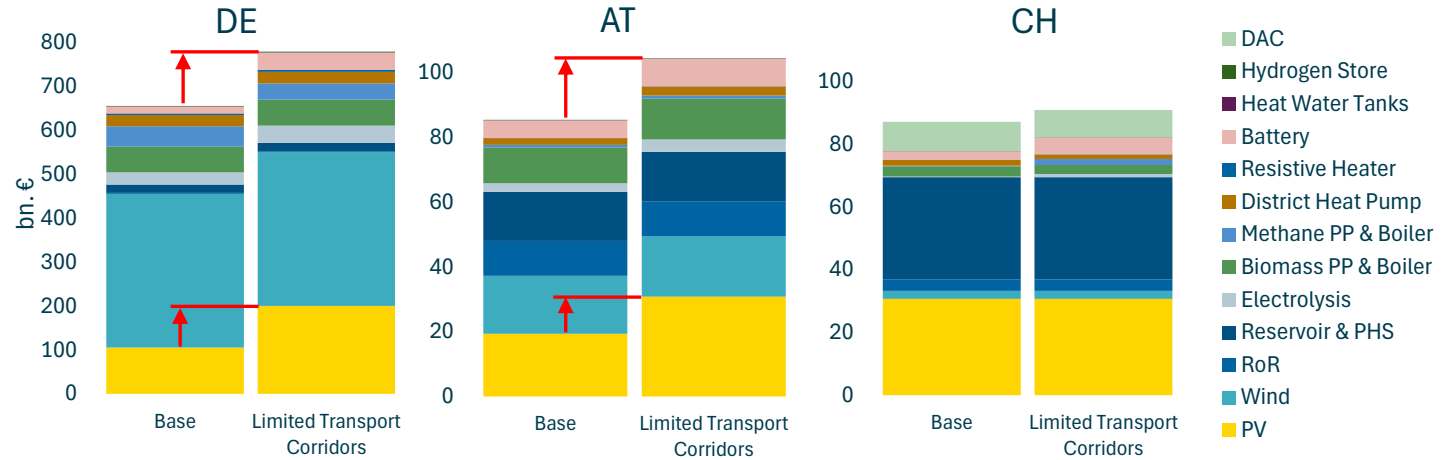
Durchschnittliche Marginalkosten für Strom in 2050

[€/MWh]	DE	AT	CH
Limited Transport Corridors	80	143	150
Base	69	71	75

Quantifizierung der erhöhten Investitionsbedarfe

Limited Transport Corridors: Independent Pursuit

Accumulated Investment Costs until 2050



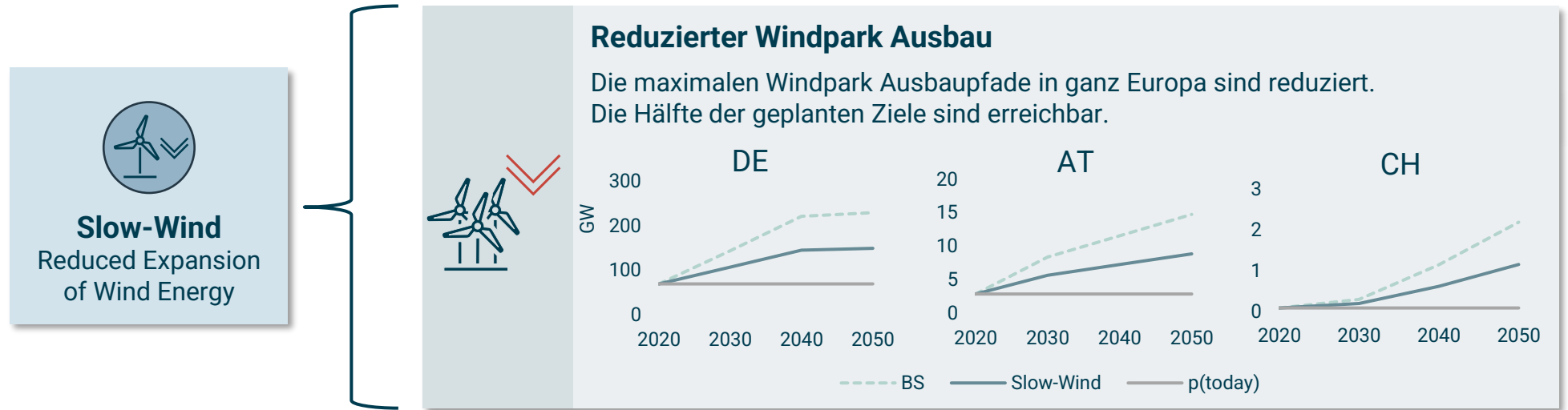
1. Investitionskosten steigen
DE: +19 %
AT: +22 %
CH: +4 %

