

# UPTAKE

(Unkonventionelle Perspektiven auf den Transportnetz-Ausbau für  
Klimaneutralität & Energiewende)

## Netzausbau im Zeichen beschleunigter Klimaneutralitätspolitik und der neuen Unübersichtlichkeit

Felix Matthes, Franziska Flachsbarth (Öko-Institut)

Philipp Härtel, Norman Gerhardt, Felix Frischmuth (Fraunhofer IEE)

Sirkka Porada, Lukas Löhr (IAEW RWTH Aachen)

### Endbericht

Berlin / Kassel / Aachen, 4. Juli 2022

## Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Projekthintergrund

- Die **Transformation** des Energiesystems zur **Klimaneutralität** soll **massiv beschleunigt** werden (robuster regulativer Rahmen in der EU und DE)
- Die technologischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen **Unsicherheiten** werden **größer** (in vielerlei Hinsicht)
- **Infrastruktur**aus- und -umbau ist eine der **kritischen Trägheiten** für die Systemtransformation (nicht nur, aber insbesondere mit Blick auf Strom)
- Die **aktuellen Planungsperspektiven** (und die daraus resultierenden regulatorischen Folgen) sind **zeitlich zu begrenzt** und oft **zu eng gefasst**
- Die **längerfristige Perspektive** wird mit der Aufgabe zur Spezifikation eines **Klimaneutralitätsnetzes** grundsätzlich eröffnet
- Die Ansätze zur **erweiterten Analyse des Möglichkeitsraumes** befinden sich bisher in einem **relativ frühen Stadium**, sind (bisher) sehr aufwändig angelegt (z.B. BMWi-Langfristszenarien) und sind mit Blick auf die treibenden / erklärenden Rahmenannahmen nicht immer ausreichend erschließbar bzw. transparent

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Vorab: der (angestrebte) Neuigkeitswert (1)

- **Unkonventionell:**  
Betrachtung und Verdichtung sehr unterschiedlicher Entwicklungsdeterminanten und deren Auswirkungen / Implikationen
- **Perspektiven:**  
Betrachtung eines Zielsystems, (noch) keine Betrachtung von Transformationspfaden
- **Transportnetz-Ausbau:**  
Ableitung und Einordnung der zukünftigen Transportaufgaben im Stromnetz (inklusive einer qualitativen Einordnung anderer Energienetz-Transportaufgaben) mit einer orientierenden quantitativen Analyse
- **Klimaneutralität und Energiewende:**  
wesentliche Eigenschaft der betrachteten Zielsysteme bzw. der entsprechenden Transportaufgaben
- **Bezugssystem:**  
Deutschland, aber mit Transitbetrachtung, primär Stromsystem, aber auch qualitative Dokumentation anderer Energie-Transportaufgaben

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Vorab: der (angestrebte) Neuigkeitswert (2)

- Entwicklung eines **systematischeren Analyserahmens** nicht nur für das „Was“, sondern auch für das „Warum“ unterschiedlicher Entwicklungstrends
  - Entwicklung eines Ebenenkonzepts „Achsen-Deskriptoren-Treiber“:  
neu, aber nicht notwendigerweise unkonventionell
- **Umfassende Analyse** von technischen, ökonomischen, regulatorischen und gesellschaftlichen **Treibern**, deren **Interaktionen** und der Effekte auf die **Ausprägung der unterschiedlichen Entwicklungstrends** sowie systematische Ableitung und Charakterisierung von prototypischen Entwicklungstrends (**Storylines**)
  - mit Blick auf die „Erklärbarkeit“ prototypischer Entwicklungstrends:  
neu und teilweise unkonventionell

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Vorab: der (angestrebte) Neuigkeitswert (3)

- Erschöpfende Abdeckung der **großen Vielfalt und Breite** von Ausprägungen des zukünftigen Energiesystems über systematisch entwickelte Storylines
  - sehr große Bandbreite von Niveaus und räumlichen Strukturen in den Bereichen Angebot und Nachfrage sowohl für Strom als auch Wasserstoff:
    - neu und unkonventionell
  - sehr große Bandbreite von Determinanten für die Ausprägung der zukünftigen Energiesysteme sowohl im Inland als auch im Ausland (in den Bereichen Strom und Wasserstoff):
    - neu und unkonventionell
- Vergleichsweise **schnelle Bearbeitungsmöglichkeit** im Analyseverbund Treiber-Deskriptoren-Storylines-Modell durch
  - Beschränkung auf Storyline-Entwicklung
  - und Fokus auf den orientierenden **Ergebnisindikator „Transportaufgabe“**
    - neu und unkonventionell

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Große Bandbreite von Ausprägungen – aber auch einige Prämissen

- **Grundlegende Prämissen, auf deren Basis sich die Analysen bewegen**
  - die Europäische Union bleibt bestehen
  - Ziel der Klimaneutralität wird in DE erreicht
  - die Europäische Union und ihr Umfeld (EFTA etc.) verfolgen weiterhin das Ziel der Klimaneutralität
- **Energiemarkt-Prämissen, auf deren Basis sich die Analysen bewegen**
  - der europäische Strommarkt in seinen heutigen Grundstrukturen bleibt bestehen (Großhandelsmarkt auf der Basis von Grenzkostenpreisbildung bleibt Kern des Strommarktes)
  - die Etablierung neuer Energieträger im System (v.a. Wasserstoff) erfolgt grundsätzlich im Rahmen eines Marktmodells (mit diversen Flankierungsmaßnahmen)
  - es erfolgt keine radikale Umstellung des Marktmodells in Richtung hoch aufgelöster Lokalisierungssignale (z.B. keine Umstellung auf ein nodales System – mit allen Konsequenzen)

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Das Erkenntnisziel und der Beginn der Strukturierung (1)

### Das Erkenntnisziel:

- Erarbeitung einer Orientierungshilfe zum Managen der Bandbreiten möglicher Entwicklungen des Energiesystems und deren Konsequenzen für die Strom-Transportaufgaben (mit einer Einordnung der anderen Energie-Transportaufgaben)

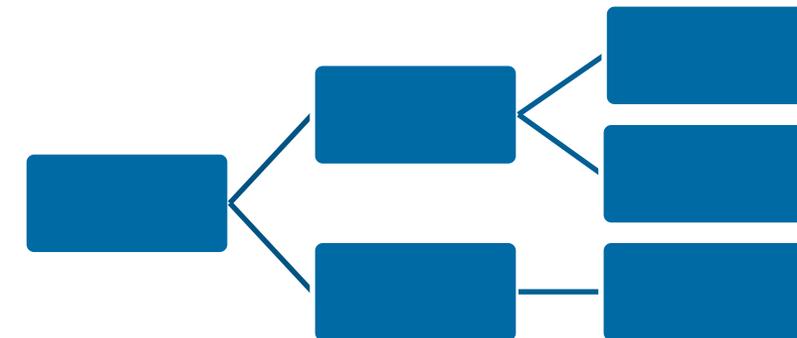
### Die zentrale Herausforderung:

- Die Zahl der technischen, wirtschaftlichen, regulativen, politischen und gesellschaftlichen Einflussgrößen ist extrem groß und führt zu einer unübersichtlichen Kombinatorik

### Der pragmatische Ansatz:

- Aggregation verschiedener Entwicklungen zu Storylines
- reduzierte Anzahl an numerischen Analysen

#### Orientierungshilfe: Aggregation zu Storylines



# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Das Erkenntnisziel und der Beginn der Strukturierung (2)

### Der Weg zu den Storylines (Kapitel 2 und 3):

- Identifikation von systemisch beschreibbaren Dimensionen (Achsen) für Ausprägungen des Strom-/ Energiesystems über spezifische (systemische) Deskriptoren und Hinterlegung von techno-ökonomischen, gesellschaftlichen und politisch-regulatorischen Erklärungsgrößen (Treiber) für diese Deskriptoren
- Auf Basis dieser Treiber können Deskriptoren & Achsen gebündelt bzw. zu (konsistenten) Storylines zusammengefasst werden.

### Parametrisierung und Modellierung der Storylines (Kapitel 4 und 5)

- Beschränkung auf Storylines: indikative Parametrisierung auf der Basis von bestehenden Szenarien
- Analyse der Storylines mit dem Modell SCOPE SD des Fraunhofer IEE

### Auswertung der Ergebnisse (Kapitel 6)

- Konzentration auf den Ergebnisindikator „Transportaufgabe“
- Erarbeitung von Schlussfolgerungen

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Zusammenwirken unterliegender Entwicklungen, systemischer Achsen & Storylines (1)

### Storyline

Eine **Storyline** ist ein **qualitatives Narrativ** zur Beschreibung einer möglichen Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems. Dabei fasst eine Storyline eine Menge von verschiedenen **technischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen, politischen und regulatorischen Treibern** zusammen, die in eine **ähnliche Richtung** wirken und in sich **konsistent** sind.

Die Auswahl bzw. Ausprägung der verschiedenen Storylines versucht, mehrere mögliche Determinanten von Unsicherheiten zu berücksichtigen sowie den gesamten möglichen Entwicklungsraum aufzuspannen.

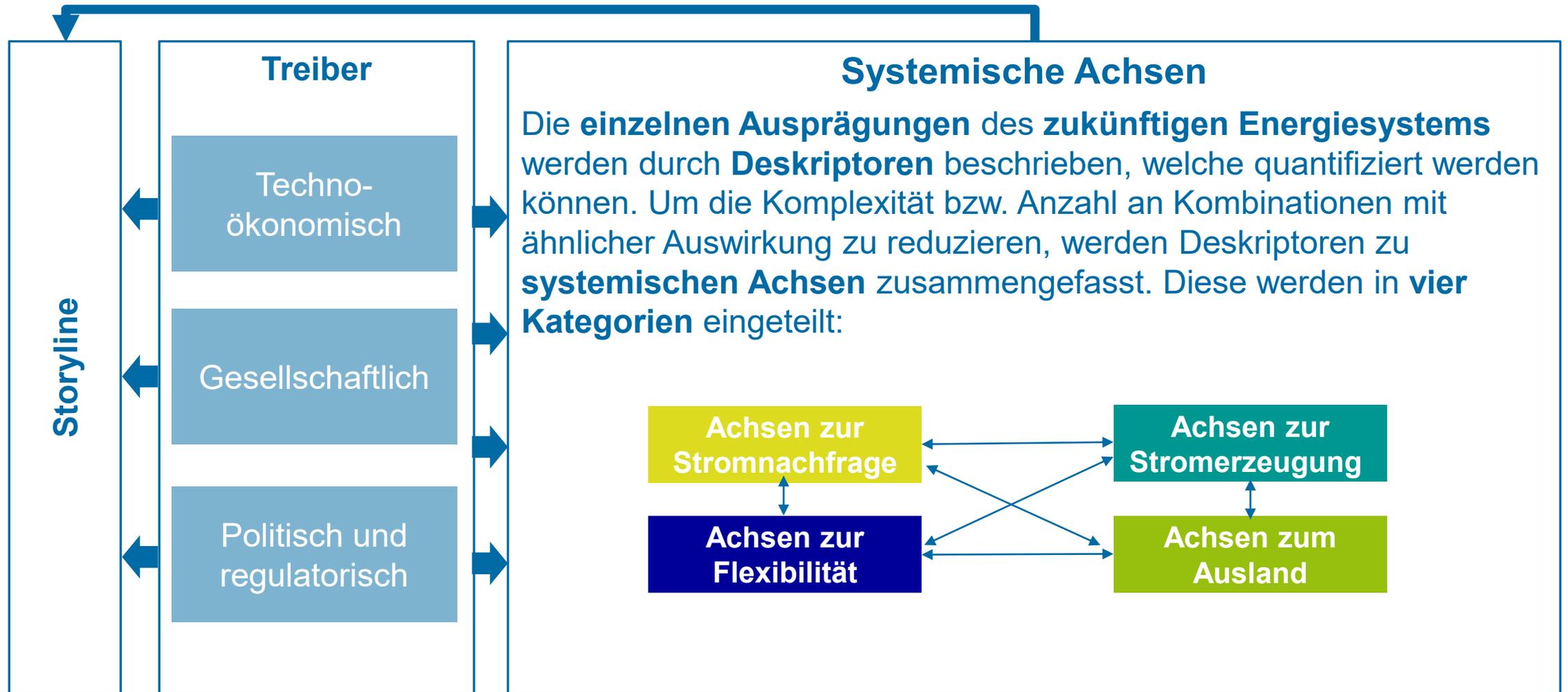
# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Zusammenwirken unterliegender Entwicklungen, systemischer Achsen & Storylines (2)



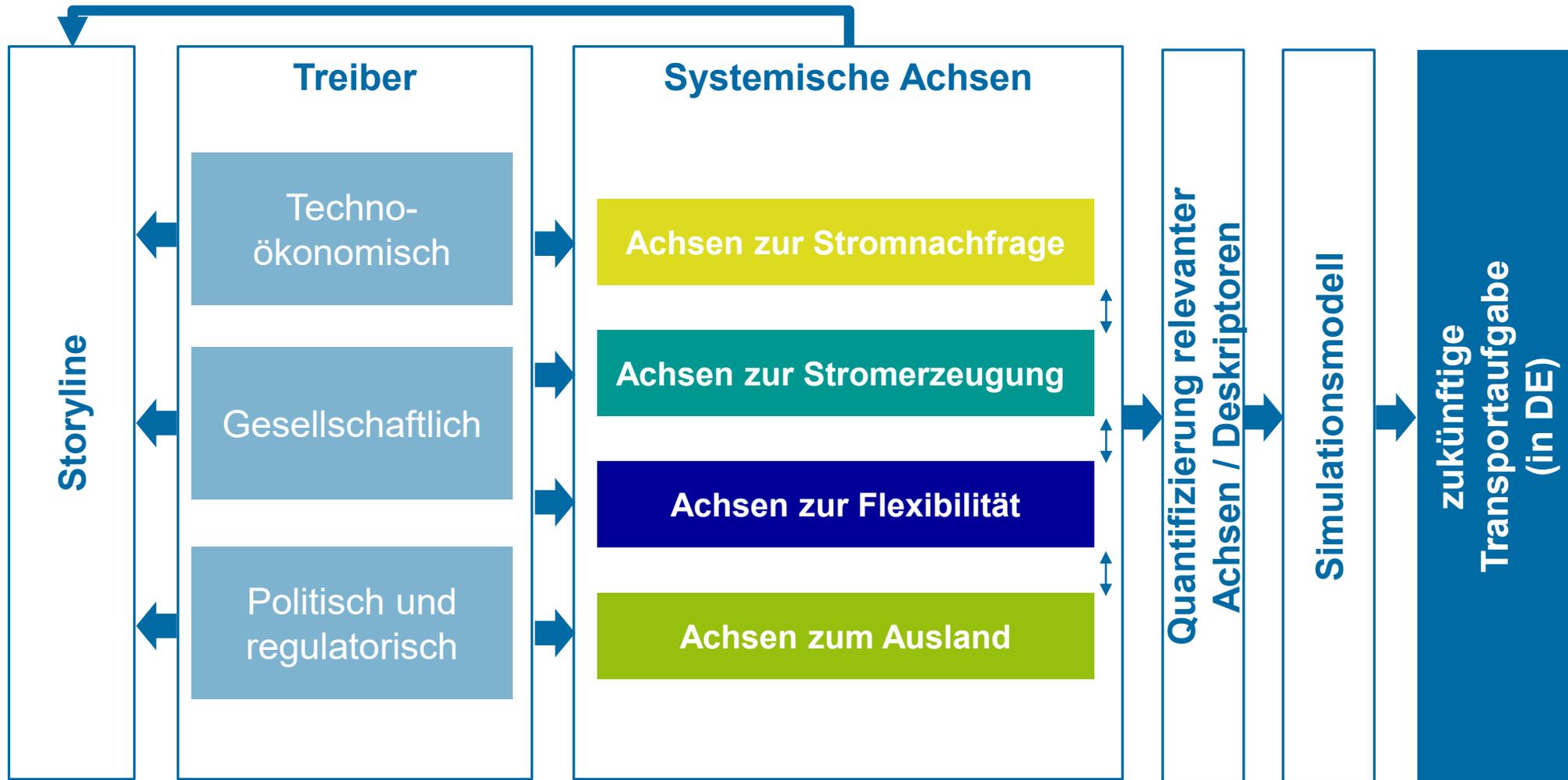
# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Zusammenwirken unterliegender Entwicklungen, systemischer Achsen & Storylines (3)



# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Zusammenwirken unterliegender Entwicklungen, systemischer Achsen & Storylines (4)



# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Methodisches Vorgehen

Festlegung der systemischen Achsen

Identifikation der relevanten techno-ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen **Deskriptoren** und **Treiber**

Identifikation der relevanten (**Wechsel**)wirkungen

Reduktion auf relevante **Storylines**

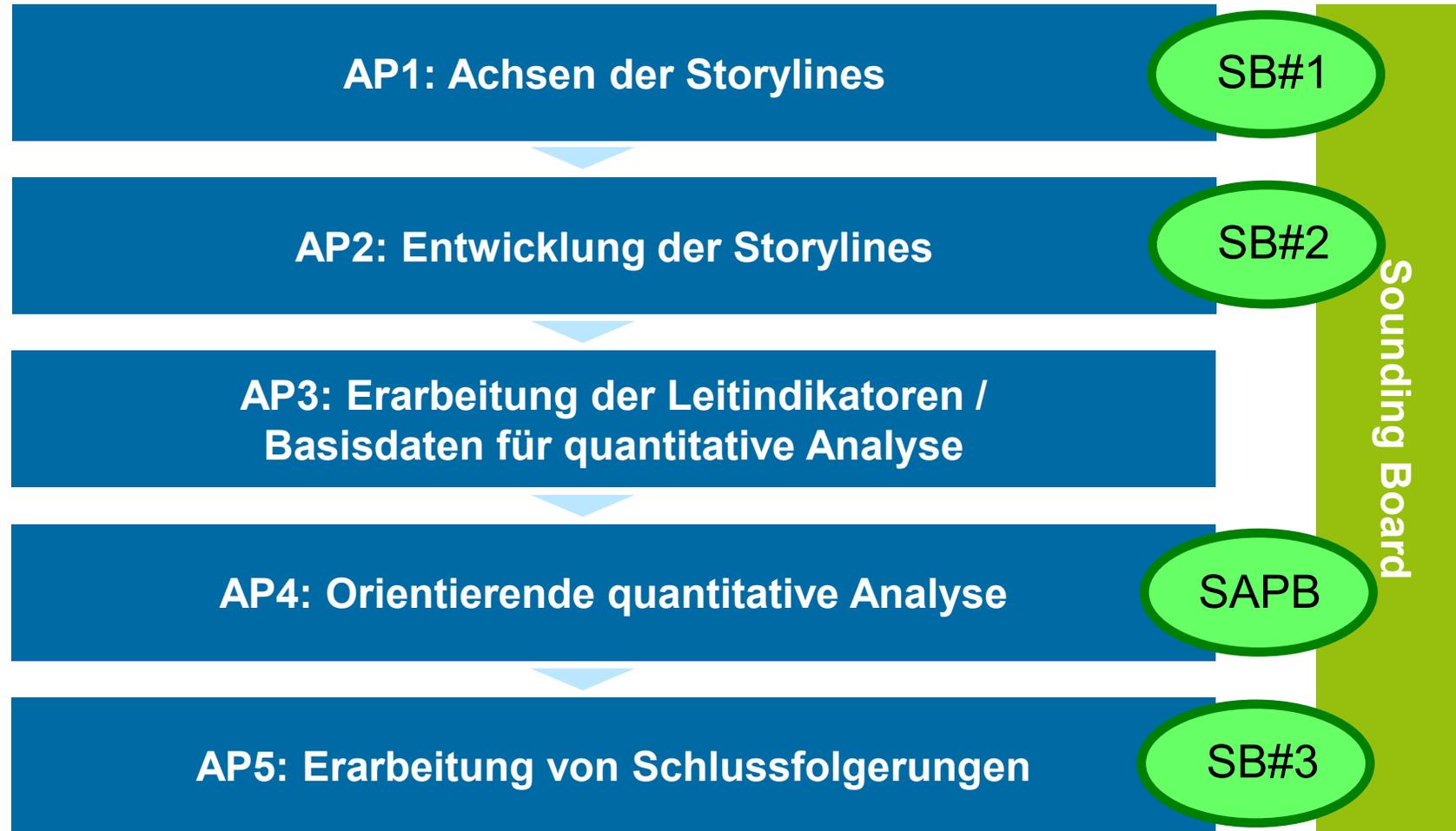
Quantifizierung der für die Storyline relevanten Deskriptoren

Quantifizierung der weiteren Deskriptoren durch **Simulationsmodell**

Erarbeitung von **Schlussfolgerungen**

# 1 Einführung und methodischer Ansatz

## Ein Kooperationsprojekt mit externer Reflektion der (Zwischen-)Ergebnisse



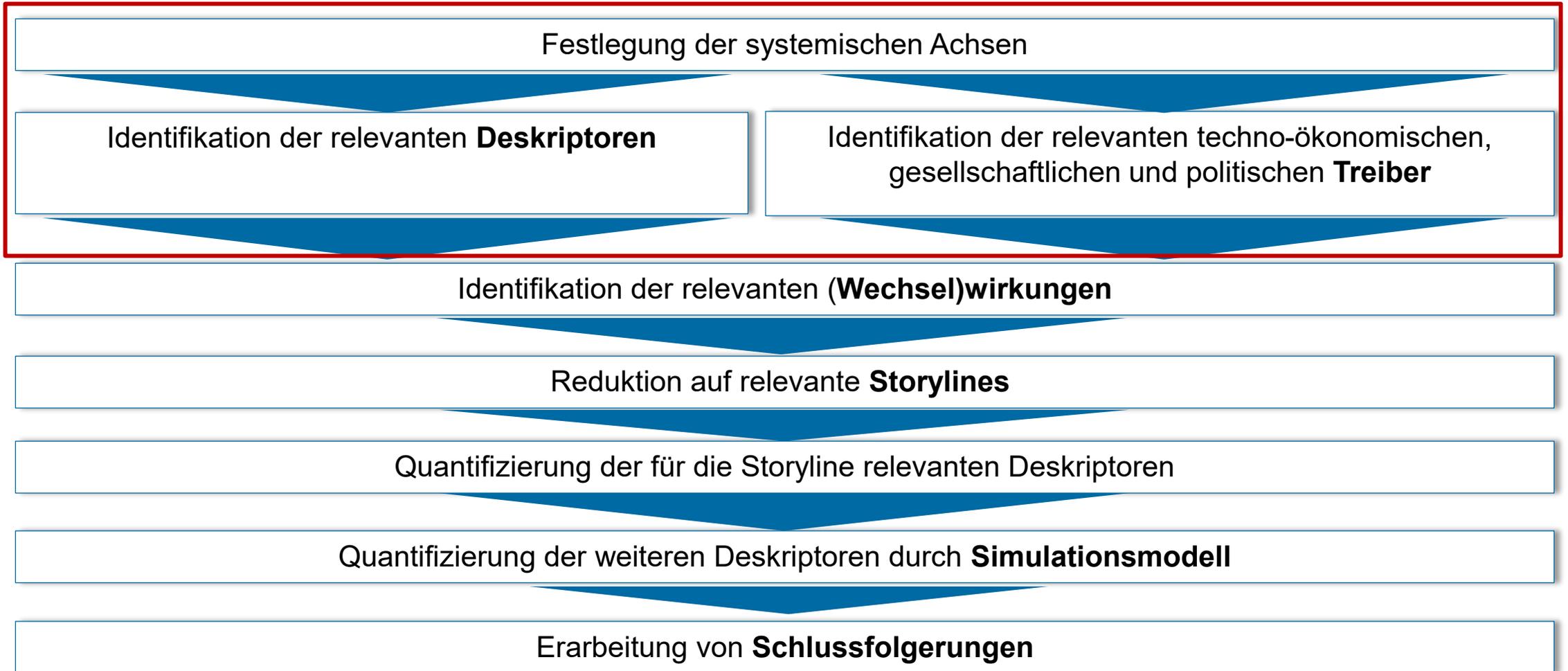
- Die fünf Arbeitspakete wurden in einem intensiven Kooperationsprozess zwischen den drei beteiligten Instituten zusammengestellt.
- Zwischenergebnisse wurden in zwei Webinars mit ausgewählten Mitgliedern des SAPB („*Sounding Board*“) und auf zwei Veranstaltungen des SAPB vorgestellt und diskutiert
- Die Entwurfsversion der Schlussfolgerungen wurde dem *Sounding Board* zur schriftlichen Kommentierung zur Verfügung gestellt

## 2 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

## 2 Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren

### Methodisches Vorgehen



## 2 Was treibt die Strom-Transportaufgaben des Energiesystems? Auf hoher Flughöhe: die systemischen Ausprägungen („Achsen“)

### Stromnachfrage

- Stromverbrauchsniveaus / -strukturen Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveaus / -strukturen Umwandlung

### Stromerzeugung

- Volatile Stromerzeugung
- Disponible Stromerzeugung

### Flexibilität

- Zeitliche Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Sektorale Verschiebung der Versorgungsaufgabe

### Ausland

- Import von Strom
- Import von grünen Brennstoffen

# 2 Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren

## Übersicht der relevanten systemischen Deskriptoren der vier Kategorien

### Stromnachfrage

#### Stromverbrauchs niveaus Letztverbrauch

- Konventioneller Stromverbrauch
- Grad der Elektrifizierung des Mobilitätssektors
- Grad der Elektrifizierung des Wärmesektors
- Grad der Elektrifizierung des Industriesektors

#### Stromverbrauchs niveaus Umwandlung

- Kapazität von PtX-Anlagen (insb. Elektrolyseure, ausgenommen PtH)
- Kapazität von großskaligen PtH-Anlagen (Industrie oder Einspeisung in Wärmenetze)
- Lokalisierung von PtX-Anlagen (insb. Elektrolyseure, ausgenommen PtH)

### Stromerzeugung

#### Volatile Stromerzeugung

- Umfang von Freiflächen PV-Ausbau
- Umfang von Dachflächen PV-Ausbau
- Umfang Windkraftanlagen-Onshore-Ausbau
- Umfang Windkraftanlagen-Offshore-Ausbau
- Lokalisierung Freiflächen-PV-Ausbau
- Lokalisierung Windkraftanlagen-Onshore-Ausbau
- **Disponible Stromerzeugung**
- Stromerzeugung durch brennstoffbasierte Kraftwerke (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Ölprodukte)
- Stromerzeugung durch andere disponible Kraftwerke

### Flexibilität

#### Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe

- Verfügbarkeit der Flexibilität von „Flexsumern“ (DSM, dezentrale Batteriespeicher)
- Umfang von Großbatteriespeichern
- Lokalisierung von Großbatteriespeichern

#### Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

- Verfügbarkeit der Erdgastransportinfrastruktur
- Verfügbarkeit einer Wasserstoffinfrastruktur

### Ausland

#### Import von Strom

- Ausbau grenzüberschreitender Handelskapazitäten im Stromsektor
- Umfang volatiler Stromerzeugung im Ausland
- Umfang Kernkraft im Ausland
- Umfang Flexibilität (Erzeugung und Verbrauch) im Ausland

#### Import von grünen Brennstoffen

- Angebot an grünen Brennstoffimporten
- Infrastruktur für grüne Brennstoffimporte
- Preise für grüne Brennstoffimporte

# 2 Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren

## Analyse der einzelnen Deskriptoren und der relevanten Treiber über Steckbriefe

Struktur der Deskriptoren-Steckbriefe, alle Steckbriefe sind im [Anhang 1](#) zusammengestellt

### Deskriptor: *Deskriptor*

#### Systemische Achse

*Systemische Achse*

#### Ausprägung des Deskriptors

*Kurze Erläuterung zu den möglichen Ausprägungen des Deskriptors sowie eine Einordnung der Auswirkungen des Deskriptors auf die Transportaufgabe*

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- *Gesellschaftliche Entwicklungen / Veränderungen, die die Ausprägung des Deskriptors wesentlich beeinflussen*

##### Politische / regulatorische Treiber

- *Politische Entscheidungen, die die Ausprägung des Deskriptors wesentlich beeinflussen*

##### Techno-ökonomische Treiber

- *Technische bzw. ökonomische Entwicklungen, die die Ausprägung des Deskriptors wesentlich beeinflussen*

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- *Systemische Achsen oder Deskriptoren, deren Ausprägung durch eine höhere Ausprägung des Deskriptors ebenfalls ansteigt*

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- *Systemische Achsen oder Deskriptoren, deren Ausprägung durch eine höhere Ausprägung des Deskriptors tendenziell sinkt*

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- *Möglichkeiten, um die Ausprägung dieses Deskriptors in Modellen zur Szenariengenerierung (bspw. SCOPE Modell) zu quantifizieren / berücksichtigen*

#### Sonstige Ergänzungen

- *Ergänzungen, die für den Einfluss des Deskriptors auf die Transportaufgabe relevant sind*

# 2 Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren

## Zusammenfassung der relevanten Treiber auf die verschiedenen Deskriptoren

### Stromnachfrage

#### Stromverbrauchs-niveaus Letztverbrauch

- Förderung von elektrifizierten Anwendungen
- Kostenentwicklung elektrifizierter Anwendungen und konkurrierender Technologien
- Technologiefortschritt und Effizienz sowie deren Standards
- Veränderungen im Verbrauchsverhalten (Suffizienz)
- Offenheit ggü. Technologiewechsel im Gegensatz zu Beharrung
- Wachstum (Bevölkerung, Wirtschaft)

#### Stromverbrauchs-niveaus Umwandlung

- Kostenentwicklung / Technologieentwicklung PtX und alternativer Anwendungen
- Steuern und Umlagen für Elektrolyseure
- Reg. Rahmen für Positionierung und Betriebsweise

### Stromerzeugung

#### Volatile Stromerzeugung

- Förderung / Finanzierung von EE-Anlagen/Wegfall EEG
- Bereitstellung von Flächen und Ko-Nutzungsmöglichkeiten
- Abstandsgebote von WEA
- Akzeptanz ggü. Infrastrukturausbau
- Technologiefortschritt
- Lokale CO2- Preise

#### Disponible Stromerzeugung

- Verfügbarkeit und Kosten von grünen Brennstoffen
- Autarkiebestreben, Akzeptanz, Nutzungskonflikte

### Flexibilität

#### Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe

- Bereitschaft zu Komforteinbußen
- Gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende
- Förderung von zentraler / dezentraler Flexibilität
- Technologiefortschritt (Kommunikationstechnik, Speichertechnologien)
- Rolle von Quartierslösungen

#### Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

- Förderung von Gasinfrastrukturen
- Förderung von Elektrolyseuren zur Flexibilitätsbereitstellung
- Partnerschaften für / Angebot und Preis von grünen Brennstoffen

### Ausland

#### Import von Strom

- Akzeptanz ggü. Stromimporten
- Autarkiebestreben / Europäische Kooperation
- Ausbau / Freigabe von Handelskapazitäten
- Akzeptanz ggü. Erzeugungstechnologien im Ausland
- Vergütung der Transite

#### Import von Brennstoffen

- Ausbau / Verfügbarkeit der Brennstoffinfrastruktur
- Politische Abhängigkeiten / Autarkiebestrebungen / Stabile politische Partnerschaften
- Technologiefortschritt Brennstoffherzeugung

# 3 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Methodisches Vorgehen AP2

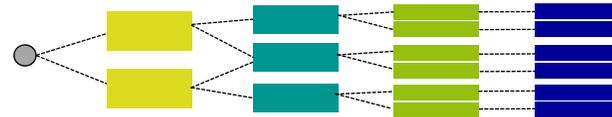
Festlegung der systemischen Achsen

Identifikation der relevanten techno-ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen **Deskriptoren** und **Treiber**

Identifikation der relevanten (**Wechsel**)wirkungen



Reduktion auf relevante **Storylines**



Quantifizierung der für die Storyline relevanten Deskriptoren

Quantifizierung der weiteren Deskriptoren durch **Simulationsmodell**

Erarbeitung von **Schlussfolgerungen**

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Verdichtung zu Storylines – Methodisches Vorgehen

#### Methodisches Vorgehen:

- Aus Deskriptoren ergibt sich eine hohe potentielle Kombinatorik möglicher Ausprägungen des zukünftigen Energiesystems
- Bündelung von Ausprägungen aufgrund von Wechselwirkungen zur Reduktion der Komplexität möglich:

#### Wechselwirkungen zwischen den Achsen der Deskriptoren



#### Wechselwirkungen zwischen Achsen und ihren Treibern



- Bei gleichen Treibern oder systemischen Wechselwirkungen kann eine Bündelung von Achsen in Storylines vorgenommen werden
- Bei unterschiedlichen Treibern oder systemischen Wechselwirkungen ist eine Differenzierung von Achsen in Storylines notwendig
- Ableitung einer begrenzten Anzahl an Storylines mit großer Vielfalt und Breite möglich

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Verdichtung zu Storylines – Wechselwirkungen zwischen den Achsen (Übersicht)

Von	Nachfrage Letztverbrauch	Nachfrage Umwandlung	Volatile Erzeugung	Disponible Erzeugung	Zeitliche Verschiebung	Sektorale Verschiebung	Import Strom	Import grüne Brennstoffe
Zu								
Nachfrage Letztverbrauch		-	++	++	++	-	++	--
Nachfrage Umwandlung	-		++	--	-	++	+	--
Volatile Erzeugung	+	++		+/-	++	++	--	--
Disponible Erzeugung	+	--	+/-		-	++	-	++
Zeitliche Verschiebung	++	-	++	-		--	--	--
Sektorale Verschiebung	-	++	++	++	--		--	++
Import Strom	++	+	--	-	--	--		--
Import gr. Brennstoffe	--	--	--	++	--	++	--	

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Verdichtung zu Storylines – Wechselwirkungen zwischen den Achsen

#### Wesentliche Erkenntnisse und Schlussfolgerungen:

- Achsen innerhalb einer Kategorie tendenziell substituierend, z.B. Import von Elektronen vs. Brennstoffen, da unterschiedliche Ausgestaltungsoptionen einer systemischen Aufgabe abgebildet werden
- Nachfrage Stromverbrauch treibt Strombedarf aus inländischer Erzeugung oder Stromimporte
- Substituierende Effekte bei inländischer vs. ausländischer Stromerzeugung und Molekülproduktion
- **Zeitlicher Flexibilitätsbedarf** (inkl. disponibler Erzeugung) resultiert aus **inflexibler Stromnachfrage** und **volatiler Erzeugung**
- **Volatile Stromerzeugung** kann neben **zeitlicher Flexibilität** auch durch **sektorale Flexibilität** in das System integriert werden
- Hohe **Korrelation** zwischen der Ausprägung der Achsen des **Stromverbrauchs** und der **Flexibilitätsbereitstellung**
- Während zeitliche Flexibilität im Stromsystem tendenziell substituierend auf Importe wirkt (bezogen auf Leistung [GW]), ist **sektorale Flexibilität (Infrastruktur) Voraussetzung** für großskalige **Brennstoffimporte**.
- Gleichzeitig **hohe Umwandlung** bei **disponibler Stromerzeugung** systemisch **ineffizient**

# 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines

## Verdichtung zu Storylines – Auswirkungen von Treibern auf Achsen (Übersicht)

Treiber	Nachfrage Letztverbrauch	Nachfrage Umwandlung	Volatile Erzeugung	Disponible Erzeugung	Zeitliche Verschiebung	Sektorale Verschiebung	Import Strom	Import gr. Brennstoffe
<b>1</b> Gesellschaftliches Wachstum	++	++	++	++				
Sinkendes Nachfrage Niveau (Effizienz der Anlagen, Verbrauchsverhalten)	--	--	--	--				
<b>4</b> Förderung elektrifizierter Anwendungen	++	--	<b>2</b>		++	--		
Technologiefortschritt und Effizienz elektrifizierter Anwendungen	+	-			+	-		
Kostenentwicklung elektrifizierter Anwendung	++	--			++	--		
Offenheit ggü. Technologiewechsel	++	--			++	--		
Kostenentwicklung alternativer Anwendung	--	++			--	++		
Steuern und Umlagen für PtX-Anlagen	--	++			--	++		-
<b>5</b> Reg. Rahmen für netzentlastende Positionierung von PtX-Anlagen/lokale CO2-Bespreisungen bzw. Zertifikate für PtX	--	++	++	-	--	++		
Förderungen / Anreize zur Flexibilitätsbereitstellung	++	-	+	-	++			
Bereitschaft zur Flexibilitätsbereitstellung	++	-	+	-	++			
<b>3</b> Finanzierung / Förderung von H2-Infrastruktur	--	++			+/-	++	-	++
Ausbau von Gasinfrastrukturen	--	++				++	--	++
Verfügbarkeit von grünen Brennstoffen	-	++	-	++	-	++	-	+
Kosten für grüne Brennstoffe	-	++	-	++	-	++	-	+
Offenheit ggü. Infrastrukturausbau		-	+	-	-	-	+	
Lokale CO2-Bespreisungen bzw. Zertifikate	--	++	++	-	--	++		
<b>5</b> Bestrebungen zu Quartierslösungen oder dezentralen, klimaneutralen, autarken Netzen	++	-	+/-	-	++	-	--	-
<b>5</b> Förderung von EE-Anlagen / Wegfall EEG	<b>2</b>		<b>3</b>	++	-		+	-
<b>5</b> Freigabe von Flächen / Akzeptanz für Infrastruktur				++	--		+	-
<b>6</b> Ausbau der EU-Handelskapazitäten				+	-	-	++	--
Zubau an Erzeugungskapazitäten im Ausland				+	-	-	++	--
Akzeptanz für Stromim- und -exporte				+	--	-	++	--
<b>6</b> Stabile politische Partnerschaften				-	--	-	++	++
<b>6</b> Aversion ggü politischen Abhängigkeiten				+	++	+	--	--
Autarkiebestrebungen					++	++	--	--
<b>6</b> Zubau an Kernenergie im Ausland						+	-	-

# 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines

## Verdichtung zu Storylines – Auswirkung der Treiber auf die systemischen Achsen

### Wesentliche Erkenntnisse und Schlussfolgerungen:

1. Gesellschaftliche und techno-ökonomische Treiber, die die gesamte Nachfrage beeinflussen, führen tendenziell zu einer Skalierung der Nachfrage und damit der Transportaufgabe, nicht aber zu einer lokalen Erhöhung und einer strukturellen Veränderung der Transportaufgabe.
2. Die Achsen der Stromnachfrage und der Stromerzeugung werden von unterschiedlichen, im Wesentlichen voneinander unabhängigen Treibern beeinflusst. (→ Bandbreite in Storylines abzubilden)
3. Es besteht eine starke Korrelation zwischen Erzeugungsstruktur und Strom- sowie Brennstoffhandel mit dem Ausland / der den Handel ermöglichenden bestehenden Infrastruktur. (→ Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)
4. Die Achsen der **Stromnachfrage** und der **Flexibilitätsbereitstellung** werden durch ähnliche Treiber beeinflusst. Treiber, die eine zeitliche Flexibilisierung der direkten Stromnachfrage (z.B. E-Autos) befördern, bewirken auch einen Kostenvorteil elektrifizierter Anwendungen. (→ Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)
5. Die **Lokalisierungsfrage** ist in **Umwandlungs-Storylines** insb. **nachfrageseitig**, in **Elektrifizierungs-Storylines** insb. **erzeugungsseitig** relevant. (→ Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)
6. Der Umfang des **Imports** von Energieträgern ist stark von **politischen Entscheidungen** getrieben.

# 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines

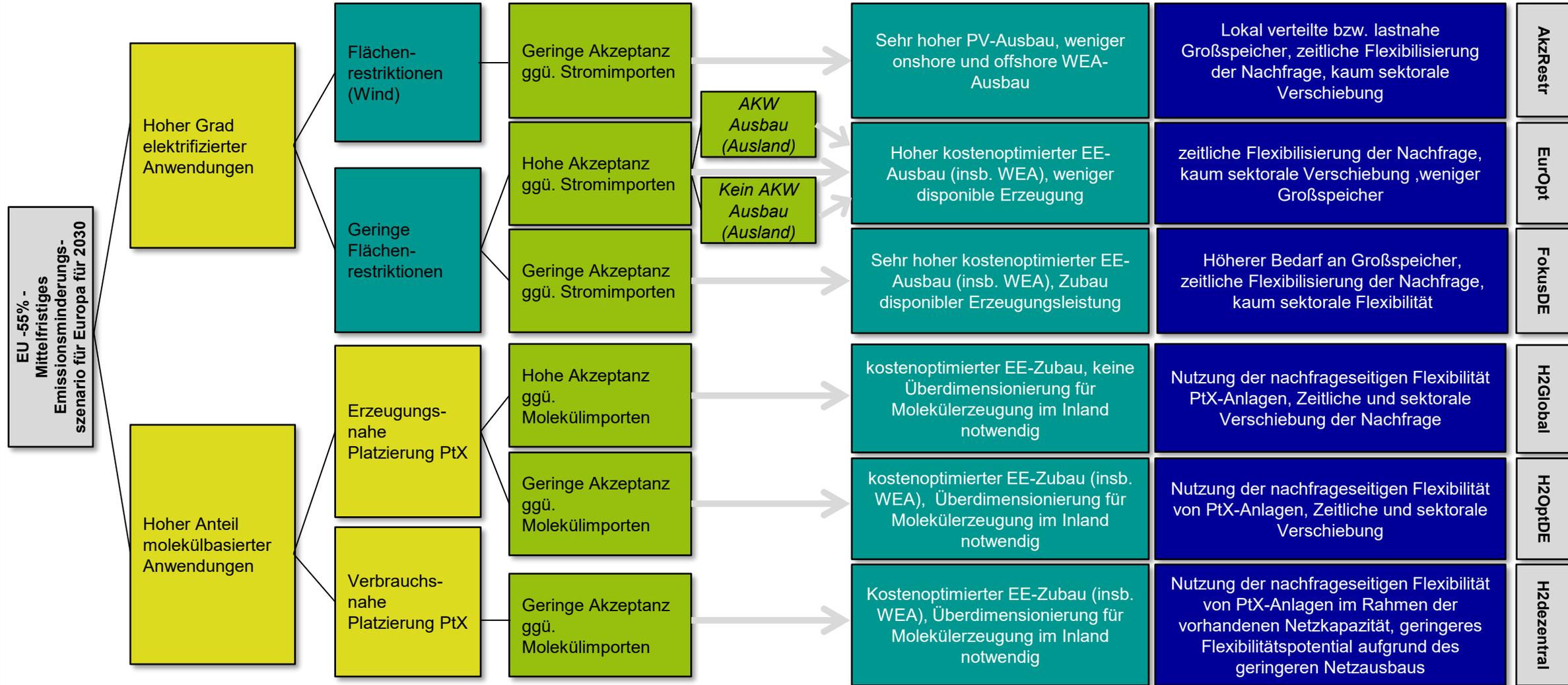
## Verdichtung zu Storylines

### Zusammenfassung:

- Direkte (Endverbrauchs-)Stromnachfrage (=Elektrifizierung) und Stromnachfrage durch Umwandlungstechnologien (=Einsatz von Molekülen) bilden weitgehend konkurrierende Optionen und damit entgegengesetzte Entwicklungen des Energiesystems ab. (→ Bandbreite ist in Storylines abzubilden; Kombination der Ausprägungen unwahrscheinlich)
- Die Lokalisierung der Stromnachfrage stellt nur in Energiesystemen mit einer hohen Nachfrage durch Umwandlungstechnologien einen relevanten Freiheitsgrad dar, da vor allem mit den Elektrolyseuren eine hohe Stromnachfrage frei zu lokalisieren ist. (→ Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)
- Die Lokalisierung der Stromerzeugungstechnologien stellt insbesondere in Storylines mit einer hohen Elektrifizierung (Nachfrage nicht frei positionierbar) einen relevanten Freiheitsgrad dar. (→ Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)
- Der Erzeugungspark ergibt sich als Folge aus der Stromnachfrage, dem Stromimport und dem Flexibilitätspotential. (→ Nicht alle Parameter müssen einzeln in Storylines festgelegt werden. Teilweise ergeben sie sich als Folgerung der festgelegten Parameter. → Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)
- Die zeitliche Flexibilitätsbereitstellung korreliert stark mit der Dominanz direkter Stromverbraucher bzw. Umwandlungstechnologien. (→ Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)
- Hohe Strom- bzw. Brennstoffimporte sind nur bei vorhandener bzw. ausgebauter Infrastruktur möglich und in einem dezentralen Szenario daher nicht sinnvoll. (→ Möglichkeit zur Storyline-Reduktion)

# 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines

## Ableitung relevanter Achsenkombinationen / Storylines



# 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines

## Referenzvariante: grundsätzliche Beschreibung

- **EU -55%: Mittelfristiges Emissionsminderungsszenario für Europa**

Europaweites Emissionsreduktionsziel von 55% ggü. 1990.

EE-Ausbau und regionale Verteilung auf Netzzonen entspricht dem Entwurf für den Szenariorahmen NEP 2035 (2021), für 2030 interpoliert zwischen 2020 und 2035.

Thermische Bestandskraftwerke plus endogener Ausbau von Gaskraftwerken (KWK + GuD + GT).

Endogene Ausbau- und Versorgungsentscheidungen im Gebäudewärme- und Industriewärmesektor.

Wasserstoff spielt im Energiesystem noch keine nennenswerte Rolle.

### **Hinweis:**

Die spezifische Parametrisierung für alle Storylines wird mit Blick auf die zentralen Parametersetzungen im [Kapitel 4](#) sowie im [Anhang 2](#) in größerem Detail gezeigt.

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil

- **Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil:**

Ein hoher Elektrifizierungsanteil entsteht insbesondere dadurch, dass für (neue) Anwendungen wie Mobilität und Wärme, aber auch für die Industrie (insbesondere Industrieöfen) die unterschiedlichen Elektrifizierungsoptionen ökonomisch attraktiv sind, die entsprechenden Technologien bzw. Technologiewechseloptionen verbraucherseitig angenommen werden und dass sich im Ergebnis ein signifikanter Anteil der Endenergienachfrage in den Strombereich verschiebt. Die ökonomische Vorteilhaftigkeit kann durch politische / regulatorische Förderungen, durch steigende Kosten fossiler Energieträger oder durch eine flexiblere Stromnachfrage entstehen.

Im Vergleich zu den Varianten mit einem hohen Wasserstoffanteil liegt die Stromnachfrage in Deutschland um bis zu 40% höher, in Europa ergeben sich entsprechende Entwicklungen.

Der Importpreis für H<sub>2</sub> von außerhalb Europas liegt auf einem mittleren bis hohen Niveau, so dass die Wasserstoffherzeugung für den verbleibenden Wasserstoffbedarf auch in Elektrolyseanlagen innerhalb Deutschlands bzw. Europas konkurrenzfähig ist, sich jedoch im Vergleich zu den konkurrierenden Elektrifizierungsoptionen (wo diese möglich sind) wirtschaftlich nicht durchsetzen können.

Die spezifische Parametrisierung der unterschiedlichen Storylines wird mit Blick auf die zentralen Parametersetzungen im [Kapitel 4](#) sowie im [Anhang 2](#) in größerem Detail gezeigt.

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil: grundsätzliche Beschreibung (1)

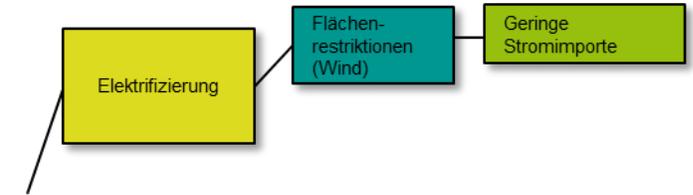
- **AkzRestr: Akzeptanz-Restriktionen**

Die elektrifizierten Anwendungen in den neuen Anwendungsgebieten setzen sich durch.

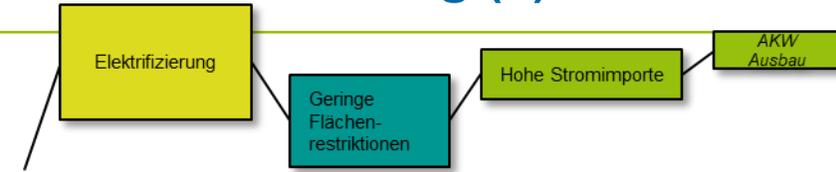
Gleichzeitig wachsen innerhalb Deutschlands aber die Vorbehalte bezüglich des Ausbaus von Windenergie und Stromnetzen zu Restriktionen: Die Flächenfreigaben für Wind kommen nicht voran, neue Netzausbauvorhaben werden aufgrund hoher Verzögerungen gehemmt angegangen: in 2050 liegen die Transportkapazitäten des Netzes weiterhin auf dem Niveau der Referenz **EU -55%**.

