



# TransDE: Transformation der Infrastruktur Deutschlands bis zum Jahr 2045 im Einklang mit der Energiewende aller Verbrauchssektoren

—  
TransDE Abschlussworkshop Berlin, 14.03.2023

# Projektübersicht

## TransDE

### Laufzeit:

- 09.2019 – 12.2022

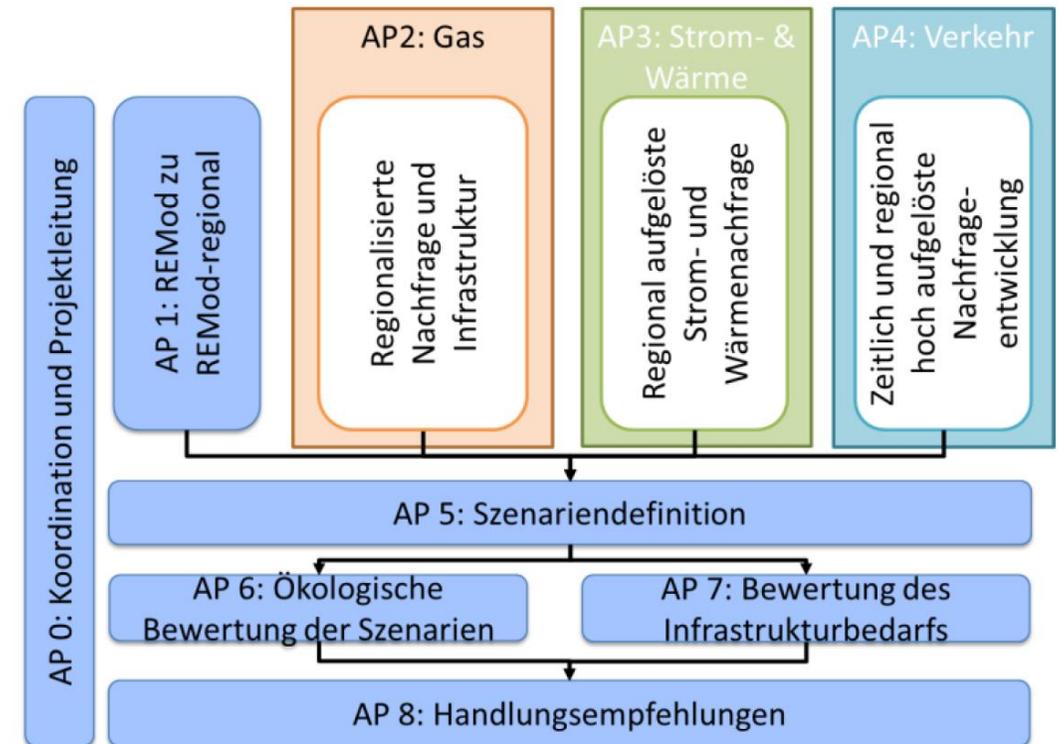
### Konsortium:

- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
- DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH
- Volkswagen AG

### Ziele:

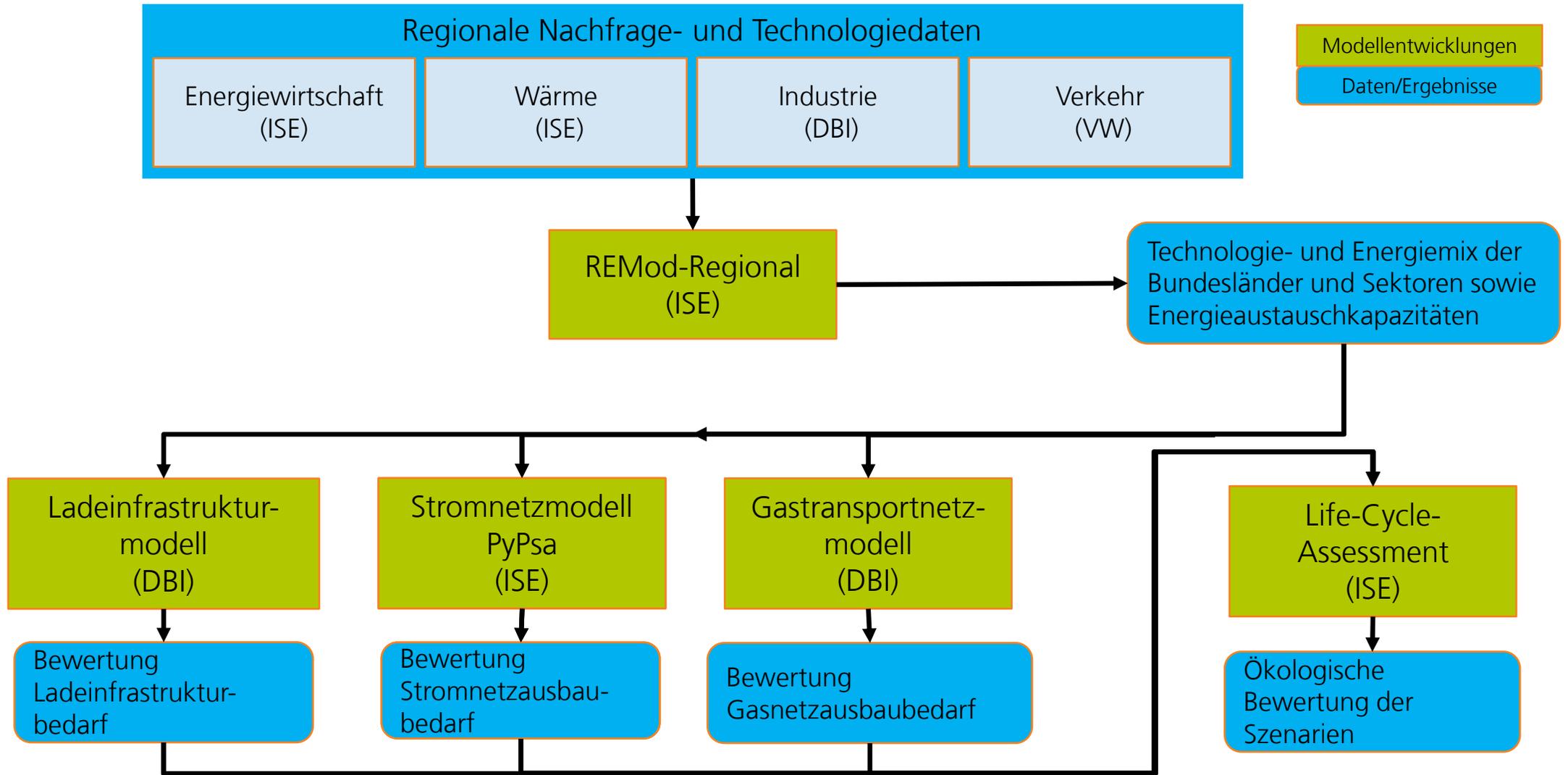
- Regionalisierung und Integration von Infrastrukturen im Energiesystemmodell REMod (ISE)
- Aufbau von Infrastrukturmodellen von Gas- und Wasserstoff (DBI), Ladeinfrastrukturen (DBI), Stromnetzen (ISE)
- Ökologische Bewertung der Szenarien mittels einer LCA (ISE)