2. Die höchsten Anstiege sind für PV und Batterien zu beobachten.
Als Kompensation für den wegfallenden Handel.

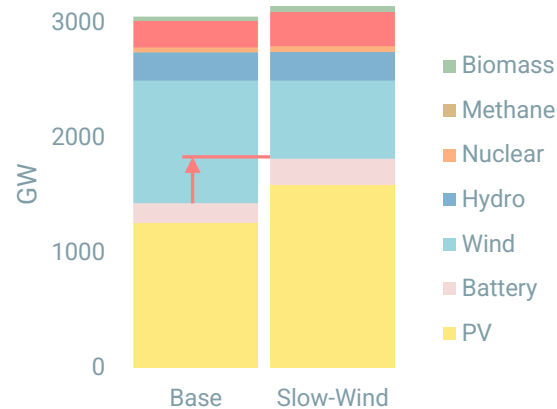
3. + 56 %
in jährlichen europäischen Systemkosten für 2050 exklusive Endenergieverbraucher.

Reduzierter Windpark Ausbau– Szenario Definition

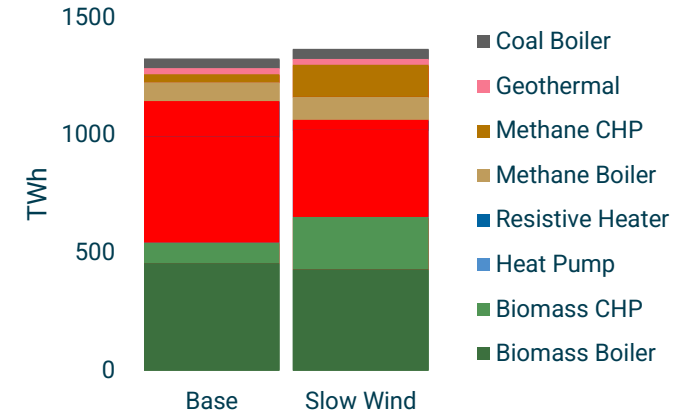
Slow-Wind: Reduced Expansion of Wind Energy



Installierte Stromerzeugungskapazitäten in Europa in 2050



Fernwärmeerzeugung in Europa in 2050



Slow-Wind
Reduced Expansion
of Wind Energy

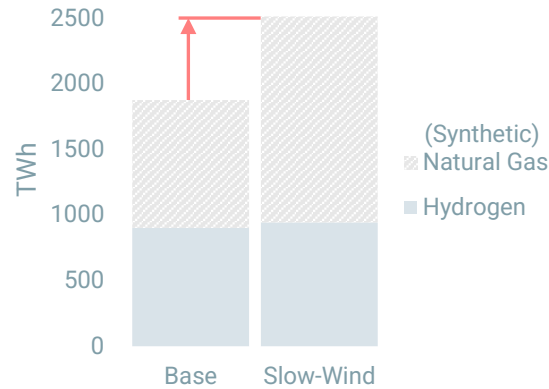
1. Die wegfallenden Wind Kapazitäten werden hauptsächlich durch PV kompensiert. Batterien steigen entsprechend.

2. Die höhere Volatilität durch PV führt zu einem stärkeren Bedarf an flexiblen Kraftwerken.

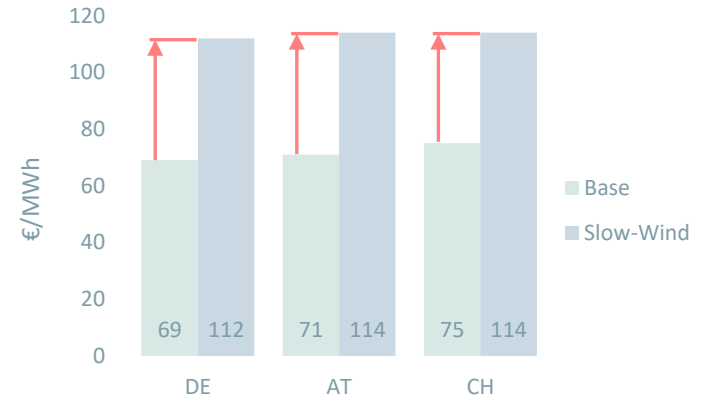
3. **KWKs gewinnen an Relevanz**
Weil sie Strom und Wärme erzeugen.

4. **Elektrifizierung des Fernwärmesektor fällt schwächer aus.**
Im Einklang mit mehr KWKs.