Diese Entwicklung kann unter anderem durch regulatorische Restriktionen (bspw. Abstandsgebote) oder fehlende politische Zielvorgaben bezüglich der regionalen Flächenbereitstellung für EE-Anlagen verstärkt werden.

Die Stromaustauschkapazitäten mit dem Ausland bleiben auf einem niedrigen Niveau (keine Veränderungen zur Referenz **EU -55%**). Anstelle des grenzüberschreitenden Handels und des internen Stromaustauschs in Deutschland wird sehr stark auf lokale Lösungen gesetzt, vor allem PV-Freiflächenanlagen und dezentrale Speichertechnologien spielen eine stark zunehmende Rolle.



### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil: grundsätzliche Beschreibung (2)



- **EurOpt: Europäische Optimierung**

Die elektrifizierten Anwendungen in den neuen Anwendungsgebieten setzen sich durch.

Gleichzeitig besteht in der EU ein Einvernehmen, sich gegenseitig mit der Schaffung von hohen Austauschkapazitäten bei der Realisierung der Energiewende zu unterstützen: die Stromaustauschkapazitäten zum Ausland haben sich im Vergleich zur Referenz **EU -55%** massiv vergrößert (verdoppelt).

Auch innerhalb Deutschlands bestehen regulatorisch, technisch oder akzeptanzseitig keine Beschränkungen des Stromnetzausbaus. Da das Netz weiterhin eine dem Strommarkt dienende Rolle einnimmt, stehen Netzausbaukosten praktisch nicht in Konkurrenz zu anderen Systemkosten\*.

Im Erzeugungsbereich wird verstärkt auf Windenergieanlagen gesetzt. Onshore-Wind kann sowohl im In- als auch im Ausland eine deutlich bedeutendere Rolle einnehmen als in der Storyline **AkzRestr.**, auch Offshore-Wind kann verstärkt zugebaut werden.

Diese Entwicklung kann durch ambitionierte politische Zielvorgaben bzgl. der regionalen Flächenbereitstellung getrieben werden. Eine Aufhebung restriktiver regionaler Vorgaben (wie bspw. Abstandsgebote), beschleunigte Genehmigungsverfahren sowie Möglichkeiten der Co-Nutzung der Flächen können diese Entwicklung ebenfalls befördern.



\* Modelltechnisch umgesetzt wird dies, indem für eine Erhöhung der innerdeutschen Transportkapazität ein „Strafterm“ aktiviert wird. So kann verhindert werden, dass willkürliche Stromflüsse Netzausbau hervorrufen.

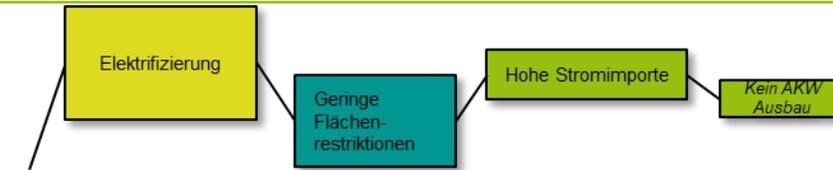
### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil: grundsätzliche Beschreibung (3)

- **Variante EurAtom: Atomausbau in anderen EU-Staaten**

Diese Storyline entspricht der Storyline **EurOpt** mit der Ausnahme, dass für das europäische Ausland angenommen wird, dass die diesbezüglich relevanten Länder beim Einsatz der Kernenergie bleiben bzw. die Kapazitäten der Kernkraftwerke im Vergleich zu den anderen Varianten erheblich steigen.

Diese Entwicklung kann insbesondere durch eine politische Förderung der Kernenergie im Ausland getrieben werden.

Gleichwohl bleibt Deutschland bei seinen Ausbauplänen für die Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien, die sich im Vergleich zur Storyline **EurOpt** weder bezüglich der Niveaus noch der regionalen Verteilung verändern.

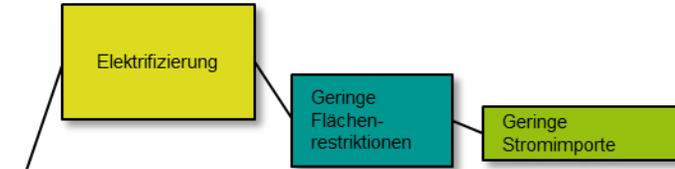


### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil: grundsätzliche Beschreibung (4)

- **Fokus DE: Fokus Deutschland**

Die elektrifizierten Anwendungen in den neuen Anwendungsgebieten setzen sich durch. Gleichzeitig wachsen innerhalb Deutschlands aber die Vorbehalte bezüglich einer starken Orientierung auf den europäischen Stromaustausch zu Restriktionen – insbesondere, wenn diese zusätzlichen Netzausbau verursacht: Die Austauschkapazitäten mit dem Ausland werden auf dem Niveau der Storyline **AkzRestr** bzw. der Referenz **EU -55%** belassen.

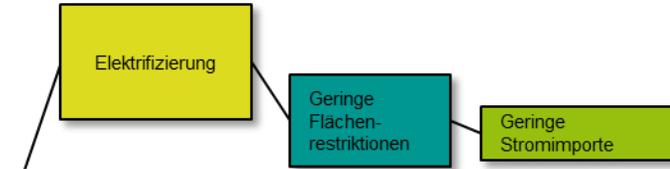
Innerhalb Deutschlands hingegen wird auf ökonomische Optimierung gesetzt, und es bestehen keine Vorbehalte gegenüber dem Stromnetzausbau (bzw. die dienende Rolle des Netzes wird nicht hinterfragt). Die notwendigen Flächen für den Ausbau von Onshore-Windkraft werden verfügbar gemacht, die Vorbehalte mit Blick auf den Naturschutz abgebaut, so dass es zu einem Ausbau entsprechend der Storyline **EurOpt** kommen kann. Auch die Offshore-Windkraft kann entsprechend ausgebaut werden.



### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil: grundsätzliche Beschreibung (5)

- Fokus DE: Fokus Deutschland (Fortsetzung)**

Der Importpreis von H2 von außerhalb Europas liegt auf einem mittleren Niveau. Mit diesem ggü. anderen Elektrifizierungsvarianten niedrigen Preis ist es Deutschland möglich, mehr Wasserstoff zu importieren, die Konkurrenzfähigkeit der einheimischen Wasserstoffelektrolyse sinkt. Es müssen weniger volatile Erzeugungskapazitäten (insb. Wind Onshore) ausgebaut werden. Trotzdem erreichen Wasserstoffanwendungen keine qualitativ neue Konkurrenzfähigkeit gegenüber den Elektrifizierungsvarianten und verdrängen diese nur in sehr geringem Umfang. Neben einer geringeren Rolle des Stromhandels bzw. Stromaustauschs existieren weniger potenziell netzentlastende Elektrolyseure. Verbraucher- und erzeugerseitige Flexibilitäten können vor diesem Hintergrund in größerer Vielfalt eine Rolle spielen.



# 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines

## Varianten mit hohem Wasserstoffanteil

- **Varianten mit hohem Wasserstoffanteil**

Für die Wasserstoff-Storylines wird angenommen, dass Umwandlungstechnologien für Wasserstoff massiv und in großem Umfang gefördert werden. Insbesondere steigt dadurch die Wasserstoffnachfrage für die Industrieöfen (im Vergleich zu den auf Elektrifizierung orientierten Storylines) deutlich. Zusätzlich wird insbesondere infrastruktureitig die Möglichkeit geschaffen, dass vermehrt dezentrale Wärmeanwendungen auf Wasserstoff-Basis zur Anwendung kommen und sich ein Verbraucherverhalten einstellt, bei dem der Technologiewechsel zu Elektrifizierungsoptionen nur gebremst vollzogen wird. Bei der endogenen Entscheidung, wie viel dezentrale Wärme aus H<sub>2</sub> erzeugt wird, besteht die Möglichkeit, vermehrt auf Wasserstoff zu setzen.

Die Elektrolyseleistung in den deutschen Netzregionen kann unbegrenzt, die im europäischen Ausland (unabhängig von der Storyline) ebenfalls in großem Umfang ausgebaut werden. Um die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen im Bereich Wasserstoff (auf der Anwendungs- und Erzeugungsseite) abzubilden, wird angenommen, dass der Importpreis für H<sub>2</sub> von außerhalb Europas zwischen den Storylines in einer erheblichen Bandbreite variiert.

Aufgrund der verstärkten verbrauchsseitigen Umstellung auf Wasserstoff besteht ein geringerer Anreiz, die Stromaustauschkapazitäten zum Ausland auszubauen (Niveaus vergleichbar zur Storyline **AkzRestr**).

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Wasserstoffanteil: grundsätzliche Beschreibung (1)

- **H2Global: H2-Durchbruch global**

Diese Storyline ist insbesondere durch ein sehr großes und preislich sehr attraktives Angebot von Wasserstoff aus Herkunftsregionen jenseits der EU geprägt.

Damit wird sowohl technologisch als auch kostenseitig ein Durchbruch der Wasserstofferzeugung angenommen, dessen Erzeugung global lukrativ geworden ist. Es bestehen stabile politische Partnerschaften und keine Vorbehalte ggü. Energieabhängigkeiten.

Ein umfassender Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur ermöglicht den weltweiten Wasserstoffhandel und signifikante Brennstoffimporte Deutschlands. Innerhalb Deutschlands wird zwar eine erzeugungsnahe Positionierung von Elektrolyseanlagen möglich, die einheimische Wasserstofferzeugung hat aber massive Schwierigkeiten, mit importiertem Wasserstoff zu konkurrieren. Insofern entsteht nur eine minimale Stromnachfrage aus der inländischen Wasserstofferzeugung. Der Ausbau von Windkraftwerken in Deutschland geht in diesem Marktumfeld zurück.

Akzeptanz-Restriktionen spielen in der Storyline keine Rolle. Das Netz nimmt weiterhin eine dem Strommarkt dienende Rolle ein, so dass die Netzausbaukosten praktisch nicht gegen andere Systemkosten optimiert werden.\*



\* Modelltechnisch umgesetzt wird dies, indem für eine Erhöhung der innerdeutschen Transportkapazität ein „Strafterm“ aktiviert wird. So kann verhindert werden, dass willkürliche Stromflüsse Netzausbau hervorrufen.

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Wasserstoffanteil: grundsätzliche Beschreibung (2)

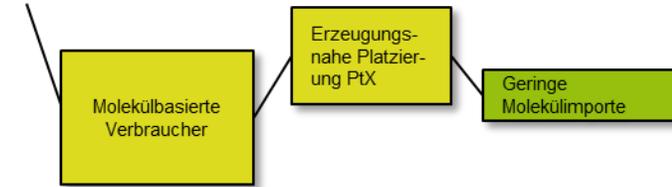
- **H2OptDE: H2-Optimierung Deutschland**

Diese Storyline beschreibt eine Entwicklung, in der die Klimaneutralitätsstrategie vor allem wegen massiver Vorbehalte gegenüber elektrischer Technologiewechseloptionen anstelle von Elektrifizierung auf Wasserstoffoptionen ausgerichtet wird.

Innerhalb Deutschlands ist das Wasserstoffnetz ausgebaut, und die Preisniveaus von importiertem Wasserstoff schaffen (wegen nur begrenzt stabiler bzw. langfristiger Handelsbeziehungen) Anreize, Wasserstoff erzeugungsnah zu produzieren und diesen anstelle von Strom zu transportieren. Ein verstärktes Autarkiebestreben in der Bevölkerung, instabile politische Partnerschaften oder eine fehlende weltweite Wasserstoffinfrastruktur könnten diese Entwicklung ebenso befördern.

Weitere Akzeptanz-Restriktionen spielen in der Storyline keine Rolle. Der Bedarf an inländischer Stromerzeugung (v.a. aus Windkraftanlagen) steigt.

Das Stromnetz nimmt eine dem Strommarkt dienende Rolle ein, so dass die Netzausbaukosten praktisch nicht gegen andere Systemkosten optimiert werden.\*



\* Modelltechnisch umgesetzt wird dies, indem für eine Erhöhung der innerdeutschen Transportkapazität ein „Strafterm“ aktiviert wird. So kann verhindert werden, dass willkürliche Stromflüsse Netzausbau hervorrufen.

### 3 Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines Varianten mit hohem Wasserstoffanteil: grundsätzliche Beschreibung (3)

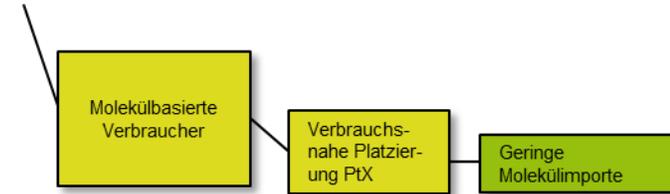
- **H2dezentral: H2-Fokus dezentral**

Die Storyline repräsentiert eine Entwicklung, in der sich politische bzw. regulatorische Rahmensetzungen nur schwerfällig vollziehen. Auf der Technologie-, Kosten- und Infrastrukturseite kommt es nicht zu Entwicklungen, aus denen sich klare Pfadentscheidungen in Richtung Elektrifizierung oder Wasserstoff ergeben.

Die Gasnetzinfrastruktur in Deutschland für Wasserstoff wurde nur rudimentär ausgebaut. Es kann angebots-, kosten- bzw. infrastrukturseitig nur wenig Wasserstoff importiert werden. Insbesondere der Wasserstoffpreis aus dem internationalen Raum bleibt hoch. Auch ein verstärktes Autarkiebestreben in der Bevölkerung sowie instabile politische Partnerschaften könnten diese Entwicklung befördern.

Damit besteht innerhalb Deutschlands der Anreiz, für die nachgefragten Wasserstoffmengen Elektrolyseure v.a. verbrauchsnahe zu platzieren.

Das Stromnetz nimmt weiterhin eine dem Strommarkt dienende Rolle ein, so dass die Netzausbaukosten praktisch nicht gegen andere Systemkosten optimiert werden.\*



\* Modelltechnisch umgesetzt wird dies, indem für eine Erhöhung der innerdeutschen Transportkapazität ein „Strafterm“ aktiviert wird. So kann verhindert werden, dass willkürliche Stromflüsse Netzausbau hervorrufen.

# 4 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

## Methodisches Vorgehen

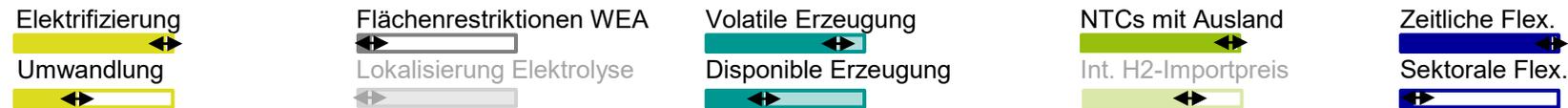
Festlegung der systemischen Achsen

Identifikation der relevanten techno-ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen **Deskriptoren** und **Treiber**

Identifikation der relevanten (**Wechsel**)wirkungen

Reduktion auf relevante **Storylines**

Quantifizierung der für die Storyline relevanten Deskriptoren



Quantifizierung der weiteren Deskriptoren durch **Simulationsmodell**

Erarbeitung von **Schlussfolgerungen**

# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

## Beschreibung des Modellierungs- & Optimierungsframeworks SCOPE SD

### Modellierungs- und Optimierungs-Framework SCOPE SD am Fraunhofer IEE

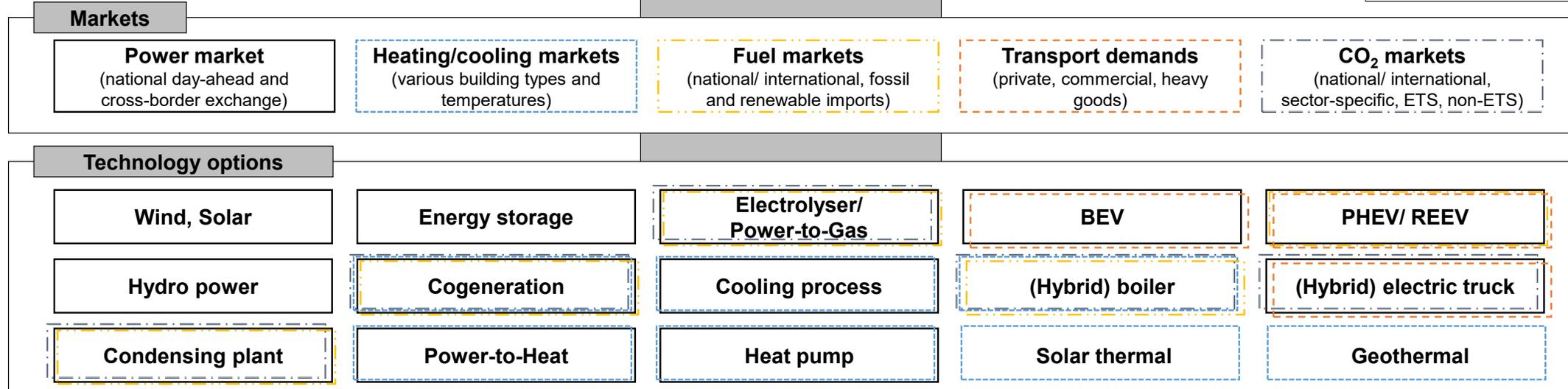
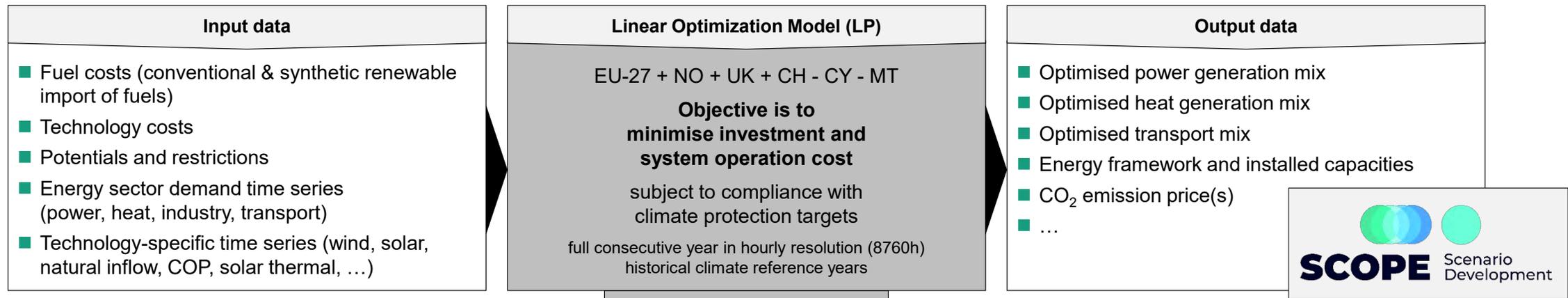
Das Energiesystemmodell SCOPE Scenario Development (SCOPE SD) am Fraunhofer IEE ist ein sektorenübergreifendes Kapazitätsausbauplanungsmodell (Capacity Expansion Planning, CEP) mit stundenscharfer Abbildung des Anlageneinsatzes im gesamten Jahr (8760 h) und Berücksichtigung aller relevanten Wechselwirkungen zwischen den zukünftigen Strom-, Gebäude-, Industrie- und Transportsektoren. Mit einem linearen Programmieransatz minimiert es die Kosten für Erzeugung, Speicherung und sektorenübergreifende Investitionen in Verbrauchertechnologien sowie für den Betrieb des Gesamtsystems. Es bietet umfassende Möglichkeiten zur Darstellung von traditionellen Stromversorgungssystemen und allen relevanten (Hybrid-) Technologiekombinationen an den sektoralen Schnittstellen zum Gebäude-, Industrie-, und Verkehrssektor.

Als technoökonomisches Bottom-Up-Modell zur Berechnung partieller Gleichgewichte trifft SCOPE SD deterministische Entscheidungen zum Kapazitätsausbau und zum Systembetrieb für ein bestimmtes Szenariojahr. Abhängig davon, wie weit das untersuchte Szenariojahr in der Zukunft liegt, analysiert das Modell sowohl Szenarien mit als auch ohne Bestandsanlagen („brown-field“ bzw. „green-field“). Eine große Stärke des Modells liegt in dem ganzjährigen Optimierungshorizont, was die konsistente Bewertung diverser wetterabhängiger Zeitreihensignale und die Erfassung sektorenübergreifender Korrelationen ermöglicht. Nationale und internationale Treibhausgasemissionsbudgets (z. B. separate Ziele für EU-ETS / Nicht-ETS) können die Investitionsentscheidungen in Transformationsszenarien hin zur Klimaneutralität beeinflussen. Durch die explizite Modellierung von nationalen und europaweiten Brennstoffmärkten kann die Verwendung von einerseits fossilen und andererseits synthetischen erneuerbaren Energieträgern unterschieden werden, die entweder importiert oder über Elektrolyseure und weitere Umwandlungsschritte im Inland hergestellt werden.

Eine grafische Übersicht des Modells ist auf der folgenden Folie dargestellt. Für aktuelle Beschreibungen und mathematische Formulierungen des Modells siehe bspw. [Härtel & Ghosh, 2020], [Härtel & Korpås, 2021] und [Böttger & Härtel, 2022].



# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines Modellierungs- & Optimierungsframework SCOPE Scenario Development (SCOPE-SD)



# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

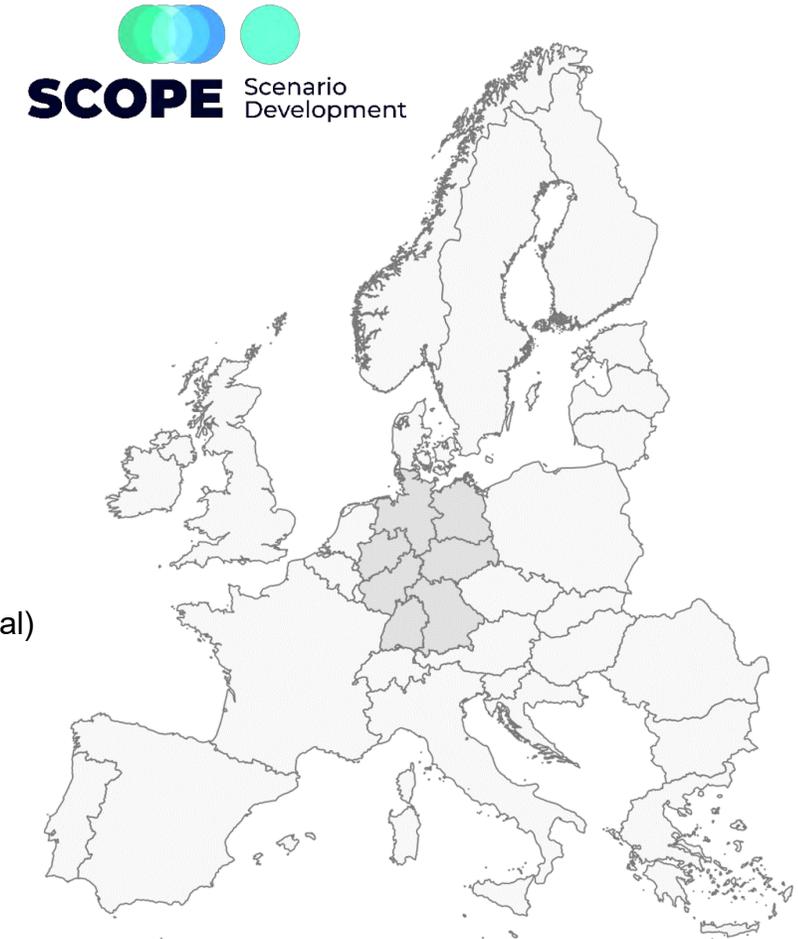
## SCOPE SD Simulationen und geographischer Fokus

### Implementierung und Simulation der Storylines

- Sektorenübergreifendes Ausbau- u. Einsatzplanungsmodell
- Geographischer Fokus auf europäischem Gesamtsystem: EU-27 + NO + UK + CH (– CY – MT)
- Deutschland wird mit 7 individuellen Netzregionen betrachtet
- Ganzjahresbetrachtung in stündlicher Auflösung
- Meteorologisches Bezugsjahr 2012
- Fokus auf eingeschwungenen Endzustand des Systems in DE / Europa bis 2050 (netto-neutral)
- Kein Transformationspfad
- Grundsätzlich endogene Entscheidungen aber auch exogene Vorgaben möglich
- Quantifizierung und Berechnung von insgesamt 8 Storylines:  
1 mittelfristiges Referenzszenario (EU -55%)  
6 Storylines mit 1 Variante (AkzRestr, EurOpt/EurAtom, FokusDE, H2Global, H2OptDE, H2dezentral)

### Fokus der Auswertung

- Stromtransportaufgaben zwischen den für Deutschland betrachteten Netzregionen
- Austauschmengen und -kapazitäten für Import-, Export-, und Transitflüsse
- Ausbauentscheidungen für Erzeugungs- und Verbrauchstechnologien



# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

## Übersicht der zur Variation erfassten SCOPE-SD-Parameter

### Stromerzeugung

- Onshore Wind (oberes Potenzial)
- Offshore Wind (unteres Potenzial)
- PV (Potenzialgrenzen)
- Kernkraft im europäischen Ausland

### (Strom-)verbrauch

- Herkömmlicher Verbrauch
- Dezentrale u. zentrale Gebäudewärmeversorgung (Bedarfe / Technologieoptionen)
- Industriewärmeversorgung Heißwasser, Dampf, Öfen (Bedarfe / Technologieoptionen)
- E-PKW (Bedarfe / Technologieoptionen)
- E-LKW (Bedarfe / Technologieoptionen)
- Elektrolyse (Potenzialgrenzen)

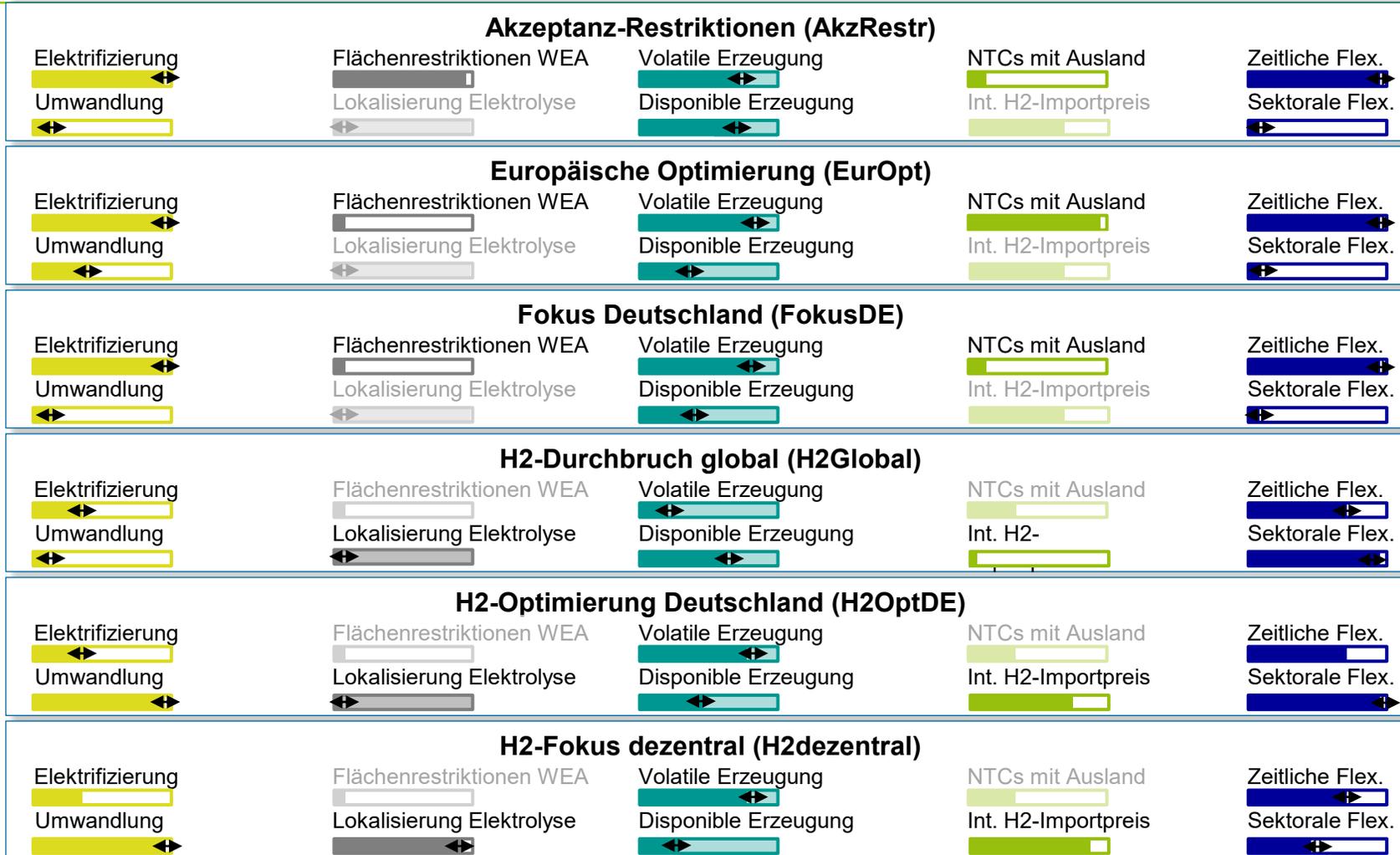
### Flexibilität

- Anteil flexibles Ladeverhalten von E-PKW (BEV + HEV)
- Hybridauslegung E-LKW
- Größe zentrale Wärmespeicher
- Größe dezentrale Wärmespeicher
- Nutzungsmodus Eigenstromspeicher

### Ausland

- Austauschkapazitäten mit und im europäischen Ausland
- Austauschkapazitäten zwischen den deutschen Netzregionen
- Importpreis H2 / PtX

# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines Ausprägungen der Deskriptoren als Input für SCOPE SD



**Hinweis:**

Im [Anhang 2](#) sind sämtliche Schlüsselparameter für die Modellierung dargestellt und die entsprechenden Literaturangaben ausgewiesen, d.h.

- exogene Vorgaben,
- Mindestwerte (Bounds),
- Höchstwerte (Bounds).

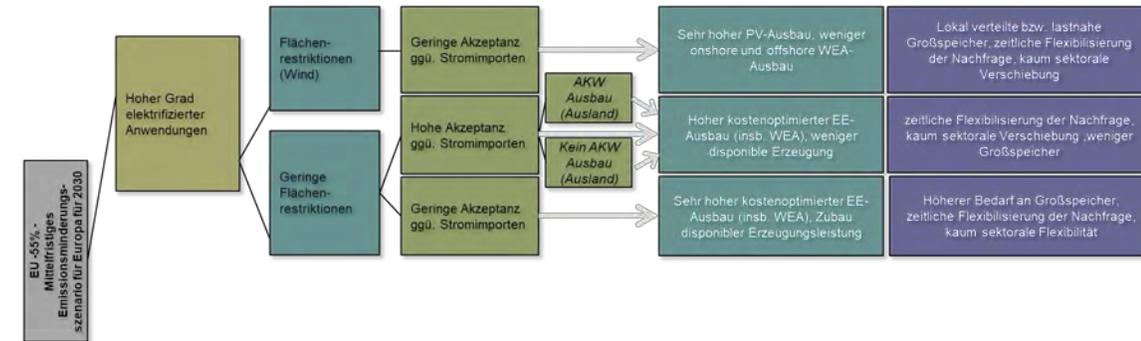
# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

## Ausprägungen der Deskriptoren (1)

- Es wird eine Übersicht über die wesentliche Quantifizierung der Storylines gegeben:
  - Fokus auf charakteristischen Kennzahlen, die für die Storyline prägend sind (vgl. [Anhang 2](#))

### Varianten mit hohem Elektrifizierungsanteil:

- Neue Stromanwendungen, insb. Industrie (Öfen) und Verkehr (Schwerlastverkehr):
  - im Vergleich zu den Varianten mit einem hohen Wasserstoffanteil liegt die Stromnachfrage in DE um ca. 100 TWh höher, in Europa um ca. 470 TWh
  - weitere Nachfrageerhöhung durch Freiraum der modellendogenen Entscheidungen ermöglicht
- Importpreis für H2 von außerhalb Europas liegt (mit Ausnahme von FokusDE) als Mainstream-Annahme bei 85 € / MWh<sub>th</sub> bzw. 2,55 € / kg H2



# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

## Ausprägungen der Deskriptoren (2)

### AkzRestr: Akzeptanz-Restriktionen

- Ausbau Wind onshore in Deutschland auf max. 115 GW beschränkt
- Ausbau Wind offshore in Deutschland beträgt minimal 41 GW
- kein innerdeutscher Netzausbau im Vergleich zur Referenz EU -55%
- keine Erhöhung der Stromaustauschkapazitäten mit dem Ausland im Vergleich zur Referenz EU -55%

### EurOpt: Europäische Optimierung

- Verdopplung der Stromaustauschkapazitäten zum Ausland im Vergleich zur Referenz EU -55%
- innerdeutscher Netzausbau unbegrenzt ermöglicht (endogene Entscheidung)
- Ausbau Wind onshore in Deutschland auf bis zu 180 GW ermöglicht
- Ausbau Wind offshore beträgt minimal 71 GW

### Variante EurAtom: EU Atomausbau

- Parametrierung entspricht der Storyline EurOpt
- Ausnahme: 76 GW anstelle von 24 GW installierte Leistung aus Atomkraftwerken
- EE-Ausbaupläne in Deutschland sind auf Ergebnisse der Storyline EurOpt fixiert

# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines Ausprägungen der Deskriptoren (3)

## Fokus DE: Fokus Deutschland

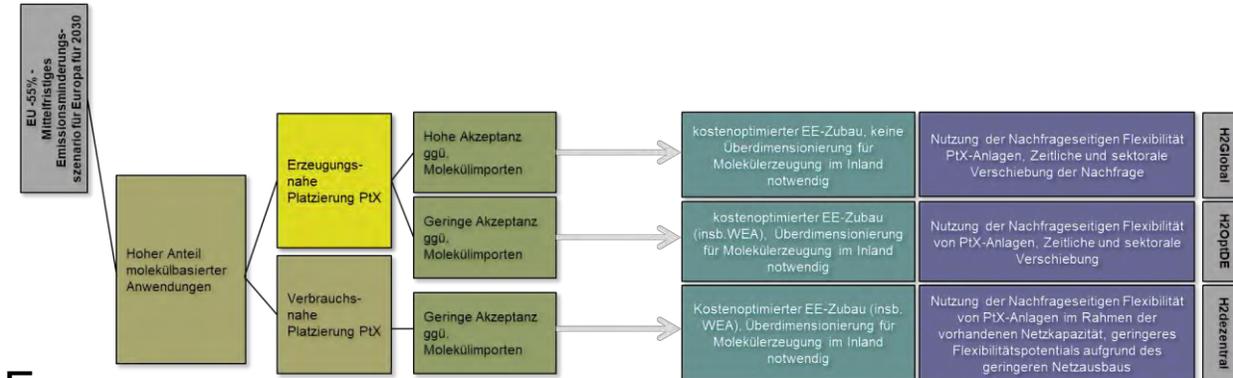
- Austauschkapazitäten mit dem Ausland entsprechen denen der Storyline AkzRestr
- Innerdeutscher Netzausbau unbegrenzt ermöglicht (endogene Entscheidung)
- Ausbau Wind onshore in Deutschland auf bis zu 180 GW ermöglicht
- Ausbau Wind offshore beträgt minimal 71 GW
- niedriges Niveau für Importpreis für H<sub>2</sub> von außerhalb Europas: 73 € / MWh<sub>th</sub> (2,2 € / kg H<sub>2</sub>)

# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

## Ausprägungen der Deskriptoren (4)

### Varianten mit hohem Wasserstoffanteil:

- anstelle von einer Elektrifizierung werden Anwendungen auf die Nutzung von Wasserstoff umgestellt.
- Im Vergleich zu den Elektrifizierungs-Storylines:
  - Wasserstoffnachfrage der Industrieöfen in DE um 74 TWh höher, in Europa um 259 TWh
  - Wasserstoffnachfrage des Schwerlastverkehrs in DE um 40 TWh höher, in Europa um 197 TWh
  - weitere Nachfrageerhöhung durch Freiraum der endogenen Entscheidungen ermöglicht (insb. dezentrale Wärme aus H<sub>2</sub>)
- Ausbau der Elektrolyseure in DE unbegrenzt möglich, in Europa auf 409 GW<sub>el</sub>\* begrenzt
- keine Erhöhung der Stromaustauschkapazitäten mit dem Ausland im Vergleich zur Referenz **EU -55%**
- Ausbau Wind onshore in Deutschland auf max. 150 GW beschränkt



\* Diese Begrenzung ist notwendig, um zu vermeiden, dass in kleinen Ländern mit guten EE-Ressourcen unrealistisch hohe Elektrolyseverbräuche entstehen.

## 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines Ausprägungen der Deskriptoren (5)

### H2Global: H2-Durchbruch global

- Importpreis für H2 von außerhalb Europas liegt bei 50 € / MWh<sub>th</sub> bzw. 1,50 € / kg H2
- Ausbau Wind offshore in Deutschland beträgt minimal 41 GW
- Ausbau Wind onshore in Deutschland auf max. 150 GW beschränkt
- innerdeutscher Netzausbau unbegrenzt ermöglicht (endogene Entscheidung)

### H2OptDE: H2-Optimierung Deutschland

- innerdeutscher Netzausbau Strom unbegrenzt ermöglicht (endogene Entscheidung)
- Konfiguration der Storyline entspricht H2Global mit folgenden Ausnahmen:
  - der Importpreis für H2 von außerhalb Europas liegt bei 85 € / MWh<sub>th</sub> bzw. 2,55 € / kg H2.
  - Ausbau Wind offshore in Deutschland beträgt minimal 71 GW
- Innerdeutscher Netzausbau Strom unbegrenzt ermöglicht (endogene Entscheidung)

# 4 Numerische Analyse der Storylines: Implementierung der Storylines

## Ausprägungen der Deskriptoren (6)

### H2dezentral: H2-Fokus dezentral

- Abbildung der nicht großflächig ausgebauten Gasnetzinfrastruktur durch Mindestleistung an Elektrolyseuren in allen Regionen
- innerdeutscher Netzausbau unbegrenzt ermöglicht (endogene Entscheidung)
- untere Potenzialgrenze Elektrolyseleistung von in Summe  $60 \text{ GW}_{el}$  in Deutschland für Onsite-Industriestandorte
- der Importpreis für H2 von außerhalb Europas liegt bei  $110 \text{ €} / \text{MWh}_{th}$  bzw.  $3,30 \text{ €} / \text{kg H}_2$ .
- Konfiguration der Storyline entspricht sonst H2OptDE

# 5 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Methodisches Vorgehen

Festlegung der systemischen Achsen

Identifikation der relevanten techno-ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen **Deskriptoren** und **Treiber**

Identifikation der relevanten (**Wechsel**)wirkungen

Reduktion auf relevante **Storylines**

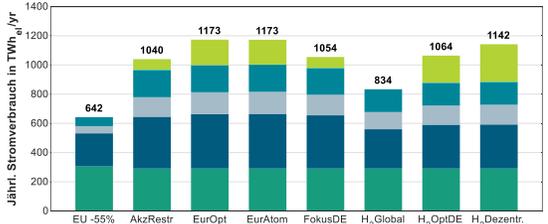
Quantifizierung der für die Storyline relevanten Deskriptoren

Quantifizierung der weiteren Deskriptoren durch **Simulationsmodell**

Akzeptanz-Restriktionen (AkzRestr)			
Elektrifizierung	Flächenrestriktionen (Fläch)	Wassernutzung (Wass)	NTCA mit Auswert
Umwandlung	Landnutzung (Land)	Dezentrale Erzeugung	Statische Planung
Elektrifizierung	Europäische Optimierung (EurOpt)	NTCA mit Auswert	Statische Planung
Umwandlung	Flächenrestriktionen (Fläch)	Wassernutzung (Wass)	NTCA mit Auswert
Umwandlung	Landnutzung (Land)	Dezentrale Erzeugung	Statische Planung
Fokus Deutschland (FokusDE)			
Elektrifizierung	Flächenrestriktionen (Fläch)	Wassernutzung (Wass)	NTCA mit Auswert
Umwandlung	Landnutzung (Land)	Dezentrale Erzeugung	Statische Planung
Elektrifizierung	H <sub>2</sub> Durchbruch global (H2Global)	NTCA mit Auswert	Statische Planung
Umwandlung	Landnutzung (Land)	Dezentrale Erzeugung	Statische Planung
Elektrifizierung	H <sub>2</sub> Optimierung Deutschland (H2OptDE)	NTCA mit Auswert	Statische Planung
Umwandlung	Landnutzung (Land)	Dezentrale Erzeugung	Statische Planung
Elektrifizierung	H <sub>2</sub> Fokus dezentral (H2FokusDezent)	NTCA mit Auswert	Statische Planung
Umwandlung	Landnutzung (Land)	Dezentrale Erzeugung	Statische Planung



**SCOPE** Scenario Development

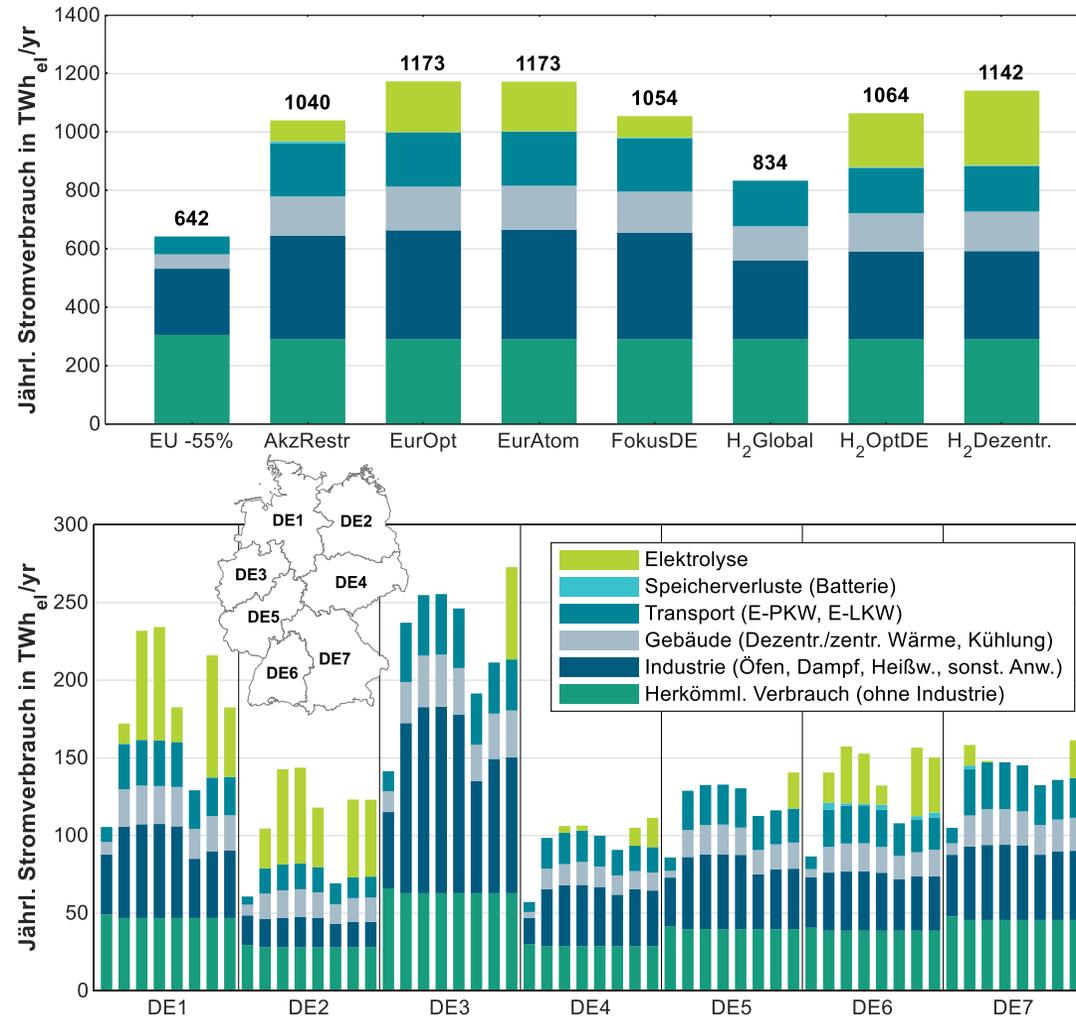


Scenario	Consumption (TWh <sub>el</sub> /yr)
EU -55%	642
AkzRestr	1040
EurOpt	1173
EurAtom	1173
FokusDE	1054
H <sub>2</sub> Global	834
H <sub>2</sub> OptDE	1064
H <sub>2</sub> Dezent.	1142

Erarbeitung von **Schlussfolgerungen**

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

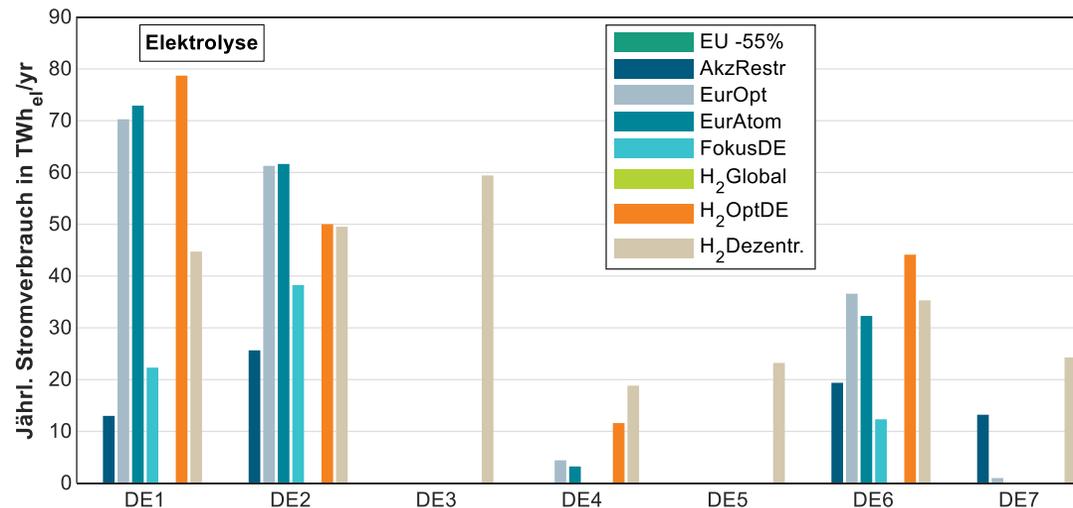
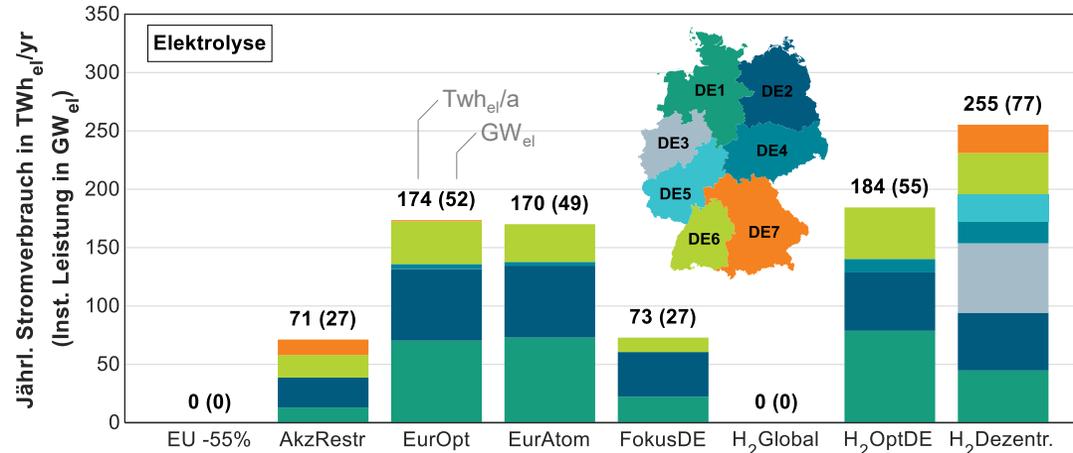
## Strombedarfe für Gesamtdeutschland und seine 7 Netzregionen



- Die Endverbrauchsstruktur für Strom in Industrie- und Transportsektoren ist durch Pfad der Storylines (strom- vs. wasserstofflastige Storylines) bereits weitestgehend exogen bestimmt:
  - exogen vorgegebene Stromnachfrage in DE um 71 TWh höher, in Europa um 320 TWh
- Endogene Veränderungen der Stromnachfrage kommen insbesondere durch:
  - Stromverbrauch der Elektrolyse-Anlagen
  - Industrie- und Fernwärmebereitstellung durch KWK-Anlagen und Elektrodenkessel
- Bandbreite des Elektrolysestromverbrauchs von 0 (**H2Global**) bis 255 TWh<sub>el</sub>/a (**H2dezentral**)
- Ergebnis:** Elektrolyse spielt im zukünftigen System mit Blick auf die Stromnachfrage eine zentrale Rolle bzw. markiert die signifikantesten Veränderungen

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Exkurs: Installierte Leistung und Erzeugung von Elektrolyse-Anlagen

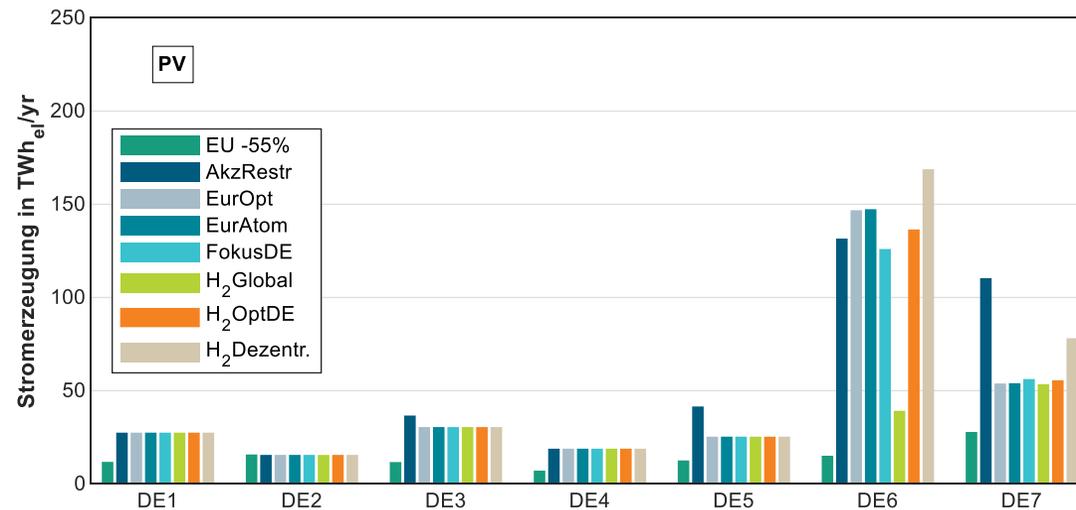
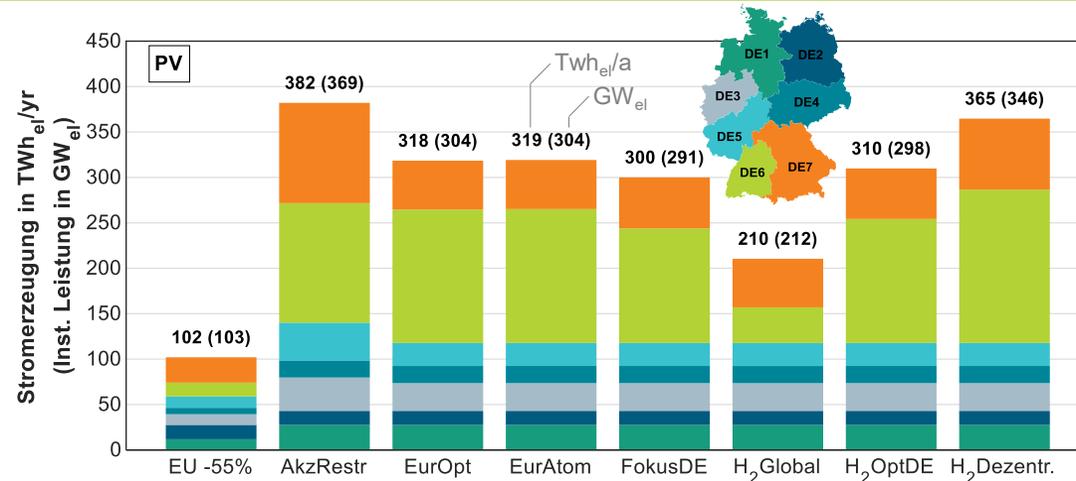


- Umfang und Lokalisierung der Elektrolyse unterscheidet sich stark zwischen den Storylines
- Vorzugsregionen für Platzierung im Norden (Versorgung durch Wind) und in geringerem Ausmaß im Süden (Versorgung durch Freiflächen-PV)
- Sofern Freiheitsgrade gegeben (Gasnetzinfrastruktur vorhanden), erfolgt die modellendogene Platzierung zuerst im Norden, dann im Süden und zuletzt in den Zwischenregionen
- Die Gasnetzinfrastruktur wird in allen Storylines mit Ausnahme von **H2dezentral** als gegeben vorausgesetzt. Die fehlende Infrastruktur wird in der Storyline **H2dezentral** dadurch abgebildet, dass es einen Mindestausbau entsprechend von On-Site-Industriestandorten gibt.