### Arbeitsplan:



# Modellkopplungen

TransDE





Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Transformationspfade deutscher Bundesländer unter Berücksichtigung von Infrastrukturen

Julian Brandes (Fraunhofer ISE)

TransDE Abschlussworkshop Berlin, 14.03.2023

# Inhalt

---

1

**Forschungsfragen**

2

**Methodik**  
Regionalisierung des Energiesystemmodells  
REMod

3

**Ergebnisse**  
Bundeslandspezifische Transformationspfade für  
Deutschland und Infrastrukturen

4

**Zusammenfassung und Ausblick**

# Inhalt

1

Forschungsfragen

2

**Methodik**  
Regionalisierung des Energiesystemmodells  
REMod

3

**Ergebnisse**  
Bundeslandspezifische Transformationspfade für  
Deutschland und Infrastrukturen

4

Zusammenfassung und Ausblick

# Forschungsfragen



## Aktueller Forschungsstand:

- Bisherige Systemstudien (z.B. „Big 5“) fokussieren sich vor allem auf die Transformation des deutschen Energiesystems, nicht auf einzelne Bundesländer
- Die Wechselwirkungen von Strom, Gas und Wasserstoffnetzen mit der Transformation der einzelnen Sektoren werden meist nicht vollständig berücksichtigt

## Daher wurde das Energiesystemmodell REMod weiterentwickelt, um beispielsweise folgende Fragen zu beantworten:

- *Wie können Transformationspfade deutscher Bundesländer unter Berücksichtigung eines sektorgekoppelten deutschen Energiesystems unter hoher zeitlicher Auflösung aussehen?*
- *Welche Konsequenzen für den Ausbau der Infrastrukturen ergeben sich hieraus?*