Globaler (synthetisches) Erdgas & Wasserstoff Import in Europa in 2050



Durchschnittliche Marginalkosten für Strom in 2050



Slow-Wind

Reduced Expansion of Wind Energy

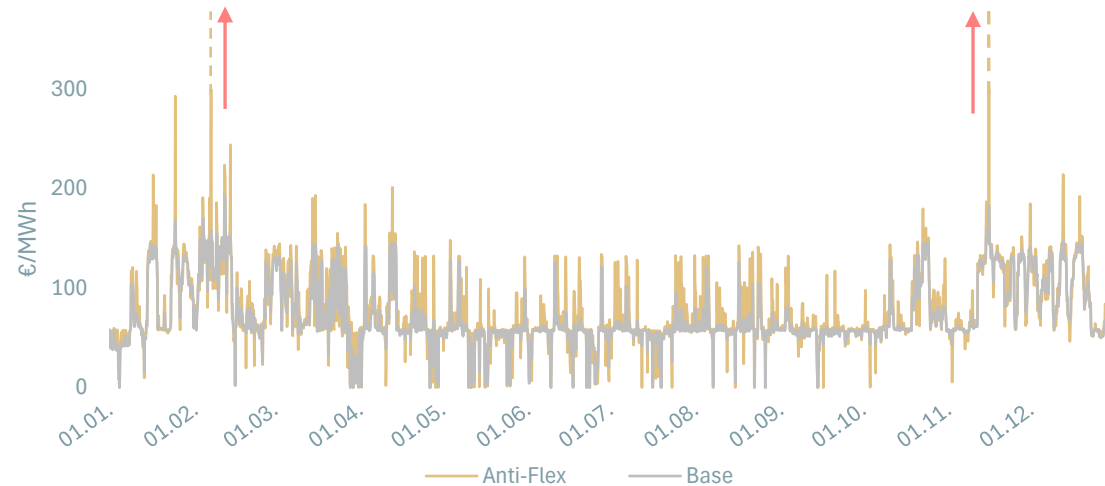
1. **Anstieg in globalen Erdgas Importen.**
Die europäische Selbstversorgung von Primärenergie sinkt um 7%.

2. **Die durchschnittlichen Marginalkosten für Strom steigen in ganz Europa.**

3. **+ 10 %**
in jährlichen europäischen Systemkosten für 2050 exklusive Endenergieverbraucher.



Marginalkosten für Strom in 2025



Anti-Flex
Low System
Flexibility

1. Marginalkosten-Spitzen treten öfter und sie sind höher.
Bei europäischen EE-Flauten erreichen die Marginalkosten Extremwerte.

2. Transport Korridore werden verstärkt ausgebaut.
Die fehlende zeitliche Flexibilität wird durch örtliche Flexibilität kompensiert.

3. Flexible Kraftwerke werden wichtiger.
DE: +29 %
AT: +54 %
CCGT-Ausbau in 2025 verglichen zu Base.



Limited Transport Corridors Independent Pursuit

Begrenzte Transport Korridore und hohe Selbstversorgungsziele führen zu ...

- signifikantem Anstieg der jährlichen europäischen Systemkosten.
- großen Differenzen der Marginalkosten für Strom zwischen Ländern.
- zusätzlichen Investitionskosten für Stromerzeugung und Energieumwandlung

Die internationale Koordinierung der Energiewende in Europa führt zu einem kosteneffizienteren Energiesystem



Slow-Wind Reduced Expansion of Wind Energy

Verfehlen der nationalen Erneuerbaren Ausbauziele führt zu ...

- höheren Systemkosten in ganz Europa.
- einer höheren Abhängigkeit von globalen Importen.
- geringerer Elektrifizierung des Energiesystems.

Der integrierte und koordinierte Übergang zu einem kosteneffizienten erneuerbaren Energiesystem verringert die Importabhängigkeit Europas und vermeidet Kompensationskosten in einzelnen Sektoren.



Anti-Flex Low System Flexibility

Unzureichende Energiespeicher im europäischen Energiesystem führen zu ...

- häufigeren und höheren Marginalkosten-Spitzen.
- einer höheren Abhängigkeit von globalen Importen.
- einem erhöhten Bedarf an Transport Korridoren.

Ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem benötigt überregionale und lokale Flexibilität.

Kooperation von der Planung bis zur Umsetzung

Ausblick

Die Zusammenarbeit europäischer ÜNBs in der Entwicklung des Energiesystemmodells ...



... bringt neue Perspektiven und fördert innovative Ideen.



... ermöglicht den Austausch von Best-Practices und führt zu einer robusten und validierten Datengrundlage.



... beschleunigt Verfahren durch die stets verfügbare Expertise über individuelle Marktregionen.



Die Ermöglichung eines freien europäischen Strommarkts wird mit der Energiewende herausfordernder.

Schnelle Modellentwicklungen sind notwendig.



Kooperation und Zusammenarbeit werden für die Bewältigung von Herausforderungen und die effektive Nutzung von Chance von entscheidender Bedeutung sein.

Damit Europa weiterhin die Vorreiterrolle bei der globalen Energiewende einnimmt.