**Ergebnis:** Nur in den Regionen DE3-5 und DE7 findet darüber hinaus kein Ausbau statt.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Installierte Leistung und Erzeugung von Photovoltaik (Dachfläche + Freifläche)



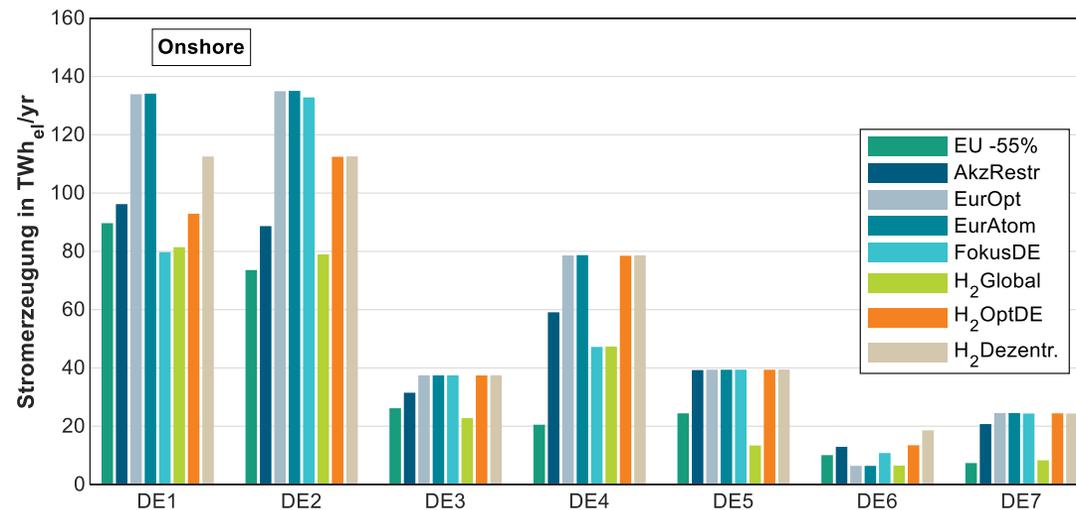
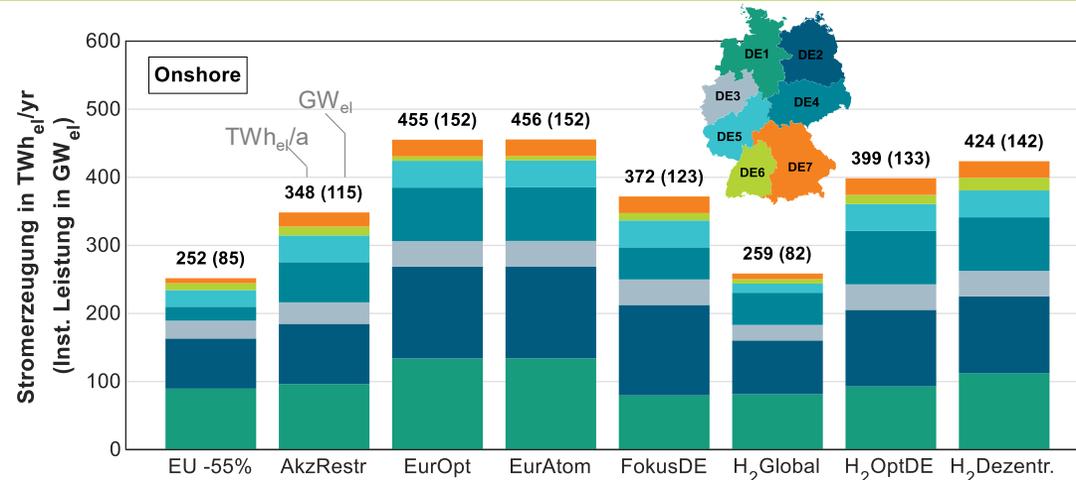
- Hoher Anteil der Dachflächen-Photovoltaik (208 GW<sub>el</sub>) ist durch die Vorgabe einer hohen unteren Ausbaugrenze entsprechend der Potentialobergrenze exogen vorgegeben und führt zu einem Solarstromangebot in allen Netzregionen
- Endogener Ausbau umfasst nur Freiflächen-Photovoltaik (unbegrenzt):
  - Diese Option wird fast ausschließlich in den Regionen DE6 und DE7 gezogen (vgl. Abbildung unten)
  - Im 50Hertz-Gebiet wird in der gesamtwirtschaftlichen Optimierung die Option der Freiflächen-Photovoltaik nicht gezogen, da sie in starker Konkurrenz zu Wind Onshore steht.

### Ergebnisse

- Zusätzlicher Ausbau in Süddeutschland aufgrund hoher Stromnachfrage und schlechterer Wirtschaftlichkeit von Onshore-Windenergieanlagen
- Bandbreite der Gesamtleistung PV aus Dach- und Freifläche zwischen 212 GW<sub>el</sub> (**H2Global**) und 369 GW<sub>el</sub> (**AkzRestr**)

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

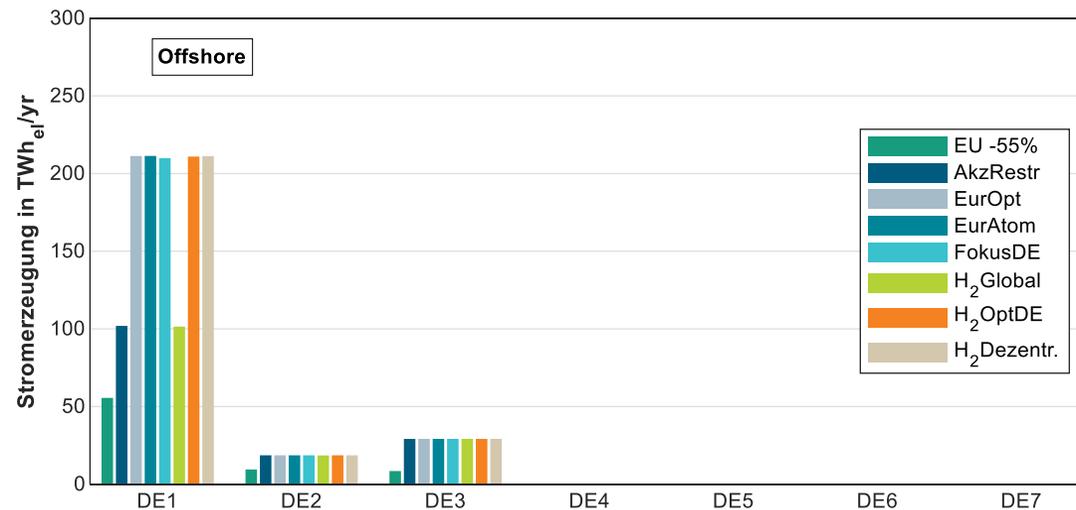
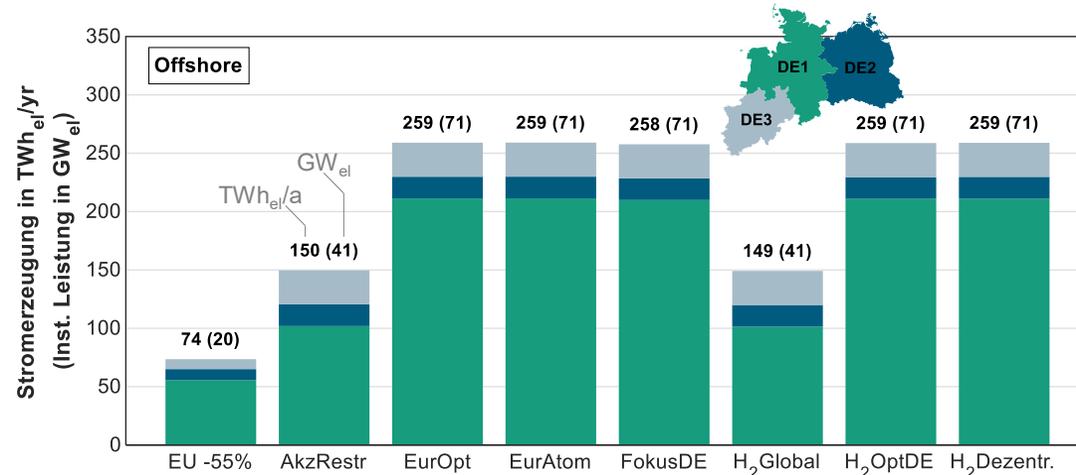
## Installierte Leistung und Erzeugung von Onshore Wind



- Die Bandbreite des Onshore-Wind-Ausbaus beläuft sich auf 82 GW<sub>el</sub> (**H2Global**) bis 152 GW<sub>el</sub> (**EurOpt/EurAtom**)
- Eine sehr hohe Akzeptanz (Obergrenze 2% der Bundesfläche, hier repräsentiert durch ein Ausbaupotenzial i. H. v. 180 GW<sub>el</sub>) wird aufgrund schlechterer Wirtschaftlichkeit einiger Standorte nicht in allen Netzregionen vollständig ausgereizt.
- Es kann eine Konkurrenzsituation von Onshore Wind mit Freiflächen-Photovoltaik entstehen, insb. an Standorten mit im Vergleich schlechteren Ertragsbedingungen für Onshore-Windenergieanlagen. (SCOPE SD berücksichtigt bei den Ausbauentscheidungen für jede Technologieklasse verschiedene Standortkategorien mit letztlich unterschiedlichen Stromgestehungskosten.)

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

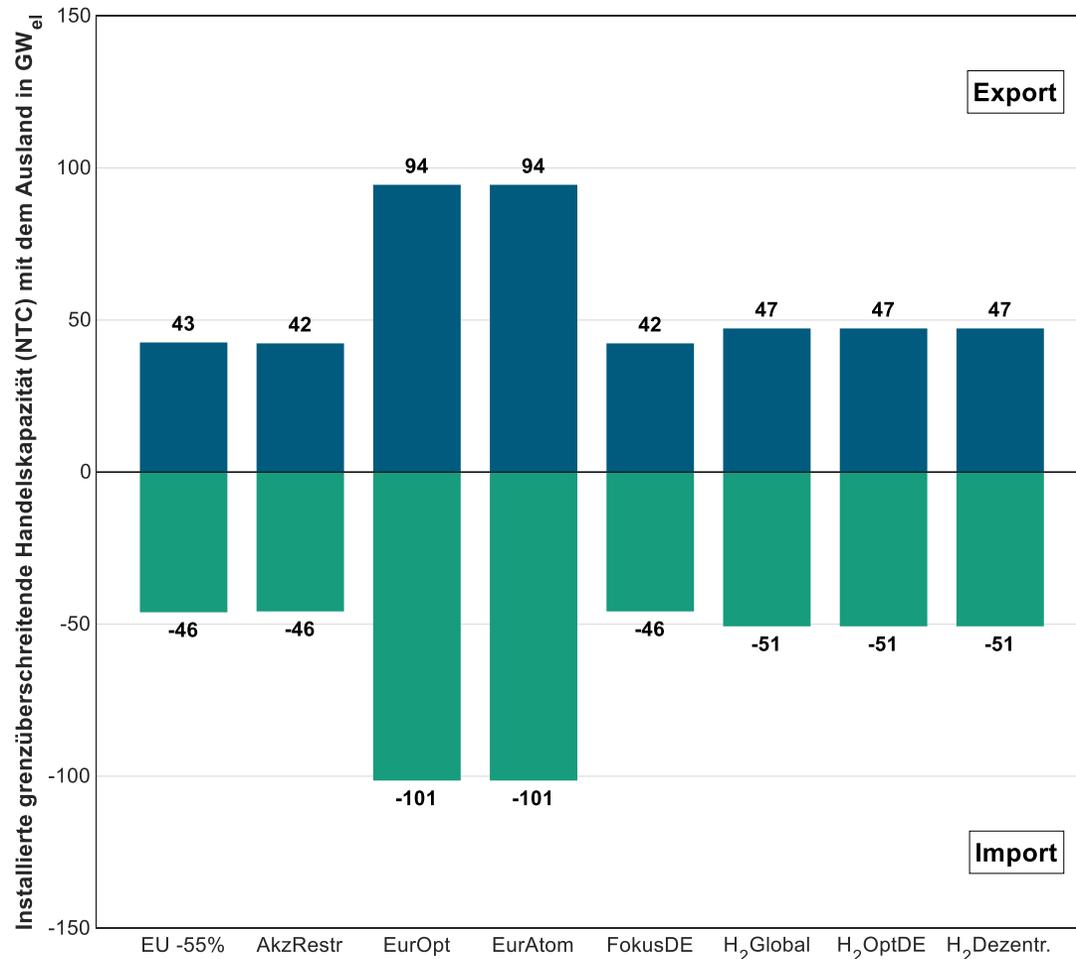
## Annahmen und Ergebnisse: Offshore Wind



- Endogener Ausbau über exogene Untergrenze möglich, aufgrund der Einbeziehung der hohen Netzanschlusskosten in die Optimierung aber unwirtschaftlich („gesamtgesellschaftliches Kalkül“)
- Annahme im Projekt: Anlandung aller zusätzlichen Kapazität >41 GW<sub>el</sub> in DE1 (ohne konkrete technische Verortung an Netzanschlusspunkten), siehe hierzu auch [Anhang 2](#)
- Notwendiger Ausbau von separaten Offshore-Netzanbindungskorridoren oder alternativ Elektrolyseure im Netzbetrieb werden nur vereinfacht abgebildet
- Hybride Interkonnektoren oder Offshore-Insel-Konzepte sind hier nicht betrachtet.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

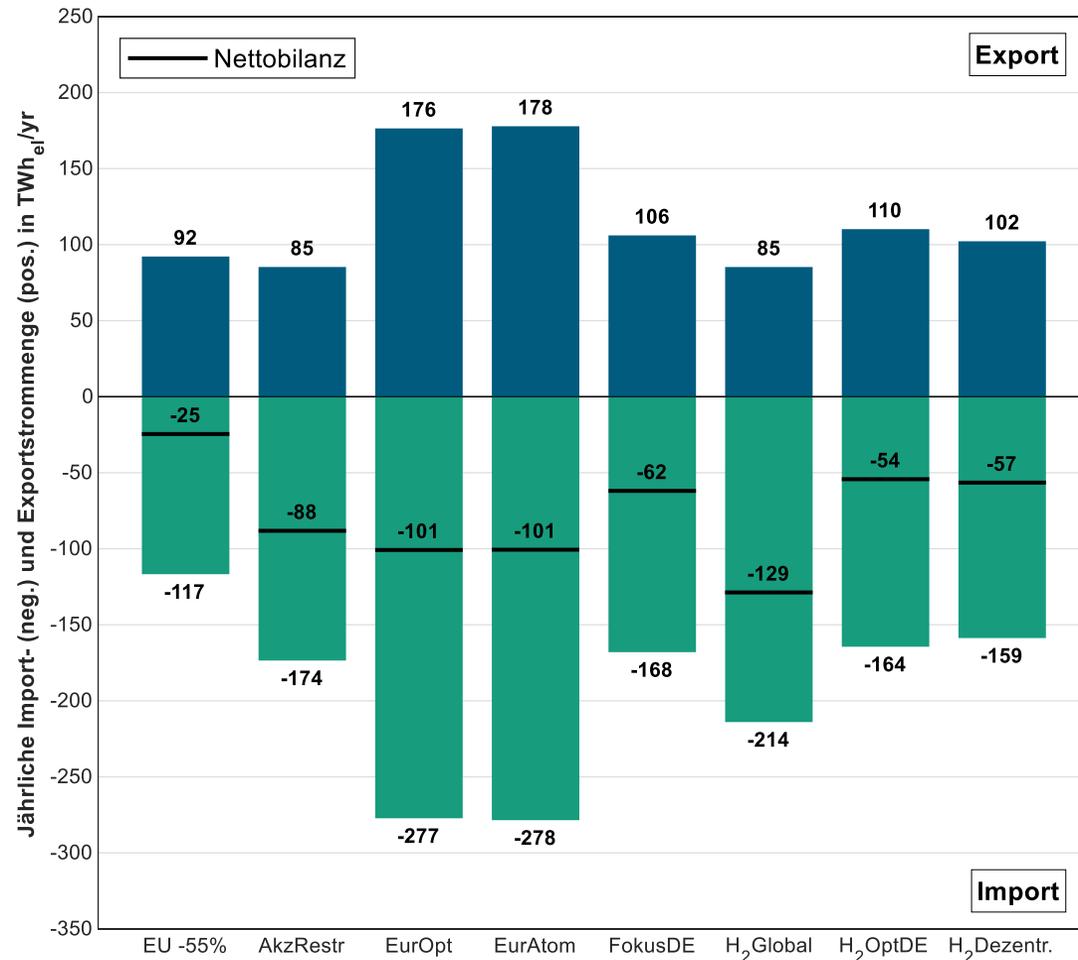
## Grenzüberschreitende Handelskapazität (NTC) für Deutschland mit Ausland



- Für die Implementierung der Storylines hinsichtlich des Stromhandels mit dem Ausland werden drei verschiedene Szenarien für den grenzüberschreitenden Handel von Deutschland mit seinen Nachbarn berücksichtigt
- Restringiertes Szenario mit bis zu 46 GW<sub>el</sub> Importkapazität und 43 GW<sub>el</sub> Exportkapazität dient zur Implementierung der Referenz (**EU -55%**) sowie der Storylines **AkzRestr** und **FokusDE**
- Mittleres Szenario mit bis zu 51 GW<sub>el</sub> Importkapazität und 47 GW<sub>el</sub> Exportkapazität dient zur Implementierung der Storylines **H2Global**, **H2OptDE** und **H2dezentral**
- Erweitertes Szenario mit bis zu 101 GW<sub>el</sub> Importkapazität und 94 GW<sub>el</sub> Exportkapazität dient zur Implementierung der Storylines **EurOpt** und **EurAtom**
- Alle grenzüberschreitenden Handelskapazitäten sind als freie Kapazität ohne netztechnische Einschränkung durch Offshore-Winderzeugungsanlagen zu verstehen.
- Für weitere Infos siehe auch [Anhang 2](#) und [Anhang 3](#).
- ➔ Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland wird in Storylines mit geringen Austauschkapazitäten wirksam

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Nettoimporte von Strom



- Deutschland ist unabhängig von der Storyline ein Nettoimporteur von Strom
- In den Storylines **EurOpt/EurAtom** kommt es auch aufgrund der hinterlegten höheren Stromaustauschkapazitäten mit knapp 280 TWh<sub>e</sub>/a Import und knapp 180 TWh<sub>e</sub>/a Export zu den höchsten Stromaustauschen mit dem europäischen Ausland.
  - Deutlicher Treiber für die inländische Transportaufgabe
- Die Storylines **AkzRestr** und **H2Global** fallen mit einer geringeren Exportmenge in Höhe von 85 TWh<sub>e</sub>/a und einer (bei **H2Global** deutlich höheren) Importmenge aus dem Storyline-Set heraus.
- Die Storyline **H2Global** erzielt mit 129 TWh<sub>e</sub>/a den höchsten Nettoimport. Verursacht ist dies insbesondere durch den geringen Ausbau Wind Offshore.
- Die Ergebnisse für die verbleibenden Storylines fallen mit ca. 100 TWh<sub>e</sub>/a Export und gut 160 TWh<sub>e</sub>/a Import ähnlich aus.
- Die Storylines **FokusDE** und **AkzRestr** bieten zwar den begrenztesten Lösungsraum, verursachen aber dennoch höhere Austauschbilanzen als die Storylines **H2OptDE** und **H2dezentral**.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Allgemeine Hinweise zur Analyse der Transportaufgaben

- Es wird grundsätzlich zwischen der auf einem Korridor „maximal genutzten Transportkapazität“ und der „installierten Transportkapazität“ unterschieden.
- Die maximal genutzte Transportkapazität je Korridor und insb. je Flussrichtung muss nicht notwendigerweise der installierten Transportkapazität eines Korridors entsprechen.
- Sobald es zu einem Ausbau auf einem Transportkorridor kommt, entspricht die maximal genutzte Kapazität zumindest in einer Flussrichtung auch der installierten Transportkapazität.
- In der Referenz **EU-55%** und in der Storyline **AkzRestr** hat das Modell keinen Transportkapazitätsausbau berücksichtigt, d.h. beide Varianten besitzen dasselbe „Startnetz“ mit einer installierten Transportkapazität in Höhe von 83,4 GW über alle Korridore (inkl. HGÜ) zwischen den deutschen Netzregionen.
  - Hier kann die maximal genutzte Transportkapazität unter der installierten Transportkapazität liegen und sich zwischen den Storylines unterscheiden.
- In allen anderen Storylines wurden endogene Transportkapazitätsausbauentscheidungen zwischen den für Deutschland modellierten Netzregionen getroffen.
  - Sofern ein Ausbau auf dem Korridor standfand, muss die maximal genutzte Transportkapazität zumindest in einer Flussrichtung der installierten Transportkapazität entsprechen.

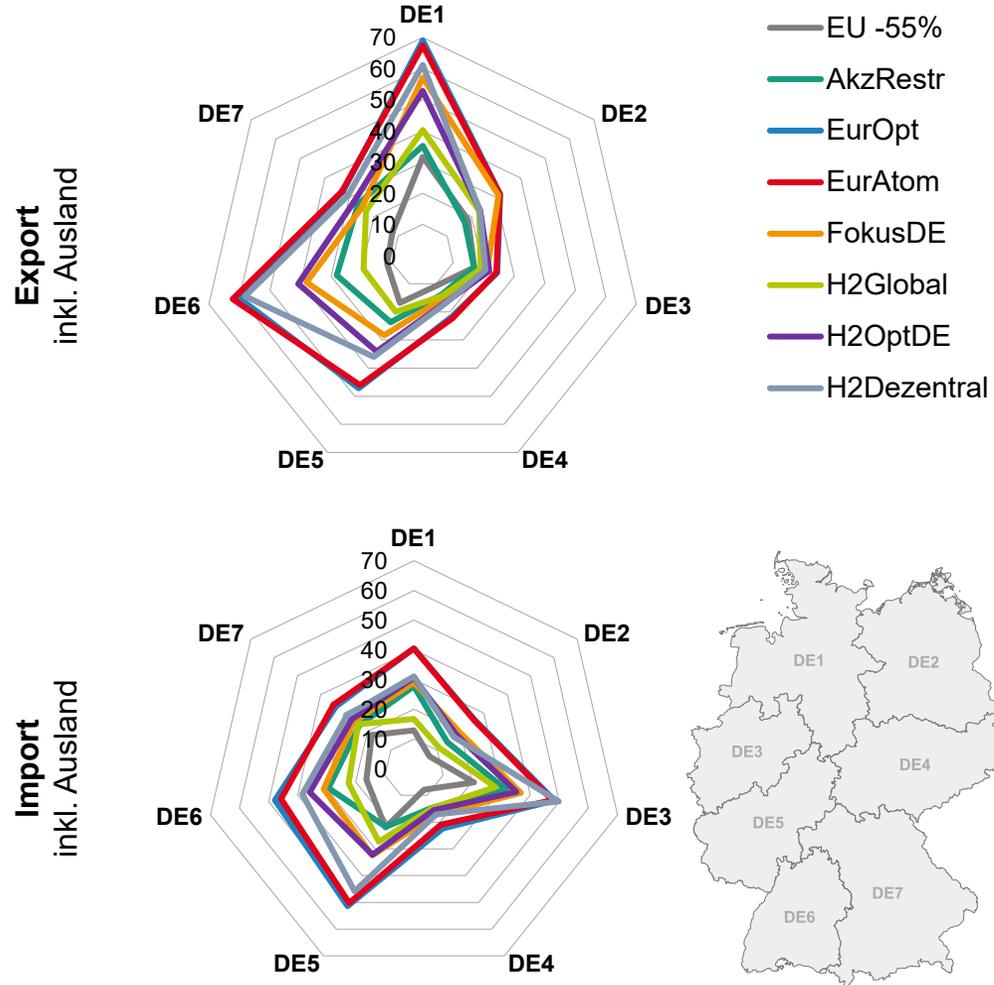
### Disclaimer zu HGÜ-Korridoren:

- Die Transportkorridore zeigen nur die Austauschbedarfe zwischen den benachbarten Regionen. Aus den Austauschbedarfen werden aber keine Ausbaukorridore entwickelt, z.B. in Form von (mehrere Regionen überschreitenden) HGÜ-Korridoren. Deshalb sind die bereits genehmigten HGÜ-Korridore in der Tabelle grau hinterlegt bzw. bei der Darstellung der Austauschbedarfe zwischen den Regionen nicht explizit dargestellt: Sie sind Teil des Startnetzes, auf ihnen kann sich an dieser Stelle aber kein Ausbaubedarf zeigen.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Transportaufgabe für Deutschland auf hohem Aggregationsniveau (1)

Maximal auftretende Austauschleistung inkl. Ausland in GW<sub>el</sub>



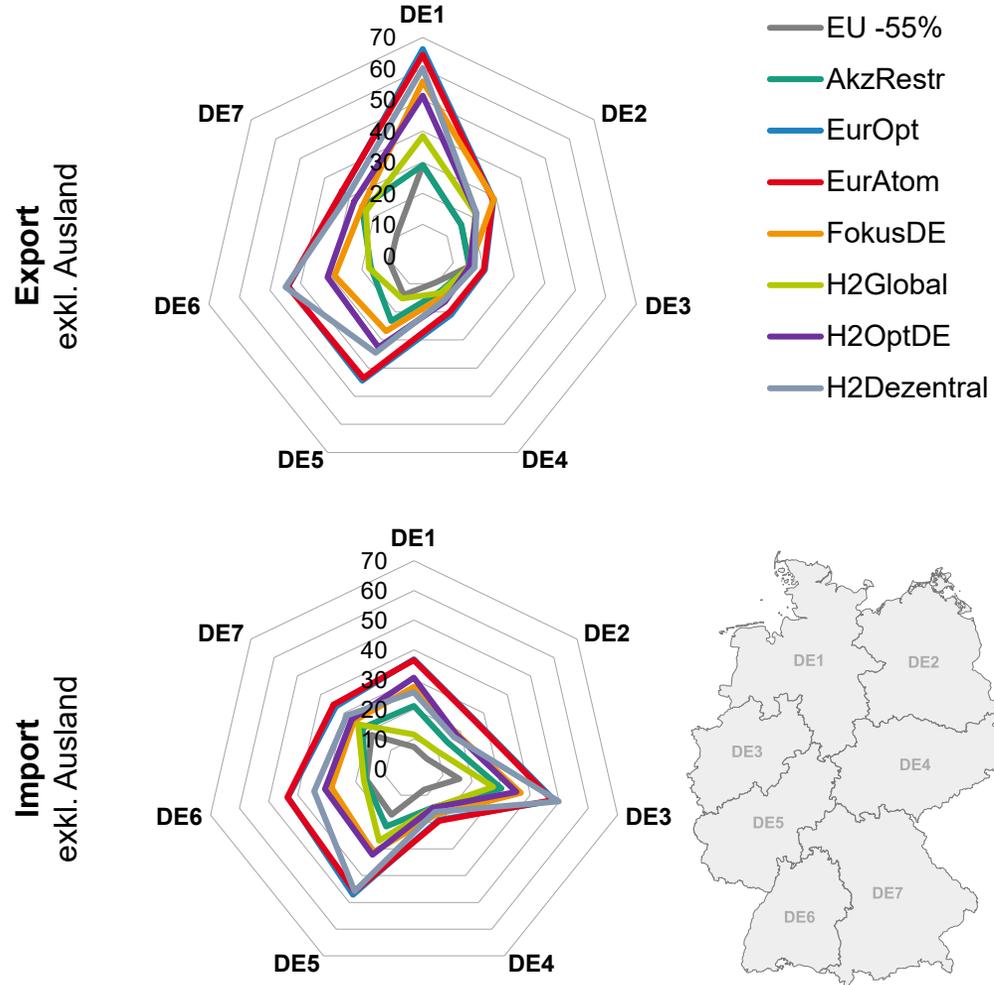
- Zu beobachtende Bandbreiten sind sehr groß
- Selbst kleinere Schwankungsbereiche stellen erhebliche Anforderungen (Verdopplung) an Stromnetz-Infrastruktur dar
- Größte Unsicherheiten für max. auftretende Exportleistung in Netzregionen DE1, DE5 und DE6
- Größte Unsicherheiten für max. auftretende Importleistung in Netzregionen DE3, DE5 und DE6
- Für das 50Hertz-Gebiet sind die Bandbreiten nicht so stark ausgeprägt wie in anderen Regionen, aber immer noch substantiell:

	DE2	DE4
Δ Importleistung:	bis zu +19 GW	bis zu +15 GW
Δ Exportleistung:	bis zu +13 GW	bis zu +12 GW

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Transportaufgabe für Deutschland auf hohem Aggregationsniveau (2)

Maximal auftretende Austauschleistung inkl. Ausland in GW<sub>el</sub>

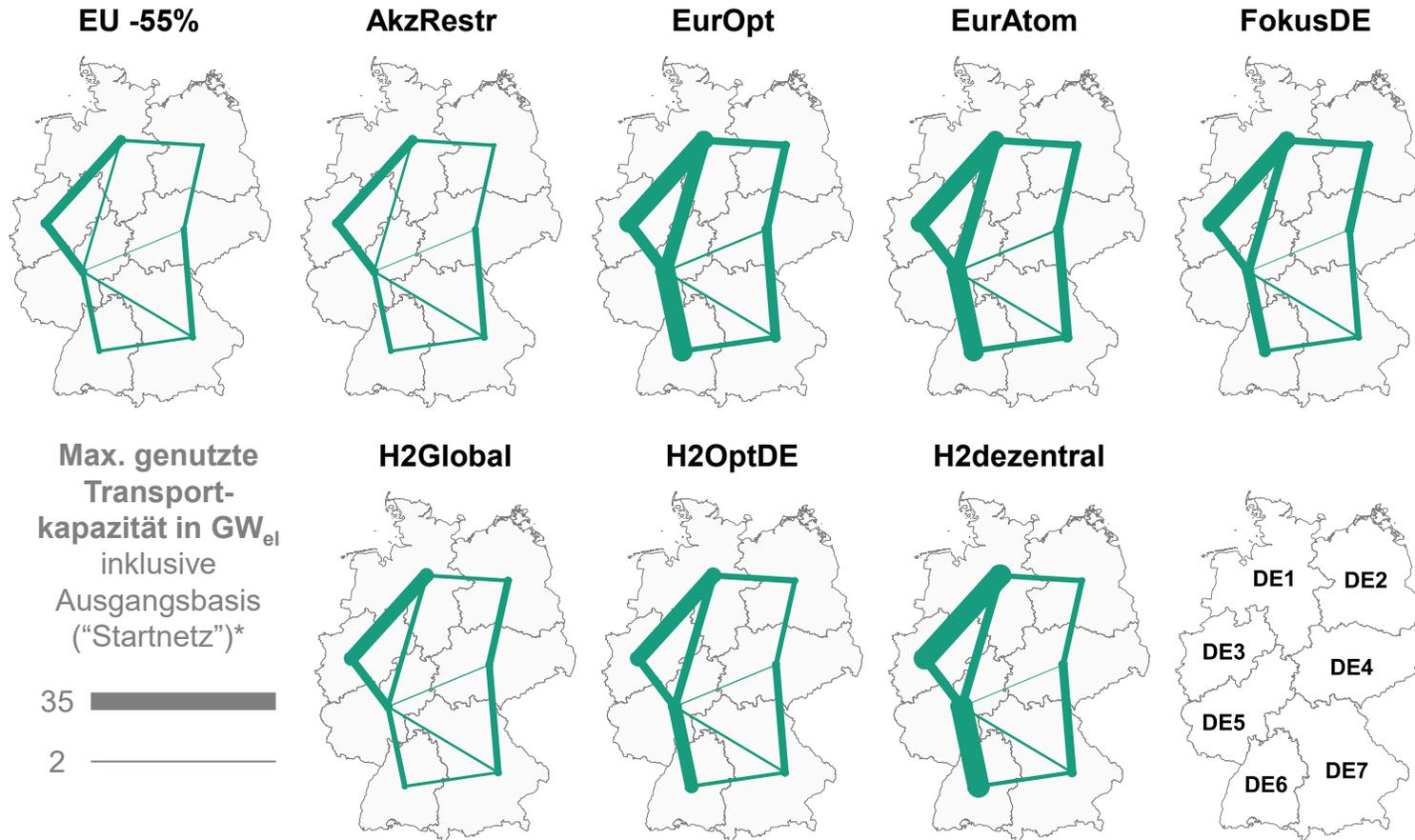


- Bei Ausblendung der grenzüberschreitenden Transporte zeigt sich für die maximal auftretenden Austauschleistungen ein größtenteils ähnliches Bild.
- Größere, durch die Austauschflüsse mit dem Ausland bedingte Unterschiede ergeben sich lediglich für DE6.
- Für das 50Hertz-Gebiet verändert sich durch die Ausblendung der grenzüberschreitenden Transportflüsse vornehmlich die Importleistung:

	DE2	DE4
Δ Importleistung:	bis zu +21 GW	bis zu +12 GW
Δ Exportleistung:	bis zu +13 GW	bis zu +11 GW

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Transportkapazitäten zwischen deutschen Netzregionen im Überblick

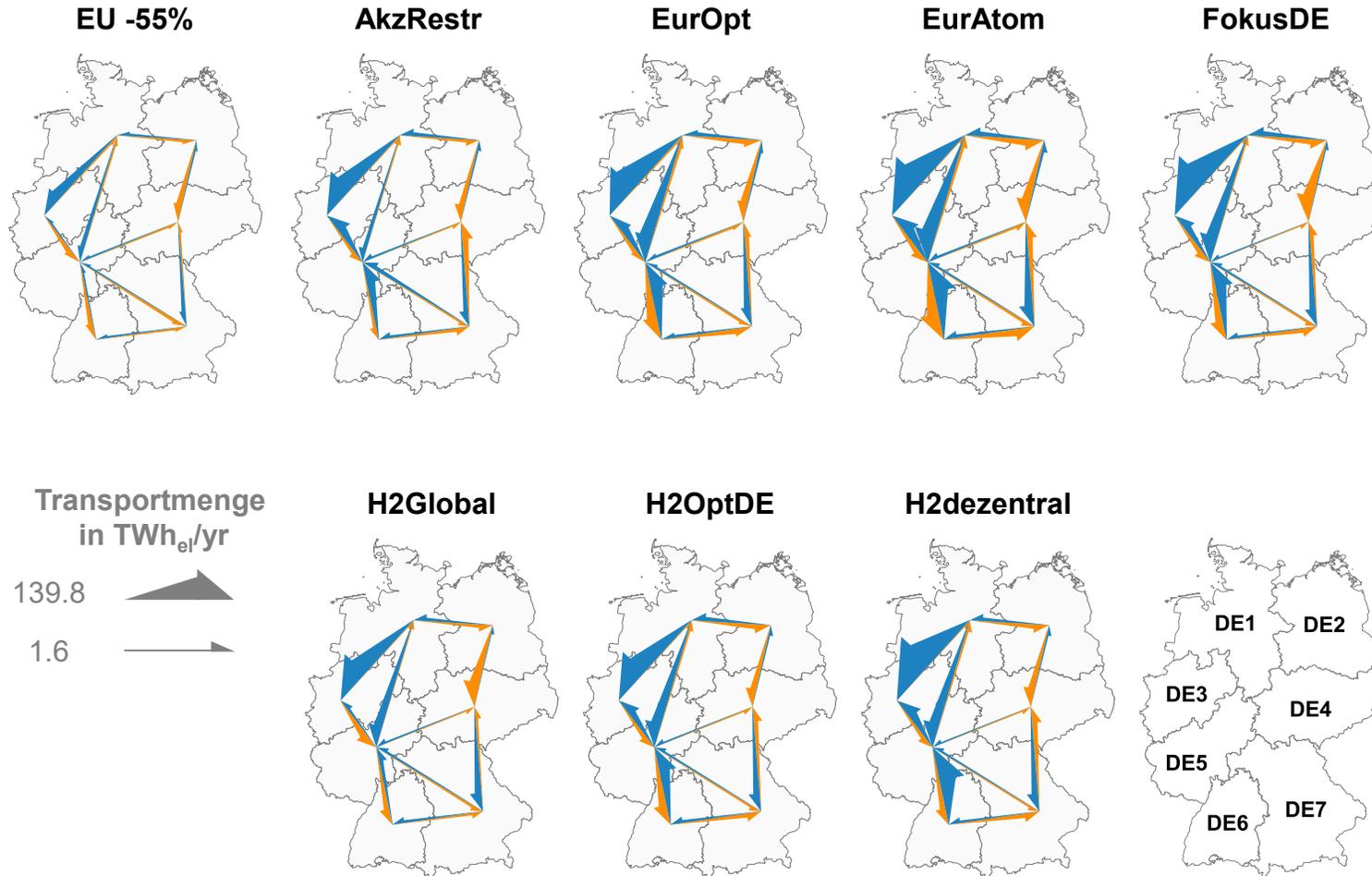


- Größte Transportaufgaben in **EurOpt** und **EurAtom**: inländischer Netzausbaubedarf korreliert mit den freigegebenen Handelskapazitäten zum Ausland
- **H2dezentral**: neue Stromnachfragen der dezentralen Elektrolyseure an Industriestandorten führen zu Netzausbaubedarf
- Transportaufgabe auf Korridor DE1  $\leftrightarrow$  DE3 korreliert mit Offshore-Szenario
- Größere Ost-West-Transportaufgaben treten im Norden oder Süden und weniger im mittleren Teil Deutschlands auf

\* Da auf den HGÜ-Korridoren projektbedingt kein Ausbau analysiert wird („nur Austauschbedarfe, keine Ausbauplanung“), sind auf diesen Abbildungen die konstant gehaltenen innerdeutschen HGÜ-Korridore aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Gleiches gilt für die grenzüberschreitenden Leitungen. Immer Startnetz (83,4 GW) mit endogenem Ausbau. Bei **EU -55%** u. **AkzRestr** nur Startnetz ohne endogenen Ausbau.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Transportflüsse zwischen deutschen Netzregionen im Überblick



- Transportaufgabe auf dem Korridor West-Süd verschärft durch grenzüberschreitenden Handel und / oder dezentrale Lokalisierung von Elektrolyseuren
- Keine Umkehr von Hauptflussrichtungen

Transportkorridore für innerdeutsche HGÜ und grenzüberschreitende Leitungen sind hier nicht dargestellt.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Transportaufgabe noch stärker disaggregiert (1)



Transportkorridor	Maximal genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>e1</sub>							
	EU -55%	AkzRestr EU -55%	EurOpt EU -55%	EurAtom EU -55%	FokusDE EU -55%	H2Global EU -55%	H2OptDE EU -55%	H2Dez'tral EU -55%
DE4<>DE5	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0
DE4<>DE7	9.5	0.6	6.0	6.4	0.6	1.5	2.4	4.6
DE2<>DE1	5.5	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9
DE4<>DE2	6.3	0.0	6.9	7.0	7.7	5.0	1.9	3.2
DE7<>DE5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<>DE5	8.3	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	26.1
DE7<>DE6	4.7	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9
DE1<>DE5	4.2	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7
DE5<>DE3	13.3	0.0	5.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.7
DE1<>DE3	15.3	0.0	13.5	13.0	11.5	6.7	9.0	18.6
DE6<>DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<>DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<>DE2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<>DE3	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Summe</b>	<b>82.8</b>	<b>0.6</b>	<b>84.3</b>	<b>83.1</b>	<b>47.1</b>	<b>18.7</b>	<b>41.2</b>	<b>68.6</b>

### Disclaimer zu HGÜ-Korridoren:

Die Transportkorridore zeigen nur die Austauschbedarfe zwischen den benachbarten Regionen. Aus den Austauschbedarfen werden aber keine Ausbaukorridore entwickelt, z. B. in Form von (mehrere Regionen überschreitenden) HGÜ-Korridoren. Deshalb sind die bereits genehmigten HGÜ-Korridore in der Tabelle grau hinterlegt: Sie sind Teil des Startnetzes, auf ihnen kann sich an dieser Stelle aber kein Ausbaubedarf zeigen.

- Es besteht eine hohe Schwankungsbreite der resultierenden Transportbedarfe zwischen den Storylines:
  - Die **summierten Ergebnisse** schwanken zwischen 0 GW und 84 GW
  - Auch exklusive des Sonderfalls der Storyline AkzRestr (kein Netzausbau ermöglicht) liegt die **Bandbreite auf einem Transportkorridor** häufig im Bereich von 5 GW, tw. bis zu 10 GW
  - D.h. es besteht eine Unsicherheit über den Ausbaubedarf auf einem Korridor in der Größenordnung von bis zu 5 HGÜ-Korridoren
- Diese **enorme Unsicherheit** zeigt den Bedarf an einer Entscheidungshilfe für die Abschätzung der Transportbedarfe auf.
- Ansatzpunkt: Ein **Monitoring** der Energiesystementwicklungen auf das Einschlagen gewisser Pfade hilft, Ausbauentscheidungen mit höherer Sicherheit treffen zu können.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Transportaufgabe noch stärker disaggregiert (2)



Transportkorridor	Maximal genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>el</sub>							
	AkzRestr EU -55%	EurOpt EU -55%	EurAtom EU -55%	FokusDE EU -55%	H2Global EU -55%	H2OptDE EU -55%	H2Dez'tral EU -55%	
DE4↔DE5	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0
DE4↔DE7	9.5	0.6	6.0	6.4	0.6	1.5	2.4	4.6
DE2↔DE1	5.5	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9
DE4↔DE2	6.3	0.0	6.9	7.0	7.7	5.0	1.9	3.2
DE7↔DE5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6↔DE5	8.3	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	26.1
DE7↔DE6	4.7	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9
DE1↔DE5	4.2	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7
DE5↔DE3	13.3	0.0	5.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.7
DE1↔DE3	15.3	0.0	13.5	13.0	11.5	6.7	9.0	18.6
DE6↔DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7↔DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7↔DE2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6↔DE3	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Summe</b>	<b>82.8</b>	<b>0.6</b>	<b>84.3</b>	<b>83.1</b>	<b>47.1</b>	<b>18.7</b>	<b>41.2</b>	<b>68.6</b>

Transportkorridore mit hoher Relevanz für die Regelzone von 50Hertz

Kein endogener Ausbau der HGÜ-Korridore berücksichtigt (nur Bestand)

- Die Storylines **EurOpt/EurAtom** zeigen, dass ein Fokus auf Elektrifizierung und eine Förderung des europäischen Stromaustausches zu hohen Stromnetz-Ausbaubedriften führt.
- Aber auch in Storylines, in denen eine hohe Durchsetzung von Umwandlungstechnologien angenommen wird, kann der Ausbaubedarf des Stromnetzes sehr hoch ausfallen:
- Die Storyline **H2dezentral** verdeutlicht den enormen Stromnetzausbaubedarf, der durch eine verbrauchsnahe Platzierung der Elektrolyseure verursacht werden kann.
- Ein deutlich geringerer Stromnetz-Ausbaubedarf in Deutschland entsteht, wenn Wasserstoff vornehmlich importiert wird (vgl. Storyline **H2Global**).
- Die Storyline **AkzRestr** zeigt, dass Stromnetz-Ausbaubedarf vermieden werden kann. Dies geht zu Lasten des europäischen Austauschs und erfordert einen noch verbrauchsnäheren Zubau von regenerativen Erzeugungsanlagen und mehr Flexibilitätsoptionen wie Batteriespeicher.