# Inhalt

1

Forschungsfragen

2

**Methodik**  
Regionalisierung des Energiesystemmodells  
REMod

3

**Ergebnisse**  
Bundeslandspezifische Transformationspfade für  
Deutschland und Infrastrukturen

4

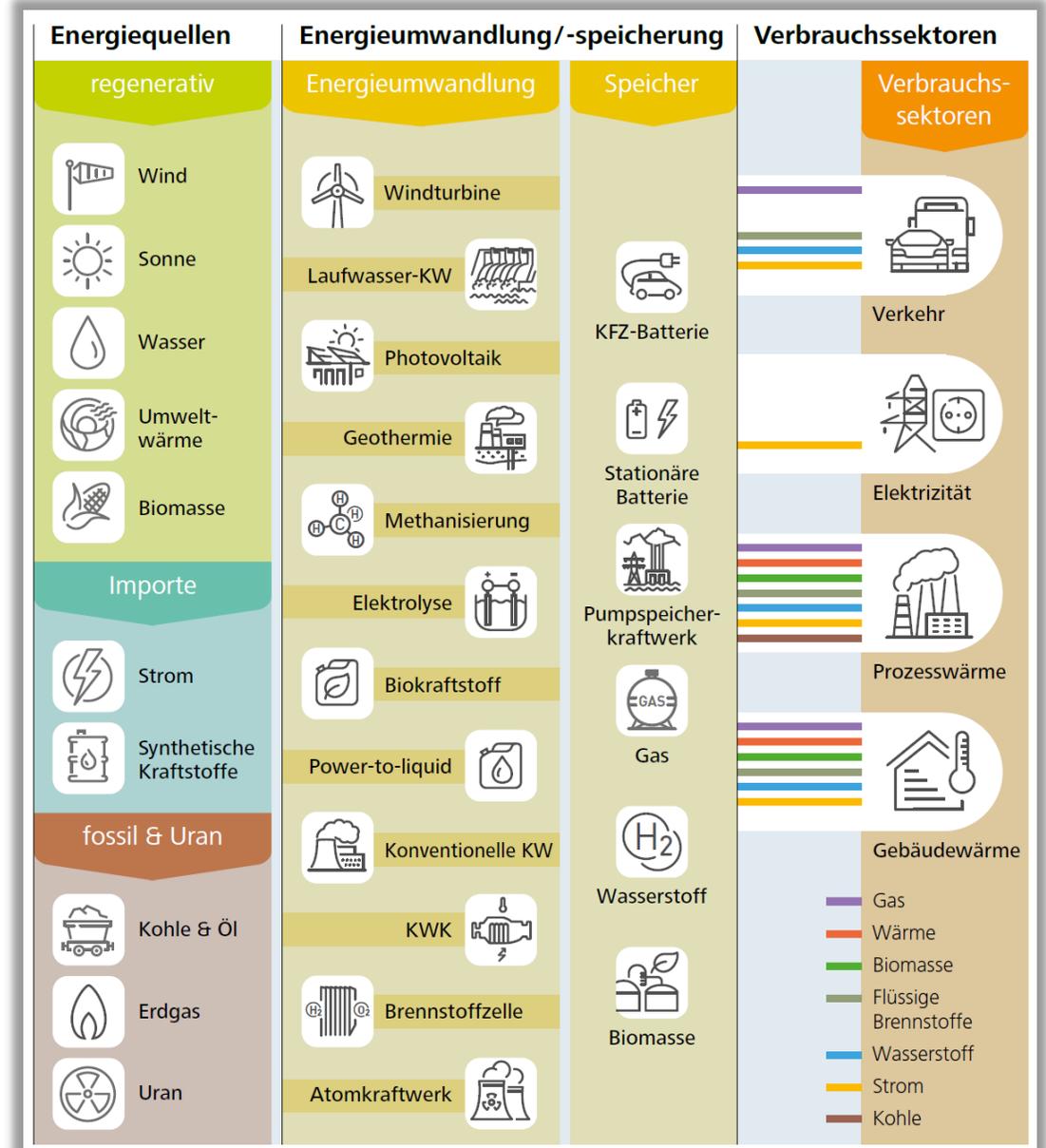
Zusammenfassung und Ausblick

# Methodik

## Energiesystemmodell REMod

### Modell zur Simulation und Optimierung der Entwicklung nationaler Energiesysteme

- Einbeziehung aller Verbrauchssektoren und Energieträger
- Jahresscharfe Optimierung des Technologiemixes aller Sektoren mittels evolutionärer Optimierung
- Minimierung der Transformationskosten
- Stundengenaue Modellierung der Energiebilanz



# Methodik

## Regionalisierung REMod

REMod

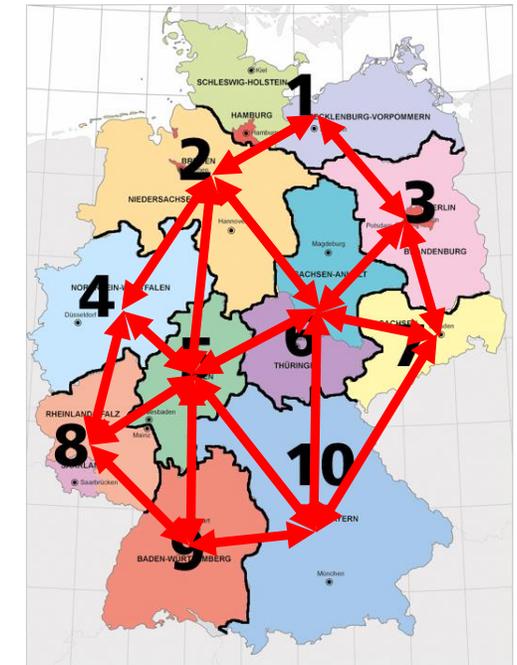
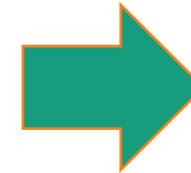
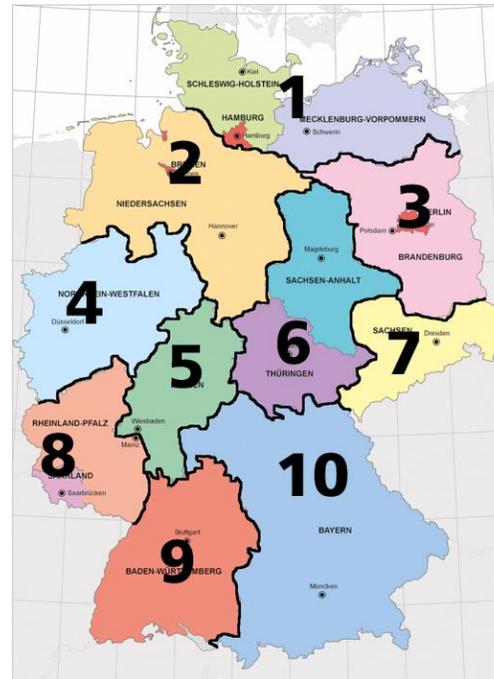
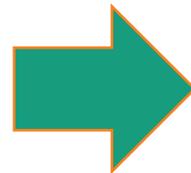
REMod-Regional

### Ursprüngliches Modell:

Deutschland als Ein-Knoten-Modell: Energie überall gleichzeitig verfügbar

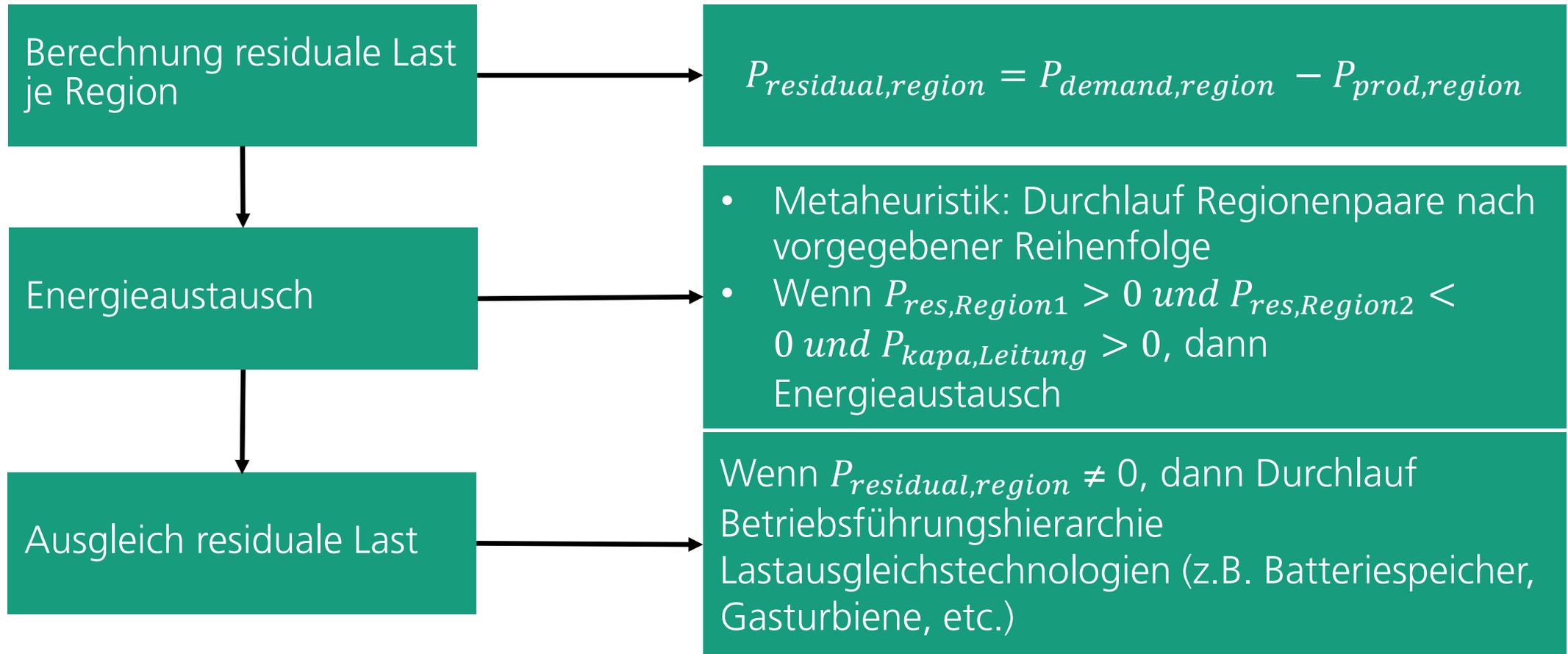
**Knotenscharfe Energiebilanz:** Für 10 Knoten auf Bundeslandebene muss die Energiebilanz zu jeder Stunde erfüllt sein.

**Infrastruktur:** Verknüpfung des Knoten zu Mehr-Knoten Modell: Austausch von Energie mittels Metaheuristiken



# Methodik

## Metaheuristik für Energieaustausch



# Szenariorahmen

## Szenarien in TransDE

---

- Vollständige Reduktion der Emissionen bis zum Jahr 2045 in allen Bundesländern
- Annahmen zum Vorgestellten *Elektrifizierungsszenario*:
  - Verkehr: 100% batterieelektrische PKW, 80% batterieelektrische LKW
  - Gebäude: Mindestens 40% Wärmepumpen
  - Industrie: Mindestens 40% der Prozesswärme durch strombasierte Technologien
- Weitere Szenarien mit deutlich Gas-lastigeren Verbrauchssektoren geplant – Wie wirken sich unterschiedliche Entwicklungen in den Nachfragesektoren auf die Infrastruktur in Deutschland aus