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Transportaufgabe noch stärker disaggregiert (3)

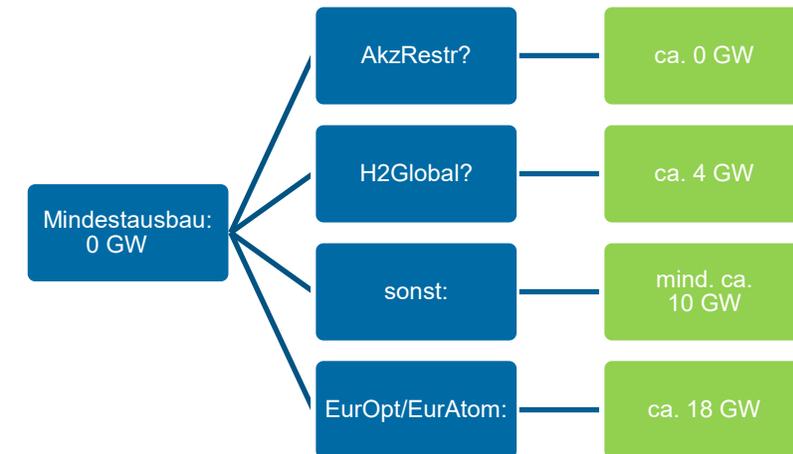
Beispiel: Ausbauentcheidung auf dem Transportkorridor DE1 ↔ DE5:



Transportkorridor	Maximal genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>el</sub>							
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2Dez'tral
DE1<>DE5	4.2	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7

- **Akzeptanzrestriktionen** können Ausbau auf Transportkorridor vollständig verhindern (→ Ausbauempfehlung: 0 GW)
  - Energiesystementwicklung „weltweiter **H2-Durchbruch**“ zweiter entscheidungsrelevanter Pfad (→ Ausbauempfehlung: ca. 4 GW)
  - Alle anderen Energiesystementwicklungen: Ausbauempfehlung ca. 10 GW
  - Wenn die Energiesystementwicklung stark **europäisch orientiert** mit starkem Ausbau der Interkonnektoren erfolgt, dann ist die Ausbauempfehlung auf ca. 18 GW anzuheben.
- Die **Unsicherheit über die zukünftigen Stromtransportaufgaben** ist durch die **Beobachtung der Energiesystementwicklungen** eingrenzbar.

Entscheidungsbaum zur Abschätzung des Transportbedarfs auf dem Korridor DE1 - DE5:



Anmerkung: Die Ausbauentscheidungen werden immer auf 2-GW-Schritte gerundet (2 GW entspricht 1 HGÜ-Korridor)

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Entscheidungsbäume zu den Transportkorridoren (1)

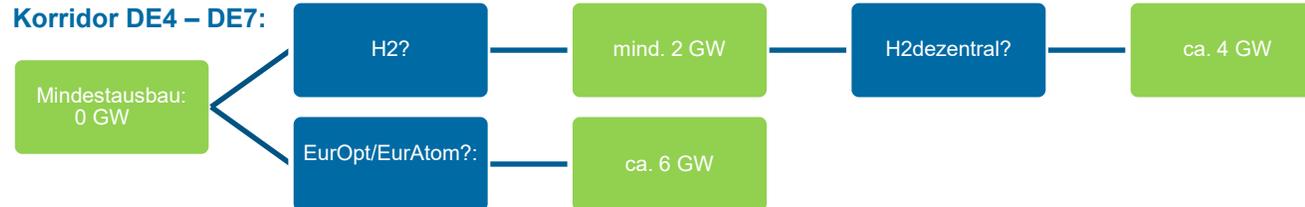


Transportkorridor	Maximal genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>el</sub>							
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2Dez'tral
	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%
DE4<=>DE5	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0
DE4<=>DE7	9.5	0.6	6.0	6.4	0.6	1.5	2.4	4.6
DE2<=>DE1	5.5	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9
DE4<=>DE2	6.3	0.0	6.9	7.0	7.7	5.0	1.9	3.2
DE7<=>DE5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<=>DE5	8.3	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	26.1
DE7<=>DE6	4.7	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9
DE1<=>DE5	4.2	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7
DE5<=>DE3	13.3	0.0	5.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.7
DE1<=>DE3	15.3	0.0	13.5	13.0	11.5	6.7	9.0	18.6
DE6<=>DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<=>DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<=>DE2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<=>DE3	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Summe</b>	<b>82.8</b>	<b>0.6</b>	<b>84.3</b>	<b>83.1</b>	<b>47.1</b>	<b>18.7</b>	<b>41.2</b>	<b>68.6</b>

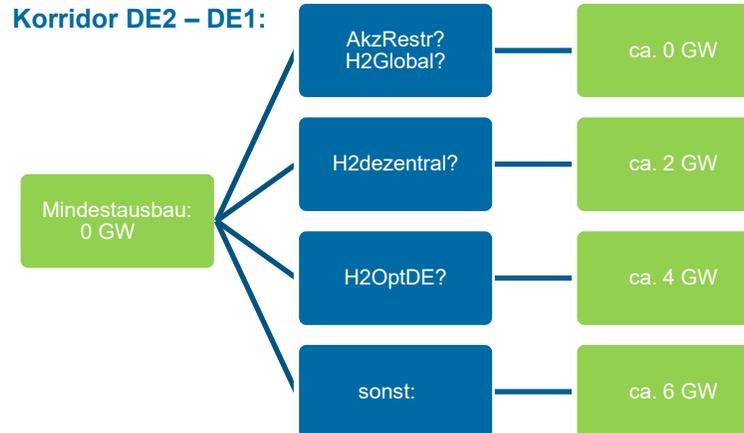
### Korridor DE4 - DE5:



### Korridor DE4 - DE7:



### Korridor DE2 - DE1:



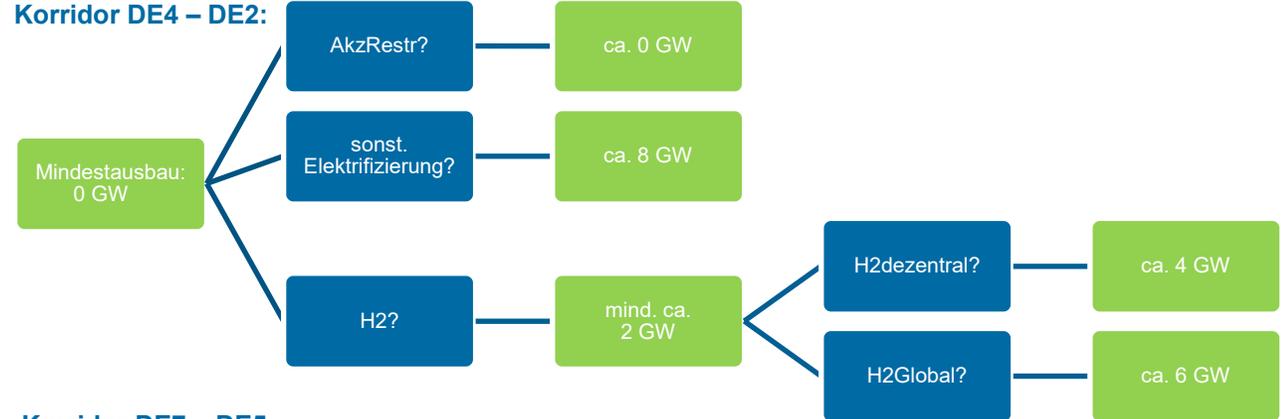
# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Entscheidungsbäume zu den Transportkorridoren (2)



Transportkorridor	Maximal genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>el</sub>							
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2Dez'tral
	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%
DE4<->DE5	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0
DE4<->DE7	9.5	0.6	6.0	6.4	0.6	1.5	2.4	4.6
DE2<->DE1	5.5	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9
DE4<->DE2	6.3	0.0	6.9	7.0	7.7	5.0	1.9	3.2
DE7<->DE5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<->DE5	8.3	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	26.1
DE7<->DE6	4.7	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9
DE1<->DE5	4.2	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7
DE5<->DE3	13.3	0.0	5.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.7
DE1<->DE3	15.3	0.0	13.5	13.0	11.5	6.7	9.0	18.6
DE6<->DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<->DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<->DE2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<->DE3	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Summe</b>	<b>82.8</b>	<b>0.6</b>	<b>84.3</b>	<b>83.1</b>	<b>47.1</b>	<b>18.7</b>	<b>41.2</b>	<b>68.6</b>

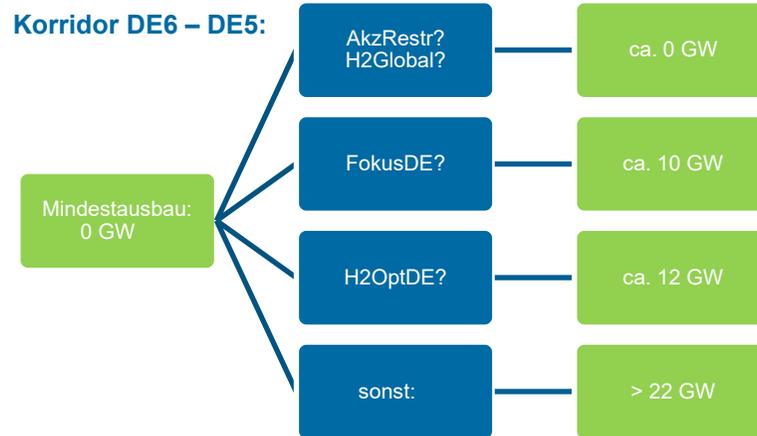
### Korridor DE4 – DE2:



### Korridor DE7 – DE5:



### Korridor DE6 – DE5:

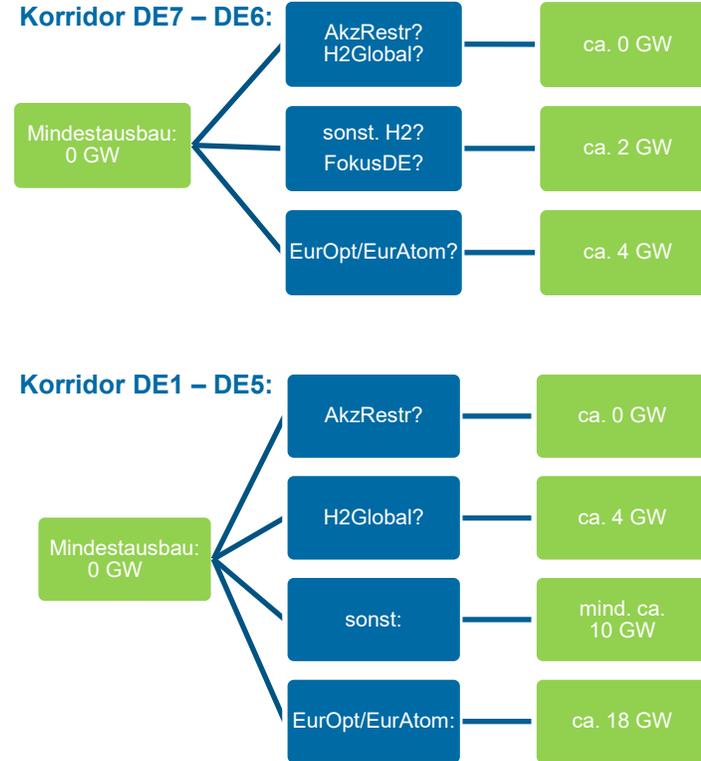


# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Entscheidungsbäume zu den Transportkorridoren (3)



Transportkorridor	Maximal genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>el</sub>							
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2Dez'tral
	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%
DE4<=>DE5	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0
DE4<=>DE7	9.5	0.6	6.0	6.4	0.6	1.5	2.4	4.6
DE2<=>DE1	5.5	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9
DE4<=>DE2	6.3	0.0	6.9	7.0	7.7	5.0	1.9	3.2
DE7<=>DE5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<=>DE5	8.3	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	26.1
DE7<=>DE6	4.7	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9
DE1<=>DE5	4.2	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7
DE5<=>DE3	13.3	0.0	5.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.7
DE1<=>DE3	15.3	0.0	13.5	13.0	11.5	6.7	9.0	18.6
DE6<=>DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<=>DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<=>DE2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<=>DE3	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Summe</b>	<b>82.8</b>	<b>0.6</b>	<b>84.3</b>	<b>83.1</b>	<b>47.1</b>	<b>18.7</b>	<b>41.2</b>	<b>68.6</b>

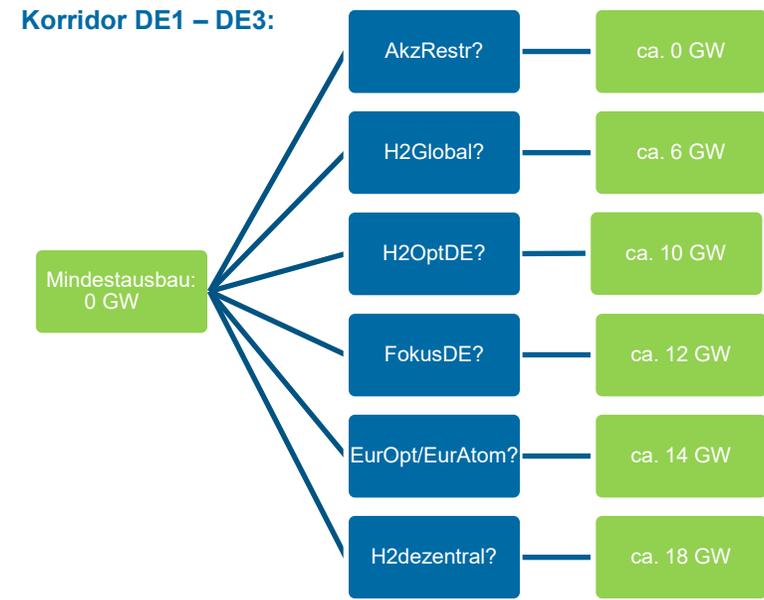
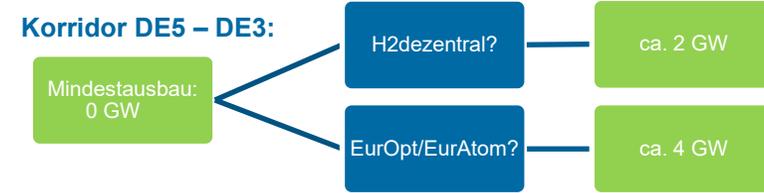


# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Entscheidungsbäume zu den Transportkorridoren (4)



Transportkorridor	Maximal genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>el</sub>							
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2Dez'tral
	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%
DE4<->DE5	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0
DE4<->DE7	9.5	0.6	6.0	6.4	0.6	1.5	2.4	4.6
DE2<->DE1	5.5	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9
DE4<->DE2	6.3	0.0	6.9	7.0	7.7	5.0	1.9	3.2
DE7<->DE5	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<->DE5	8.3	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	26.1
DE7<->DE6	4.7	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9
DE1<->DE5	4.2	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7
DE5<->DE3	13.3	0.0	5.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.7
DE1<->DE3	15.3	0.0	13.5	13.0	11.5	6.7	9.0	18.6
DE6<->DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<->DE1	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7<->DE2	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE6<->DE3	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Summe</b>	<b>82.8</b>	<b>0.6</b>	<b>84.3</b>	<b>83.1</b>	<b>47.1</b>	<b>18.7</b>	<b>41.2</b>	<b>68.6</b>



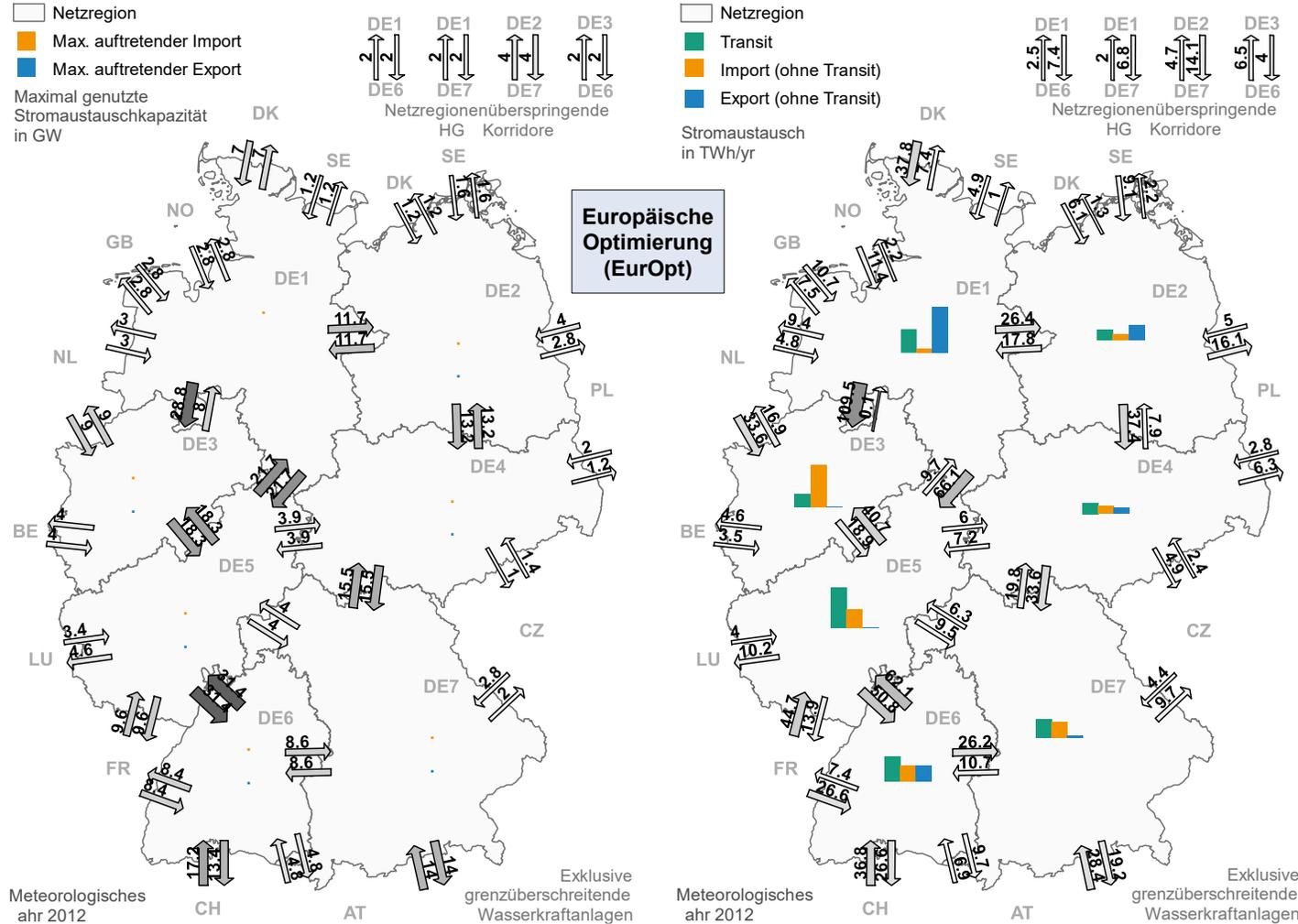
# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Ergebnisse: Fünf genau zu beobachtende Energiesystementwicklungen

- Fünf wichtige Pfadentscheidungen (Treiber) für Abschätzung des Netzausbaubedarfs:
  - Auswirkungen von Akzeptanzfragen auf die Energiemarktentwicklung
  - Flächenentwicklung auf See / Offshore-Anlandungspunkte
  - Regulatorische Rahmenbedingungen des europäischen Strommarktes
  - Elektronen oder Moleküle
  - Höhe und Lokalisierung der inländischen Elektrolysekapazität
- Alle Pfadentscheidungen sind politisch adressierbar!
- Methode funktioniert sofern Pfadentwicklungen zum Zeitpunkt der Ausbaumentscheidung abschätzbar sind
  - Die darauf aufbauende Gewichtung der Storylines mit Eintrittswahrscheinlichkeiten kann eine Methode zur Quantifizierung der benötigten Ausbaubedarfe sein
- Die Einbeziehung von Wahrscheinlichkeiten in die Netzausbauplanung zeigt, dass diese Komponenten der Vorsorgeplanung enthalten muss:
  - Für wirksamen Klimaschutz müssen Ausbaumentscheidungen getroffen werden, bevor die Bedarfsplanung abgeschlossen sein kann
  - Der Umgang mit aus der Vorsorgeperspektive (unvermeidbar) entstehenden Fehlern sollte regulatorisch adressiert werden: Fehler sind zu tolerieren

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Transportaufgabe weiter disaggregiert



- Für spezifische weitere Analysen liegen die unterschiedlichen Austauschdaten in hoher Detaillierung vor und sind in [Anhang 3](#) dargestellt.
- Die Graphik liefert einen Eindruck der Ergebnisse:
  - Detaillierte Ergebnisse zur Transportaufgabe helfen, die Veränderungen der benötigten Strom austauschkapazitäten und auftretenden Strom austauschmengen zu verstehen
  - Neuer Ansatz liefert erste Indikatoren für robuste und sensitive Transportkorridore unter Berücksichtigung sektoren- und länderübergreifender Wechselwirkungen klimaneutraler Energiesysteme
  - Import-, Export- und Transitflüsse beinhalten grenzüberschreitenden Austausch mit Nachbarmarktgebieten

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Transportaufgabe noch weiter disaggregiert



Transportkorridor	Max. genutzte Stromaustauschkapazität in GW <sub>e</sub>															
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2global	H2OptDE	H2dez'tral	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2global	H2OptDE	H2dez'tral	
	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	EU -55%	
DE4>DE5	1.7	1.7	3.9	4.0	1.7	2.2	2.1	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0	
DE5>DE4	1.7	1.7	3.9	4.0	1.7	2.2	2.1	1.7	0.0	2.2	2.3	0.0	0.5	0.4	0.0	
DE4>DE7	9.5	10.1	15.5	15.9	10.1	11.0	12.0	14.1	0.6	6.0	6.4	0.6	1.5	2.4	4.6	
DE7>DE4	4.6	10.1	15.5	15.9	10.1	11.0	12.0	14.1	5.5	10.9	11.3	5.5	6.4	7.4	9.5	
DE7>DE5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE5>DE7	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE6>DE5	8.3	8.3	31.4	31.0	18.3	8.9	21.1	34.4	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	26.1	
DE5>DE6	8.3	8.3	31.4	31.0	18.3	8.9	21.1	26.6	0.0	23.1	22.7	10.0	0.6	12.8	18.3	
DE7>DE6	4.7	4.7	8.6	9.3	6.6	4.7	6.0	6.6	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9	
DE6>DE7	4.7	4.7	8.6	9.3	6.6	4.7	6.0	6.6	0.0	3.9	4.6	1.9	0.0	1.3	1.9	
DE1>DE5	4.2	4.2	21.7	20.7	14.0	7.8	13.4	13.9	0.0	17.5	16.5	9.8	3.6	9.2	9.7	
DE5>DE1	1.3	4.2	21.7	20.7	14.0	3.9	13.4	13.9	2.9	20.4	19.4	12.7	2.6	12.0	12.6	
DE5>DE3	7.4	13.3	18.3	18.0	13.3	13.3	13.3	15.0	5.9	11.0	10.6	5.9	5.9	5.9	7.6	
DE3>DE5	13.3	13.3	18.3	18.0	13.3	13.3	13.3	15.0	0.0	5.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.7	
DE1>DE3	15.3	15.3	28.8	28.3	26.8	22.0	24.3	33.9	0.0	13.5	13.0	11.5	6.7	9.0	18.6	
DE3>DE1	2.1	15.3	8.0	7.5	2.3	4.2	8.4	0.3	13.2	5.9	5.3	0.1	2.0	6.2	-1.8	
DE2>DE1	5.5	5.5	11.7	11.4	11.0	6.3	9.7	8.4	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9	
DE1>DE2	5.5	5.5	11.7	11.4	11.0	6.3	9.7	8.4	0.0	6.2	5.9	5.5	0.8	4.2	2.9	
DE4>DE2	3.1	6.3	13.2	13.3	14.0	4.3	8.2	9.5	3.2	10.1	10.2	10.9	1.2	5.1	6.4	
DE2>DE4	6.3	6.3	13.2	13.3	14.0	11.3	8.2	9.5	0.0	6.9	7.0	7.7	5.0	1.9	3.2	
DE6>DE1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE1>DE6	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE7>DE1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE1>DE7	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE7>DE2	3.1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
DE2>DE7	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE6>DE3	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
DE3>DE6	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Summe*	82.8	83.4	167.1	165.9	129.9	101.5	124.0	151.4	0.6	84.3	83.1	47.1	18.7	41.2	68.6	

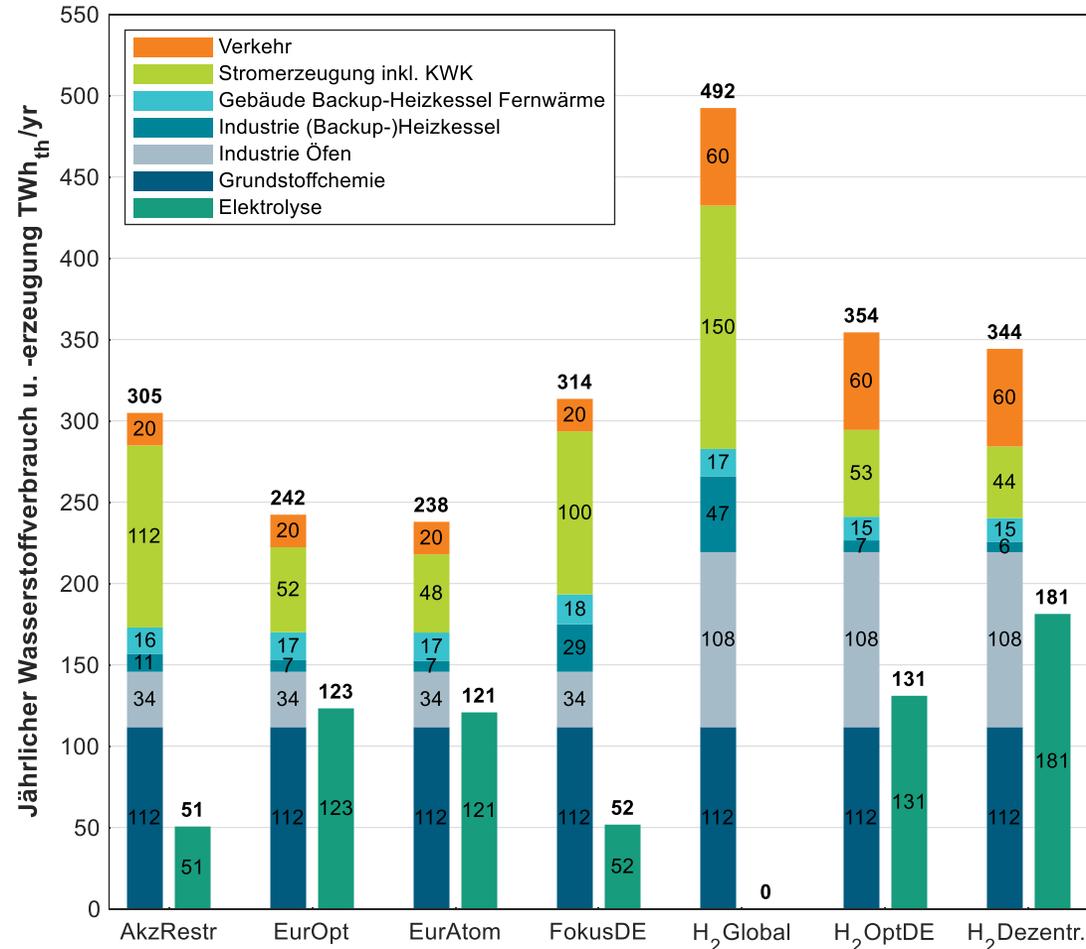
\* über Maximum beider Richtungen

- Diese Darstellung ergänzt die vorangehende um die Information der Flussrichtung, und es wird die maximal genutzte Stromaustauschkapazität je Flussrichtung dargestellt.
- Der Stromnetz-Ausbaubedarf ergibt sich aus dem Maximum beider Werte
- Nicht alle Korridore nutzen volle Transportkapazität auf beiden Richtungen aus:
  - Der Korridor DE4 ↔ DE5 wird in beide Richtungen in gleichem Maße ausgenutzt.
  - Der Korridor DE4 ↔ DE2 hingegen wird in allen Storylines mit Ausnahme von **H2OptDE** deutlich stärker in Süd-Nord-Richtung als in die Nord-Süd-Richtung genutzt.

 Transportkorridore mit hoher Relevanz für die Regelzone von 50Hertz

# 5 Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse

## Annahmen und Ergebnisse: Inländische Wasserstoffbilanz in Deutschland



- Wasserstoff war nicht im Fokus dieses Projekts, dennoch wurden wichtige marktseitige Wechselwirkungen durch Modellierungsansatz berücksichtigt (jedoch keine Abbildung von Gastransportinfrastrukturen)
- Wasserstofferzeugung und -verbrauch sind endogenes Ergebnis
- Inländische Wasserstofferzeugung von 0 (**H2Global**) bis 181 TWh<sub>th</sub>/yr (**H2dezentral**)
- Inländischer Wasserstoffverbrauch von 242 / 238 (**EurOpt/EurAtom**) bis 492 TWh<sub>th</sub>/yr (**H2Global**)
- H<sub>2</sub>-Nettobilanz (Verbrauch abzgl. Erzeugung) ist für Deutschland immer positiv („Nettoimporteur“)
- In einzelnen Netzregionen treten zum Teil ausgeglichene bzw. negative Nettobilanzen auf (v. a. im Norden und Südwesten Deutschlands)

# 6 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick Methodisches Vorgehen

Festlegung der systemischen Achsen

Identifikation der relevanten techno-ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen **Deskriptoren** und **Treiber**

Identifikation der relevanten (**Wechsel**)wirkungen

Reduktion auf relevante **Storylines**

Quantifizierung der für die Storyline relevanten Deskriptoren

Quantifizierung der weiteren Deskriptoren durch **Simulationsmodell**

Erarbeitung von **Schlussfolgerungen**

# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (1)

## 1. Strom-Transportaufgabe

- Zukünftige Stromtransportaufgaben bergen hohe Unsicherheit ...

- Der aggregierte Netzausbaubedarf über alle Transportkorridore kann 0 GW (im Falle von starken netzseitigen Akzeptanzrestriktionen) und 84 GW (im Falle einer starken europäischen Orientierung) liegen.
- Die Bandbreite des Transportbedarfs auf einem Korridor kann bis zu 26 GW betragen (DE5 ↔ DE6), im Mittel liegt sie bei 9,3 GW (entspricht ca. 5 HGÜ-Korridoren!)
- Ist innerdeutscher Netzausbau zulässig, so schwanken die ermittelten Transportbedarfe häufig im Bereich von 5 GW, im Mittel liegt die Bandbreite weiterhin bei 8 GW
  - 3 Ausreißer: DE5 ↔ DE6 (25,5 GW), DE1 ↔ DE5 (13,9 GW) und DE1 ↔ DE3 (11,9 GW)

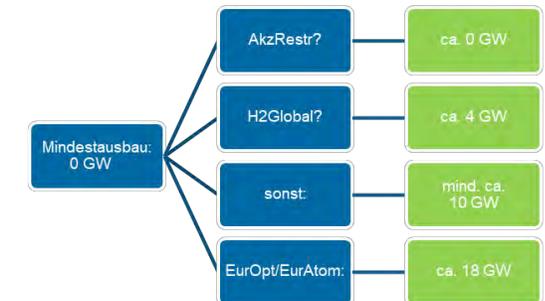


# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (2)

## 1. Strom-Transportaufgabe

- **Zukünftige Stromtransportaufgaben bergen hohe Unsicherheit, die durch Beobachtung der Energiesystementwicklungen eingrenzbar ist.**
  - Um die hohe Unsicherheit zu handhaben, ist eine vertiefte Analyse und intensives Monitoring der Entwicklungen, auch der diesbezüglich entscheidenden gesetzlichen Rahmenbedingungen notwendig.
  - Nach Analyse aller Trassen konnten fünf Energiesystementwicklungen identifiziert werden, deren Monitoring für die Bestimmung der zukünftigen Transportbedarfe elementar ist:
    - Auswirkungen von Akzeptanzfragen auf die Energiemarktentwicklung
    - Flächenentwicklung auf See / Offshore-Anlandungspunkte
    - Regulatorische Rahmenbedingungen des europäischen Strommarktes
    - Elektronen oder Moleküle
    - Höhe und Lokalisierung der inländischen Elektrolysekapazität

Entscheidungsbaum zur Abschätzung des Transportbedarfs auf dem Korridor DE1 - DE5:



# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (3)

## 1. Strom-Transportaufgabe

- **Zukünftige Stromtransportaufgaben bergen hohe Unsicherheit, die durch Beobachtung der Energiesystementwicklungen eingrenzbar ist**
- Auswirkungen von Akzeptanzfragen auf die Energiemarktentwicklung:
  - Die Storyline **AkzRestr** zeigt, dass eine differenzierte Bewertung der Akzeptanzfragen (vgl. [Nr. 6](#)) eine zeitkritische Bewertungs- und Monitoring-Aufgabe darstellt: Wirken Akzeptanzrestriktionen im Netzbereich, so können Ausbaubedarfe substituiert werden.
- Flächenentwicklung auf See / Offshore-Anlandungspunkte:
  - In diesem Projekt wurde vereinfacht angenommen, dass die zusätzliche Offshore-Windleistung in DE1 angelandet wird. Diese Annahme nimmt wesentlich Einfluss auf die resultierende Transportaufgabe. Die Flächenentwicklung auf See ist eine Monitoring-Aufgabe.
- Regulatorische Rahmenbedingungen des europäischen Strommarktes:
  - Die Annahmen über den Zusammenhalt des europäischen Strommarktes nehmen signifikant Einfluss auf den Stromnetz-Ausbaubedarf. Dies betreffende regulatorische Rahmenbedingungen sind entsprechend zu beobachten.
- Elektronen oder Moleküle / Höhe und Lokalisierung der inländischen Elektrolysekapazität:
  - Ein (erwartetes) Unterscheidungsmerkmal der Stromtransportaufgabe ist die Abhängigkeit von der grundsätzlichen Elektrifizierung-/ Wasserstoffausprägung des Energiesystems. Wasserstoff-Storylines führen in der Regel zu einem geringeren Stromnetz-Ausbaubedarf, sofern die inländischen Elektrolyseure nicht verbrauchsnah errichtet werden (Storyline **H2dezentral**). Die Tendenz hin zu mehr oder weniger Molekülen ist ebenso zu beobachten, insbesondere mit Blick auf die Höhe und Lokalisierung der inländischen Elektrolysekapazität.

# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (4)

## 1. Strom-Transportaufgabe

- Zukünftige Stromtransportaufgaben bergen hohe Unsicherheit, die durch Beobachtung der Energiesystementwicklungen eingrenzbar ist
- Methode funktioniert sofern Pfadentwicklungen **zum Zeitpunkt der Ausbauentcheidung abschätzbar** sind
- Die darauf aufbauende Gewichtung der Storylines mit **Eintrittswahrscheinlichkeiten** kann eine Methode zur Quantifizierung der benötigten Ausbaubedarfe sein (weitere methodische Ansätze zur Entscheidungsfindung unter Unsicherheit denkbar)
- Die Einbeziehung von Wahrscheinlichkeiten in die Netzausbauplanung zeigt, dass diese Komponenten der **Vorsorgeplanung** enthalten muss:
  - Für **wirksamen Klimaschutz** müssen Ausbauentscheidungen getroffen werden, bevor die Bedarfsplanung abgeschlossen sein kann
  - Der Umgang mit aus der Vorsorgeperspektive (unvermeidbar) entstehenden Fehlern sollte regulatorisch adressiert werden: Fehler sind zu tolerieren
  - Übrigens: Durch eine Gestaltung des regulatorischen Rahmens sind alle genannten Unsicherheiten deutlich eingrenzbar!

# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (5)

## 2. Strom-Transportaufgabe

- Mit Blick auf das 50Hertz-Gebiet ergeben sich vor allem folgende Aspekte

- Anlandung Wind Offshore entscheidend für die Abschätzung der zukünftigen Transportbedarfe im 50Hertz-Gebiet
- Strukturelle Robustheit für Transportkorridor DE4↔DE5: nur bei starker europäischer Orientierung zusätzliche Transportaufgabe (ca. 2 GW)
- Auf den anderen Transportkorridoren liegt die Schwankungsbreite zwischen den Storylines bei 5 – 6 GW:



### DE4↔DE7:

- Wenn **EurOpt/EurAtom**, dann zusätzliche Transportaufgabe von ca. 6 GW
- Wenn H<sub>2</sub>-orientiert mit H<sub>2</sub>-Infrastruktur, dann zusätzliche Transportaufgabe von ca. 2 GW
- Wenn H<sub>2</sub>-orientiert ohne H<sub>2</sub>-Infrastruktur: ca. 4 GW

### DE2↔DE4:

- Wenn stromorientiert und nicht **AkzRestr**, dann ca. 8 GW
- Wenn H<sub>2</sub>, dann mind. 2 GW, bei vornehmlichem H<sub>2</sub>-Import (**H2Global**) ca. 6 GW, bei verbrauchsnahen Elektrolyseuren (**H2dezentral**) ca. 4 GW.

### DE1↔DE2:

- Bei **AkzRestr** und **H2Global** keine zusätzliche Transportaufgabe
- bei verbrauchsnahen Elektrolyseuren (**H2dezentral**) ca. 2 GW
- bei **H2OptDE** ca. 4 GW
- sonst: 6 GW

→ Unsicherheit lässt sich mithilfe eines Monitorings teilweise eingrenzen

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (6)

### 3. Vier Storylines und eine Zusatzvariante bilden mit Blick auf den Zuwachs von Transportaufgaben Extrementwicklungen ab

- In folgenden Storylines bleibt die Transportaufgabe deutlich hinter der in anderen Storylines zurück:
  - **H2Global:** sehr deutliche, strukturelle und quantitative Unterschiede; ein sehr großes Angebot sehr preisgünstigen Wasserstoffs würde das Energiesystem in vielerlei Hinsicht deutlich verändern (diese Storyline hätte aber auch massive Implikationen auf der Wasserstoff-Infrastrukturseite, die hier nicht untersucht werden konnten) – diese Umfeldbedingung ist jenseits der Wasserstoff-Infrastruktur nur begrenzt steuerbar
  - **AkzRestr:** (starke) Beschränkungen des innerdeutschen Netzausbaus verändern v.a. regionale Entwicklungsmuster (v.a. bei Freiflächen-PV) – und damit Engpass-Managements- und Flexibilitätsbedarf (und dessen Kosten) – diese Umfeldbedingung ist begrenzt steuerbar
- In folgenden Storylines übersteigt die Transportaufgabe deutlich die anderer Storylines:
  - **EurOpt/EurAtom:** (kosten-)optimale Ausbaustrukturen v.a. für die regenerative Stromerzeugung in Deutschland sowie die Optimierung im europäischen Verbund erhöhen den Transportbedarf deutlich
  - **H2dezentral:** starker Ausbau verbrauchsnahe Wasserstoffherzeugung auf Elektrolysebasis und der entsprechende Strombedarf jenseits der Regionen mit hohem Angebot erneuerbarer Stromerzeugung – diese Umfeldbedingung ist auf regulatorischer Ebene im Prinzip gut steuerbar

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (7)

### 4. Strom- und Wasserstoffwelten und ihr Einfluss auf überregionalen Energieaustausch

- Deutschland ist (auch) zukünftig Nettoimporteur für Energie, die Muster bei den unterschiedlichen Energieträgern verschieben sich jedoch:
  - Dies gilt in Fortsetzung der bisherigen Netto-Importsituation für Brennstoffe, nunmehr auch bei Wasserstoff. Die Niveaus der Importe für Wasserstoff und Wasserstoffderivate (letztere wegen der völlig anderen Transportinfrastrukturen nicht weiter betrachtet) werden jedoch erkennbar unter denen für Mineralöl, Erdgas und Steinkohle liegen.
  - Eine neue Situation ergibt sich jedoch mit Blick auf die Außenhandelsituation bei Strom. Für Deutschland wird die historische Situation ausgeglichener Export-/ Import-Salden oder erheblicher Nettostromexporte langfristig mit hoher Wahrscheinlichkeit durch eine Netto-Importsituation abgelöst – und dies unabhängig davon, ob der Fokus der Energiesystem-Entwicklung eher in Richtung eines dominant zur Elektrifizierung oder in signifikanten Teilen zu Wasserstoff tendieren wird.
- Innerhalb von Deutschland ergeben sich ebenfalls unabhängig vom Fokus der Energiesystem-entwicklung auf Strom oder Wasserstoff sowohl klare Export- als auch Importregionen (für Strom und Wasserstoff).

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (8)

### 5. Stromverbrauchs-niveaus und -strukturen

- Die signifikantesten Unterschiede zwischen den Storylines zeigen sich an den Verbrauchs-Bandbreiten und den Lokalisierungen der einheimischen Wasserstoff-Elektrolyseanlagen:
  - In der Storyline **H2Global** kommt es zu quantitativ großen und kostengünstigen Wasserstoffangeboten aus dem internationalen Raum, und die Wasserstoff-Erzeugung in deutschen Elektrolyseanlagen wird dadurch marktseitig verdrängt. Voraussetzung dafür ist eine ausreichend ausgebaute Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland.
  - In der Storyline **H2dezentral** kommt es z. B. wegen nicht ausreichend großer Angebote aus dem internationalen Raum zur Errichtung großer Elektrolysekapazitäten in Deutschland, die unter Maßgabe eines nicht in ausreichendem Maße erfolgenden Infrastrukturausbaus oder aus einer Eigenversorgungslogik der Wasserstoffverbraucher („der regulatorisch keine Grenze gesetzt wird,“) verbrauchsnahe erfolgt.
- Die Unterschiede für die Verkehrs- und Wärmenachfragen (v. a. mit Blick auf die strom- oder wasserstoffseitig ausgeprägten Storylines) sind weit weniger signifikant, v. a. nicht hinsichtlich der für die Strom-Transportaufgaben relevanten regionalen Nachfragemuster. Die Verbraucher sind relativ gleichmäßig verteilt, Änderungen sind hier nur begrenzt erwartbar.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (9)

### 6. Regionalisierungsaspekte des Energiesystems sind mit Blick auf die Entwicklung der Strom-Transportaufgaben eine Gestaltungsaufgabe

- Elektrolyse

- Die Gesamtleistung und die Lokalisierung der Elektrolyseanlagen sind entscheidende räumliche Determinanten des zukünftigen Strombedarfs und damit auch des zukünftigen Stromtransportbedarfs.
- Integrierte Betrachtungen und die Schaffung eines entsprechenden regulatorischen Rahmens in den Bereichen zu Elektrolyseförderung, Wasserstoffnetz-Rollout und Stromnetz-Verstärkung sind notwendig und möglich.
- Die Zeitschiene ist hier kritisch, angesichts der in den Facetten Wasserstofferzeugung, Wasserstoffanwendung und ggf. auch Infrastrukturen flankierungsintensiven Rahmenbedingungen aber bei frühzeitiger Adressierung auch gut umsetzbar.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (10)

### 6. Regionalisierungsaspekte des Energiesystems sind mit Blick auf die Entwicklung der Strom-Transportaufgaben eine Gestaltungsaufgabe

- PV-Freiflächenanlagen

- PV-Freiflächenanlagen werden landesweit eine zunehmende Rolle spielen, Rahmenbedingungen hier sind Flächenverfügbarkeit und Akzeptanz, aber auch die wirtschaftliche Attraktivität der entsprechenden Projekte.
- PV-Freiflächenanlagen im deutschen Süden sind aus wirtschaftlicher Perspektive und unter Maßgabe hoher Erzeugungsbedarfe für die Klimaneutralität eine überproportional attraktive Option, Flächenverfügbarkeit bleibt aber eine Herausforderung, deshalb ist eine (auch rechtlich ermöglichte) vorsorgliche räumliche Steuerung (Richtung Süden) sinnvoll

- Offshore Wind

- Die Implikationen des Offshore-Windkraft-Ausbaus sind wegen begrenzter räumlicher Freiheitsgrade gravierend.
- Robuste Langfrist-Entscheidungen zur Verfügbarkeit und Erschließung der notwendigen Flächen (deutsche AWZ / andere Flächen Nordsee und Ostsee) sowie zu den notwendigen Anlandungspunkten (in Deutschland oder jenseits der deutschen Grenzen) sind nötig.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (11)

### 6. Regionalisierungsaspekte des Energiesystems sind mit Blick auf die Entwicklung der Strom-Transportaufgaben eine Gestaltungsaufgabe

- Speicher und andere Flexibilitätsoptionen

- Energiesysteme mit sehr hohen Anteilen variabler erneuerbarer Energien benötigen in großem Umfang Flexibilitätsoptionen. Flexibilitätsoptionen beinhalten flexible Verbraucher sowie Speicher (auf der Strom- und ggf. auf der Wärmeseite). Einige (wichtige) Flexibilitätsoptionen sind auf bestimmte Regionen oder Lokalitäten konzentriert (Wasserkraftwerke, Power-to-Heat-Anlagen, große und flexible industrielle Verbraucher etc.), andere sind räumlich sehr flexibel (Batteriespeicher als Extrem).
- Aus der modellendogenen Optimierung ergibt sich ein optimaler Einsatz der verschiedenen Flexibilitätsoptionen. In der Realität vieler einzelwirtschaftlicher Entscheidungskalküle (und abhängig von diversen regulativen Rahmenbedingungen) können sich andere Lokalisierungsmuster herausbilden, die ggf. auch die Transportaufgaben verändern können. Die aktive räumliche Gestaltungsaufgabe bzgl. der Lokalisierung regenerativer Erzeugung, wichtiger Nachfrage (v. a. Elektrolyse) und der Infrastruktur sollte auch mit Blick auf Speicher erweitert und integriert betrachtet werden. Die (in dieser Untersuchung nicht betrachtete) Rolle von Flexibilisierungsoptionen für die Verteilnetze spielt hier ebenfalls eine Rolle.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (12)

### 7. Öffentliche Akzeptanz ist eine wichtige (und komplexe) Determinante für die Storylines

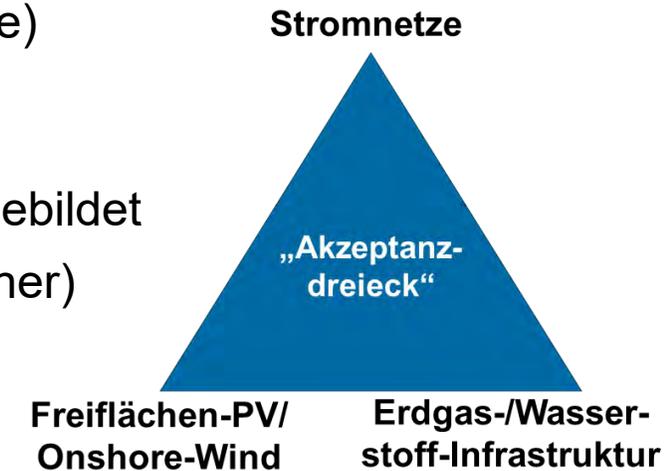
Eine grundsätzliche Frage / Unsicherheit besteht darin, welche Zielfunktion / welche Restriktionen bei der weiteren Entwicklung des Energiesystems dominieren werden bzw. den zentralen Engpass bilden.

Die öffentliche Akzeptanz spielt hier eine wichtige Rolle. Sie sollte jedoch differenziert werden:

- bei Stromnetzen (vor allem auf der Hoch- und Höchstspannungsebene)
  - als exogene Vorgabe (Transportnetz) explizit betrachtet
- bei Freiflächen-PV- und / oder Onshore-Windkraft-Anlagen
  - als Bounds konsistent zu den Storylines zumindest orientierend abgebildet
- bei neuen / umgebauten Wasserstoffinfrastrukturen (Netze und Speicher)
  - in der hier vorgelegten Analyse nicht spezifisch betrachtet

→ Auf allen drei Ebenen durchschlagende Akzeptanzrestriktionen führen zur Verfehlung der Klimaschutzziele

→ Somit bildet die Bewertung der Akzeptanzrestriktionen sowie der damit verbundenen Effekte auf den Netzausbau, dessen Zeithorizonte und das Engpassmanagement ein wichtiges, auch gesellschaftlich zu führendes Vertiefungsthema.



# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (13)

## 8. Exkurs: Sensitivität Atomkraft in Europa

- Für die Entwicklungen innerhalb Deutschlands ist nur von (sehr) untergeordneter Bedeutung, wie sich das Ausland bezüglich des Ausbaus der Atomkraft bzw. mit Blick auf die existierenden Kernkraftwerkskapazitäten verhält:
  - Die Storyline beruht auf der Annahme, dass sich durch die verstärkte Nutzung der Atomkraft in anderen europäischen Staaten die politischen Rahmensetzungen und Investitionsstrategien in Deutschland (Ausbauniveaus, Technologiemic, diverse Lokalisierungsmuster etc.) nicht ändern.
  - Ein großskaliger Import von Strom aus Kernkraftwerken jenseits der deutschen Grenzen entsteht unter dieser Maßgabe nicht.
  - Zusätzliche oder reduzierte Transportaufgaben zwischen den verschiedenen Netzregionen in signifikantem Umfang (>1 GW) ergeben sich damit ebenfalls nicht.
  - Allein im Ausland veränderte Investitionsstrategien bzgl. der Kernenergie haben nur sehr geringe Implikationen auf die Entwicklung der Transportaufgaben in Deutschland.
  - Die entsprechenden Analysen wurden für ein bzgl. der Atomenergie „Extremszenario“ durchgeführt.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (14)

### 9. Und insgesamt...

- **Methode funktioniert grundsätzlich und kann analytischen Mehrwert generieren**
- **Diskussion von auf der Basis von Deskriptoren und deren Wechselwirkungen entwickelten Storylines ist sinnvoll und führt in zwei Dimensionen zu Mehrwert**
  - Die Bandbreite zukünftiger Systementwicklungen und der entsprechenden Auswirkungen auf die Transportaufgaben der Energieinfrastruktur kann aus einer *Ex ante*-Perspektive systematischer eingegrenzt und so der Möglichkeitsraum besser objektiviert werden.
  - Beschränkung exogener Vorgaben im Modellierungskontext erhöht gezielt die Konsistenz

**Ausgewählte Systemcharakteristika (tw. exogen vorgegeben, tw. endogen ermittelt):**

**Stromverbrauch**  
834-1.173 TWh

**Elektrolyseanlagen**  
0-77 GW (in DE)

**PV-Anlagen**  
210-369 GW

**Onshore-Windkraft**  
82-152 GW

**Offshore-Windkraft**  
41-71 GW

**NTCs zum Ausland**  
56-101 GW

**H2-Marktpreis**  
50- €/MWh

**AKW in Europa**  
24-76 GW

**Ggf. in unterschiedlichen Lokalisierungsvarianten**

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (15)

### 9. Und insgesamt...

- **Diskussion von auf der Basis von Deskriptoren und deren Wechselwirkungen entwickelten Storylines ist sinnvoll und führt in zwei Dimensionen zu Mehrwert**
  - Die Bandbreite zukünftiger Systementwicklungen und der entsprechenden Auswirkungen auf die Transportaufgaben der Energieinfrastruktur kann aus einer Ex ante-Perspektive systematischer eingegrenzt und so der Möglichkeitsraum besser objektiviert werden.
  - Die den Storylines zugrunde liegenden Deskriptoren eignen sich auch für das Monitoring der realweltlichen Entwicklungen des Energiesystems. Sie können damit auch als Frühindikatoren für die Frage dienen, in Richtung welcher Storyline sich die realweltlichen Trends entwickeln.
  - Hierzu zählen insbesondere die Trends „Fokus auf Elektrifizierung / Umwandlung“, „europäische Kooperation“, „Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur“ und „Akzeptanzrestriktionen“.
  - Werden an diesen Stellen rechtzeitig Pfadentscheidungen getroffen, so lassen sich Netzausbauentscheidungen mit deutlich höherer Sicherheit treffen.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (16)

### 9. Und insgesamt...

- **Bandbreite der Storylines zeigt aber auch**
  - Vieles ist möglich, aber nicht alles:
    - Zu eng gefasste Zukunftsbilder können gefährlich sein.
    - Die Bandbreiten / Restriktionen der vorstellbaren Entwicklungen sollten in einigen Bereichen, die in dieser Analyse nicht ausreichend abgebildet werden konnten (v.a. bzgl. infrastruktureller Restriktionen jenseits der Stromnetze), erweitert werden.
    - Eine Bewertung der prototypischen Storylines mit Eintrittswahrscheinlichkeiten ist sinnvoll (, wegen möglicher Verkettungseffekte aber auch methodisch anspruchsvoll).
  - Der Umgang mit Unsicherheiten und der langfristige Vorsorgegedanke anstelle stark deterministisch geprägter Planungsansätze müssen bei Infrastruktur-Assets mit sehr langfristigen Vorlaufzeiten stärker an Gewicht gewinnen (, auch in den regulatorischen Vorgaben für Netzplanung).
  - Die in der längerfristigen Perspektive und bei sehr straffen Transformationszeiträumen zur Klimaneutralität unvermeidlichen Fehler müssen toleriert werden, der Umgang mit aus der Vorsorgeperspektive entstehenden Fehlern muss vor allem regulatorisch adressiert werden.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (17)

### 10. ... bleibt aber auch noch viel zu tun / zu forschen

- Transformationspfade (d.h. die Entwicklung vom Ist-Zustand zum Zielbild der Storyline) bilden wichtige Rahmenbedingungen für die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Storylines
  - Der Einstieg in bestimmte Transformationspfade kann im Zeitverlauf die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Storylines massiv reduzieren („*Road blocker*“, fehlender Einstieg in Wasserstoffinfrastrukturen zu einem vergleichsweise frühen Zeitpunkt kann die Storyline **H2Global** ausschließen etc.).
  - Der Einstieg in bestimmte Transformationspfade kann im Zeitverlauf die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Storylines massiv erhöhen („*Booster*“, regulatorische Systeme, die einen ökonomisch und ggf. grenzüberschreitend optimierten Ausbau von Erzeugungs- und Speicheroptionen flankieren, können Storylines wie **EurOpt** massiv befördern).
- Neben den Zielbild-Storylines ist deswegen die Untersuchung der entsprechenden Transformationspfade eine sinnvolle und notwendige Ergänzung.
- Es bestehen starke Interaktionen zwischen der Infrastruktur (Erzeugung, Netze, Speicher) auf der Stromseite und der Infrastruktur (Erzeugung, Importe, Netze, Speicher) auf der Wasserstoff-Seite. Hier sind zeitliche Trägheiten und Kosten, aber auch Akzeptanzfragen und deren Interaktionen ein weitgehend unbearbeitetes Feld, das auch analytisch adressiert werden sollte.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (18)

### 10. ... bleibt aber auch noch viel zu tun / zu forschen

- Die aus pragmatischen Gründen stark vereinfachte Annahme, die zusätzliche Leistung der Offshore-Windenergie ausschließlich der Nordsee zuzuordnen und ausschließlich im Netzgebiet DE1 anzulanden, muss detaillierter untersucht werden, da sie großen Einfluss auf die identifizierten Netzausbaubedarfe hat.
- Die Transportaufgaben wurden aus wiederum pragmatischen Gründen aus einer AC-Perspektive ermittelt, die Errichtung zusätzlicher und ggf. netzzonenübergreifender DC-Stromtransportkapazitäten kann die Transportaufgaben verändern bzw. verschieben. Hier besteht weiterer und ergänzender Untersuchungsbedarf (auch unter Berücksichtigung der Akzeptanzfragen).
- Es gibt einige weitere Punkte, die sich im Verlauf der Arbeiten als untersuchungs- bzw. vertiefungswürdig herausgestellt haben, dies betrifft v. a. die Verteilung der Freiflächen-PV.
- Die Versorgungssicherheitsfrage wurde nur auf hohem Abstraktionsniveau betrachtet, deren Auswirkungen auf Transportaufgabe und -kapazitäten sollten vertieft betrachtet werden.
- Entsprechendes gilt für das Zusammenspiel der verschiedenen Flexibilitätsoptionen (auf der Angebots-, Speicher- und ggf. auch auf der Nachfrageseite) im In- und Ausland.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick (19)

### 10. ... bleibt aber auch noch viel zu tun / zu forschen

- Unterschiedliche Systementwicklungen im Ausland wurden nur eingeschränkt (= grundsätzlich als modellendogene Entscheidung mit einem über alle Länder homogenen Entscheidungskalkül, zusätzlich dazu nur die davon abweichende und exogen bestimmte Sensitivität zur Kernenergie im Ausland) berücksichtigt. Hier sind weitere Sensitivitätsanalysen mit modellexogenen Vorgaben für relevante Sachverhalte sinnvoll.
- Es wurden keine Variationen im Bereich des klassischen Stromverbrauchsniveaus unterstellt. Hier wären Zusatzuntersuchungen sinnvoll, um einen Eindruck zu bekommen, ob sich aus diesem Bereich für den Gesamtstromverbrauch signifikante Änderungen jenseits der Strombedarfe für Gebäude, Verkehr und Elektrolyse ergeben.
- Die spezifische Analyse der Ausbaubedarfe für die Wasserstoffinfrastruktur ist aus der strategischen, kostenseitigen, zeitlichen und akzeptanzseitigen Perspektive notwendig.
- Die Storylines könnten eine Grundlage für stochastische Analysen bilden, über die Eintrittswahrscheinlichkeiten und damit Bandbreiten der Transportaufgaben eingegrenzt werden könnten.
- Die Übersetzung der ermittelten Transportaufgaben in den Ausbaubedarf für die Transportnetze bildet den letztlich notwendigen Schritt zur Nutzung der Ergebnisse für die Netzausbauprozesse.

# 7 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

## 7 Literatur- und Quellenverzeichnis (1)

- [50Hertz et al., 2020] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, *Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber*, 2020. url: [https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf\\_NEP2037\\_2023.pdf](https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2037_2023.pdf)
- [50Hertz et al., 2022] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, *Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023, Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber*, 2022. url: [https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf\\_NEP2037\\_2023.pdf](https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2037_2023.pdf)
- [Anderski et al., 2015] T. Anderski, Y. Surmann, S. Stemmer, N. Grisey, E. Momot, A.-C. Leger, B. Betraoui, P. van Roy, *European cluster model of the Pan-European transmission grid. e-HIGHWAY 2050. Modular Development Plan of the Pan-European Transmission System 2050*, 2015. url: [https://docs.entsoe.eu/baltic-conf/bites/www.e-highway2050.eu/fileadmin/documents/Results/D2\\_2\\_European\\_cluster\\_model\\_of\\_the\\_Pan-European\\_transmission\\_grid\\_20072015.pdf](https://docs.entsoe.eu/baltic-conf/bites/www.e-highway2050.eu/fileadmin/documents/Results/D2_2_European_cluster_model_of_the_Pan-European_transmission_grid_20072015.pdf)
- [Böttger & Härtel, 2022] D. Böttger, P. Härtel, *On wholesale electricity prices and market values in a carbon-neutral energy system*, Energy Economics, Volume 106, 105709, 2022. doi: [10.1016/j.eneco.2021.105709](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105709).

## 7 Literatur- und Quellenverzeichnis (2)

- [EC, 2016] European Commission, *EU Reference Scenario 2016, Energy, transport and GHG emissions, Trends to 2050*, 2016.  
url: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft\\_publication\\_RE F2016\\_v13.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_RE F2016_v13.pdf)
- [EC, 2020] European Commission, *An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future*, 2020.  
url: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/offshore\\_renewable\\_energy\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/offshore_renewable_energy_strategy.pdf)
- [ENTSO-E & ENTSOG, 2020] ENTSO-E, ENTSOG, *TYNDP 2020, Scenario Report, 2020, Scenario Data Sets*. url: [https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP\\_2020\\_Joint\\_ScenarioReport\\_final.pdf](https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP_2020_Joint_ScenarioReport_final.pdf), <https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2020/06/TYNDP-2020-Scenario-Datafile.xlsx.zip>
- [ENTSO-E & ENTSOG, 2022] ENTSO-E, ENTSOG, *TYNDP 2022, Draft Scenario Report, 2022, Scenario Data Sets*. url: [https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2021/09/2021-10-TYNDP\\_2022\\_Draft\\_Scenario\\_Report.pdf](https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2021/09/2021-10-TYNDP_2022_Draft_Scenario_Report.pdf), <https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/download/>
- [FhG CINES, 2022] Fraunhofer ISI, Fraunhofer IEE, Fraunhofer IEG, CINES Modellvergleich, noch unveröffentlicht.

## 7 Literatur- und Quellenverzeichnis (3)

- [Fleiter et al., 2021] T. Fleiter, M. Rehfeldt, P. Manz, M. Neuwirth, A. Herbst, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, Treibhausgasneutrale Hauptszenarien, Modul Industrie, Karlsruhe, 2021. url: [https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/Modul\\_TN\\_Hauptszenarien\\_Industrie.pdf](https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/Modul_TN_Hauptszenarien_Industrie.pdf)
- [Fleiter et al. 2022] T. Fleiter, R. Schmitz, C. Senkpiel, M. Haun, J. Brandes, M. Welisch, C. Kost, N. Gerhardt, M. Neuwirth, P. Manz, B. Pfluger, *Wasserstoff im CO<sub>2</sub>-neutralen Energiesystem*, 2022. url: <https://fraunhofer.wasserstoff-story.de/>
- [Härtel & Ghosh, 2020] P. Härtel, M. Korpås, *Modelling heat pump systems in low-carbon energy systems with significant cross-sectoral integration*, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 93, 105051, 2020. doi: [10.1109/TPWRS.2020.3023474](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3023474).
- [Härtel & Korpås, 2021] P. Härtel, M. Korpås, *Demystifying market clearing and price setting effects in low-carbon energy systems*, Energy Economics, Volume 93, 105051, 2021. doi: [10.1016/j.eneco.2020.105051](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105051).

# A1 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromnachfrage

### Deskriptor: Konventioneller Stromverbrauch

#### Systemische Achse

Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringem Niveau konventioneller Stromnachfrage bis zu hohem Niveau

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Suffizienz
- Entwicklung der Bevölkerungszahl

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderung von Suffizienzmaßnahmen

##### Techno-ökonomische Treiber

- Technische Innovation
- Strompreis (bedingt)

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von Strom

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Sektorale Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Konventionelle Stromnachfrage [TWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Konventionelle Stromnachfrage umfasst die Stromnachfrage nach Licht, IT, sonst. elektrischen Anwendungen (z.B. Haushaltsgeräte), ...
- Lokalisierung der konventionellen Stromnachfrage stark durch Nutzer determiniert und daher nicht als systemischer Freiheitsgrad betrachtet
- Höhe der konventionellen Stromnachfrage wird im Projekt nicht variiert, da sie sich weitgehend proportional nach Bevölkerung verteilen würde und dem entsprechend auch die Transportaufgaben linear wachsen / sinken

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromnachfrage

### Deskriptor: Grad der Elektrifizierung des Mobilitätssektors

#### Systemische Achse

Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringer Durchdringung batterieelektrischer Fahrzeuge (z.B. PKW, LKW, ÖPNV) bis zu hoher Durchdringung

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Suffizienz
- Entwicklung der Bevölkerungszahl

- Bereitschaft zum Technologiewechsel
- Entwicklung des Individualverkehrs

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderung batterieelektrischer Fahrzeuge
- Förderung Suffizienzmaßnahmen

##### Techno-ökonomische Treiber

- Kostenentwicklung Batterien
- Technische Innovationen in der Elektromobilität

- Kostenentwicklung konkurrierender Treibstoffe i.w.S.

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von Strom

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Sektorale Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Marktanteile / Anzahl batterieelektrischer Fahrzeuge [%], [#]
- Stromnachfrage des Mobilitätssektors [TWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Lastprofil verursacht ohne Laststeuerung hohe untertägige Leistungsspitzen
- Lokalisierung der Mobilitätsnachfrage stark durch Nutzer determiniert und daher nicht als systemischer Freiheitsgrad betrachtet
- Die Höhe der Nutzenergie des Mobilitätssektors wird im Projekt nicht variiert, jedoch der Anteil der E-Mobilität an der Gesamtmobilität.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromnachfrage

### Deskriptor: Grad der Elektrifizierung des Wärmesektors

#### Systemische Achse

Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch

#### Ausprägung des Deskriptors

Geringe Durchdringung elektrischer Heizanwendungen (insb. Wärmepumpe) versus hohe Durchdringung

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Suffizienz
- Entwicklung der Bevölkerungszahl

- Bereitschaft zum Technologiewechsel
- Entwicklung des Gebäudebestands – insbesondere Sanierungsraten

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderung elektrischer Heizsysteme
- Finanzierung des Rückbaus großer Teile des Gas(verteil)netzes/ Förderung einer Wasserstoffverteilinfrastuktur

- Förderung der Gebäudesanierung / Energieeffizienzziele
- Mindeststandards an Heizsysteme

##### Techno-ökonomische Treiber

- Kostenentwicklung Wärmepumpen

- Kostenentwicklung konkurrierender Brennstoffe i.w.S.

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von Strom

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Sektorale Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Marktanteile / Anzahl Wärmepumpen / elektrischer Heizsysteme [%], [#]
- Stromnachfrage des Wärmesektors [TWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Lastprofil mit hoher Saisonalität
- Wärmespeicher können durch Laststeuerung untertägige Leistungsspitzen glätten
- Lokalisierung der Wärmenachfrage stark durch Nutzer determiniert und daher nicht als systemischer Freiheitsgrad betrachtet
- Höhe der Nutzenergienachfrage des Wärmesektors wird im Modell des Projekts nicht variiert, jedoch der Anteil elektrischer Heizanwendungen im gesamten Wärmesektor.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromnachfrage

### Deskriptor: Grad der Elektrifizierung des Industriesektors

#### Systemische Achse

Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch

#### Ausprägung des Deskriptors

Geringe Elektrifizierung industrieller Anwendungen (z.B. Prozesswärme) versus hohe Elektrifizierung

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Suffizienz
- Entwicklung der Wirtschaftsleistung
- Bereitschaft zum Technologiewechsel
- Abwanderung der Industrie

##### Politische / regulatorische Treiber

- Umlagenbefreiung energieintensive Industrie

##### Techno-ökonomische Treiber

- Stromkosten
- Kostenentwicklung industrieller Anwendungen
- Kostenentwicklung Brennstoffe i.w.S

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von Strom

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Sektorale Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Marktanteile / Anzahl industrieller Anwendungen [%], [#]
- Stromnachfrage des Industriesektors [TWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Lastprofil mit Grundlastcharakter
- Lokalisierung der industriellen Anwendungen stark durch Nutzer determiniert und daher nicht als systemischer Freiheitsgrad betrachtet
- Höhe der Nutzenergienachfrage des Industriesektors wird im Modell dieses Projekts nicht variiert (Abwanderungseffekte etc), jedoch der Elektrifizierungsgrad von Hochtemperaturprozessen im Industriesektor

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromnachfrage

### Deskriptor: Kapazität von PtX-Anlagen (insbesondere Elektrolyseure, ausgenommen PtH)

#### Systemische Achse

Stromverbrauchsniveaus Umwandlung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringer installierter Leistung von Umwandlungsanlagen bis zu hoher installierter Leistung

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz von synthetischen Brennstoffen
- Akzeptanz einer Wasserstoffinfrastruktur

- Bereitschaft zum Technologiewechsel (insb. Im Industriesektor)

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderung PtX-Anlagen
- Partnerschaften für Brennstoffimporte

##### Techno-ökonomische Treiber

- Kostenentwicklung PtX-Anlagen
- Kostenentwicklung Brennstoffe
- Strompreise

- Technologiefortschritt und Effizienz PtX-Anlagen

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von Strom

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Installierte Leistung von PtX-Anlagen [GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- Lokalisierung der Stromnachfrage von PtX-Anlagen ist systemischer Freiheitsgrad und wird daher als dedizierter Deskriptor betrachtet
- Einsatzweisen von PtX-Anlagen je nach Anschlusskonzept (in)flexibel

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromnachfrage

### Deskriptor: Kapazität von großskaligen PtH-Anlagen (Industrie oder Einspeisung in Wärmenetze)

#### Systemische Achse

Stromverbrauchsniveaus Umwandlung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringer installierter Leistung großskaliger PtH-Anlagen bis zu hoher installierter Leistung

#### Treiber

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Gesellschaftliche Treiber           | • Akzeptanz von synthetischen Brennstoffen  |
| Politische / regulatorische Treiber | • Förderung PtH-Anlagen<br>• Partnerschaften für Brennstoffimporte                  |
| Techno-ökonomische Treiber          | • Kostenentwicklung/Effizienzentwicklung von PtH-Anlagen<br>• Ausbau an Wärmenetzen |

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von Strom

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Installierte Leistung von PtH-Anlagen [GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- Einsatzweisen von PtH-Anlagen je nach Anschlusskonzept (in)flexibel
- Im Gegensatz zu PtX-Anlagen ist die Lokalisierung von Groß-PtH-Anlagen an die Wärmenachfrage gebunden und ist folglich kein systemischer Freiheitsgrad (wird daher nicht als dedizierter Deskriptor betrachtet)

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromnachfrage

### Deskriptor: Lokalisierung von PtX-Anlagen (insbesondere Elektrolyseure, ausgenommen PtH)

#### Systemische Achse

Stromverbrauchsniveaus Umwandlung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von verbrauchsnahe Lokalisierung von PtX-Anlagen bis (strom-)erzeugungsnaher Lokalisierung

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz einer Wasserstoffinfrastruktur
- Akzeptanz von Stromnetzausbau

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderung einer Wasserstoffinfrastruktur
- Förderung industrieseitiger PtX-Projekte
- Förderung stromerzeugungsnaher PtX-Projekte

- Einsatzregime von PtX-Anlagen
- Partnerschaften für Brennstoffimporte

##### Techno-ökonomische Treiber

- Kostenentwicklung Wasserstoffinfrastruktur

- Versorgungssicherheit Wasserstoffinfrastruktur
- Versorgungssicherheit Strominfrastruktur

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren (wenn erzeugungsnah)

- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren (wenn erzeugungsnah)

- Import von Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Potentiale je Standort [GW/Standort]
- Installierte Leistung / Stromnachfrage je Standort [GW/Standort]

#### Sonstige Ergänzungen

- Installierte Leistung bzw. Stromnachfrage / Brennstoffherzeugung der PtX-Anlagen wird als dedizierter Deskriptor betrachtet

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Umfang von Freiflächen-PV-Ausbau

#### Systemische Achse

Volatile Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von sehr geringem Ausbau an Freiflächen-PV bis zu einem sehr hohen Ausbau an Freiflächen-PV

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Bereitstellung von Freiflächen
- Akzeptanz von Freiflächen-PV

##### Politische / regulatorische Treiber

- Weiterführung EEG
- Steuerung der regionalen Stromerzeugungsquoten ( analog zu „2% Flächenziel der BL“)

##### Techno-ökonomische Treiber

- Co-Nutzungsmöglichkeiten (Landwirtschaft)
- Preisentwicklung bei PV-Anlagen

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang des Ausbaus an WEA oder Dachflächen PV (teilweise substituierende Effekte)
- Import an Strom
- Import an Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flächenpotentiale [m2], Ausbaupotentiale /Ausbauziele [GW]
- Jährlich erzeugte Energiemenge [GWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Lokalisierung von Freiflächenanlagen erfolgt meist Ertragsmaximierend abhängig vom Primärenergiedargebot, was eine zentrierte Positionierung im Süden zur Folge hat. Durch regulatorische Vorgaben / Anreizsystemen könnte diese Positionierung stärker gesteuert werden. Die Lokalisierung von Freiflächen PV stellt daher einen separaten Deskriptor dar.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Umfang von Dachflächen-PV-Ausbau

#### Systemische Achse

Volatile Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von sehr geringem Ausbau an PV bis zu einem sehr hohen Ausbau an PV

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Bereitstellung von Dächern
- Autarkiebestreben einzelner Haushalte (Quartierslösungen etc.)
- Gesellschaftliches Bestreben selbst zur Energiewende beizutragen

##### Politische / regulatorische Treiber

- Weiterführung EEG
- Verpflichtungen oder Anreizsysteme zur Installation von PV-Dachanlagen auf Gebäuden

##### Techno-ökonomische Treiber

- Preisentwicklung bei PV-Anlagen

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang des Ausbau an WEA und Freiflächen PV (teilweise substituierende Effekte)
- Import von Strom
- Import von grünen Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flächenpotentiale [m<sup>2</sup>], Ausbaupotentiale / Ausbauziele [GW], Volllaststunden [h/a]
- Jährlich erzeugte Energiemenge [GWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Die Lokalisierung von Dachflächen PV-Anlagen hängt im Gegensatz zu Freiflächen-PV vielmehr von gesellschaftlichen Faktoren und geeigneten Dachflächen ab. Hierdurch verteilt sich die Lokalisierung von Dachflächen-PV gleichmäßiger in Gesamtdeutschland. Daher stellt die Lokalisierung von Dachflächen-PV keinen separaten Deskriptor dar.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Umfang Windkraftanlagen-Onshore-Ausbau

#### Systemische Achse

Volatile Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringem Ausbau an onshore WEA bis zu hohem Ausbau an onshore WEA

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz für Windenergie-Ausbau

##### Politische / regulatorische Treiber

- Bereitstellung von Flächen / Flächenausweisungen
- Abstandsgebote von Windkraftanlagen
- Weiterführung EEG
- Beschleunigung von Genehmigungsverfahren

##### Techno-ökonomische Treiber

- Co-Nutzungsmöglichkeiten (Landwirtschaft)

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang des Ausbaus an PV (teilweise substituierende Effekte)
- Umfang des Ausbaus an offshore WEA (teilweise substituierende Effekte)
- Import von Strom
- Import von grünen Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flächenpotentiale [m<sup>2</sup>], Ausbaupotentiale / Ausbauziele [GW], Volllaststunden [h/a]
- Jährlich erzeugte Energiemenge [GWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Der Umfang an zugebauten onshore WEA kann die Transportaufgabe stark beeinflussen. Das resultierende Transporterfordernis hängt jedoch auch stark von der Lokalisierung der Anlagen ab. Daher wird die Lokalisierung der Anlagen als eigener Deskriptor dargestellt.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Umfang Windkraftanlagen-Offshore-Ausbau

#### Systemische Achse

Volatile Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringem Ausbau an offshore WEA bis zu hohem Ausbau an offshore WEA

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz für Windenergie-offshore-Ausbau
- Akzeptanz ggü. Infrastrukturausbau zur Anbindung der offshore-Windparks

##### Politische / regulatorische Treiber

- Bereitstellung von Meeresflächen
- Weiterführung EEG
- Beschleunigung von Genehmigungsverfahren
- Europäische Kooperation bei offshore-Ausbau

##### Techno-ökonomische Treiber

- Co-Nutzungsmöglichkeiten (Meeresnutzung)
- Anschlusskonzepte der offshore-Anlagen / H2-Erzeugung

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Umfang des Ausbaus an PV (teilweise substituierende Effekte)
- Umfang des Ausbaus von Onshore-WEA (teilweise substituierende Effekte)
- Import von Strom
- Import von grünen Brennstoffen

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Ausbaupotentiale / Ausbauziele [GW], Volllaststunden [h/a]
- Jährlich erzeugte Energiemenge [GWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Der Umfang an zugebauten offshore WEA kann die Transportaufgabe stark beeinflussen. Das resultierende Transporterfordernis hängt jedoch auch stark von der Lokalisierung der Anlagen ab. Bei offshore WEA kann die Lokalisierung nur in Nord- und Ostsee erfolgen, der Lokalisierungsfreiheitsgrad wird aber durch Verfügbarkeit der Flächen stark eingeschränkt. Darüber hinaus kann der Netzanschlusspunkte von offshore WEA frei gewählt werden. Dies ist jedoch Aufgabe der Netzplanung. Die Lokalisierung der offshore WEA stellt daher keinen eigenen Deskriptor da.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Lokalisierung Windkraftanlagen-Onshore-Ausbau

#### Systemische Achse

Volatile Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von einer anwendungsnahen Lokalisierung von onshore WEA Anlagen bis zu einer reinen ertragsmaximierten Lokalisierung der onshore WEA

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz für Windenergie-onshore-Ausbau

##### Politische / regulatorische Treiber

- Regionale Unterschiede in der Bereitstellung von Flächen / Flächenausweisungen
- Abstandsgebote von Windkraftanlagen
- Regionale Unterschiede in der Beschleunigung von Genehmigungsverfahren
- Steuerung der regionalen Stromerzeugungsquoten („2% Flächenziel der BL“)

##### Techno-ökonomische Treiber

- Co-Nutzungsmöglichkeiten (Landwirtschaft)

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Lokalisierung Umwandlungstechnologien
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flächenpotentiale [m<sup>2</sup>], Ausbaupotentiale / lokale Ausbauziele [GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- Umfang des WEA-Onshore Ausbaus als eigener Deskriptor

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Lokalisierung Freiflächen-PV-Ausbaus

#### Systemische Achse

Volatile Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von einer anwendungsnahen Lokalisierung von PV Anlagen bis zu einer reinen ertragsmaximierten Lokalisierung der Freiflächen-PV

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz des PV-Ausbaus in den einzelnen Regionen

##### Politische / regulatorische Treiber

- Bereitstellung von Freiflächen
- Förderung / reg. Bevorzugung von Flächen mit geringeren Primärenergiedargebot
- Steuerung der regionalen Stromerzeugungsquoten ( analog zu „2% Flächenziel der BL“)

##### Techno-ökonomische Treiber

- Co-Nutzungsmöglichkeiten (Landwirtschaft)

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Lokalisierung Umwandlungstechnologien
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flächenpotentiale [m<sup>2</sup>], Ausbaupotentiale /lokale Ausbauziele [GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- Umfang des Freiflächen PV-Ausbaus als eigener Deskriptor
- Lokalisierung von Freiflächen PV eher beeinflussbar als die Lokalisierung von Dachflächen PV (Abhängigkeit von Gebäuden). Daher stellt die Lokalisierung von Dachflächen-PV keinen eigenen Deskriptor dar.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Stromerzeugung durch brennstoffbasierte Kraftwerke (Wasserstoff, Methan, Ölprodukte)

#### Systemische Achse

Disponible Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von einem geringen Einsatz brennstoffbasierter Kraftwerke bis zu einem hohen Einsatz brennstoffbasierter Kraftwerke

#### Treiber

Gesellschaftliche Treiber

Politische / regulatorische  
Treiber

- Stabile Partnerschaften für Brennstoffimporte
- Förderung und Finanzierung neuer brennstoffbasierter KW

Techno-ökonomische Treiber

- Technologischer Fortschritt und Effizienz der brennstoffbasierte KW
- CO<sub>2</sub>-Emissionsbilanz der brennstoffbasierten KW

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch
- Import von grünen Brennstoffen
- Sektorale Flexibilität
- Volatile Stromerzeugung (Erzeugung synth. Brennstoffe)

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromerzeugung durch andere disponible Kraftwerke
- Zeitliche Flexibilität
- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Volatile Stromerzeugung (Konkurrenz)
- Import von Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Brennstoffpreise [€/MWh], *installierte Kapazitäten [GW] ?*

#### Sonstige Ergänzungen

- Die Einsatzweise von brennstoffbasierten Kraftwerken kann je nach Anschlusskonzept eine erzeugerseitige Flexibilität darstellen

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Stromerzeugung

### Deskriptor: Stromerzeugung durch andere disponible Kraftwerke (Wasserkraft, Biomasse)

#### Systemische Achse

Disponible Stromerzeugung

#### Ausprägung des Deskriptors

Von einem geringen Einsatz disponibler Kraftwerke bis zu einem hohen Einsatz disponibler Kraftwerke

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz (*insb. bei Biomasse- und Pumpspeicher-KW*)
- Nutzungskonflikte biogener Einsatzstoffe

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderungen für Biomasse und Wasserkraft
- Bereitstellung geeigneter Flächen (*Wasserkraft*)

##### Techno-ökonomische Treiber

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Disponible Stromerzeugung durch brennstoffbasierte KW
- Zeitliche Flexibilität
- Volatile Stromerzeugung
- Import von Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Primärenergiedargebot [TWh/a], installierte Kapazitäten [GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- Die Einsatzweise von anderen disponiblen Kraftwerken kann je nach Anschlusskonzept eine erzeugerseitige Flexibilität darstellen

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Flexibilität

### Deskriptor: Verfügbarkeit der Flexibilität von „Flexsumern“ (DSM, dezentrale Batteriespeicher)

#### Systemische Achse

Zeitliche Flexibilität

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringer Verfügbarkeit von Flexibilität durch Flexsumer bis zu hoher Verfügbarkeit

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Bereitschaft zur Flexibilitätsbereitstellung (ggf. unter Inkaufnahme von Komfort- oder sonstigen Einbußen)

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderungen / Anreizsystematik für dezentrale Flexibilität
- Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den großflächigen Einsatz von dezentraler Flexibilität

##### Techno-ökonomische Treiber

- Technische Entwicklungen im Flexibilitätsbereich: Kommunikationstechnik, Speichertechnologien
- Strompreis

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch
- Umfang volatiler Stromerzeugung

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Zeitliche Verschiebepotentiale durch Großbatteriespeicher
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Sektorale Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen
- Import Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flexibilitätspotentiale [GW], [GWh]
- Verschiebezeiträume [h]
- Verschiebe-/ Verzichtskosten [€/MW(h)]

#### Sonstige Ergänzungen

- Lokalisierung der Nachfrageflexibilität stark durch Anbieter determiniert und daher nicht als systemischer Freiheitsgrad betrachtet.

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Flexibilität

### Deskriptor: Umfang von Großbatteriespeichern

#### Systemische Achse

Zeitliche Flexibilität

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringer installierter Leistung / Kapazität von Großbatteriespeichern bis zu hoher installierter Leistung / Kapazität

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Gesellschaftliche Akzeptanz von Großbatteriespeichern
- Rolle von Quartierslösungen

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderungen / Anreizsystematik für zentrale und dezentrale Flexibilität
- Ausprägung des europäischen Strommarktes

##### Techno-ökonomische Treiber

- Technologiefortschritt Batteriespeichertechnologien
- Kostenentwicklung Batteriespeicher / Technische Innovation
- Strompreis

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letzterbrauch
- Umfang volatiler Stromerzeugung

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Umwandlung
- Umfang der disponiblen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebepotentiale durch „Flexsumer“
- Sektorale Verschiebung der Versorgungsaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen
- Import von Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Installierte Leistung und Kapazität [GW], [GWh]
- Ausbaupotentiale [GW], [GWh], Ausbaurkosten [€/GW], [€/GWh]

#### Sonstige Ergänzungen

- Lokalisierung der Großbatteriespeicher stellt systemischen Freiheitsgrad dar und wird daher als eigener Deskriptor betrachtet

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Flexibilität

### Deskriptor: Lokalisierung von Großbatteriespeichern

<b>Systemische Achse</b>	Zeitliche Flexibilität	
<b>Ausprägung des Deskriptors</b>	Von einer verbrauchsnahe Lokalisierung von Großbatteriespeichern bis zu einer erzeugungsnahe Lokalisierung von Großbatteriespeichern	
<b>Treiber</b>		
Gesellschaftliche Treiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regionale Ziele zur Selbstversorgung / Quartierslösungen</li> </ul>	
Politische / regulatorische Treiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>Förderungen / Anreizsystematik für erzeugungs- oder verbrauchsnahe Flexibilität</li> <li>Förderungen / Anreizsystematik für regionale Selbstversorgung / ausgeglichene Strombilanzen</li> </ul>	
Techno-ökonomische Treiber	<ul style="list-style-type: none"> <li>Technologiefortschritt Batteriespeichertechnologien</li> <li>Kostenentwicklung Batteriespeicher</li> <li>Strompreis</li> </ul>	
<b>Einfluss auf weitere systemische Achsen</b>		
<b>Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren</b>	<b>Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren</b>	
<b>Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Freigabe von Flächen / Restriktionen von Flächen [m<sup>2</sup>]</li> <li>Potentiale je Standort [GW/Standort]; Ausbaurkosten je Standort [€/GW], [€/GWh]</li> <li>Installierte Leistung und Kapazität je Standort [GW], [GWh]</li> </ul>	
<b>Sonstige Ergänzungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es wird erwartet, dass der Zubau von Großbatteriespeichern im Verhältnis zu PtX-Anlagen relativ gering ausfällt, weshalb dem Deskriptor keine hohe Dominanz zukommt. Heutige Batteriespeicher sind insbesondere zum Ausgleich der Schwankungen von PV ausgelegt, weshalb bei einer erzeugungsnahe Positionierung ein Zubau in Süddeutschland zu erwarten ist.</li> </ul>	

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Flexibilität

### Deskriptor: Verfügbarkeit einer Erdgastransportinfrastruktur

#### Systemische Achse

Sektorale Flexibilität

#### Ausprägung des Deskriptors

Von keiner / geringer Verfügbarkeit einer Erdgastransportinfrastruktur bis zu hoher Verfügbarkeit

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz von Gas

##### Politische / regulatorische Treiber

- Finanzierung des Rückbaus großer Teile der Gasinfrastruktur (Fernleitungsnetz / Verteilnetz)
- Partnerschaften für Brennstoffimporte (Methan)
- Finanzierung / Förderung von Wasserstoffinfrastrukturen
- Finanzierung / Förderung von Biomethan

##### Techno-ökonomische Treiber

- Technologiefortschritt Wasserstofftechnik

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Umfang volatile Stromerzeugung
- Umfang disponible Stromerzeugung
- Import von grünen Brennstoffen

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Letztverbrauch
- Zeitliche Verschiebepotentiale durch Großbatteriespeicher
- Import von Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- NTC Gassystem [GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- In Modellen, die die Gasinfrastruktur nicht explizit modellieren, stellt dieser Deskriptor eine qualitative Annahme für die Verfügbarkeit und Lokalisierung gasbasierter Technologien dar

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Flexibilität

### Deskriptor: Verfügbarkeit einer Wasserstofftransportinfrastruktur

#### Systemische Achse

Sektorale Flexibilität

#### Ausprägung des Deskriptors

Von keiner / geringer Verfügbarkeit einer Wasserstofftransportinfrastruktur bis zu hoher Verfügbarkeit

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz von Wasserstoff

##### Politische / regulatorische Treiber

- Finanzierung des Rückbaus großer Teile der Gasinfrastruktur (Fernleitungsnetz/Verteilnetz)
- Partnerschaften für Brennstoffimporte (Wasserstoff)
- Finanzierung / Förderung von Wasserstoffinfrastrukturen

##### Techno-ökonomische Treiber

- Technologiefortschritt Wasserstofftechnik
- Importpreis H<sub>2</sub>
- Strompreis

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveau Umwandlung
- Umfang volatile Stromerzeugung
- Umfang disponible Stromerzeugung
- Import von grünen Brennstoffen

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch
- Zeitliche Verschiebepotentiale durch Großbatteriespeicher
- Import von Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- NTC Wasserstoffsystem [GW]
- Ausbaupotential [GW] und Ausbaurkosten [€/GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- In Modellen, die die Wasserstoffinfrastruktur nicht explizit modellieren, stellt dieser Deskriptor eine qualitative Annahme für die Verfügbarkeit und Lokalisierung wasserstoffbasierter Technologien dar

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Ausland

### Deskriptor: Ausbau grenzüberschreitender Handelskapazitäten im Stromsektor

#### Systemische Achse

Import von Strom

#### Ausprägung des Deskriptors

Von keinem Ausbau bis hin zu einem sehr hohen Ausbau der Handelskapazitäten

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz ggü. Netzausbau
- Akzeptanz ggü. der ausländischen Kraftwerkstechnologien (bspw. Kernenergie)
- Bestrebungen nach einer Europäischen Energiewende
- Autarkiebestrebungen
- Akzeptanz von Transit

##### Politische / regulatorische Treiber

- Freigabe der Netzkuppelleitungen für den Strommarkt (FBMC, MinRAM)
- Ausgestaltung des europäischen Strombinnenmarktes
- Europäische Kooperationen
- Ausgestaltung Wind offshore

##### Techno-ökonomische Treiber

- Weltweiter / europäischer Ausbau einer Importinfrastruktur von Brennstoffen
- Vergütung der Transite

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveaus Umwandlung

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Zeitliche / sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen
- Disponible Erzeugung
- Volatile Erzeugung

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Grenzüberschreitende Handelskapazitäten für jedes „Gebotszonenpaar“ [GW je NTC]

#### Sonstige Ergänzungen

- Wenn eine hohe Aversion ggü. dem innerdeutschen Netzausbau besteht, ist ein Ausbau der grenzüberschreitenden Handelskapazitäten unwahrscheinlich
- Der Stromimport aus dem Ausland kann eine systemische Flexibilität darstellen und somit den Bedarf an erzeuger- bzw. verbrauchsseitiger Flexibilität reduzieren

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Ausland

### Deskriptor: Umfang Kernkraft im Ausland

#### Systemische Achse

Import von Strom

#### Ausprägung des Deskriptors

Von Ausstieg aller EU Staaten aus der Kernenergie bis hin zu starkem Zubau der Kernenergie in den (manchen) EU-Staaten

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz der Kernkraft als „grüne“ Technologie
- Vorbehalte ggü. Ausbau erneuerbare Energien

##### Politische / regulatorische Treiber

- Einordnung der Kernkraft als „grüne“ Technologie
- Finanzielle Förderung von Kernkraftwerken
- Zeitlicher Verzug bei der Umstellung des Stromsystems

##### Techno-ökonomische Treiber

- Berücksichtigung der Folgekosten und Beteiligung der Kraftwerksbetreiber an diesen
- Flexibilitätsanforderungen an den Kraftwerksbetrieb

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveaus Umwandlung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen
- Disponible Erzeugung
- Volatile Erzeugung

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Ausbau der Kapazitäten [GW]

#### Sonstige Ergänzungen

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Ausland

### Deskriptor: Umfang volatile Stromerzeugung im Ausland

#### Systemische Achse

Import von Strom

#### Ausprägung des Deskriptors

Von einem geringen Anteil volatiler Stromerzeugungsanlagen bis zu einem hohen Anteil volatiler Stromerzeugungsanlagen im Ausland

#### Treiber

Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz EE-Ausbau im Ausland

Politische / regulatorische Treiber

- Förderungen EE-Ausbau im Ausland
- Flächenbereitstellung für EE-Anlagen im Ausland

Techno-ökonomische Treiber

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch (Import)
- Stromverbrauchsniveaus Umwandlung (Import)
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen
- Disponible Erzeugung (Import)
- Volatile Erzeugung (Import)

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flächenpotentiale [m<sup>2</sup>]; Ausbaupotentiale / Ausbauziele [GW]
- installierte Leistung der volatilen Stromerzeugungsanlagen [GW]; Volllaststunden [TWh/a]
- Jährlich erzeugte Energiemenge [GWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Ausland

### Deskriptor: Umfang Flexibilität (Erzeugung und Verbrauch) im Ausland

#### Systemische Achse

Import von Strom

#### Ausprägung des Deskriptors

Von einem sehr geringen Potential verbrauchs- und erzeugungsseitiger Flexibilität im Ausland bis hin zu einem hohen Potential

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Bereitschaft zur Flexibilitätsbereitstellung (ggf. unter Inkaufnahme von Komfort- oder sonstigen Einbußen) im Ausland

##### Politische / regulatorische Treiber

- Förderungen / Anreizsystematik für Flexibilitätsbereitstellung im Ausland
- Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Flexibilität

##### Techno-ökonomische Treiber

- Technische Entwicklungen im Flexibilitätsbereich
- Strompreis

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch
- Volatile Erzeugung

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von grünen Brennstoffen
- Stromverbrauchsniveaus Umwandlung
- Disponible Erzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Flexibilitätspotentiale [GW], [GWh]
- Verschiebezeiträume [h]
- Verschiebe-/ Verzichtskosten [€/MW(h)]

#### Sonstige Ergänzungen

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Ausland

### Deskriptor: Angebot an grünen Brennstoffimporten

#### Systemische Achse

Import von grünen Brennstoffen

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringem weltweiten Angebot bis zu einem sehr hohen Angebot zum Import von grünen Brennstoffen

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Weltweiter EE-Ausbau
- Autarkiebestreben

##### Politische / regulatorische Treiber

- Stabile Partnerschaften für Brennstoffimporte
- Politische Abhängigkeiten
- Langfristige Handelsbeziehungen

##### Techno-ökonomische Treiber

- Technische Entwicklungen im Wasserstoffherstellungsbereich

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Disponible Erzeugung

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchs-niveaus Letztverbrauch
- Stromverbrauchs-niveaus Umwandlung
- Import von Strom
- Volatile Erzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Angebot von grünen Brennstoffen [TWh/a]

#### Sonstige Ergänzungen

- Ein hohes weltweites Angebot von Brennstoffen kann sich nur bei einem entsprechenden Ausbau der Importinfrastruktur auf das deutsche Energiesystem auswirken

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Ausland

### Deskriptor: Infrastruktur für grüne Brennstoffimporte

#### Systemische Achse

Import von grünen Brennstoffen

#### Ausprägung des Deskriptors

Von geringem Ausbau der internationalen Infrastruktur (niedrigem Importpotential) zu intensivem Ausbau der Infrastruktur (hohem Importpotential)

#### Treiber

##### Gesellschaftliche Treiber

- Akzeptanz ggü. grünen Brennstoffimporten
- Autarkiebestreben

##### Politische / regulatorische Treiber

- Stabile Partnerschaften für grüne Brennstoffimporte
- Politische Abhängigkeiten
- Langfristige Handelsbeziehungen

##### Techno-ökonomische Treiber

- Weltweiter / europäischer Ausbau einer Importinfrastruktur für Brennstoffe

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Disponible Erzeugung

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchs niveaus Letztverbrauch
- Stromverbrauchs niveaus Umwandlung
- Import von Strom
- Volatile Erzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- NTC Wasserstoffsystem/Importpotential [GWh/d]
- Ausbaupotential [GW] und Ausbaurkosten [€/GW]

#### Sonstige Ergänzungen

- Der Ausbau der internationalen Infrastruktur für grüne Brennstoffimporte wird höchstwahrscheinlich nur angestrebt, wenn auch die innerdeutsche Brennstoffinfrastruktur ausgebaut wird. (Deskriptor: Verfügbarkeit einer Wasserstofftransportinfrastruktur )
- Importpotential auch durch Nachbarländer / Infrastruktur begrenzt

# A1 Steckbriefe der systemischen Deskriptoren

## Kategorie: Ausland

### Deskriptor: Preise für grüne Brennstoffimporte

#### Systemische Achse

Import von grünen Brennstoffen

#### Ausprägung des Deskriptors

Geringer Importpreis für Brennstoffe aus dem Ausland versus hoher Importpreis

#### Treiber

Gesellschaftliche Treiber

Politische / regulatorische  
Treiber

Techno-ökonomische Treiber

- Partnerschaften für Brennstoffimporte
- Politische Abhängigkeiten
- Langfristige Handelsbeziehungen
- Technische Entwicklungen im Wasserstofferzeugungsbereich
- Hoher weltweiter Ausbau an EE-Anlagen, um grünen Wasserstoff zu erzeugen
- Weltweiter Ausbau der Infrastruktur

#### Einfluss auf weitere systemische Achsen / Deskriptoren

##### Positiv korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Sektorale Verschiebung der Transportaufgabe
- Disponible Erzeugung

##### Negativ korrelierte Achsen / Deskriptoren

- Stromverbrauchsniveaus Letztverbrauch
- Stromverbrauchsniveaus Umwandlung
- Umfang der volatilen Stromerzeugung
- Zeitliche Verschiebung der Transportaufgabe
- Import von Strom

#### Abbildung in Modellen zur Szenariengenerierung

- Importpreise [€/MWh]

#### Sonstige Ergänzungen

- Bei einem hohen Angebot an grünen Brennstoffimporten und einer gut ausgebauten weltweiten Infrastruktur zum Import von Brennstoffen wird sich ein niedriger Preis für Brennstoffimport einstellen

# A2 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Importpreis H<sub>2</sub> von außerhalb Europas in €/MWh<sub>th</sub>

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Importpreis H<sub>2</sub> von außerhalb Europas in €/MWh<sub>th</sub></b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	Nicht relevant	<b>85</b>	<b>85</b>	<b>85</b>	<b>73</b>	<b>50</b>	<b>85</b>	<b>110</b>
Gesamtsystem (Europa ohne DE)	Nicht relevant	<b>85</b>	<b>85</b>	<b>85</b>	<b>73</b>	<b>50</b>	<b>85</b>	<b>110</b>
Kommentar/Quelle	-	[FhG CINES, 2022] Mittel Grün/Blau Optimistisch	[FhG CINES, 2022] Mittel Grün/Blau Optimistisch	[FhG CINES, 2022] Mittel Grün/Blau Optimistisch	[FhG CINES, 2022] Niedrig Blauer H2	TYNDP 2022 Global Ambition [ENTSO-E & ENTSOE, 2022] 2050 (1,50 €/kg H2)	[FhG CINES, 2022] Mittel Grün/Blau Optimistisch	[FhG CINES, 2022] Hoch PtG/ Biomethan-Szenario

**Weitere Erläuterungen**

Der Importpreis für Wasserstoff erlaubt dem Modell kohlenstoffneutralen Wasserstoff von außerhalb des betrachteten Systems (d. h. außerhalb Europas) zu importieren. Der Preis stellt endogen somit eine Opportunität ggü. des Ausbaus von EE-Erzeugungs- und Elektrolysekapazitäten innerhalb der betrachteten Systemgrenzen dar. Da ein systemweiter Brennstoffmarkt betrachtet wird, gibt es keine Unterscheidung in einzelne Marktgebiete, und der Preis gilt *global*.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Installierte Erzeugungleistung Onshore Wind (obere Potenzialgrenze) in $GW_{el}$

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Installierte Erzeugungleistung Onshore Wind (obere Potenzialgrenze) in <math>GW_{el}</math> / Endogene Ausbauentscheidung in <math>GW_{el}</math></b>								
<b>Deutschland</b> (7 Netzregionen)	<b>Untergrenze 85</b> <b>85</b>	<b>115</b> <b>115</b>	<b>180</b> <b>152</b>	<b>180</b> <b>152</b>	<b>180</b> <b>123</b>	<b>150</b> <b>82</b>	<b>150</b> <b>133</b>	<b>150</b> <b>142</b>
<b>Gesamtsystem</b> (Europa inkl. DE)	<b>363</b> <b>121</b>	<b>892</b> <b>438</b>	<b>1224</b> <b>575</b>	<b>1224</b> <b>533</b>	<b>1224</b> <b>432</b>	<b>1060</b> <b>188</b>	<b>1060</b> <b>479</b>	<b>1060</b> <b>538</b>
Kommentar/ Quelle	[ENTSO-E & ENTSOG, 2020], Distributed Energy 2030 DE-Netzregionen [50Hertz et al., 2020] (interp)	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2040	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2040/2050 (Mittelwert)	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2040/2050 (Mittelwert)	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2040/2050 (Mittelwert)

**Weitere Erläuterungen**

Die obere Potenzialgrenze dient zur Beschränkung der Ausbaupotenziale für Onshore-Wind-Technologien. Der tatsächliche Ausbau resultiert aus den in SCOPE SD ermittelten Ausbauentscheidungen für die einzelnen Technologien auf Basis der Restriktionen sowie der und dahinterliegenden Gestehungskostenklassen der Onshore-Wind-Technologien in jedem betrachteten Marktgebiet.