# Inhalt

1

Forschungsfragen

2

**Methodik**  
Regionalisierung des Energiesystemmodells  
REMod

3

**Ergebnisse**  
Bundeslandspezifische Transformationspfade für  
Deutschland und Infrastrukturen

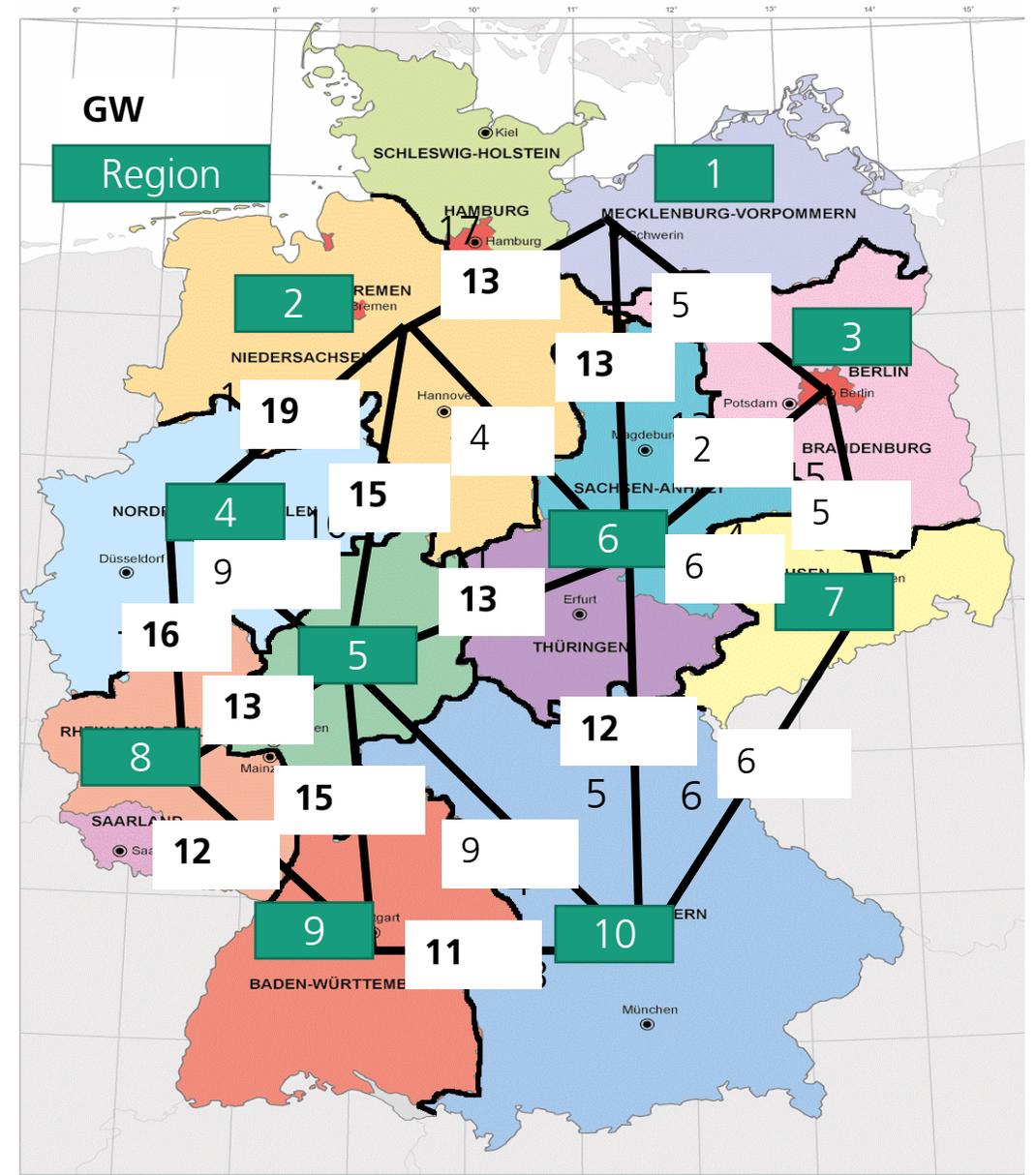
4

Zusammenfassung und Ausblick

# Ergebnisse

## Maximale Leistung Stromleitungen 2045

- Maximale Leistungen vor allem zwischen NRW, sowie nördlichen, windstarken Regionen
- Weniger Austausch in Ost-West Richtung
- In Summe Anstieg der maximalen Leistungen um Faktor 2 bis 5 im Vergleich zu heute



# Ergebnisse

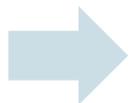
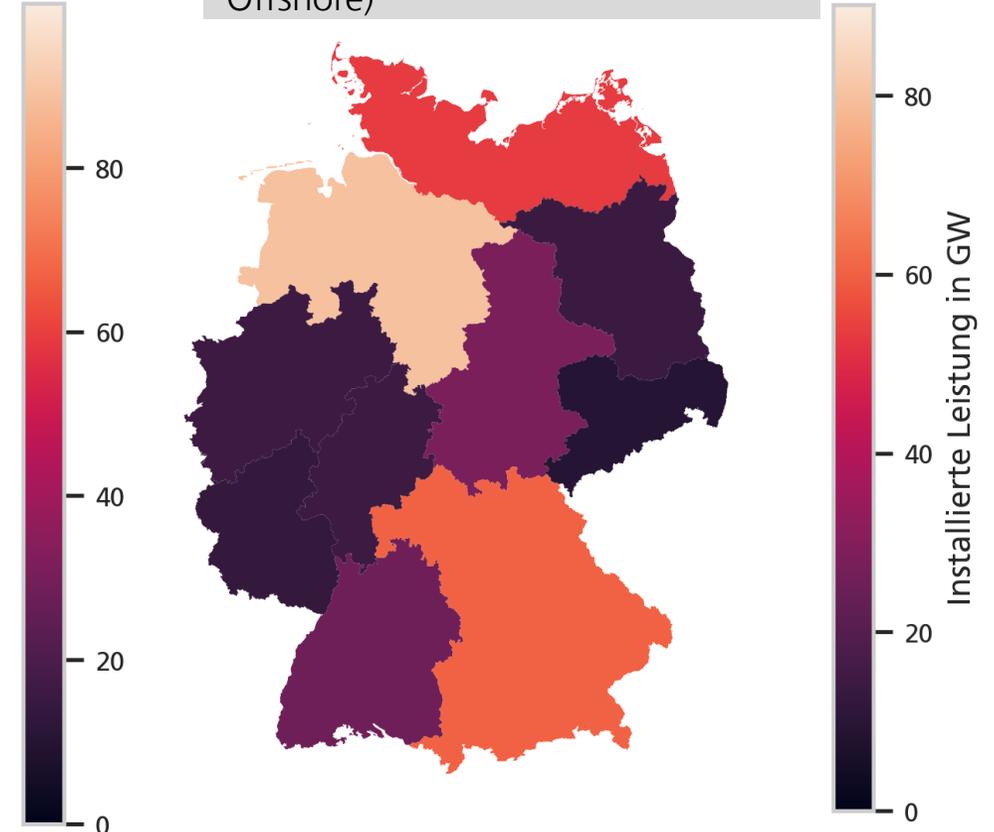
## Ausbau fluktuierender Erneuerbarer Energien (fEE) im Jahr 2045

- Ausbaugrenzen werden nahezu in allen Bundesländern erreicht (Deutschland: ca. 790 GW fEE)
- Starker Ausbau der Windenergie in nördlichen Bundesländern (ca. 130 GW)
- Ebenfalls intensiver Ausbau der Windenergie in südlichen Bundesländern notwendig (ca. 86 GW)
- Größter Ausbau der PV in Bayern und NRW (je 80-90GW), jedoch auch in BaWü und Niedersachsen

Installierte Leistung PV



Installierte Leistung Wind (On- und Offshore)