Lediglich in dem mittelfristigen Referenzszenario wird innerhalb der deutschen Netzregionen mit einer Potenzialuntergrenze für Onshore-Wind-Technologien gearbeitet, um eine Kongruenz mit dem NEP 2035 [50Hertz et al., 2020] (zwischen 2020 und 2035 interpoliert für 2030) zu gewährleisten.

Für Deutschland wird im Szenarioentwurf des NEP 2037 eine Ausbaugrenze von 209  $GW_{el}$  abgeschätzt. Die EEG-Novelle 2022 sieht ca. 160  $GW_{el}$  als obere Grenze vor. Das Flächenziel in Höhe von 2% der Landesfläche inkl. unsicherer Umsetzungswahrscheinlichkeiten wird hier mit 180  $GW_{el}$  abgeschätzt.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Installierte Erzeugungsleistung Offshore Wind (untere Potenzialgrenze) in GW<sub>el</sub>

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Installierte Erzeugungsleistung Offshore Wind (untere Potenzialgrenze) in GW<sub>el</sub> / Endogene Ausbauentscheidung in GW<sub>el</sub></b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	<b>20</b> <b>20</b>	<b>41</b> <b>41</b>	<b>71</b> <b>71</b>	<b>71</b> <b>71</b>	<b>71</b> <b>71</b>	<b>41</b> <b>41</b>	<b>71</b> <b>71</b>	<b>71</b> <b>71</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	<b>105</b> <b>105</b>	<b>403</b> <b>403</b>	<b>433</b> <b>433</b>	<b>433</b> <b>433</b>	<b>433</b> <b>433</b>	<b>403</b> <b>403</b>	<b>433</b> <b>433</b>	<b>433</b> <b>433</b>
Kommentar / Quelle	[EC,2020] 60 G <sub>el</sub> ; plus 45 GW <sub>el</sub> für UK und NO [50 Hertz et al., 2020] für DE (Zielwert Klimaschutzprogramm 2030)	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050, abweichende Annahme für DE	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050, abweichende Annahme für DE	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050

**Weitere Erläuterungen**

Die untere Potenzialgrenze dient zur Forcierung eines Mindestausbaus an Offshore-Wind-Technologien. Dieser wird im Modell benötigt, um die politischen Ausbauziele für Offshore-Wind-Erzeugungsanlagen sinnvoll abzubilden. Aufgrund der aus Gesamtsystemsicht berücksichtigten Kostenstruktur würden Offshore-Wind-Technologien sonst nur wenig oder gar nicht endogen ausgebaut (insb. aufgrund der Netzanbindungskosten). Da der tatsächliche Ausbau aus den in SCOPE SD ermittelten Ausbauentscheidungen resultiert, wäre es dem Modell theoretisch jedoch möglich, größere Offshore-Windausbauenszenarien zu bestimmen.

Es wird weiterhin angenommen, dass der zusätzliche Ausbau über 41 GW<sub>el</sub> (d. h. 30 GW<sub>el</sub>) ausschließlich in der Netzregion DE1 (Niedersachsen, Hamburg, Schleswig-Holstein) angeschlossen wird. Für 2050 werden in DE2 2.4 GW<sub>el</sub> und in DE3 2.3 GW<sub>el</sub> angeschlossen. Für 2050 werden in DE2 4.8 GW<sub>el</sub> und in DE3 8.0 GW<sub>el</sub> angeschlossen.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Installierte Erzeugungsleistung PV-Aufdachanlagen (untere Potenzialgrenze) in GW<sub>eI</sub>

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Installierte Erzeugungsleistung PV-Aufdachanlagen (untere Potenzialgrenze) in GW<sub>eI</sub> / Endogene Ausbaumentscheidung in GW<sub>eI</sub></b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	<b>73</b> <b>73</b>	<b>208</b> <b>208</b>	<b>208</b> <b>208</b>	<b>208</b> <b>208</b>	<b>208</b> <b>208</b>	<b>208</b> <b>208</b>	<b>208</b> <b>208</b>	<b>208</b> <b>208</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	<b>244</b> <b>244</b>	<b>833</b> <b>833</b>	<b>833</b> <b>833</b>	<b>833</b> <b>833</b>	<b>833</b> <b>833</b>	<b>833</b> <b>833</b>	<b>833</b> <b>833</b>	<b>833</b> <b>833</b>
Kommentar / Quelle	DE: [50Hertz et al., 2020] (interpoliert für 2030); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen

**Weitere Erläuterungen**

Die untere Potenzialgrenze dient zur Forcierung eines Mindestausbaus an PV-Anlagen, (insb. für die regionale Aufteilung innerhalb Deutschlands ist das relevant) .

Das Modell kann höhere Leistungen bis zur oberen Potenzialgrenze installieren (für PV ist i.d.R. aber keine Obergrenze vorgegeben).

IEE-eigene Annahmen für das Gesamtsystem (Europa) basieren auf pfadabhängigen Markthochlaufbetrachtungen.

Modellendogene Ausbaumentscheidungen liegen sowohl in Gesamtdeutschland und auch im Rest von Europa oberhalb der Untergrenze.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Installierte Erzeugungleistung PV-Freiflächenanlagen in $GW_{el}$

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Installierte Erzeugungleistung PV-Freiflächenanlagen in <math>GW_{el}</math> / Endogene Ausbaumentcheidung in <math>GW_{el}</math></b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	∞ / Untergrenze <b>30</b>	∞ <b>161</b>	∞ <b>96</b>	∞ <b>96</b>	∞ <b>83</b>	∞ <b>4</b>	∞ <b>90</b>	∞ <b>138</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	∞ / Untergrenze <b>39</b> <b>244</b>	∞ <b>908</b>	∞ <b>651</b>	∞ <b>411</b>	∞ <b>526</b>	∞ <b>22</b>	∞ <b>568</b>	∞ <b>804</b>
Kommentar / Quelle	DE: [50Hertz et al., 2020] (interpoliert für 2030); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen

**Weitere Erläuterungen**

Die untere Potenzialgrenze dient zur Forcierung eines Mindestausbaus an PV-Anlagen, (insb. für die regionale Aufteilung innerhalb Deutschlands ist das relevant) .

Das Modell kann höhere Leistungen bis zur oberen Potenzialgrenze installieren (für PV ist i.d.R. aber keine Obergrenze vorgegeben).

Ein zusätzlicher endogener Ausbau von PV-Freiflächenanlagen ist grundsätzlich unbeschränkt möglich.

IEE-eigene Annahmen für das Gesamtsystem (Europa) basieren auf pfadabhängigen Markthochlaufbetrachtungen.

Modellendogene Ausbaumentscheidungen liegen sowohl in Gesamtdeutschland und auch im Rest von Europa oberhalb der Untergrenze.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Installierte Erzeugungslleistung Kernkraft in GW<sub>eI</sub>

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Installierte Erzeugungslleistung Kernkraft in GW<sub>eI</sub></b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant	Nicht relevant
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	<b>91</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>76</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>
Kommentar / Quelle	-	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	UPTAKE-eigene Annahmen (siehe nächste Folie)	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Distributed Energy 2050

**Weitere Erläuterungen**

Für die Kernkraftanlagen wurde lediglich eine exogene Vorgabe zum im jeweiligen Szenariojahr bestehenden Kraftwerkspark berücksichtigt. Endogene Ausbauentscheidungen waren dem Modell nicht als Option gegeben und wurden somit nicht getätigt.

Für das EurAtom-Szenario wurde eine länderspezifische Betrachtung durchgeführt und mit dem Auftraggeber abgestimmt. Siehe hierzu auch die [nächste Folie](#).

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung

## Spezifikation des Kernkraft-Entwicklung in der Storyline-Variante EurAtom (1)

- **BG:** alle derzeit betriebenen Anlagen sind altersbedingt außer Betrieb, als dann bestehende Anlagen werden im High Nuclear Case die als planned und proposed gelisteten 3 GW in Ansatz gebracht
- **CZ:** von den derzeit betriebenen Anlagen würden noch 2 GW betrieben, dazu kämen 4,8 GW planned oder proposed Projekte, insgesamt ergäbe sich damit eine Gesamtkapazität von 6,8 GW
- **FI:** alle derzeit betriebenen Anlagen wären altersbedingt außer Betrieb, der Bestand ergibt sich aus den under construction, planned oder proposed gelisteten Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 3,4 GW
- **FR:** Von den heute betriebenen 61 GW sind 6 GW ab 1995 in Betrieb genommen worden und 3,9 GW von 1990 bis 1995, bei der von Macron angekündeten Laufzeitverlängerung auf 50 Jahre wären im o.g. Zeitpunkt der Klimaneutralität noch zwischen 6 und 9,9 GW in Betrieb, dazu kämen erstens das im Bau befindliche Kraftwerk in Flamanville mit einer Leistung von 1,6 GW sowie die von Macron dieser Tage angekündigten 6+8 neue Anlagen, bei einer Anlagenleistung von 1,6 GW wäre das eine Neuanlagenkapazität von insgesamt 11,2 bis 24 GW, das High Nuclear Scenario läge dann bei 33,9 GW
- **HU:** das derzeit verfolgte Neubaukraftwerk in Paks würde mit 2,4 GW die Leistung der altersbedingt ausfallenden Blöcke mit einer Gesamtleistung von 2 GW leicht überkompensieren, für unser Analyseaufgabe läge der High-Nuclear-Bestand dann bei 2,4 GW
- **LT:** Hier werden Neuanlagen mit einer Gesamtleistung von 2,7 GW diskutiert, das wäre dann das High Nuclear-Niveau

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung

## Spezifikation der Kernkraft-Entwicklung in der Storyline-Variante EurAtom (2)

- **NL:** Hier werden nach dem neuen Koalitionsvertrag zwei Blöcke verfolgt (es stehen allerdings nur 5 Mrd. € zur Verfügung ...), im High Nuclear Case wären das etwa 3 GW
- **PL:** Hier werden (sehr) langfristig) unter planned und proposed Anlagen mit einer Leistung von insgesamt 6 GW gelistet
- **RO:** für den Ersatz der existierenden Anlagen werden Neuanlagen mit einer Gesamtleistung von 1,4 GW diskutiert
- **SK:** von den derzeit betriebenen Anlagen wär altersbedingt im o.g. Zeitraum noch eine Leistung von 1 GW verfügbar, zusätzlich werden 0,9 GW weitere Kapazität diskutiert, so dass die zu veranschlagende Gesamtleistung im High Nuclear Case bei 1,9 GW liegen würde
- **SI:** das bestehende Kernkraftwerk wird altersbedingt außer Betrieb gehen, diskutiert wird eine Anlage mit einer Leistung von ca. 1,3 GW
- **UK:** von den bestehenden Anlagen wäre altersbedingt noch 1,2 GW in Betrieb, dazu kommt eine Gesamtkapazität von 3,4 GW im Bau oder im Prozess sowie weitere 5,6 GW in der Rubrik planned oder proposed, so dass sich für den High Nuclear Case eine Gesamtkapazität von 10,2 GW ergäbe
- in der EU-27 länge damit die Gesamtkapazität im High Nuclear Case bei 65,8 GW zuzüglich 10,2 GW in UK

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Installierte Verbrauchsleistung Elektrolyse (obere Potenzialgrenze) in $GW_{el}$

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Inst. Verbrauchsleistung Elektrolyse (obere Potenzialgrenze) in <math>GW_{el}</math> / Endogene Ausbauentscheidung in <math>GW_{el}</math></b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	Nicht relevant	∞ <b>27</b>	∞ <b>52</b>	∞ <b>49</b>	∞ <b>27</b>	∞ <b>0</b>	∞ <b>55</b>	∞ / Untergrenze <b>60</b> <b>77</b>
Gesamtsystem (Europa <u>ohne</u> DE)	Nicht relevant	<b>409</b> <b>300</b>	<b>409</b> <b>285</b>	<b>409</b> <b>254</b>	<b>409</b> <b>219</b>	<b>409</b> <b>47</b>	<b>409</b> <b>320</b>	<b>409</b> <b>383</b>
Kommentar / Quelle	-	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Maximum aus DE & GA 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Maximum aus DE & GA 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Maximum aus DE & GA 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Maximum aus DE & GA 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Maximum aus DE & GA 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Maximum aus DE & GA 2050	[ENTSO-E & ENTSOG, 2022] Maximum aus DE & GA 2050

**Weitere Erläuterungen**

Die obere Potenzialgrenze dient zur länderspezifischen Beschränkung der Ausbaupotenziale für Elektrolyseanlagen (außer in den deutschen Netzregionen, siehe unten). Weder für Deutschland noch für Europa in Summe ergeben sich durch diese Annahme bindende Restriktionen. Sie dienen lediglich der Vermeidung unrealistisch hoher Elektrolyseverbräuche insb. in kleinen Ländern.

In der Storyline H2dezentral wurde zusätzlich eine Untergrenze für die Mindestleistungen von Onsite-Elektrolyseuren in den jeweiligen Netzregionen angenommen, die sich in Summe über die dt. Netzregionen auf 60  $GW_{el}$  beläuft und wie folgt auf die Netzregionen aufteilt:  
 DE1: 8  $GW_{el}$   
 DE2: 3  $GW_{el}$   
 DE3: 20  $GW_{el}$   
 DE4: 6  $GW_{el}$   
 DE5: 8  $GW_{el}$   
 DE6: 7  $GW_{el}$   
 DE7: 8  $GW_{el}$   
 Darüber hinaus konnten auch hier unbeschränkt zusätzliche Ausbauentscheidungen getroffen werden.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung

## Jährlicher Stromverbrauch für die Industriewärmeversorgung mit Öfen in TWh<sub>e</sub>/a

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Jährlicher Stromverbrauch für die Industriewärmeversorgung mit Öfen in TWh<sub>e</sub>/a</b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	<b>21</b>	<b>105</b>	<b>105</b>	<b>105</b>	<b>105</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>34</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	<b>113</b>	<b>479</b>	<b>479</b>	<b>479</b>	<b>479</b>	<b>149</b>	<b>149</b>	<b>149</b>
Kommentar / Quelle	DE: [50Hertz et al., 2020] (interpoliert für 2030); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen	DE: [50Hertz et al., 2022] (B/C 2045); Rest: IEE-eigene Annahmen

**Weitere Erläuterungen**

Exogen angenommener Stromverbrauch für die Industriewärmeversorgung mit Öfen. Entgegen der Industriewärmebereitstellung für Heißwasser- und Dampfanwendungen werden für diese Industriesektoren der einzelnen Länder keine endogenen Transformationsentscheidungen im Modell getroffen und lediglich als exogene Annahme in der Energieversorgungsaufgabe (Strom und H2) berücksichtigt.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung

## Jährlicher Stromverbrauch im Schwerlastverkehrssektor in TWh<sub>e</sub>/a

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Jährlicher Stromverbrauch im Schwerlastverkehrssektor in TWh<sub>e</sub>/a</b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	<b>19</b>	<b>75</b>	<b>78</b>	<b>78</b>	<b>75</b>	<b>49</b>	<b>48</b>	<b>49</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	<b>85</b>	<b>376</b>	<b>382</b>	<b>383</b>	<b>377</b>	<b>241</b>	<b>239</b>	<b>239</b>
Kommentar / Quelle	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen

**Weitere Erläuterungen**

Aus exogen unterschiedlich angenommenen Verkehrsleistungen resultiert ein endogen unterschiedlich ausfallender Stromverbrauch im Schwerlastverkehrssektor. Die Verbräuche repräsentieren hierbei insbesondere die Strombedarfe von Brennstoffzellenfahrzeugen von Last- und Sattelzügen im Straßengüterverkehr.

Kleinere Schwankungen resultieren aus den modellendogenen Betriebsentscheidungen der Hybrid-LKWs. Hierbei überwiegt der elektrische Fahranteil jedoch deutlich.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung

## Jährlicher Wasserstoffverbrauch der Industriewärmeversorgung mit Öfen in TWh<sub>th</sub>/a

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Jährlicher Wasserstoffverbrauch für die Industriewärmeversorgung mit Öfen in TWh<sub>th</sub>/a</b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	Nicht relevant	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>108</b>	<b>108</b>	<b>108</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	Nicht relevant	<b>141</b>	<b>141</b>	<b>141</b>	<b>141</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>400</b>
Kommentar / Quelle	-	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021], [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021], [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021], [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021], [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021], [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021], [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021], [Fleiter et al. 2022]

**Weitere Erläuterungen**

Exogen angenommener Wasserstoffverbrauch für die Industriewärmeversorgung mit Öfen. Entgegen der Industriewärmebereitstellung für Heißwasser- und Dampfanwendungen werden für diese Industriesektoren der einzelnen Länder keine endogenen Transformationsentscheidungen im Modell getroffen und lediglich als exogene Annahme in der Energieversorgungsaufgabe (Strom und H2) berücksichtigt.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung

## Jährlicher Wasserstoffverbrauch der Grundstoffchemie in TWh<sub>th</sub>/a

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Jährlicher Wasserstoffverbrauch für die Grundstoffchemie in TWh<sub>th</sub>/a</b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	Nicht relevant	<b>112</b>	<b>112</b>	<b>112</b>	<b>112</b>	<b>112</b>	<b>112</b>	<b>112</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	Nicht relevant	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>466</b>
Kommentar / Quelle	-	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021],. [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021],. [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021],. [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021],. [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021],. [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021],. [Fleiter et al. 2022]	IEE-eigene Annahmen auf Basis [Fleiter et al. 2021],. [Fleiter et al. 2022]

**Weitere Erläuterungen**

Exogen angenommener Wasserstoffverbrauch für die Grundstoffchemie. Die Bedarfe dieser Industriesektoren der einzelnen Länder werden als exogene Annahme in der Energieversorgungsaufgabe mit H2 berücksichtigt.

Kein Unterschied für die betrachteten Storylines.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung

## Jährlicher Wasserstoffverbrauch des Schwerlastverkehrs in TWh<sub>th</sub>/a

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnah Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Jährlicher Wasserstoffverbrauch im Schwerlastverkehrssektor in TWh<sub>th</sub>/a</b>								
Deutschland (7 Netzregionen)	Nicht relevant	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>
Gesamtsystem (Europa inkl. DE)	Nicht relevant	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>295</b>	<b>295</b>	<b>295</b>
Kommentar / Quelle	-	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen	IEE-eigene Datenbasis und projekt-spezifische Annahmen

**Weitere Erläuterungen**

Exogen angenommener Wasserstoffverbrauch für den Schwerlastverkehrssektor. Die Bedarfe der Transportsektoren der einzelnen Länder werden als exogene Annahme in der Energieversorgungsaufgabe mit H2 berücksichtigt. Verbräuche repräsentieren insbesondere die Wasserstoffbedarfe von Brennstoffzellenfahrzeugen von Last- und Sattelzügen im Straßengüterverkehr.

# A2 Schlüsselparameter für die Modellierung Transportkapazitäten innerhalb, mit und außerhalb Deutschlands

Storyline	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2Global	H2OptDE	H2dezentral
Szenariojahr	2030	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Stromnachfrage		Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Grad Elektrifizierung	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen	Hoher Anteil Umwandlung / nicht-elektrifizierter Anwendungen
Lokalisierung		Regionale (Flächen-) Restriktionen	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Keine regionalen (Flächen-) Restriktionen, Flächen für WEA- u. Freiflächen-PVA	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Erzeugungsnahe Positionierung (Ausbau Gas- u. H2-Infrastruktur)	Lastnahe Positionierung (kein intensiver Ausbau Gasnetzinfrastruktur)
Ausland		Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Geringe Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>ohne</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland (Ausland <u>mit</u> Kernkraftausbau)	Begrenzung der Stromflüsse zum Ausland	Viele Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte	Wenige Brennstoffimporte
<b>Austauschkapazitäten (NTC) Summe in <math>GW_{el}</math> / Endogene Ausbauentscheidung in <math>GW_{el}</math></b>								
<b>Deutschland</b> 7 Netzregionen mit Ausland	Import <b>46</b> Export <b>43</b>	Import <b>46</b> Export <b>43</b>	Import <b>101</b> Export <b>94</b>	Import <b>101</b> Export <b>94</b>	Import <b>46</b> Export <b>43</b>	Import <b>51</b> Export <b>47</b>	Import <b>51</b> Export <b>47</b>	Import <b>51</b> Export <b>47</b>
<b>Deutschland</b> intern zwischen 7 Netzregionen	<b>83,4</b> <b>83,4</b>	<b>83,4</b> <b>83,4</b>	<b>83,4 + Ausbau</b> <b>167,1</b>	<b>83,4 + Ausbau</b> <b>165,9</b>	<b>83,4 + Ausbau</b> <b>129,9</b>	<b>83,4 + Ausbau</b> <b>101,5</b>	<b>83,4 + Ausbau</b> <b>124,0</b>	<b>83,4 + Ausbau</b> <b>151,4</b>
<b>Restsystem</b> ohne Deutschland	<b>75,6</b>	<b>111,7</b>	<b>267,9</b>	<b>267,9</b>	<b>111,7</b>	<b>133,9</b>	<b>133,9</b>	<b>133,9</b>
Kommentar / Quelle	[ENTSO-E, 2020] Distributed Energy 2030	[ENTSO-E, 2020] Distr. Energy 2030 u. 2040 (Mittelwert) Ref+Exp	[ENTSO-E, 2020] Distributed Energy 2040 Ref + Exp x 200%	[ENTSO-E, 2020] Distributed Energy 2040 Ref + Exp x 200%	[ENTSO-E, 2020] Distr. Energy 2030 u. 2040 (Mittelwert) Ref+Exp	[ENTSO-E, 2020] Distributed Energy 2040 Ref + Exp	[ENTSO-E, 2020] Distributed Energy 2040 Ref + Exp	[ENTSO-E, 2020] Distributed Energy 2040 Ref + Exp

## Weitere Erläuterungen

Im integrierten Energiesystemmodell SCOPE SD wird die Stromübertragung im Übertragungsnetz mittels eines vereinfachten, linearen Transportmodells abgebildet. Bei den Austauschkapazitäten werden technologie- und leitungslängenabhängige Verluste berücksichtigt.

Das angenommene Startnetz (83,4  $GW_{el}$ ) zwischen den 7 Netzregionen für Deutschland basiert auf [Anderski et al., 2015] sowie IEE-eigenen Validierungsrechnungen. Hierbei ist zu beachten, dass dieses Startnetz in allen Storyline-rechnungen als vorhandene Stromtransportinfrastruktur angenommen wird. Grundsätzlich können durch das Modell in allen Storylines bis auf EU-55% und AkzRestr zusätzliche Stromtransportkapazitäten zu Investitionskosten von 400 EUR/MW/km ausgebaut werden. Für die annuitätische Betrachtung werden ein Zinssatz von 8% und eine Abschreibungszeitraum von 40 Jahren angenommen. Die hinterlegten Investitionskosten sollen als „Strafterm“ wirken, um unnötigen Netzausbau zu verhindern; die Option des Netzausbaus soll so aber nicht mit anderen Flexibilitätsoptionen konkurrieren.

# A3 Gliederung

<b>1. Einführung und methodischer Ansatz .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Ausprägung zukünftiger Energiesysteme: Achsen und Deskriptoren .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Prototypische Ausprägungen zukünftiger Energiesysteme: Storylines .....</b>	<b>22</b>
<b>4. Numerische Analyse der Storylines: Operationalisierung der Storylines über Schlüssel-Parameter .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Numerische Analyse der Storylines: Modellierung und Modellierungsergebnisse .....</b>	<b>55</b>
<b>6. Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>80</b>
<b>7. Referenzen und Datenquellen .....</b>	<b>101</b>
<b>Anhänge .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang 1: Steckbriefe der Deskriptoren</b>	
<b>Anhang 2: Schlüsselparameter für die Modellierung</b>	
<b>Anhang 3: Detaillierte Modellierungsergebnisse (Tabellen &amp; Karten)</b>	

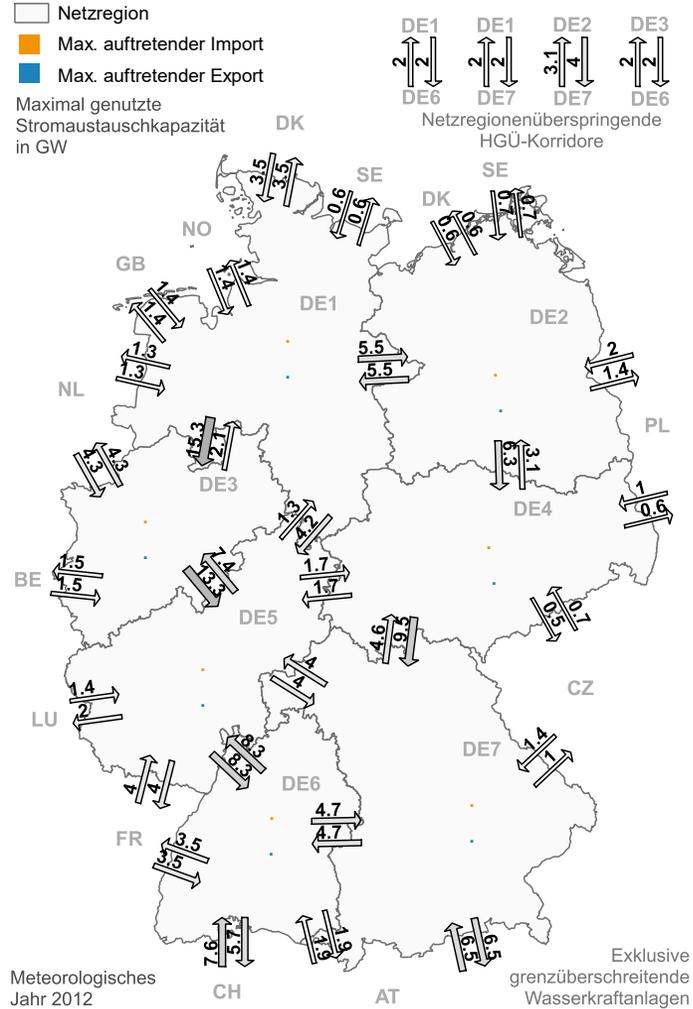
# A3

## Detaillierte Modellierungsergebnisse Weitere Modellergebnisse

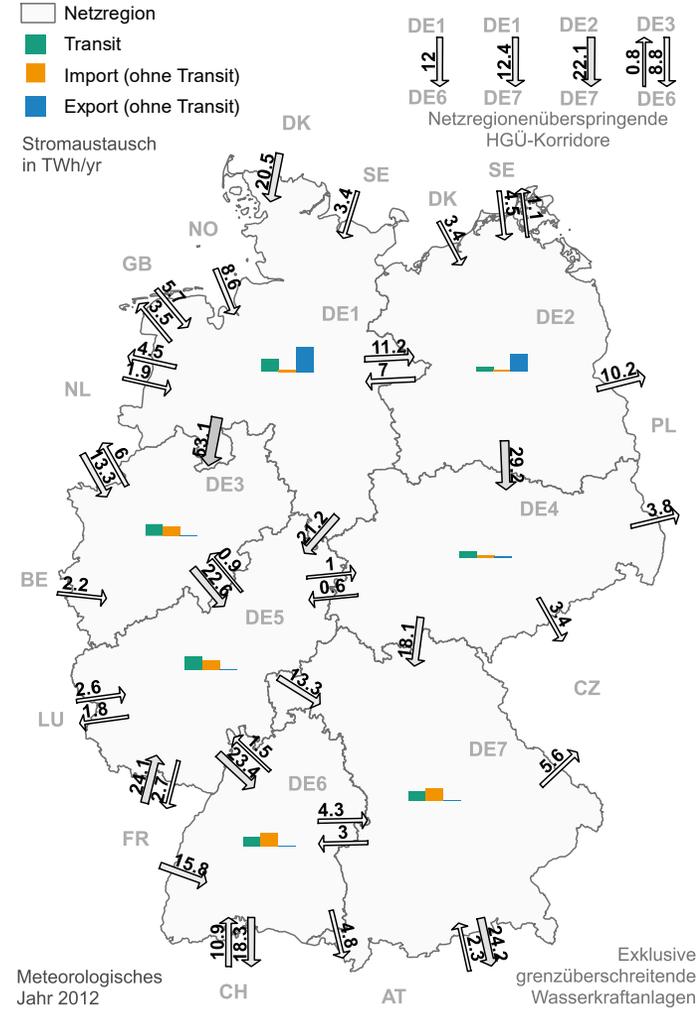
- Detaillierte Kartendarstellungen zur Transportaufgabe
- Detaillierte tabellarische Übersichten zur Transportaufgabe
- Gesamtdeutsche Stromerzeugungsbilanzen
- Detailergebnisse zu Stromerzeugungstechnologien
- Gesamtdeutsche Stromverbrauchsbilanzen
- Detailergebnisse zu Stromverbrauchstechnologien
- Wasserstoffbereitstellung im Gesamtsystem
- Wasserstoff in Netzregionen für Deutschland

# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline EU -55%

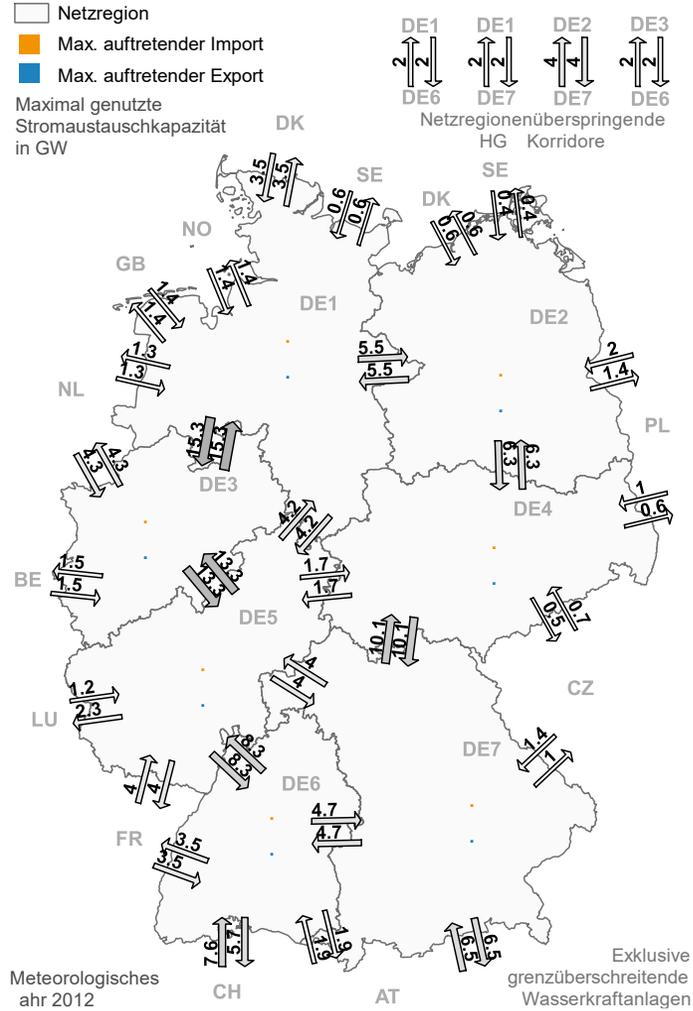


Mittelfristiges Emissions-szenario Europa (EU -55%)

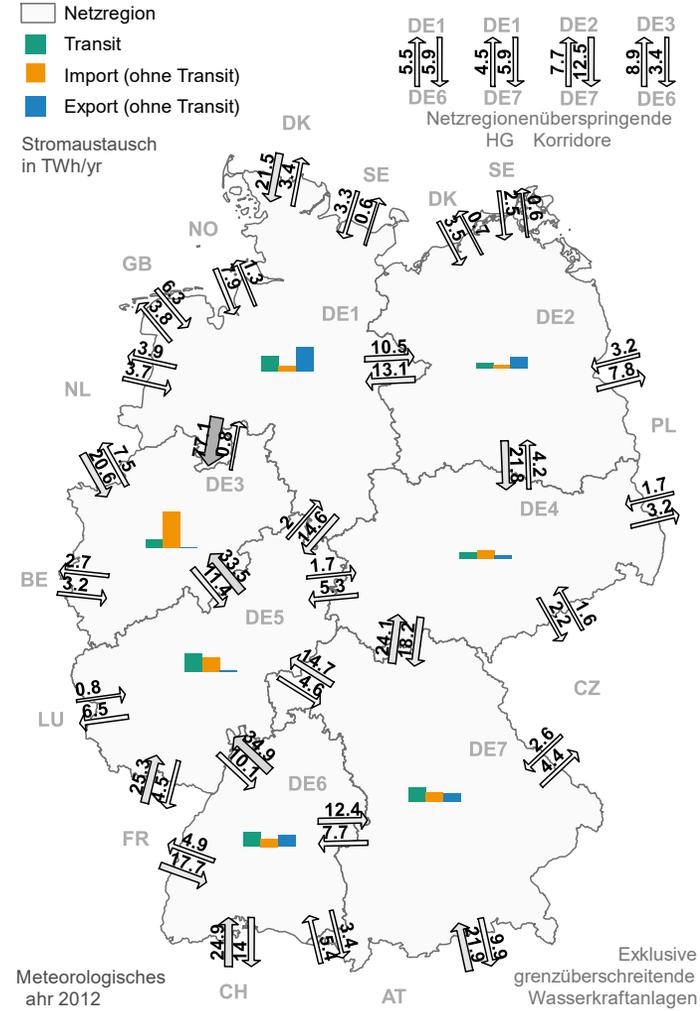


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline AkzRestr

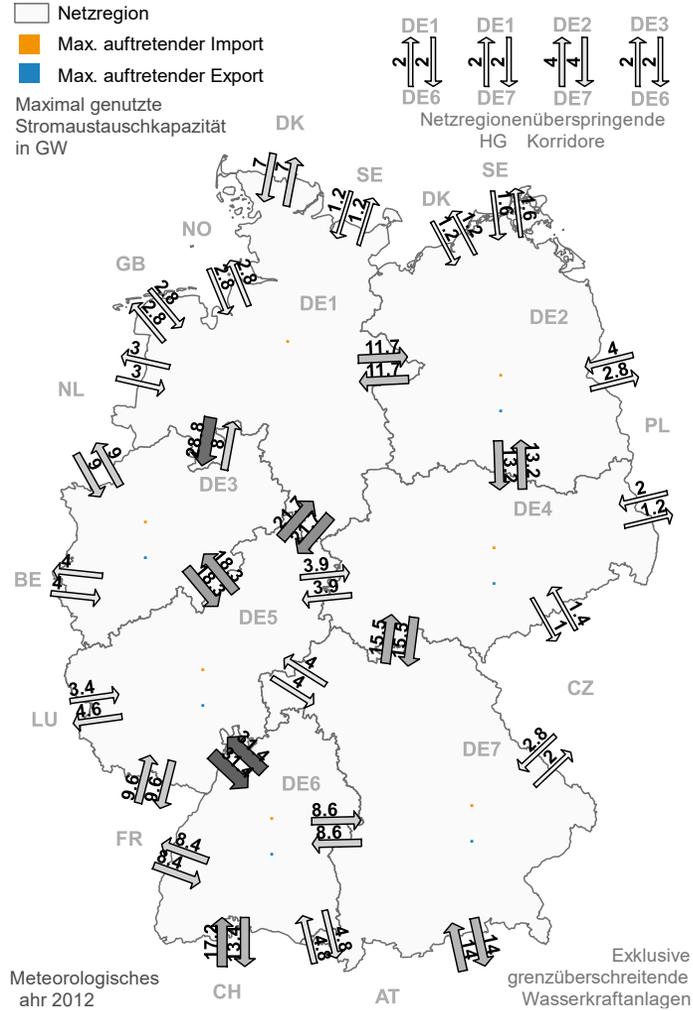


**Akzeptanz-Restriktionen (AkzRestr)**

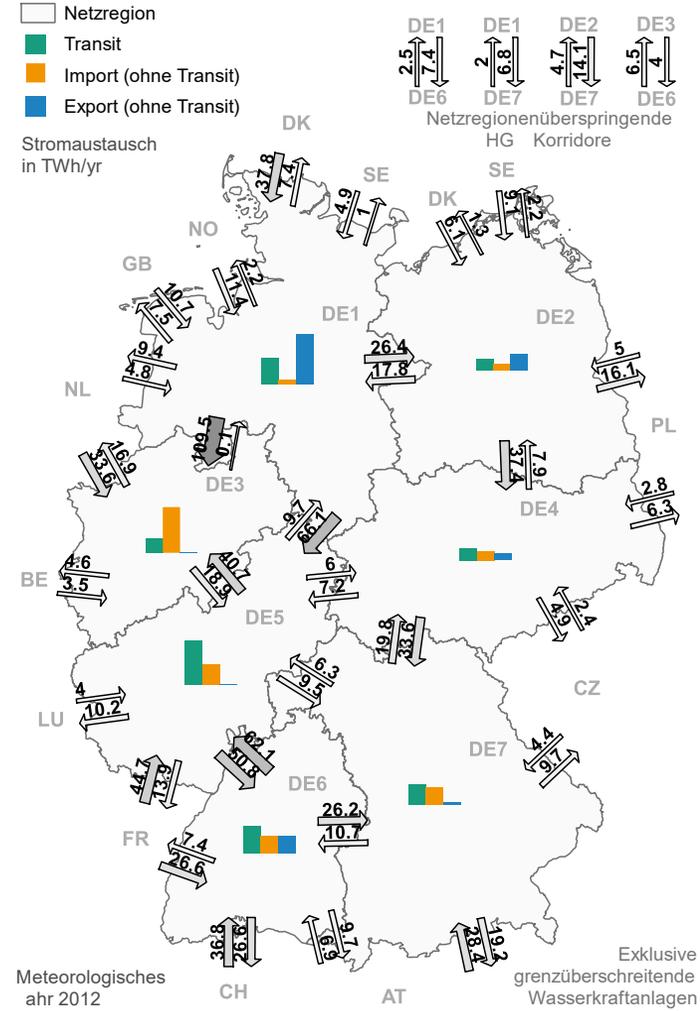


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline EurOpt

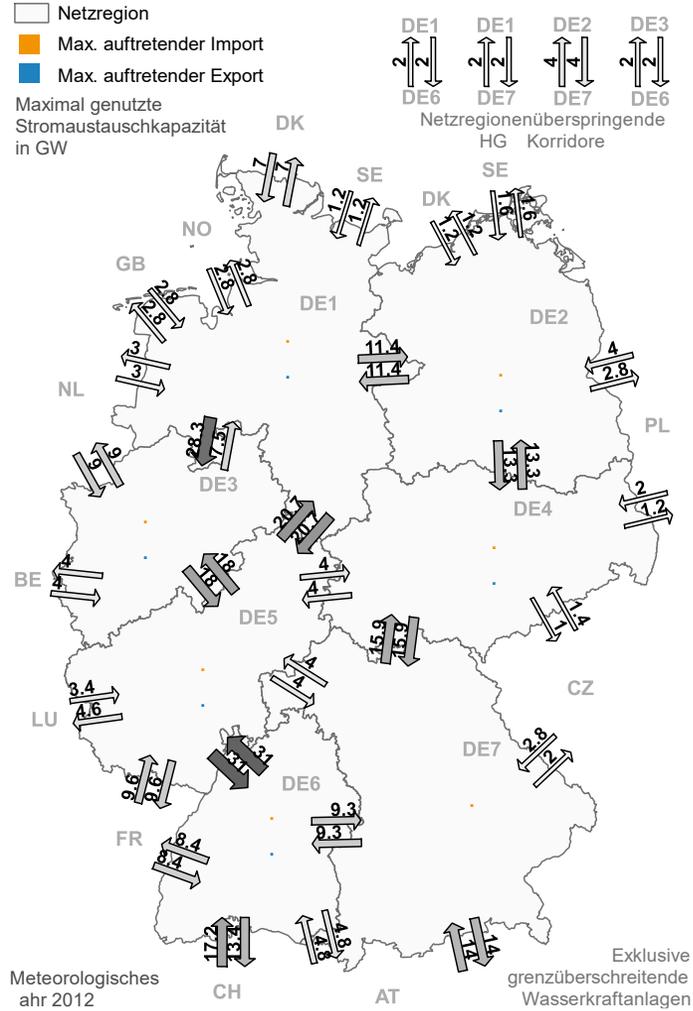


Europäische Optimierung (EurOpt)

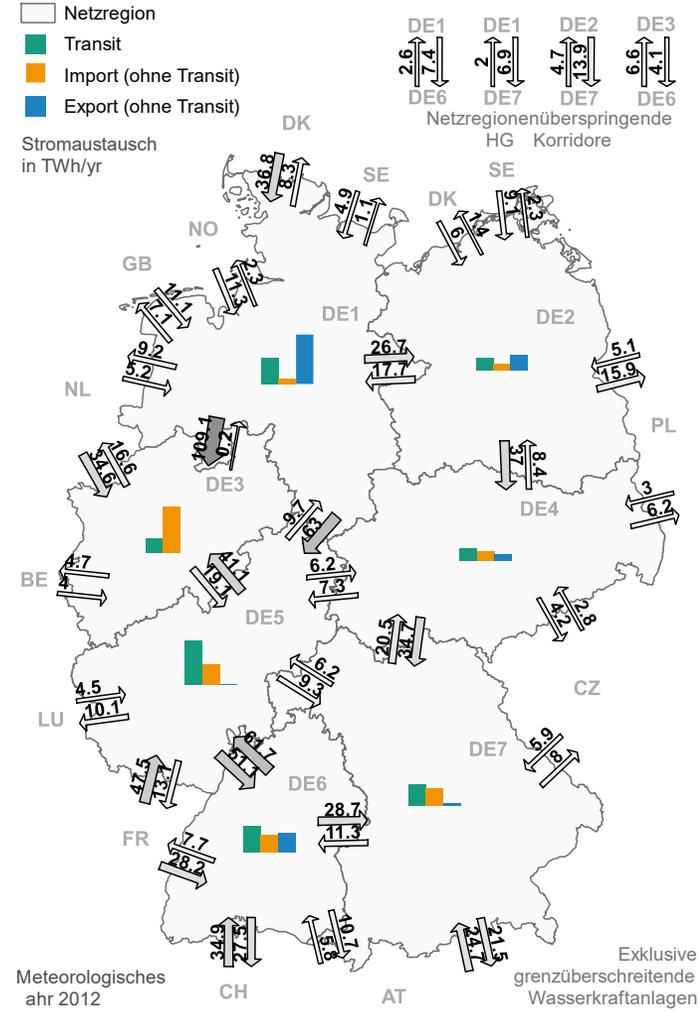


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline EurAtom

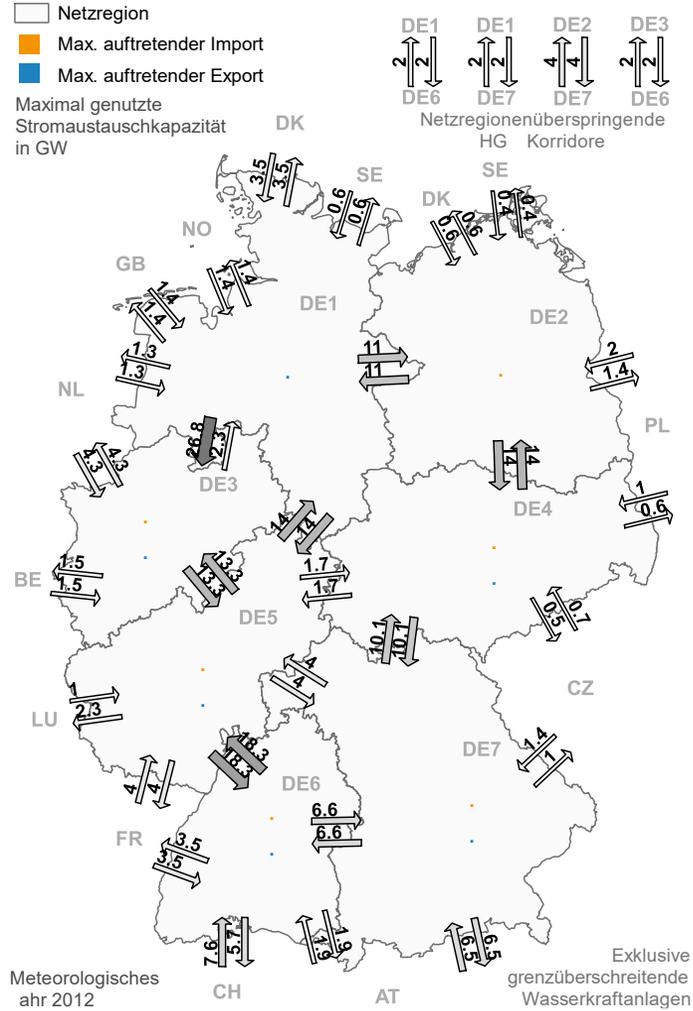


EU Atomausbau (EurAtom)