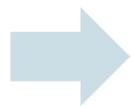
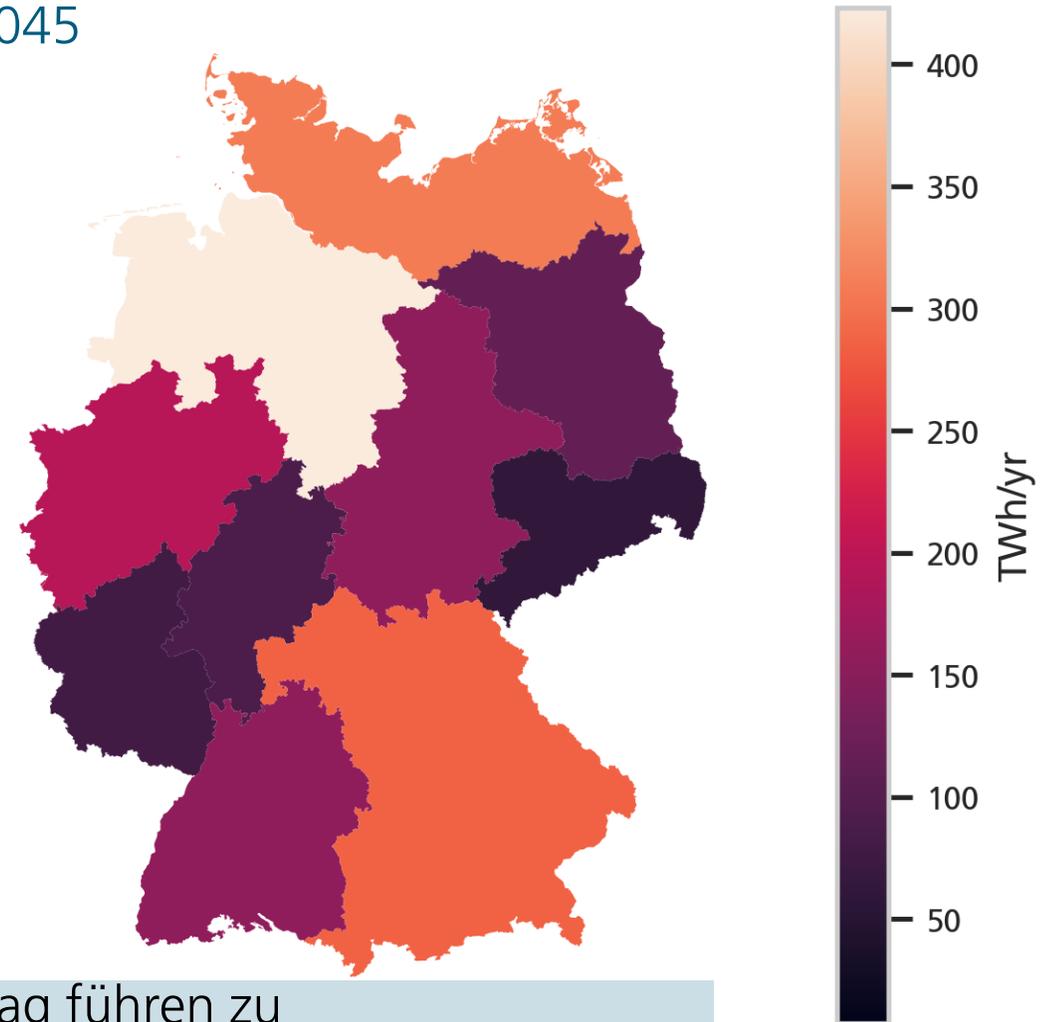


Heterogener Ausbau von Erneuerbaren Energien

# Ergebnisse

## Ertrag fluktuierender Erneuerbarer Energien (fEE) im Jahr 2045

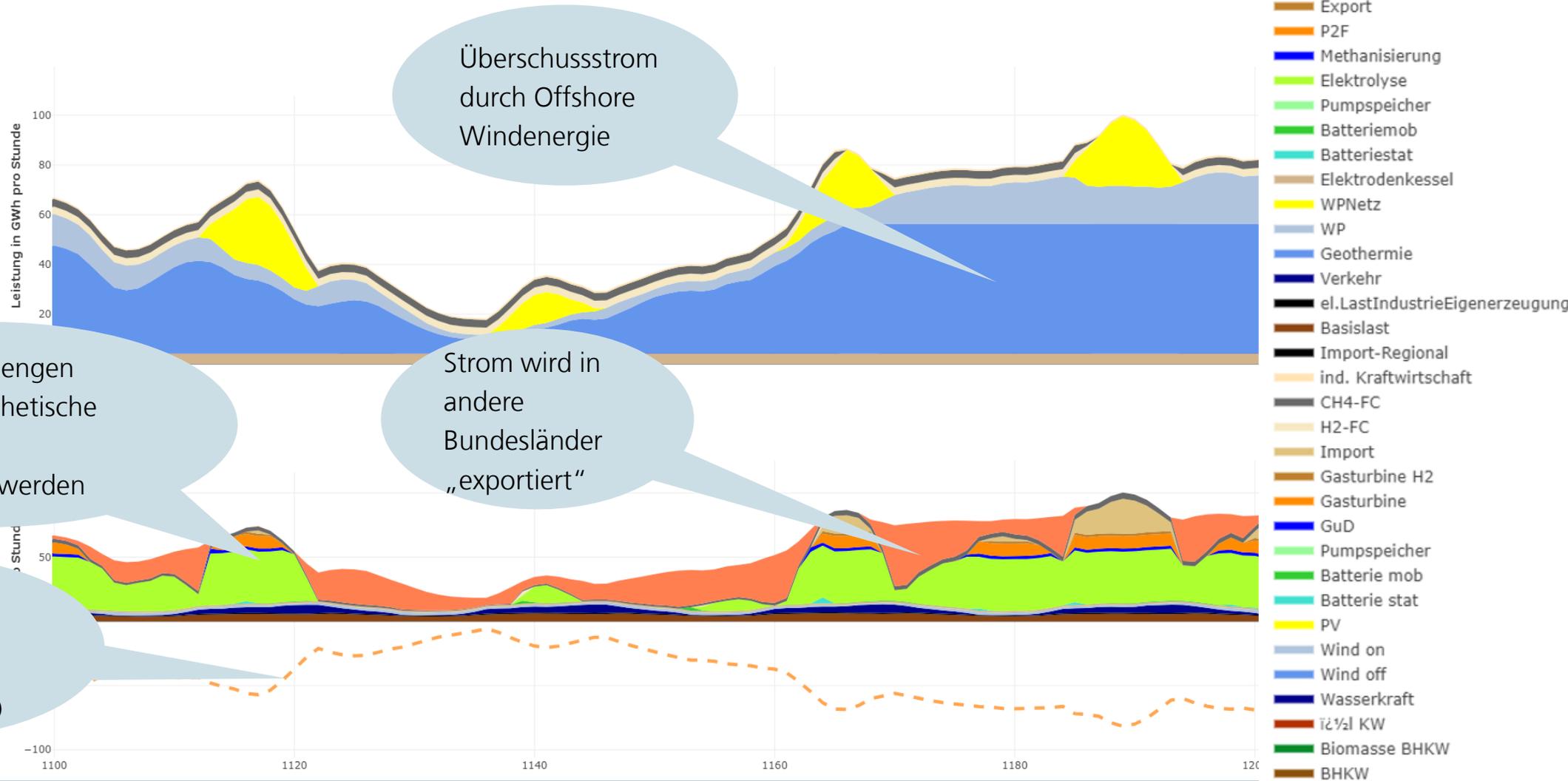
- NS mit 420 TWh und SH-MVP-HH mit 310 TWh mit viel Windenergie größte Stromerzeuger
- Bayern durch sowohl viel PV als auch Windenergie mit 285 TWh drittgrößter Stromerzeuger
- Der Ertrag von Windenergie ist im Norden höher, der von PV dafür im Süden
- Ausbau der Windenergie trotz geringerem Ertrag im Süden sinnvoll



Unterschiede im Ausbau und im Ertrag führen zu unterschiedlichen Stromprofilen

# Ergebnisse

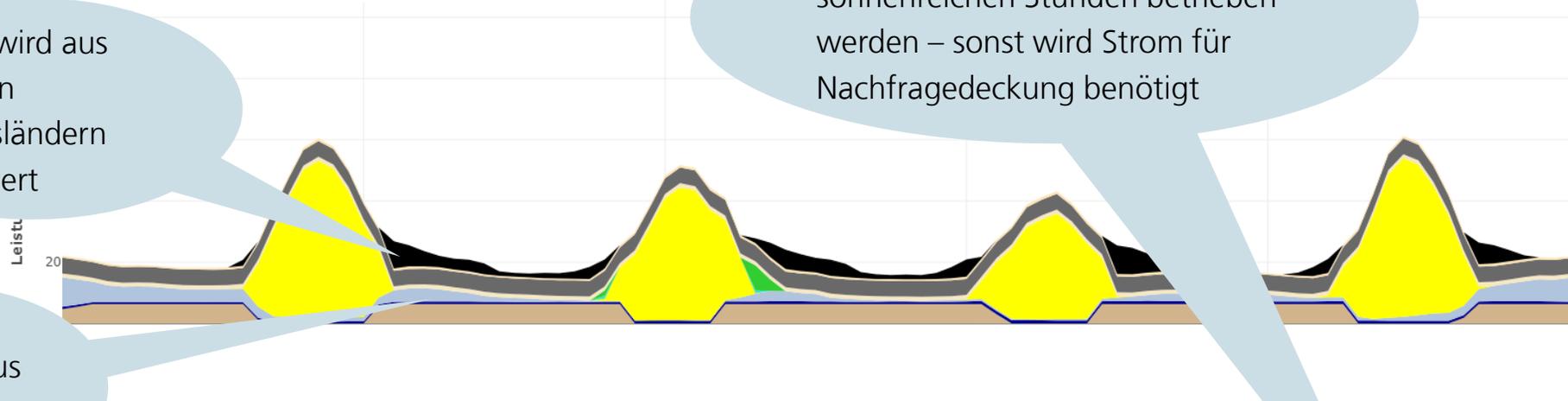
## Profil Niedersachsen - 2045 - Woche 7



# Ergebnisse

## Profile Bayern- 2045 - Woche 7

Stromerzeugung



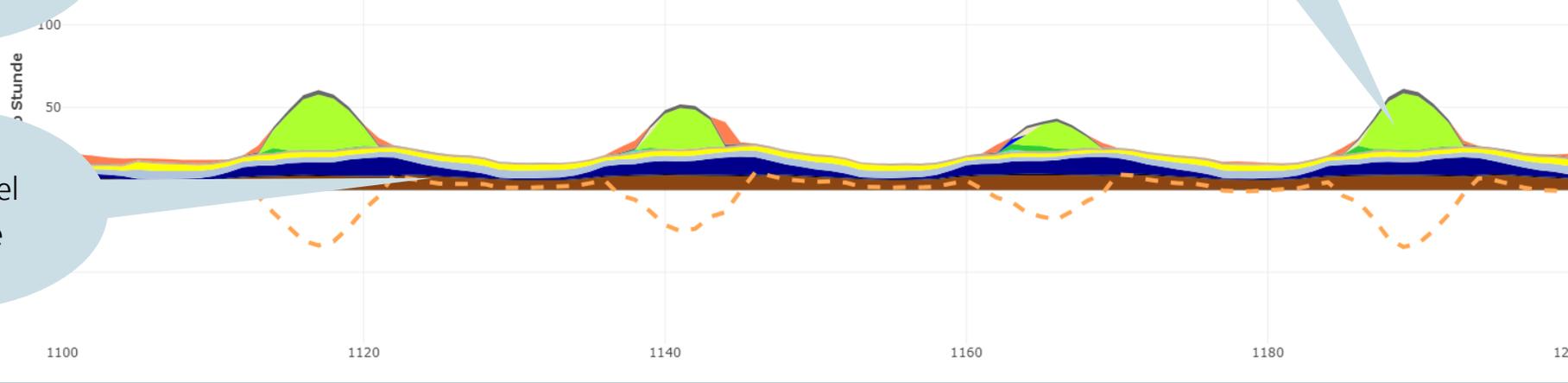
Strom wird aus anderen Bundesländern importiert