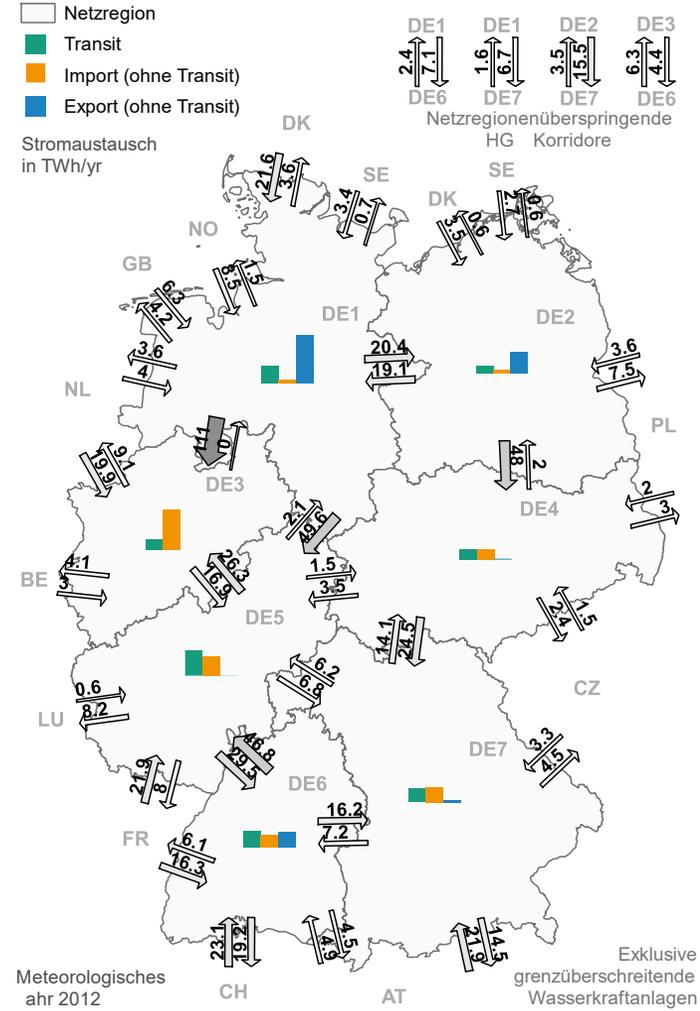


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline FokusDE

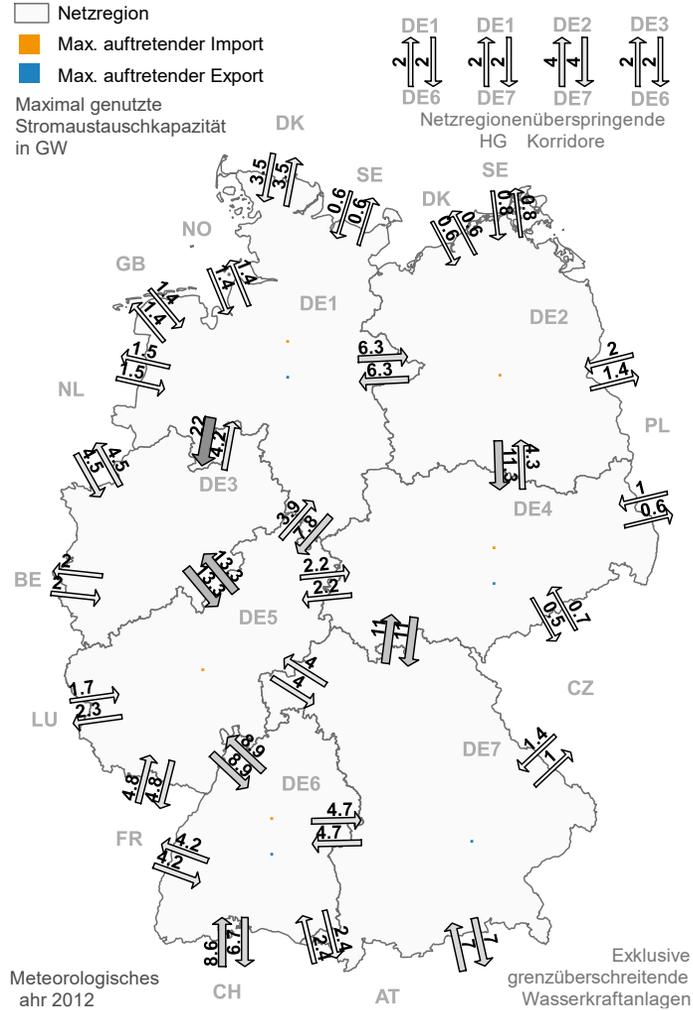


**Fokus  
 Deutschland  
 (FokusDE)**

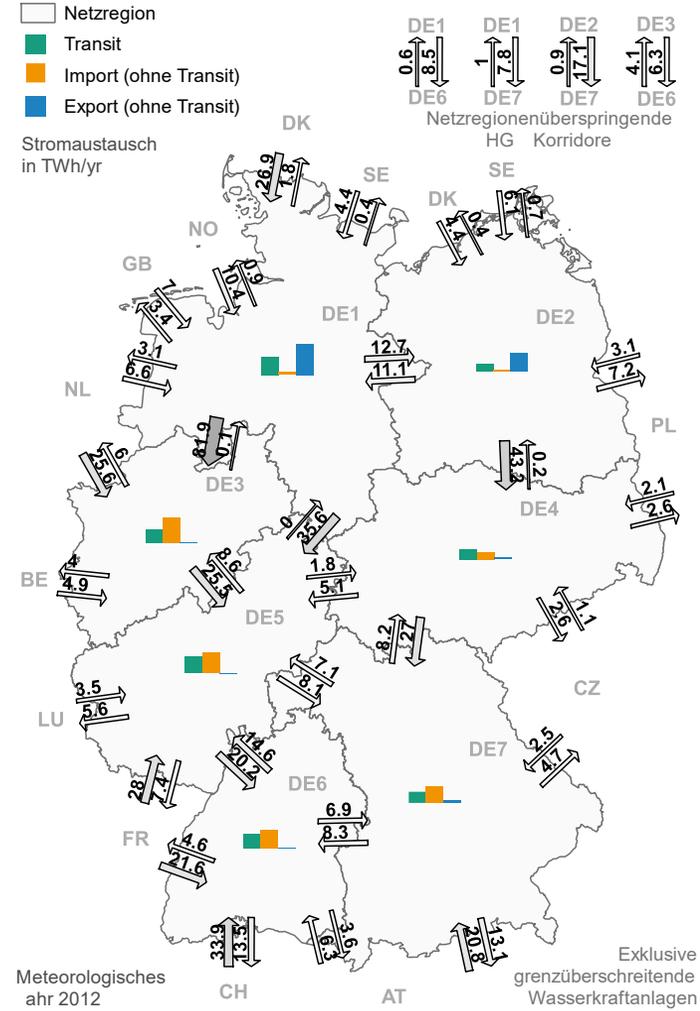


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline H2Global

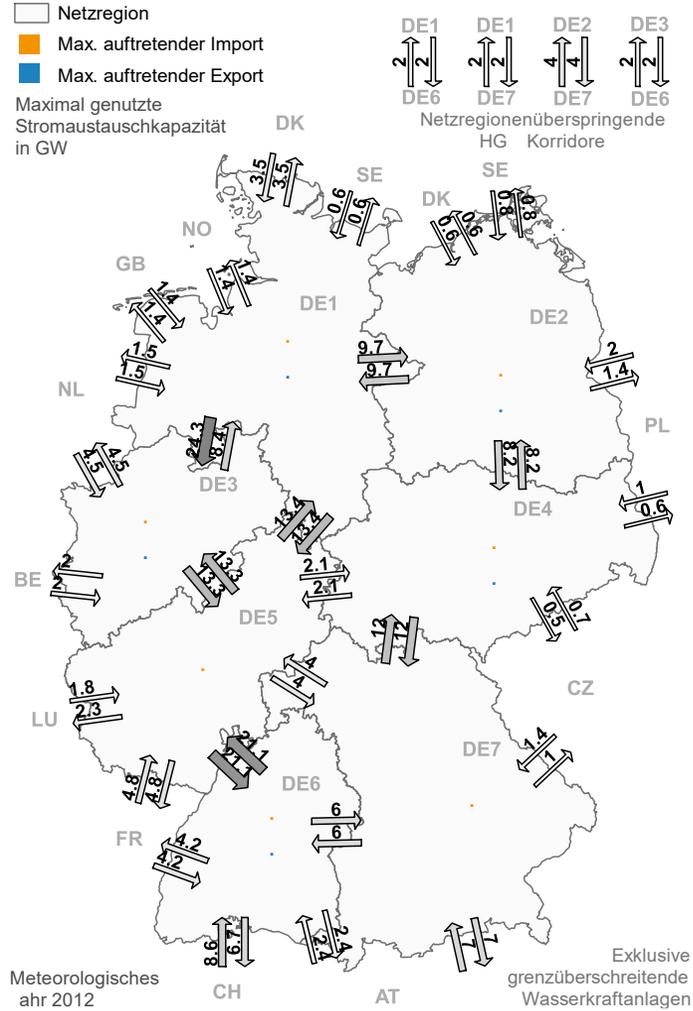


H2-Durchbruch Global (H2Global)

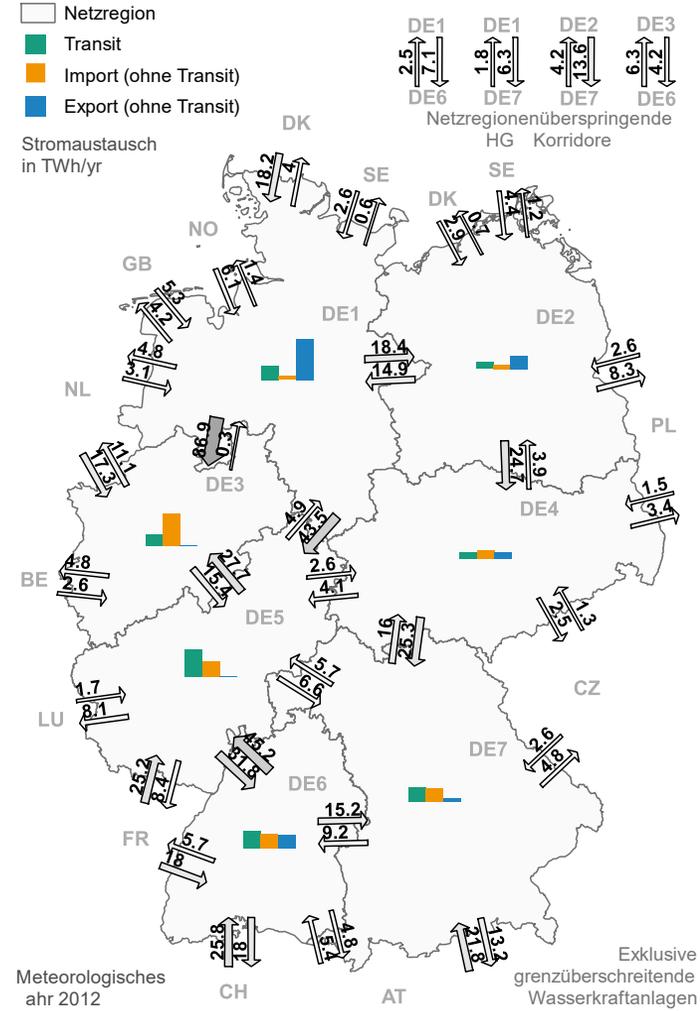


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline H2OptDE



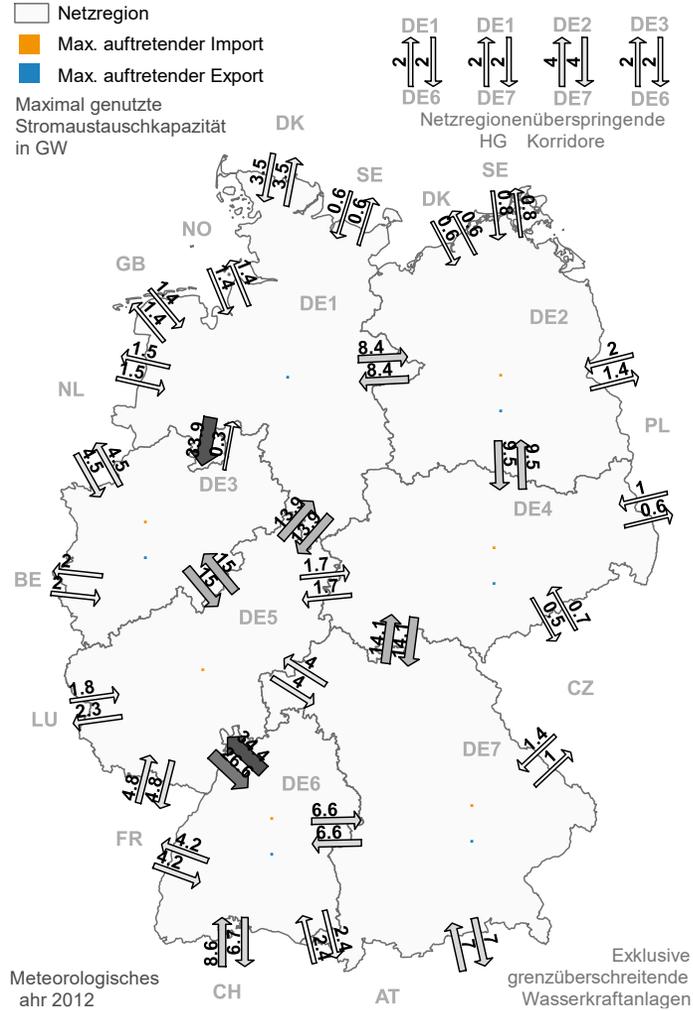
H2-Optimierung  
Deutschland  
(H2OptDE)



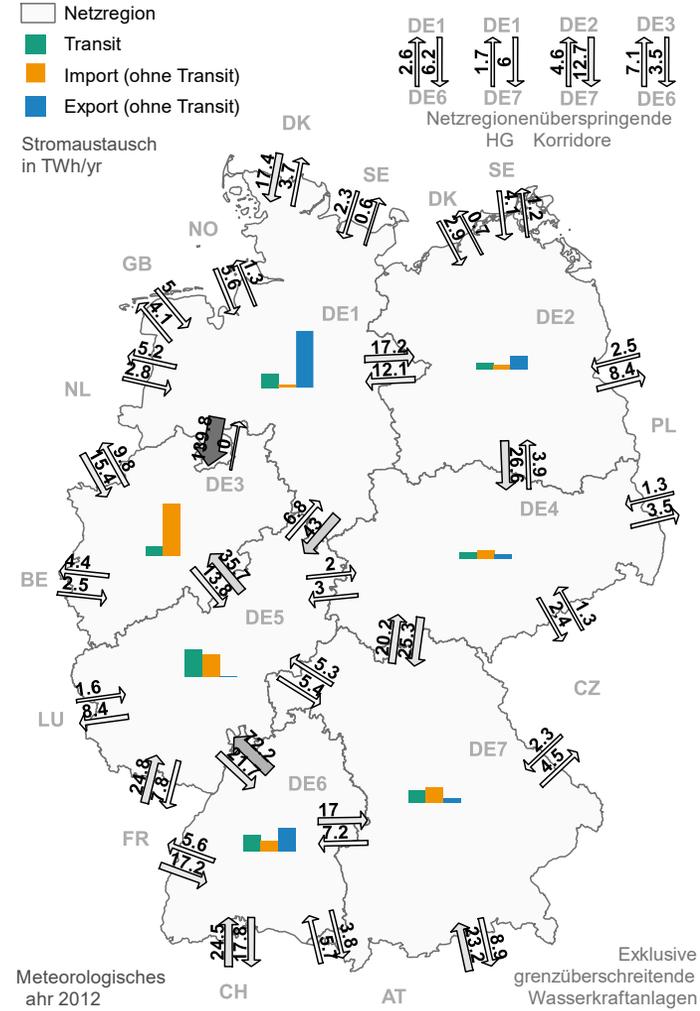
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Max. genutzte Stromtransportkapazität und -austauschmengen Storyline

### H2dezentral



H2 Fokus Dezentral (H2dezentral)



# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Innerdeutscher Stromaustauschmenge zwischen den deutschen Netzregionen

Transportkorridor	Stromaustausch in TWh <sub>el</sub> /yr														
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2global	H2OptDE	H2dez'tral	AkzRestr EU -55%	EurOpt EU -55%	EurAtom EU -55%	FokusDE EU -55%	H2global EU -55%	H2OptDE EU -55%	H2dez'tral EU -55%
	DE4>DE5	0.6	5.3	7.2	7.3	3.5	5.1	4.1	3.0	4.8	6.6	6.7	2.9	4.6	3.6
DE5>DE4	1.0	1.7	6.0	6.2	1.5	1.8	2.6	2.0	0.6	5.0	5.2	0.5	0.8	1.5	1.0
DE4>DE7	18.1	18.2	33.6	34.7	24.5	27.0	25.3	25.3	0.1	15.6	16.6	6.4	9.0	7.2	7.2
DE7>DE4	0.4	24.1	19.8	20.5	14.1	8.2	16.0	20.2	23.7	19.4	20.1	13.7	7.8	15.6	19.8
DE7>DE5	0.2	14.7	6.3	6.2	6.2	7.1	5.7	5.3	14.5	6.1	6.0	6.0	6.9	5.5	5.1
DE5>DE7	13.3	4.6	9.5	9.3	6.8	8.1	6.6	5.4	-8.6	-3.7	-4.0	-6.4	-5.2	-6.6	-7.8
DE6>DE5	1.5	34.9	62.1	61.7	46.8	14.6	45.2	72.2	33.3	60.5	60.2	45.3	13.1	43.6	70.7
DE5>DE6	23.4	10.1	50.8	51.1	29.5	20.2	31.8	21.7	-13.3	27.4	27.7	6.1	-3.2	8.5	-1.6
DE7>DE6	3.0	7.7	10.7	11.3	7.2	8.3	9.2	7.2	4.7	7.7	8.3	4.2	5.4	6.2	4.2
DE6>DE7	4.3	12.4	26.2	28.7	16.2	6.9	15.2	17.0	8.1	21.9	24.4	11.8	2.6	10.9	12.7
DE1>DE5	21.2	14.6	66.1	63.0	49.6	35.6	43.5	43.0	-6.6	44.8	41.8	28.4	14.4	22.3	21.7
DE5>DE1	0.0	2.0	9.7	9.7	2.1	0.0	4.9	6.8	2.0	9.7	9.7	2.0	0.0	4.9	6.7
DE5>DE3	0.9	33.5	40.7	41.1	26.3	8.6	27.7	35.7	32.6	39.8	40.2	25.4	7.7	26.8	34.8
DE3>DE5	22.6	11.4	18.9	19.1	16.9	25.5	15.4	13.8	-11.2	-3.7	-3.5	-5.7	2.9	-7.2	-8.8
DE1>DE3	53.1	77.1	109.5	109.1	111.0	81.9	86.9	139.8	24.0	56.4	56.1	57.9	28.9	33.9	86.7
DE3>DE1	0.0	0.8	0.1	0.2	0.0	0.1	0.3	0.0	0.8	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0
DE2>DE1	7.0	13.1	17.8	17.7	19.1	11.1	14.9	12.1	6.1	10.9	10.8	12.2	4.2	8.0	5.2
DE1>DE2	11.2	10.5	26.4	26.7	20.4	12.7	18.4	17.2	-0.7	15.2	15.5	9.2	1.5	7.2	6.0
DE4>DE2	0.3	4.2	7.9	8.4	2.0	0.2	3.9	3.9	4.0	7.6	8.1	1.7	-0.1	3.6	3.6
DE2>DE4	29.2	21.8	37.4	37.0	48.0	43.2	24.7	26.6	-7.4	8.1	7.8	18.8	14.0	-4.6	-2.6
DE6>DE1	0.1	5.5	2.5	2.6	2.4	0.6	2.5	2.6	5.4	2.5	2.6	2.3	0.5	2.4	2.5
DE1>DE6	12.0	5.9	7.4	7.4	7.1	8.5	7.1	6.2	-6.0	-4.6	-4.6	-4.8	-3.5	-4.9	-5.7
DE7>DE1	0.0	4.5	2.0	2.0	1.6	1.0	1.8	1.7	4.5	2.0	2.0	1.6	0.9	1.8	1.7
DE1>DE7	12.4	5.9	6.8	6.9	6.7	7.8	6.3	6.0	-6.4	-5.6	-5.4	-5.6	-4.5	-6.1	-6.4
DE7>DE2	0.2	7.7	4.7	4.7	3.5	0.9	4.2	4.6	7.5	4.5	4.6	3.3	0.7	4.1	4.5
DE2>DE7	22.1	12.5	14.1	13.9	15.5	17.1	13.6	12.7	-9.6	-8.0	-8.2	-6.6	-5.0	-8.5	-9.5
DE6>DE3	0.8	8.9	6.5	6.6	6.3	4.1	6.3	7.1	8.1	5.7	5.8	5.5	3.2	5.5	6.2
DE3>DE6	8.8	3.4	4.0	4.1	4.4	6.3	4.2	3.5	-5.3	-4.7	-4.7	-4.3	-2.4	-4.5	-5.3
<b>Summe</b>	<b>267.6</b>	<b>377.2</b>	<b>614.7</b>	<b>617.4</b>	<b>499.4</b>	<b>372.7</b>	<b>448.6</b>	<b>522.5</b>	<b>109.6</b>	<b>347.1</b>	<b>349.8</b>	<b>231.8</b>	<b>105.1</b>	<b>181.0</b>	<b>254.9</b>

- Tabelle zeigt richtungsabhängige Stromaus-tauschmengen für jeden Transportkorridor zwischen den für Deutschland abgebildeten Netzregionen
- Gegenüber der mittelfristigen Storyline zeigt sich in allen langfristigen Storylines ein substantieller Anstieg der Stromaustauschmengen – auch in der Storyline **AkzRestr**, in der keine zusätzlichen Transportkapazitäten gebaut werden können
- Geringster Stromaustausch mit 373 TWh<sub>el</sub>/a für Storyline **H2Global** und höchster Stromaustausch mit 615 bzw. 617 TWh<sub>el</sub>/a in **EurOpt / EurAtom**
- Für die Regelzone von 50Hertz erhöhen sich die Stromaus-tauschmengen auf allen Transportkorridoren in beiden Richtungen Ausnahme: Transportkorridor DE2 ↔ DE4



Transportkorridore mit hoher Relevanz für Regelzone von 50Hertz

# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Grenzüberschreitende Stromaustauschkapazitäten mit Nachbarmarktgebieten

Transportkorridor	Grenzüberschreitende Austauschkapazitäten mit Nachbarmarktgebieten für Deutschland in GW <sub>el</sub>														
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2global	H2OptDE	H2dez'tral	AkzRestr - EU -55%	EurOpt - EU -55%	EurAtom - EU -55%	FokusDE - EU -55%	H2global - EU -55%	H2OptDE - EU -55%	H2dez'tral - EU -55%
DE1>NLD	1.3	1.3	3.0	3.0	1.3	1.5	1.5	1.5	0.0	1.8	1.8	0.0	0.3	0.3	0.3
NLD>DE1	1.3	1.3	3.0	3.0	1.3	1.5	1.5	1.5	0.0	1.8	1.8	0.0	0.3	0.3	0.3
DE3>NLD	4.3	4.3	9.0	9.0	4.3	4.5	4.5	4.5	0.0	4.8	4.8	0.0	0.3	0.3	0.3
NLD>DE3	4.3	4.3	9.0	9.0	4.3	4.5	4.5	4.5	0.0	4.8	4.8	0.0	0.3	0.3	0.3
DE3>BEL	1.5	1.5	4.0	4.0	1.5	2.0	2.0	2.0	0.0	2.5	2.5	0.0	0.5	0.5	0.5
BEL>DE3	1.5	1.5	4.0	4.0	1.5	2.0	2.0	2.0	0.0	2.5	2.5	0.0	0.5	0.5	0.5
POL>DE2	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE2>POL	1.4	1.4	2.8	2.8	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
POL>DE4	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DE4>POL	0.6	0.6	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
CZE>DE4	0.7	0.7	1.4	1.4	0.7	0.7	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
DE4>CZE	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
CZE>DE7	1.4	1.4	2.8	2.8	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
DE7>CZE	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
AUT>DE7	6.5	6.5	14.0	14.0	6.5	7.0	7.0	7.0	0.0	7.5	7.5	0.0	0.5	0.5	0.5
DE7>AUT	6.5	6.5	14.0	14.0	6.5	7.0	7.0	7.0	0.0	7.5	7.5	0.0	0.5	0.5	0.5
AUT>DE6	1.9	1.9	4.8	4.8	1.9	2.4	2.4	2.4	0.0	2.9	2.9	0.0	0.5	0.5	0.5
DE6>AUT	1.9	1.9	4.8	4.8	1.9	2.4	2.4	2.4	0.0	2.9	2.9	0.0	0.5	0.5	0.5
DE6>CHE	5.7	5.7	13.4	13.4	5.7	6.7	6.7	6.7	0.0	7.7	7.7	0.0	1.0	1.0	1.0
CHE>DE6	7.6	7.6	17.2	17.2	7.6	8.6	8.6	8.6	0.0	9.6	9.6	0.0	1.0	1.0	1.0
DE6>FRA	3.5	3.5	8.4	8.4	3.5	4.2	4.2	4.2	0.0	4.9	4.9	0.0	0.7	0.7	0.7
FRA>DE6	3.5	3.5	8.4	8.4	3.5	4.2	4.2	4.2	0.0	4.9	4.9	0.0	0.7	0.7	0.7
DE5>FRA	4.0	4.0	9.6	9.6	4.0	4.8	4.8	4.8	0.0	5.6	5.6	0.0	0.8	0.8	0.8
FRA>DE5	4.0	4.0	9.6	9.6	4.0	4.8	4.8	4.8	0.0	5.6	5.6	0.0	0.8	0.8	0.8
DE5>LUX	2.3	2.3	4.6	4.6	2.3	2.3	2.3	2.3	0.0	2.3	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0
LUX>DE5	2.3	2.3	4.6	4.6	2.3	2.3	2.3	2.3	0.0	2.3	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0
DE1>NOR	1.4	1.4	2.8	2.8	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
NOR>DE1	1.4	1.4	2.8	2.8	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
DNK>DE1	3.5	3.5	7.0	7.0	3.5	3.5	3.5	3.5	0.0	3.5	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0
DE1>DNK	3.5	3.5	7.0	7.0	3.5	3.5	3.5	3.5	0.0	3.5	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0
SWE>DE1	0.6	0.6	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
DE1>SWE	0.6	0.6	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
DE2>DNK	0.6	0.6	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
DNK>DE2	0.6	0.6	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
DE2>SWE	0.7	0.7	1.6	1.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.0	0.9	0.9	0.0	0.1	0.1	0.1
SWE>DE2	0.7	0.7	1.6	1.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.0	0.9	0.9	0.0	0.1	0.1	0.1
DE1>GBR	1.4	1.4	2.8	2.8	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
GBR>DE1	1.4	1.4	2.8	2.8	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Summe Export</b>	<b>42.6</b>	<b>42.6</b>	<b>94.5</b>	<b>94.5</b>	<b>42.6</b>	<b>47.2</b>	<b>47.2</b>	<b>47.2</b>	<b>0.0</b>	<b>51.8</b>	<b>51.8</b>	<b>0.0</b>	<b>4.6</b>	<b>4.6</b>	<b>4.6</b>
<b>Summe Import</b>	<b>46.1</b>	<b>46.1</b>	<b>101.4</b>	<b>101.4</b>	<b>46.1</b>	<b>50.7</b>	<b>50.7</b>	<b>50.7</b>	<b>0.0</b>	<b>55.3</b>	<b>55.3</b>	<b>0.0</b>	<b>4.6</b>	<b>4.6</b>	<b>4.6</b>

- Tabelle zeigt richtungsabhängige Stromaustauschmengen für jeden Transportkorridor zwischen den für Deutschland abgebildeten Netzregionen und ihren jeweiligen Nachbarmarktgebieten



Transportkorridore mit hoher Relevanz für Regelzone von 50Hertz

# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Grenzüberschreitende Strom austauschmengen mit Nachbarmarktgebieten

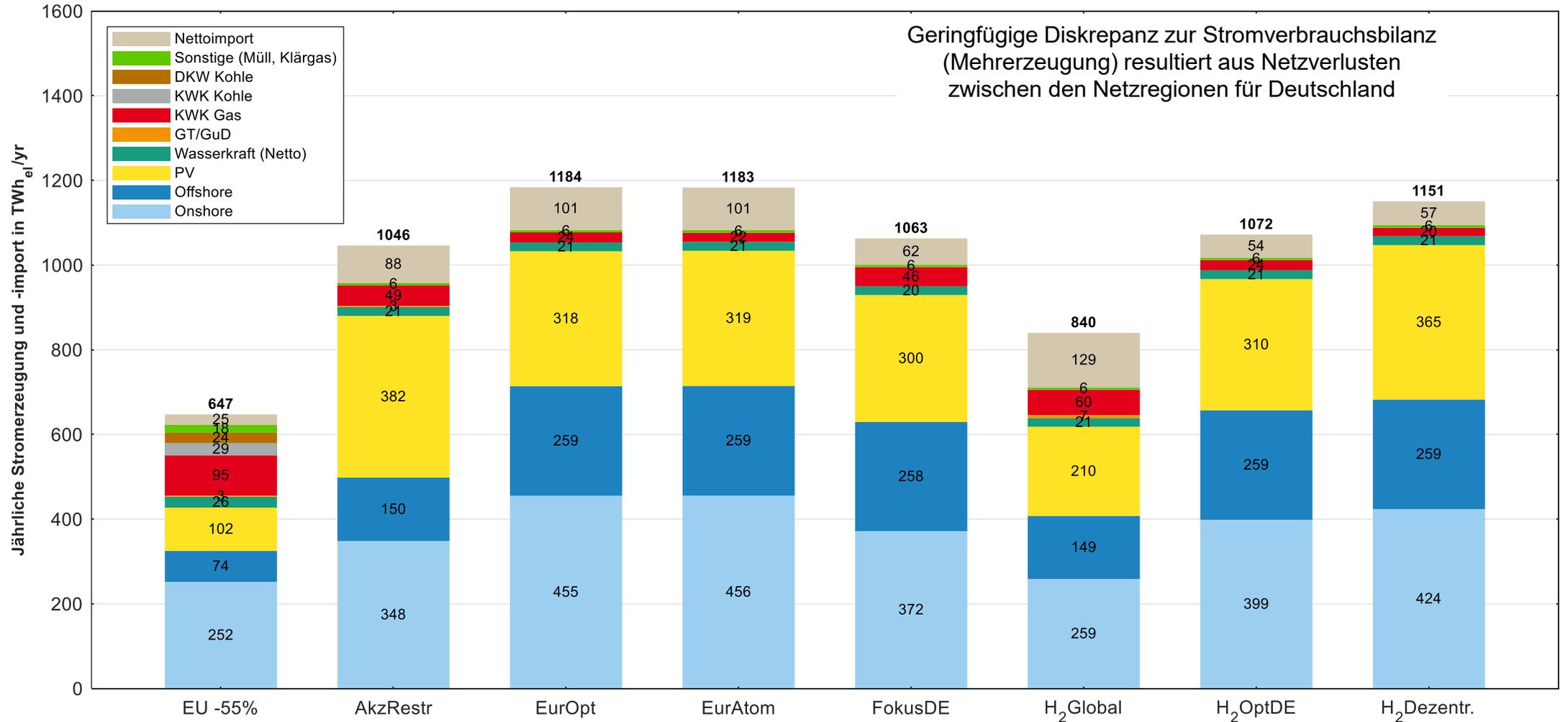
Transportkorridor	Grenzüberschreitende Strom austauschmenge mit Nachbarmarktgebieten für Deutschland in TWh <sub>el</sub> /yr														
	EU -55%	AkzRestr	EurOpt	EurAtom	FokusDE	H2global	H2OptDE	H2dez'tral	AkzRestr - EU -55%	EurOpt - EU -55%	EurAtom - EU -55%	FokusDE - EU -55%	H2global - EU -55%	H2OptDE - EU -55%	H2dez'tral - EU -55%
DE1>NLD	4.5	3.9	9.4	9.2	3.6	3.1	4.8	5.2	-0.6	4.9	4.7	-0.9	-1.4	0.3	0.7
NLD>DE1	1.9	3.7	4.8	5.2	4.0	6.6	3.1	2.8	1.7	2.8	3.3	2.0	4.6	1.2	0.9
DE3>NLD	6.0	7.5	16.9	16.6	9.1	6.0	11.1	9.8	1.6	10.9	10.6	3.2	0.0	5.1	3.8
NLD>DE3	13.3	20.6	33.6	34.6	19.9	25.6	17.3	15.4	7.3	20.4	21.3	6.7	12.4	4.1	2.2
DE3>BEL	0.5	2.7	4.6	4.7	4.1	4.0	4.8	4.4	2.2	4.1	4.2	3.6	3.5	4.3	3.9
BEL>DE3	2.2	3.2	3.5	4.0	3.0	4.9	2.6	2.5	1.0	1.3	1.8	0.8	2.7	0.4	0.3
POL>DE2	0.0	3.2	5.0	5.1	3.6	3.1	2.6	2.5	3.2	5.0	5.0	3.6	3.1	2.6	2.4
DE2>POL	10.2	7.8	16.1	15.9	7.5	7.2	8.3	8.4	-2.4	5.9	5.7	-2.7	-3.0	-1.9	-1.8
POL>DE4	0.1	1.7	2.8	3.0	2.0	2.1	1.5	1.3	1.6	2.7	2.9	1.9	2.0	1.4	1.2
DE4>POL	3.8	3.2	6.3	6.2	3.0	2.6	3.4	3.5	-0.6	2.5	2.5	-0.8	-1.2	-0.4	-0.3
CZE>DE4	0.1	1.6	2.4	2.8	1.5	1.1	1.3	1.3	1.5	2.3	2.7	1.5	1.0	1.2	1.2
DE4>CZE	3.4	2.2	4.9	4.2	2.4	2.6	2.5	2.4	-1.2	1.5	0.8	-1.1	-0.9	-0.9	-1.1
CZE>DE7	0.2	2.6	4.4	5.9	3.3	2.5	2.6	2.3	2.4	4.2	5.6	3.1	2.3	2.4	2.1
DE7>CZE	5.6	4.4	9.7	8.0	4.5	4.7	4.8	4.5	-1.2	4.1	2.3	-1.1	-1.0	-0.8	-1.1
AUT>DE7	2.3	21.9	28.4	24.7	21.9	20.8	21.8	23.2	19.6	26.1	22.4	19.6	18.5	19.4	20.9
DE7>AUT	24.2	9.9	19.2	21.5	14.5	13.1	13.2	8.9	-14.3	-5.0	-2.6	-9.7	-11.0	-11.0	-15.3
AUT>DE6	0.0	5.4	6.9	5.8	4.9	6.3	5.4	5.7	5.4	6.8	5.7	4.8	6.2	5.3	5.6
DE6>AUT	4.8	3.4	9.7	10.7	4.5	3.6	4.8	3.8	-1.4	4.9	5.9	-0.3	-1.2	0.0	-1.0
DE6>CHE	18.3	14.0	26.6	27.5	19.2	13.5	18.0	17.8	-4.3	8.3	9.2	0.9	-4.8	-0.2	-0.5
CHE>DE6	10.9	24.9	36.8	34.9	23.1	33.9	25.8	24.5	13.9	25.9	23.9	12.2	22.9	14.9	13.5
DE6>FRA	0.4	4.9	7.4	7.7	6.1	4.6	5.7	5.6	4.5	7.0	7.3	5.7	4.2	5.3	5.3
FRA>DE6	15.8	17.7	26.6	28.2	16.3	21.6	18.0	17.2	1.9	10.8	12.4	0.5	5.7	2.2	1.4
DE5>FRA	2.7	4.5	13.9	13.1	8.0	7.4	8.4	7.8	1.8	11.2	10.4	5.3	4.7	5.7	5.1
FRA>DE5	24.1	25.3	44.7	47.5	21.9	28.0	25.2	24.8	1.2	20.6	23.4	-2.2	3.9	1.1	0.7
DE5>LUX	1.8	6.5	10.2	10.1	8.2	5.6	8.1	8.4	4.7	8.4	8.3	6.4	3.8	6.3	6.6
LUX>DE5	2.6	0.8	4.0	4.5	0.6	3.5	1.7	1.6	-1.8	1.3	1.8	-2.0	0.9	-0.9	-1.0
DE1>NOR	0.4	1.3	2.2	2.3	1.5	0.9	1.4	1.3	0.9	1.7	1.8	1.1	0.4	0.9	0.9
NOR>DE1	8.6	7.9	11.4	11.3	8.5	10.4	6.1	5.6	-0.7	2.8	2.7	-0.1	1.8	-2.5	-3.1
DNK>DE1	20.5	21.5	37.8	36.8	21.6	26.9	18.2	17.4	1.0	17.2	16.3	1.1	6.3	-2.4	-3.1
DE1>DNK	0.5	3.4	7.4	8.3	3.6	1.8	4.0	3.7	2.9	6.9	7.8	3.2	1.3	3.6	3.2
SWE>DE1	3.4	3.3	4.9	4.9	3.4	4.4	2.6	2.3	-0.2	1.5	1.5	0.0	1.0	-0.9	-1.1
DE1>SWE	0.2	0.6	1.0	1.1	0.7	0.4	0.6	0.6	0.4	0.8	0.8	0.4	0.2	0.4	0.4
DE2>DNK	0.2	0.7	1.3	1.4	0.6	0.4	0.7	0.7	0.5	1.0	1.2	0.4	0.1	0.5	0.5
DNK>DE2	3.4	3.5	6.1	6.0	3.5	4.4	2.9	2.9	0.1	2.7	2.6	0.1	1.0	-0.4	-0.4
DE2>SWE	1.1	0.6	2.2	2.3	0.6	0.7	1.2	1.2	-0.6	1.0	1.2	-0.6	-0.4	0.1	0.1
SWE>DE2	4.5	2.5	9.1	9.1	2.7	6.1	4.4	4.1	-2.0	4.6	4.5	-1.8	1.6	-0.2	-0.4
DE1>GBR	3.5	3.8	7.5	7.1	4.2	3.4	4.2	4.1	0.4	4.0	3.7	0.7	-0.1	0.7	0.6
GBR>DE1	5.7	6.3	10.7	11.1	6.3	7.0	5.3	5.0	0.7	5.0	5.4	0.6	1.4	-0.4	-0.7
Summe	212.0	263.0	460.2	462.9	278.2	304.4	278.5	264.6	51.0	248.2	251.0	66.2	92.5	66.5	52.7

- Tabelle zeigt richtungsabhängige Strom austauschmengen für jeden Transportkorridor zwischen den für Deutschland abgebildeten Netzregionen und ihren jeweiligen Nachbarmarktgebieten
- Grundsätzlich erhöhen sich die Strom austauschmengen in allen langfristigen Storylines ggü. der mittelfristigen Variante **EU -55%**
- Erwartungsgemäß starke Korrelation mit exogen angenommenen grenzüberschreitenden Austauschkapazitäten



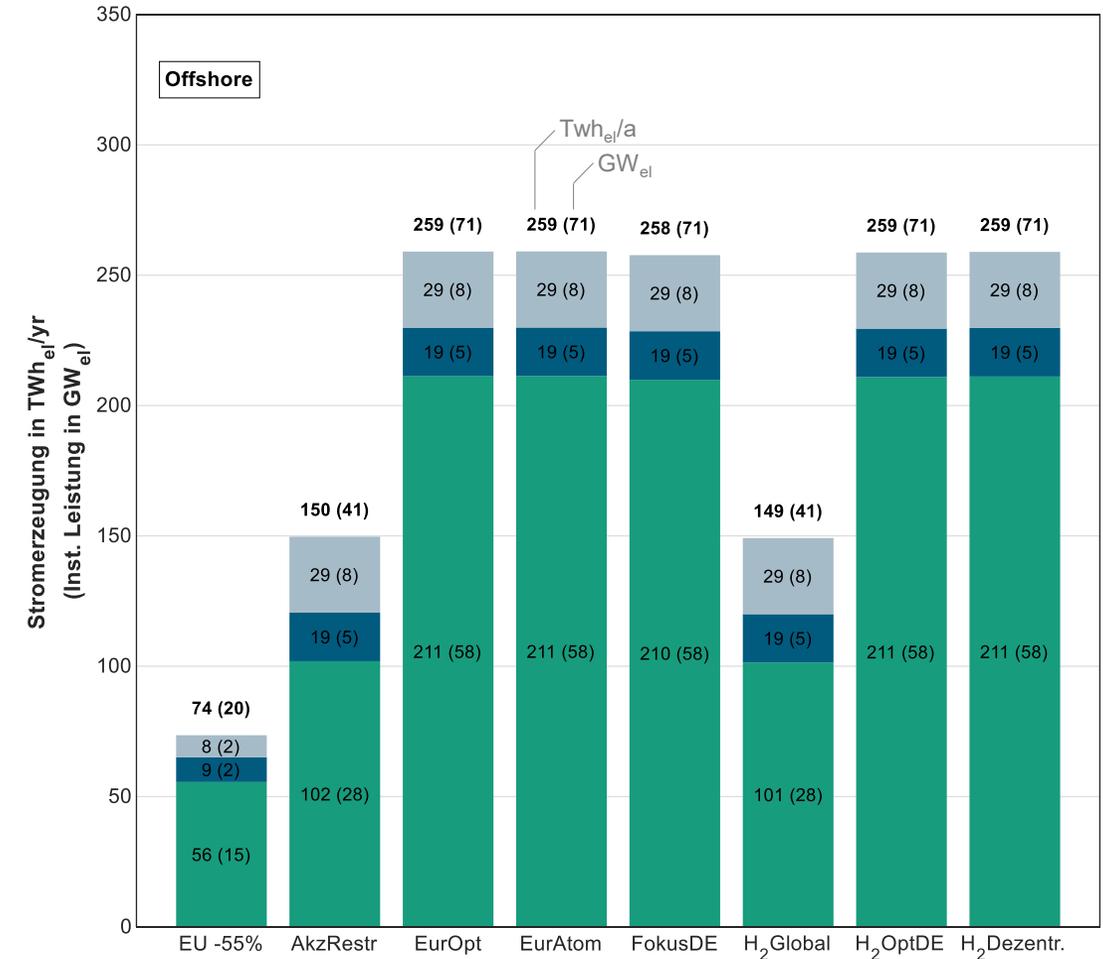
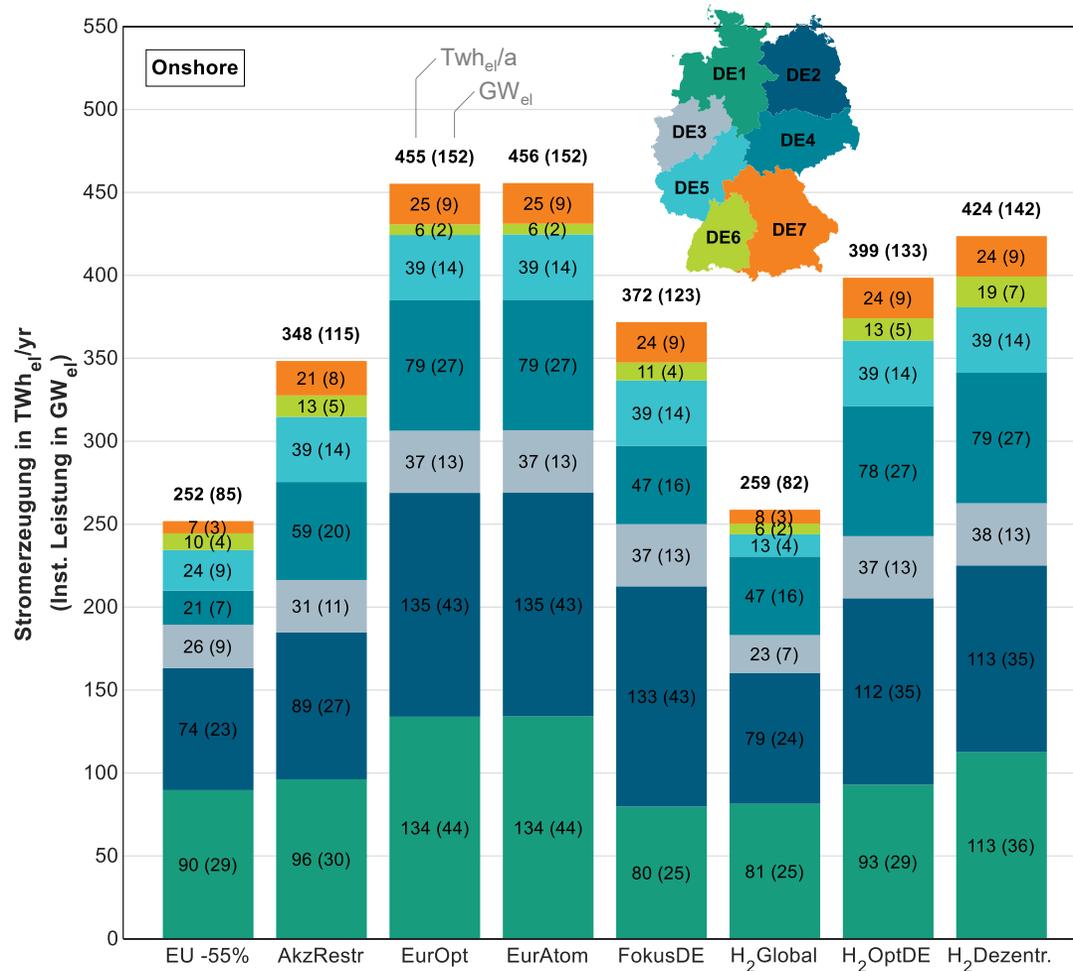
Transportkorridore mit hoher Relevanz für Regelzone von 50Hertz

# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Gesamtdeutsche Stromerzeugungsbilanz inkl. Nettoimporte



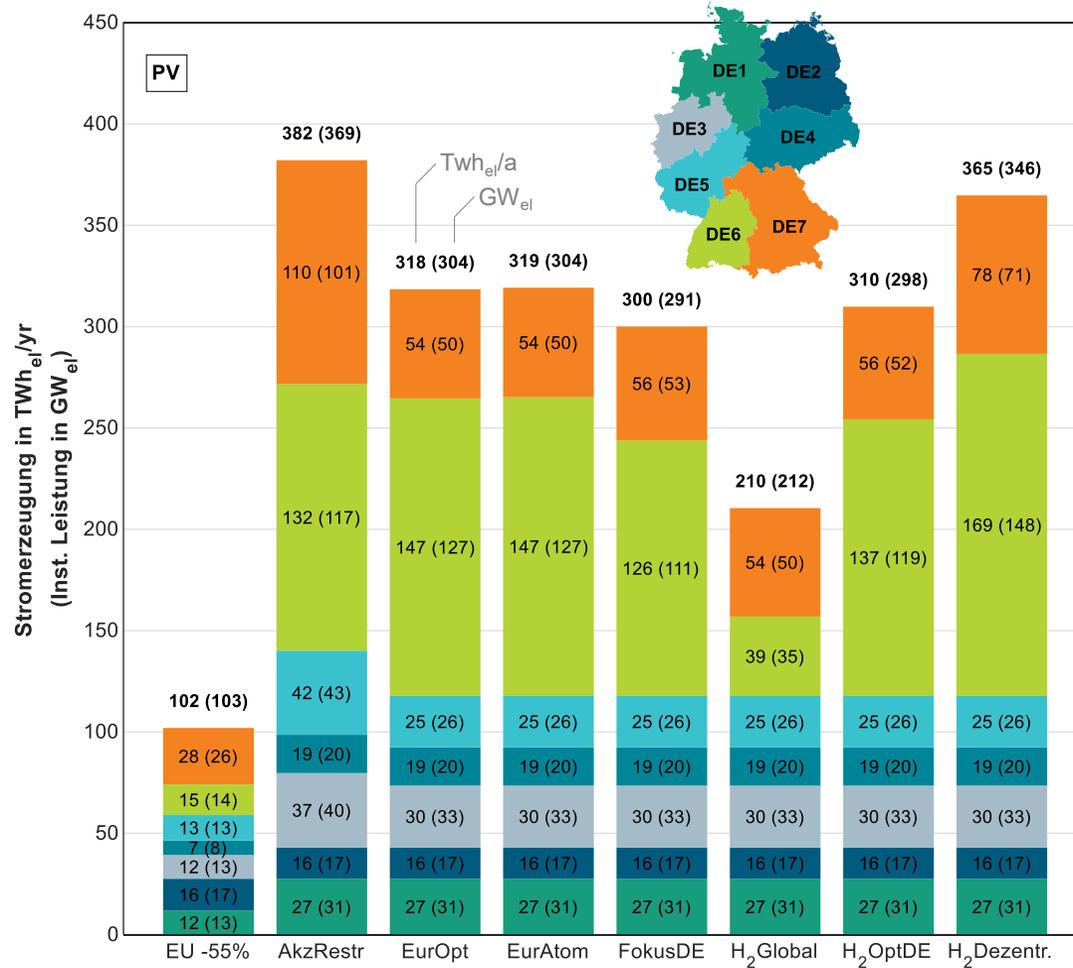
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Inst. Leistung und jährliche Stromerzeugung Wind Onshore und Offshore



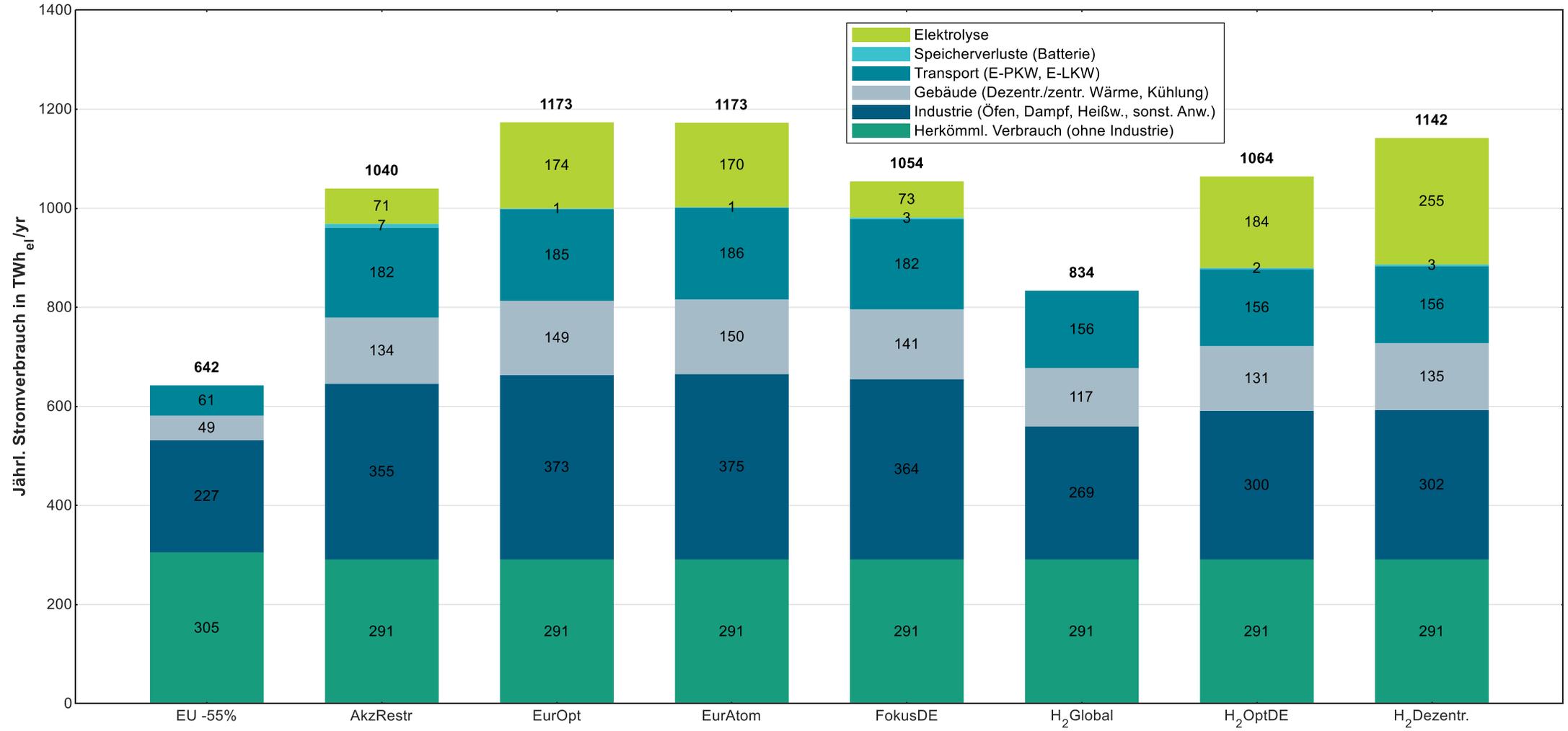
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Inst. Leistung und jährliche Stromerzeugung Photovoltaik (Dachfläche + Freifläche)



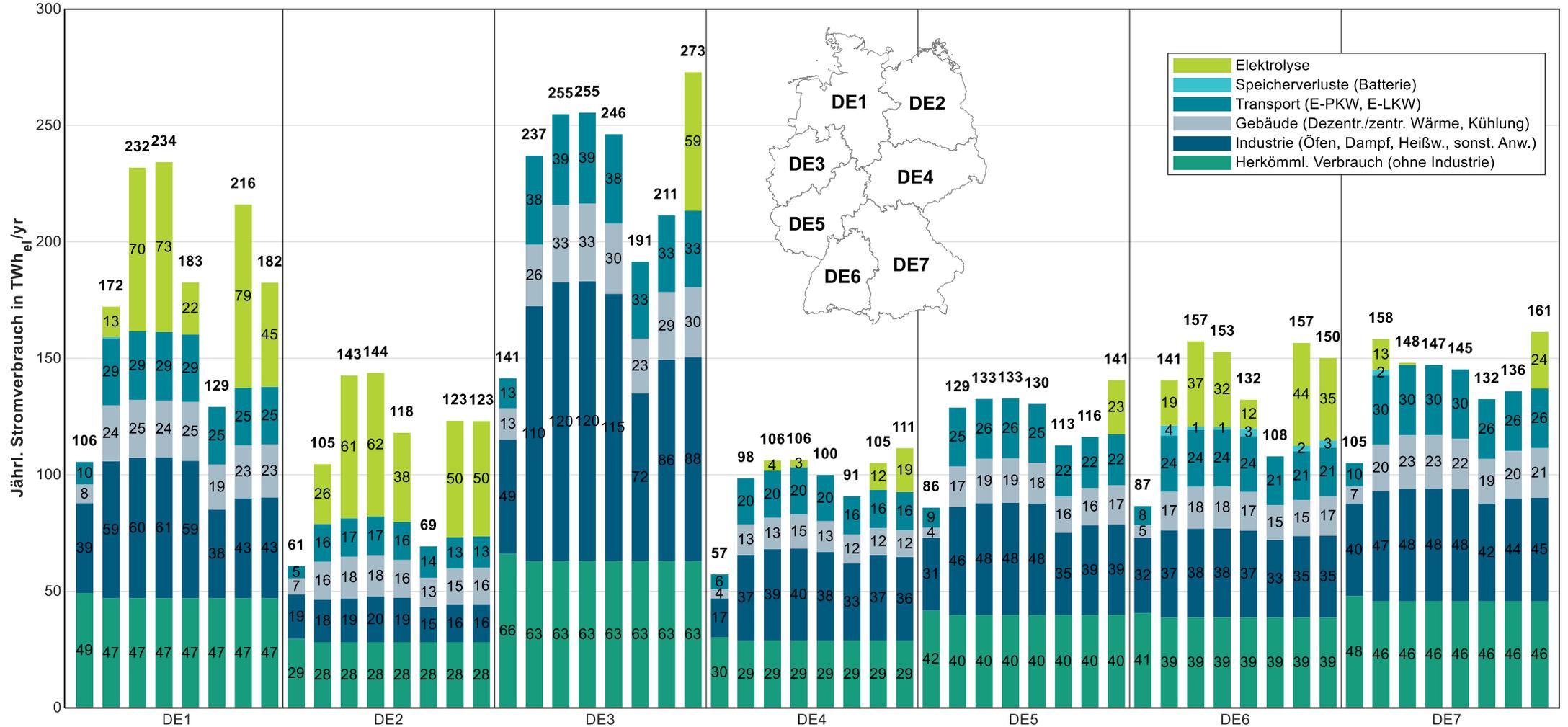
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Jährlicher Stromverbrauch Deutschland gesamt



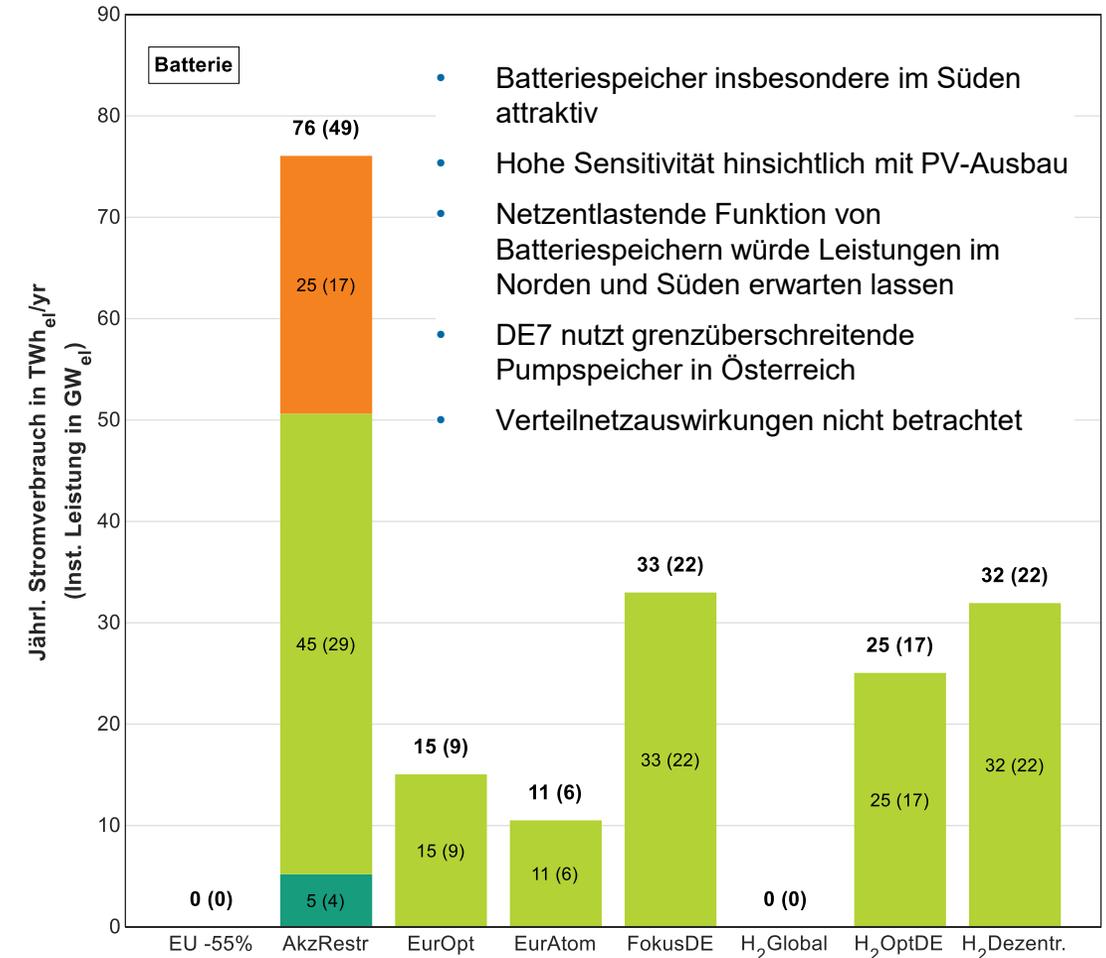
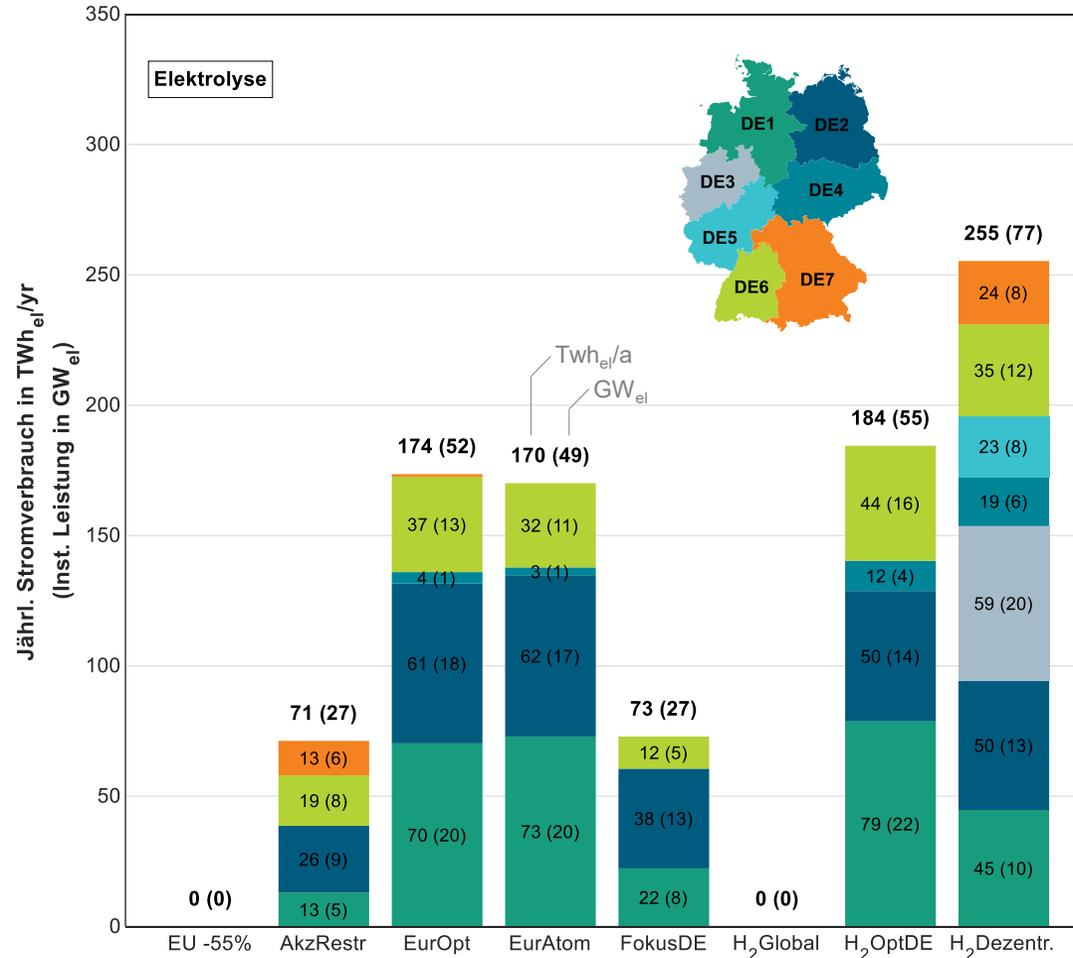
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Jährlicher Stromverbrauch Deutschland gesamt nach Netzregionen



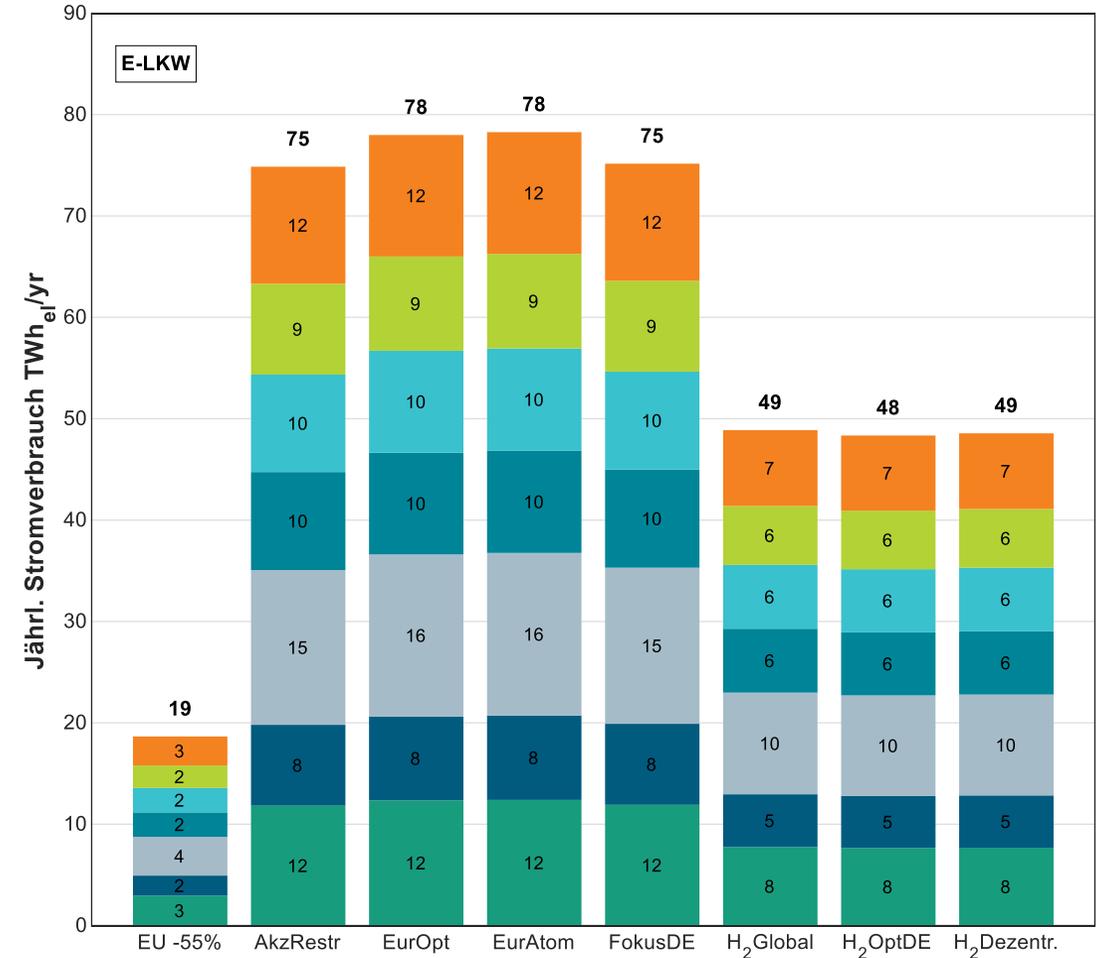
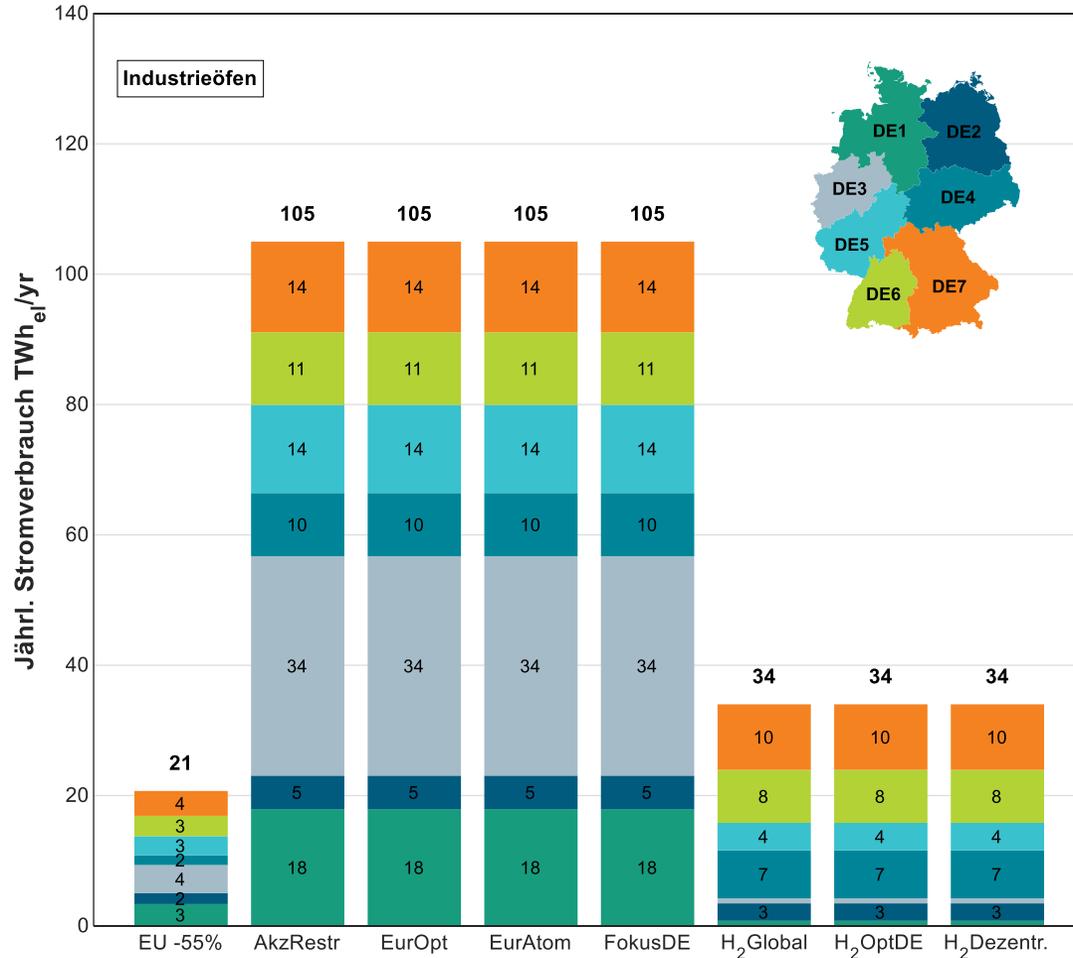
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Inst. Leistung und jährlicher Stromverbrauch von Elektrolyse u. stationärer Batterie

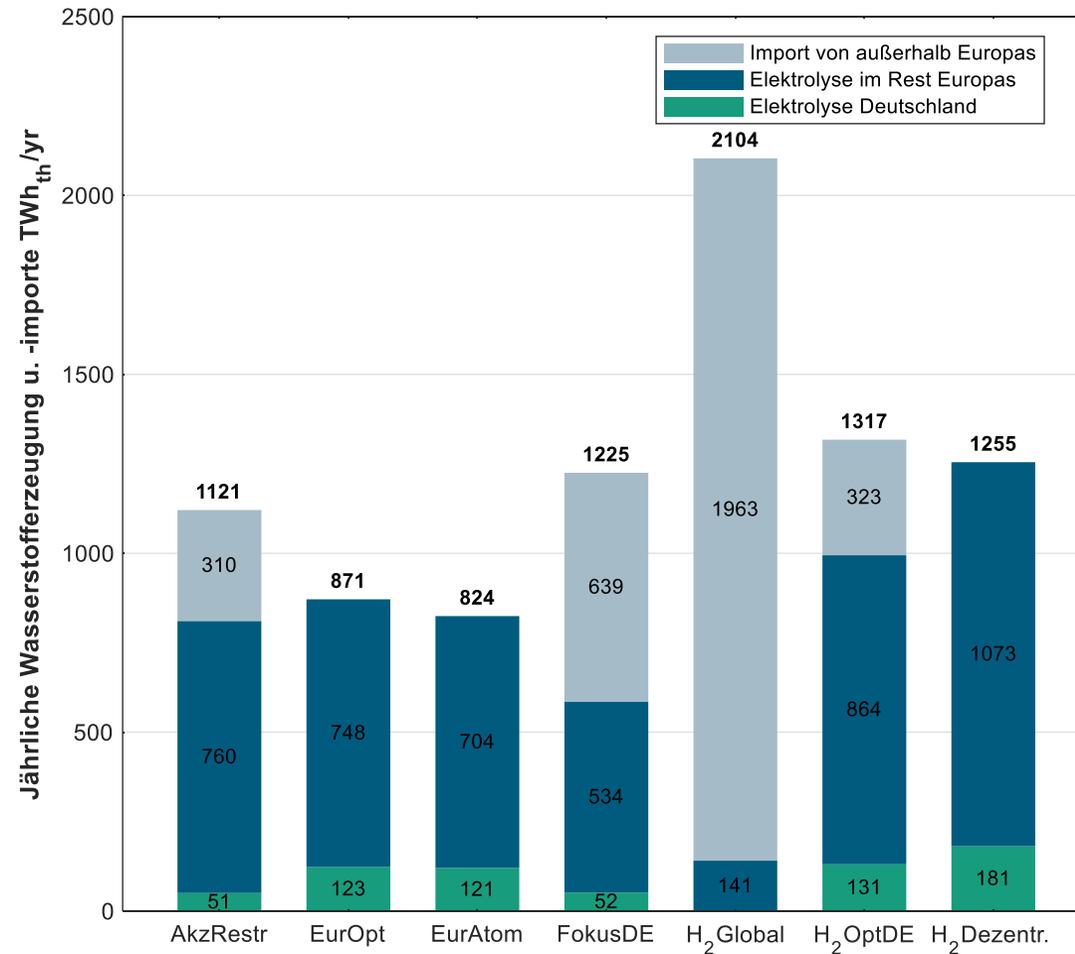


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse

## Jährlicher Stromverbrauch von Industrieöfen und Schwerlastverkehr

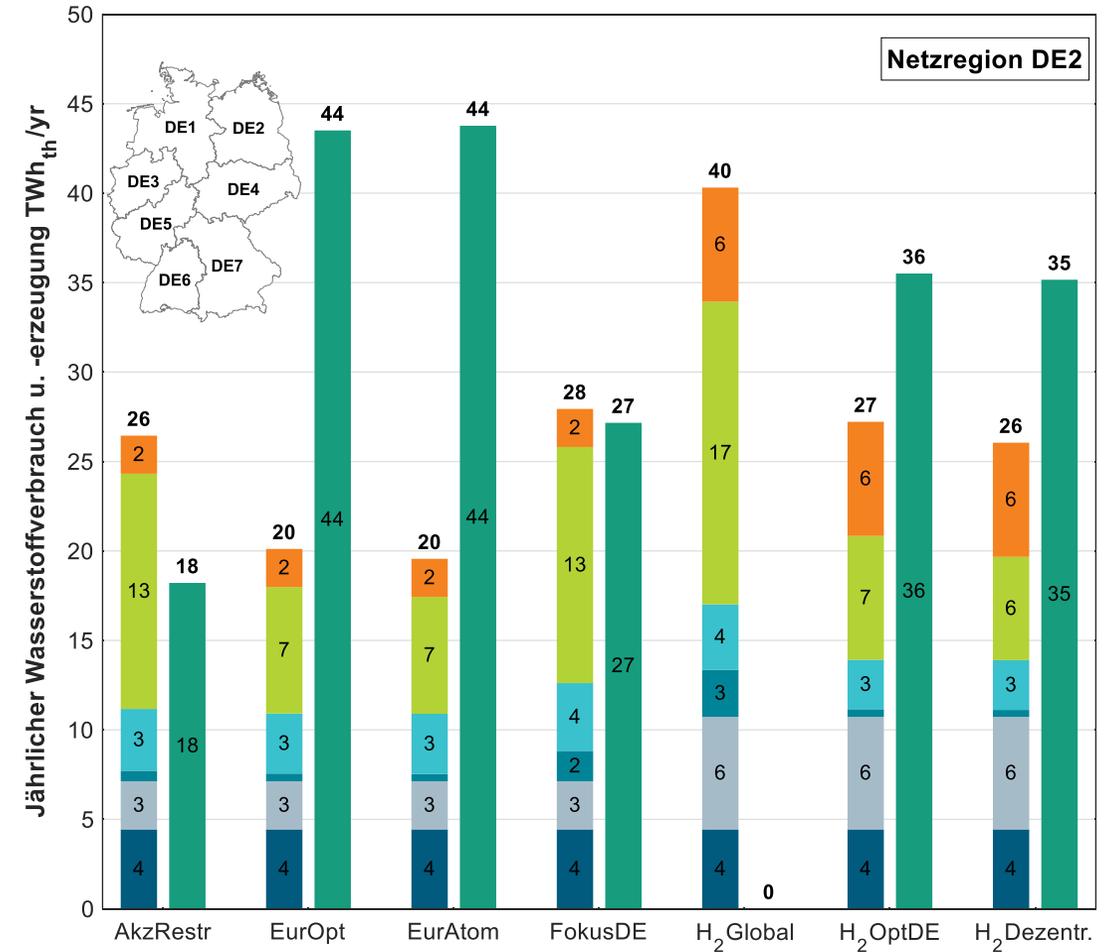
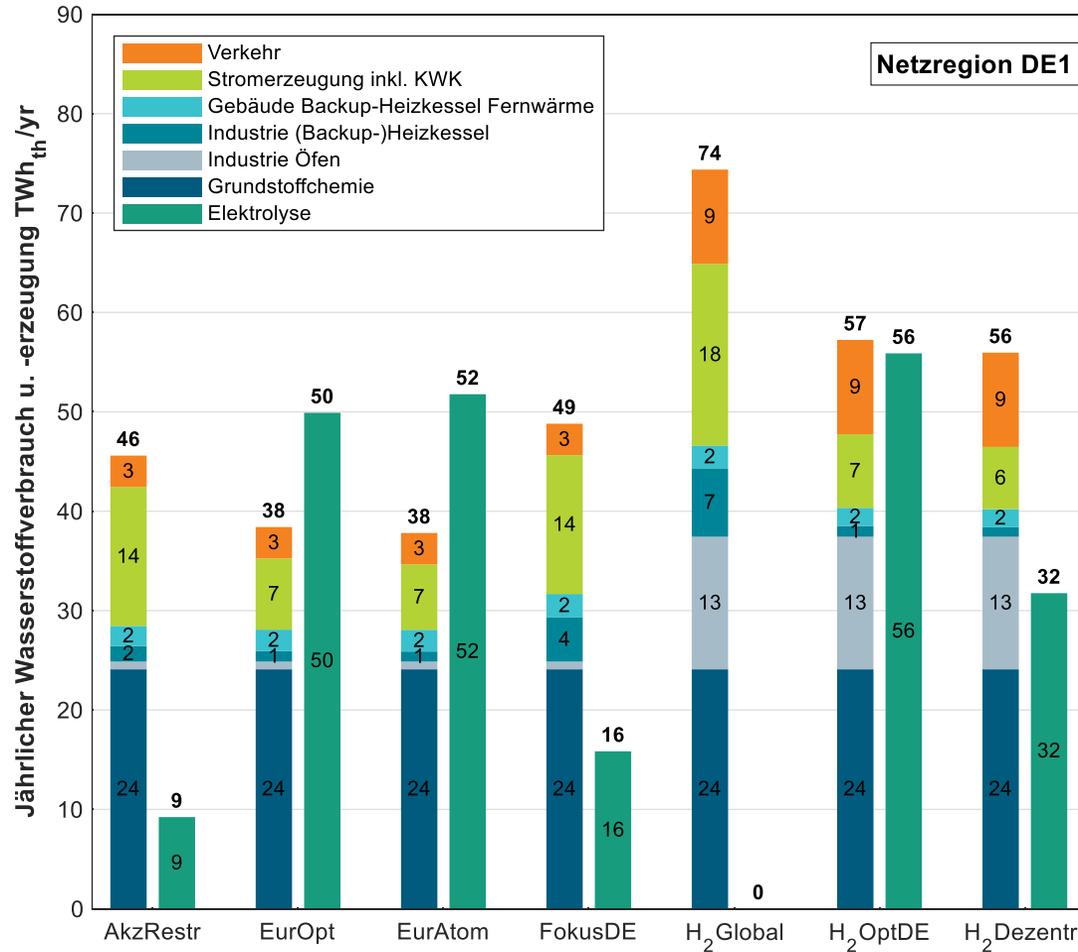


# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Europäische Wasserstoffbereitstellung

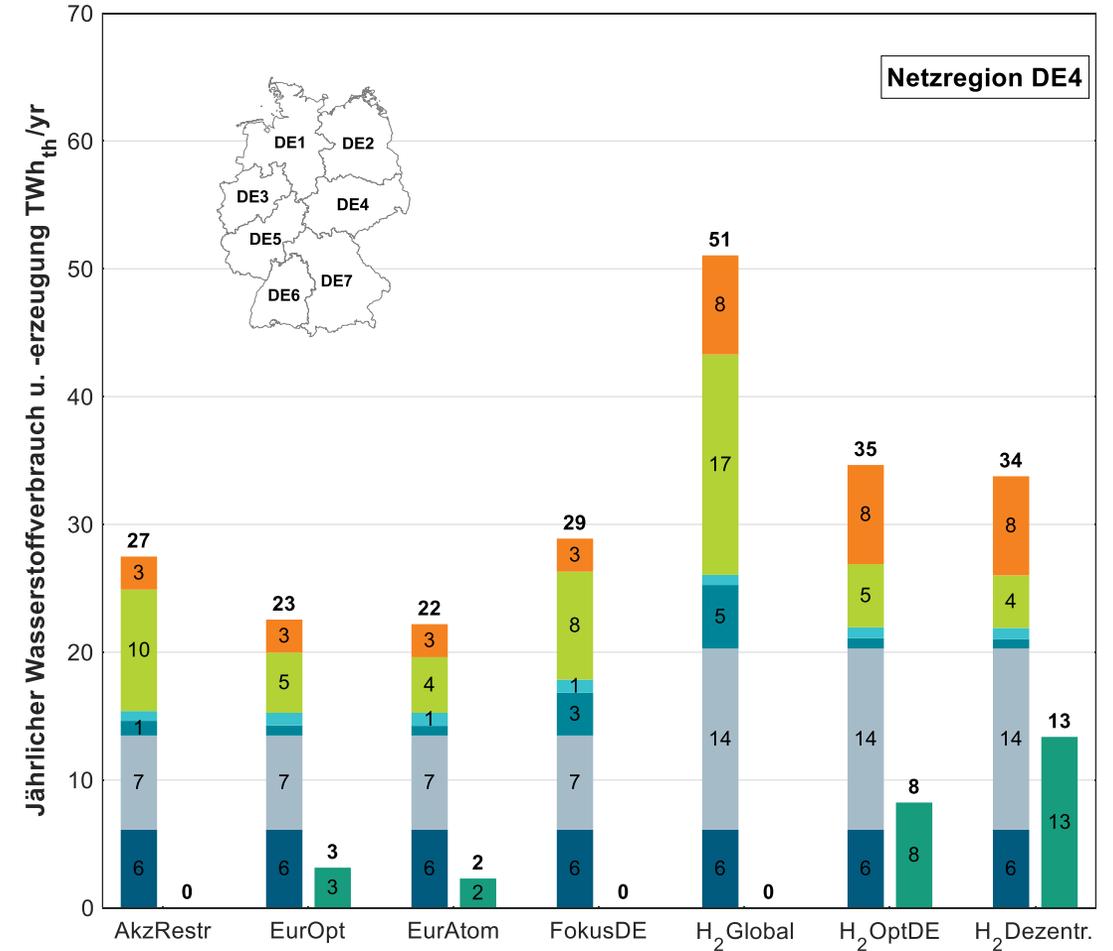
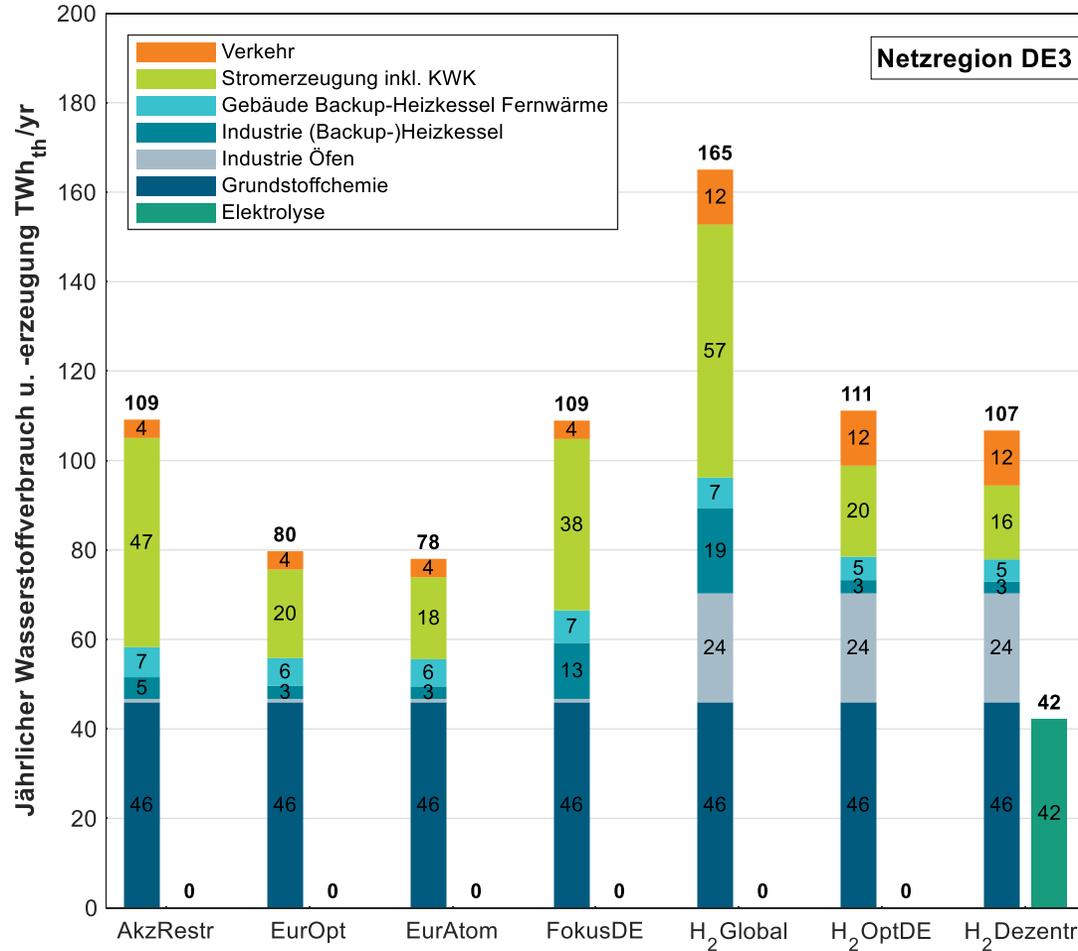


- Wasserstoff war nicht im Fokus dieses Projekts, dennoch wurden wichtige marktseitige Wechselwirkungen durch Modellierungsansatz in Deutschland und europäischen Gesamtsystem berücksichtigt
- Gastransportinfrastrukturen werden nicht explizit abgebildet
- Abbildung eines systemweiten H<sub>2</sub>-Markts mit den Möglichkeiten (1) zur Bereitstellung von Wasserstoff in den für Europa explizit modellierten Marktgebieten inkl. den 7 Netzregionen in Deutschland und (2) zum Import erneuerbaren Wasserstoffs von außerhalb Europas
- Mit Blick auf die Bereitstellung von Wasserstoff im Gesamtsystem zeigen sich deutliche Storyline-Unterschiede
- Unterschiede erklärbar durch die Wasserstoffnachfrage als Resultat exogener Vorgaben im Industriesektor (Öfen + stoffliche Nutzung) und Transportsektor, sowie endogener Entscheidungen insb. in der zentralen Wärmeversorgung und der notwendigen Rückverstromung
- Hoher Einfluss des H<sub>2</sub>-Importpreises und des erneuerbaren Stromangebots (bzw. implizit der Stromeinstandspreise für Elektrolyseure)

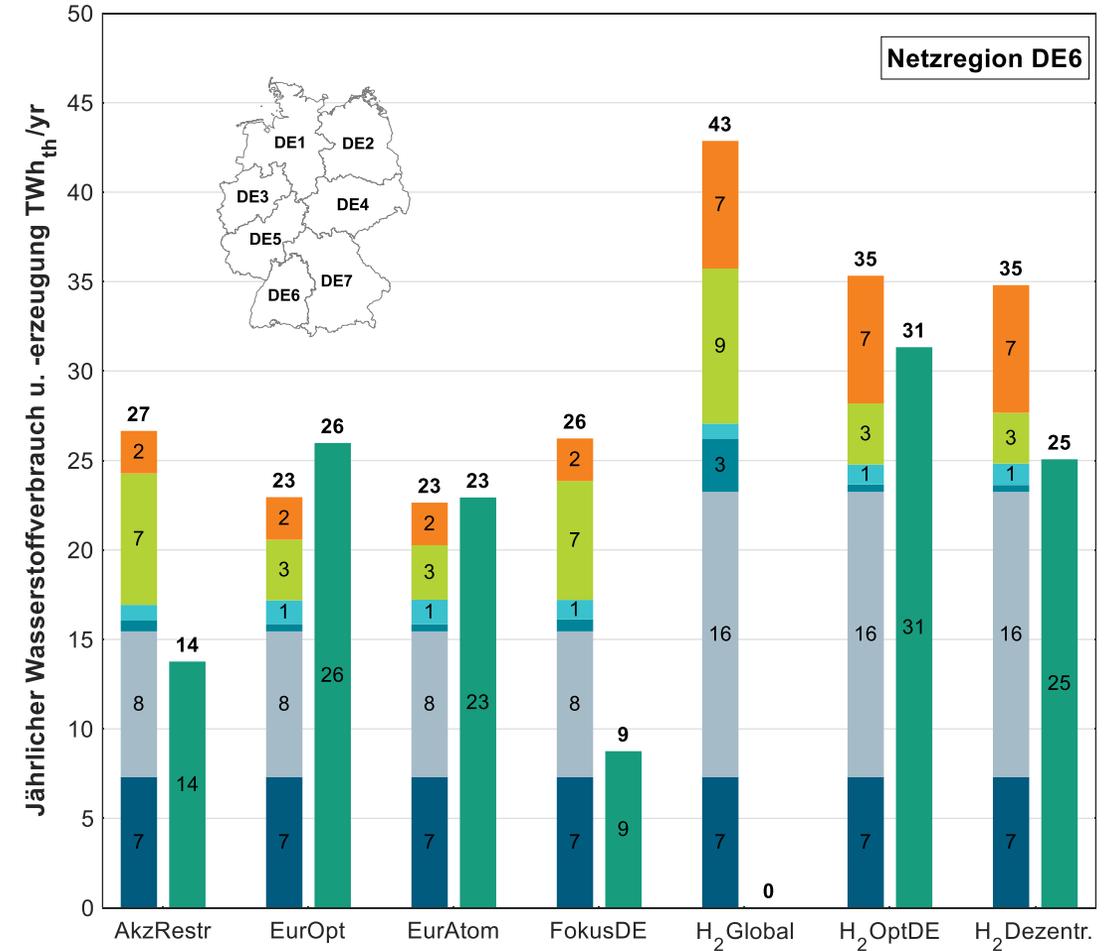
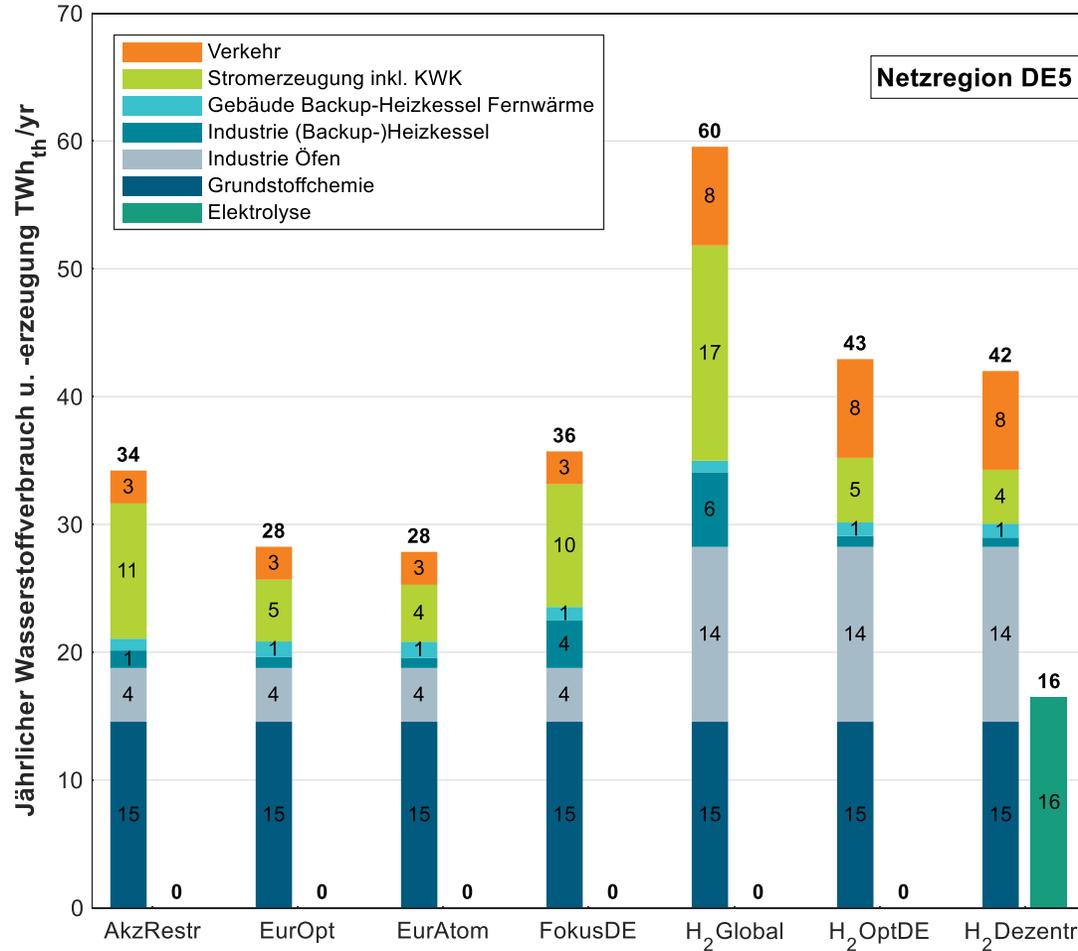
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Wasserstoffbilanz in den Netzregionen DE1 und DE2



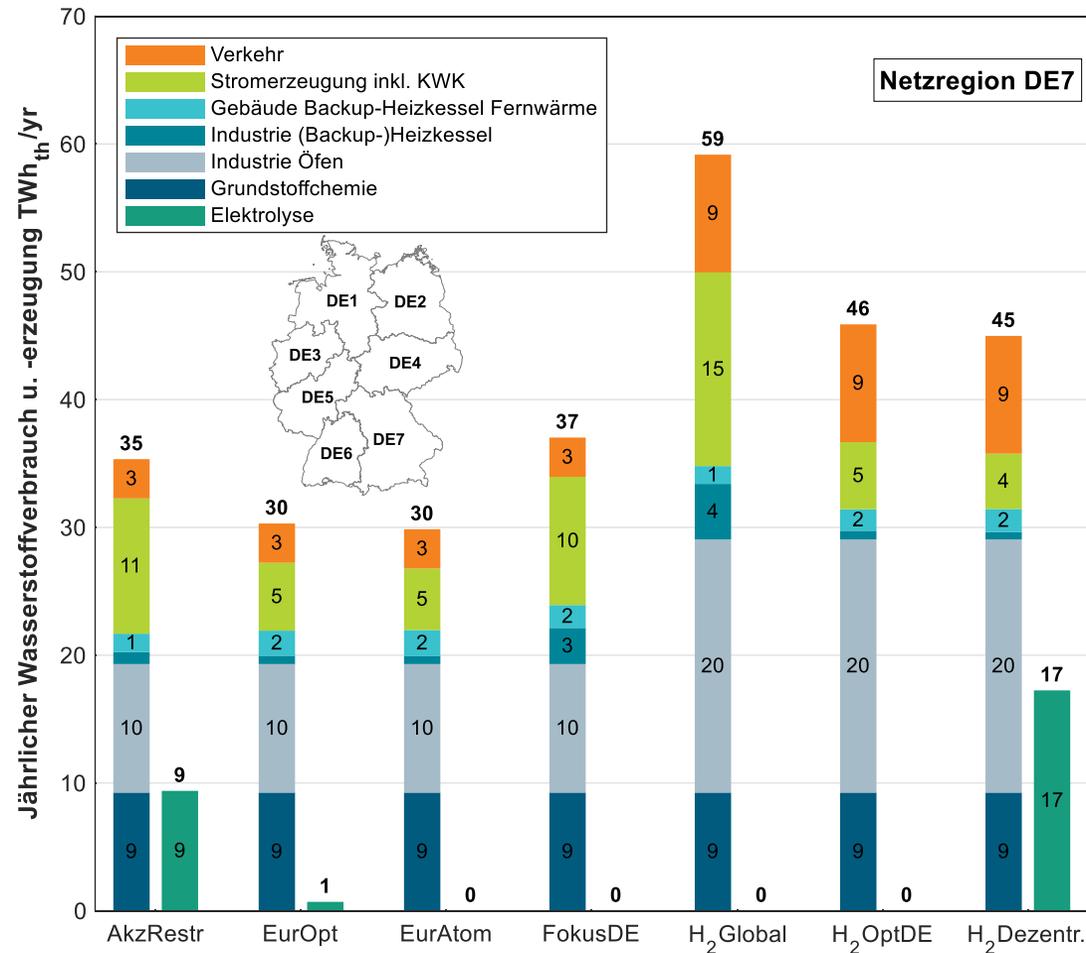
# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Wasserstoffbilanz in den Netzregionen DE3 und DE4



# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Wasserstoffbilanz in den Netzregionen DE5 und DE6



# A3 Detaillierte Modellierungsergebnisse Wasserstoffbilanz in der Netzregion DE7



- Wasserstoffverbräuche für Grundstoffchemie, Industrieöfen, Verkehr sind exogene Vorgaben.
- Andere Verbräuche sowie Elektrolyse sind endogene Ergebnisse.
- Bei einer rein marktbasierter Perspektive des Modells zeigen sich unter Optimierung der Gesamtsystemkosten große Unterschiede für die individuellen Netzregionen.
- Es zeigen sich erste Indikationen für Nettoverbrauchsregionen (DE3 und DE5) und Nettoerzeugungsregionen (DE2 und DE6).
- Einfluss der Storylines und damit einhergehende Schwankungen fallen bei Betrachtung individueller Regionen noch ausgeprägter aus.