Geringe Ausbeute aus Windenergieerzeugung

Teilweise Strommangel durch lokale Erzeugung

Elektrolyse kann vor allem in sonnenreichen Stunden betrieben werden – sonst wird Strom für Nachfragedeckung benötigt

Stromabnahme

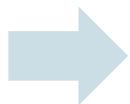
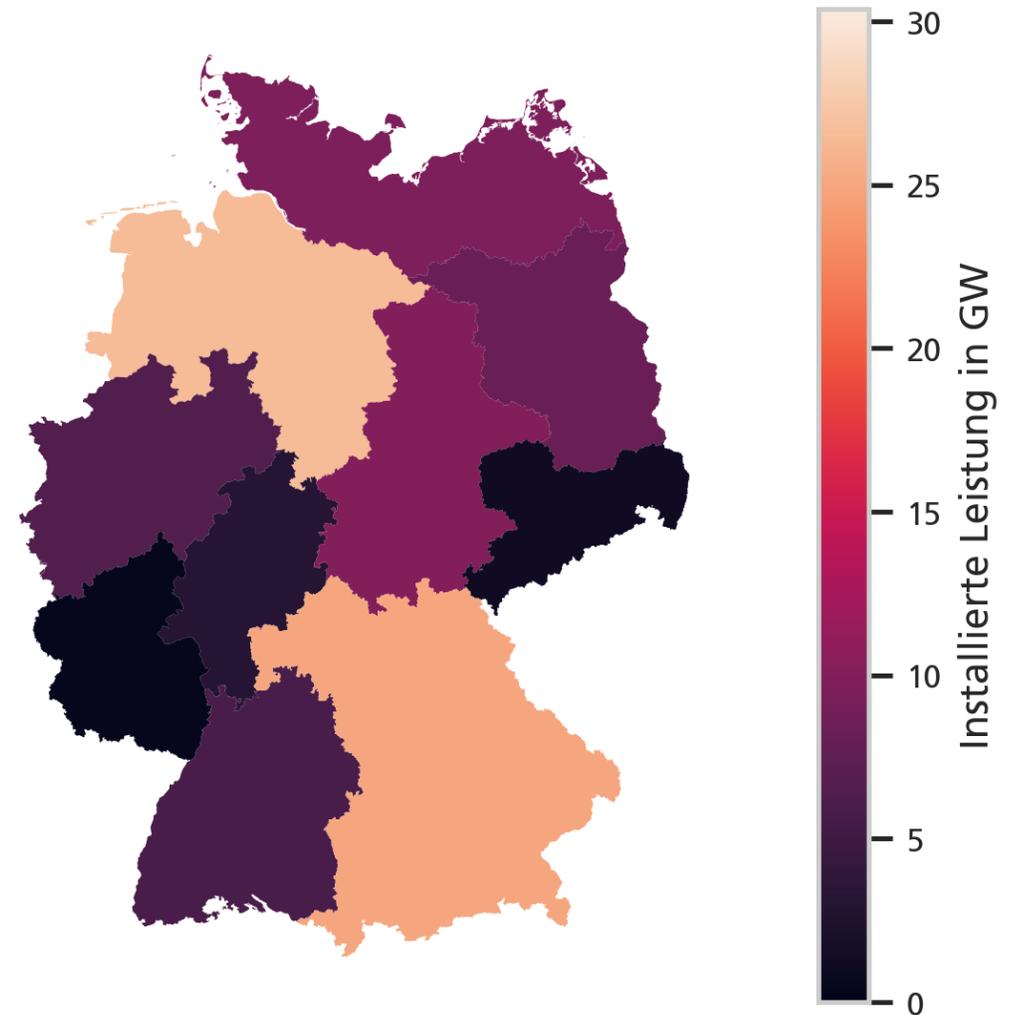


- Last
- ExportRegional
- Abgeregelt
- Verluste
- PtSynaufheizen
- P2H
- Export
- P2F
- Methanisierung
- Elektrolyse
- Pumpspeicher
- Batteriemob
- Batteriestat
- Elektrodenkessel
- WPNetz
- WP
- Geothermie
- Verkehr
- el.LastIndustrieEigenerzeugung
- Basislast
- Import-Regional
- ind. Kraftwirtschaft
- CH4-FC
- H2-FC
- Import
- Gasturbine H2
- Gasturbine
- GuD
- Pumpspeicher
- Batterie mob
- Batterie stat
- PV
- Wind on
- Wind off
- Wasserkraft
- 1/2 KW
- Biomasse BHKW
- BHKW
- KWK Netz
- SK
- BK
- AKW

# Ergebnisse

## Kapazität Elektrolyseure 2045

- Insgesamt werden etwa 150 GW an Elektrolyseuren in Deutschland zugebaut
- Power-to-X Technologien (Elektrolyse, Methanisierung und PTL) werden vor allem in Regionen mit hohem Ausbau von Windenergie installiert
- Bayern und NS auf Grund großer Windleistungen mit größten Erzeugungsleistungen von >30GW
- Windarme Länder benötigen Strom für lokalen Verbrauch, daher geringere Elektrolyseleistung

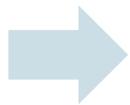
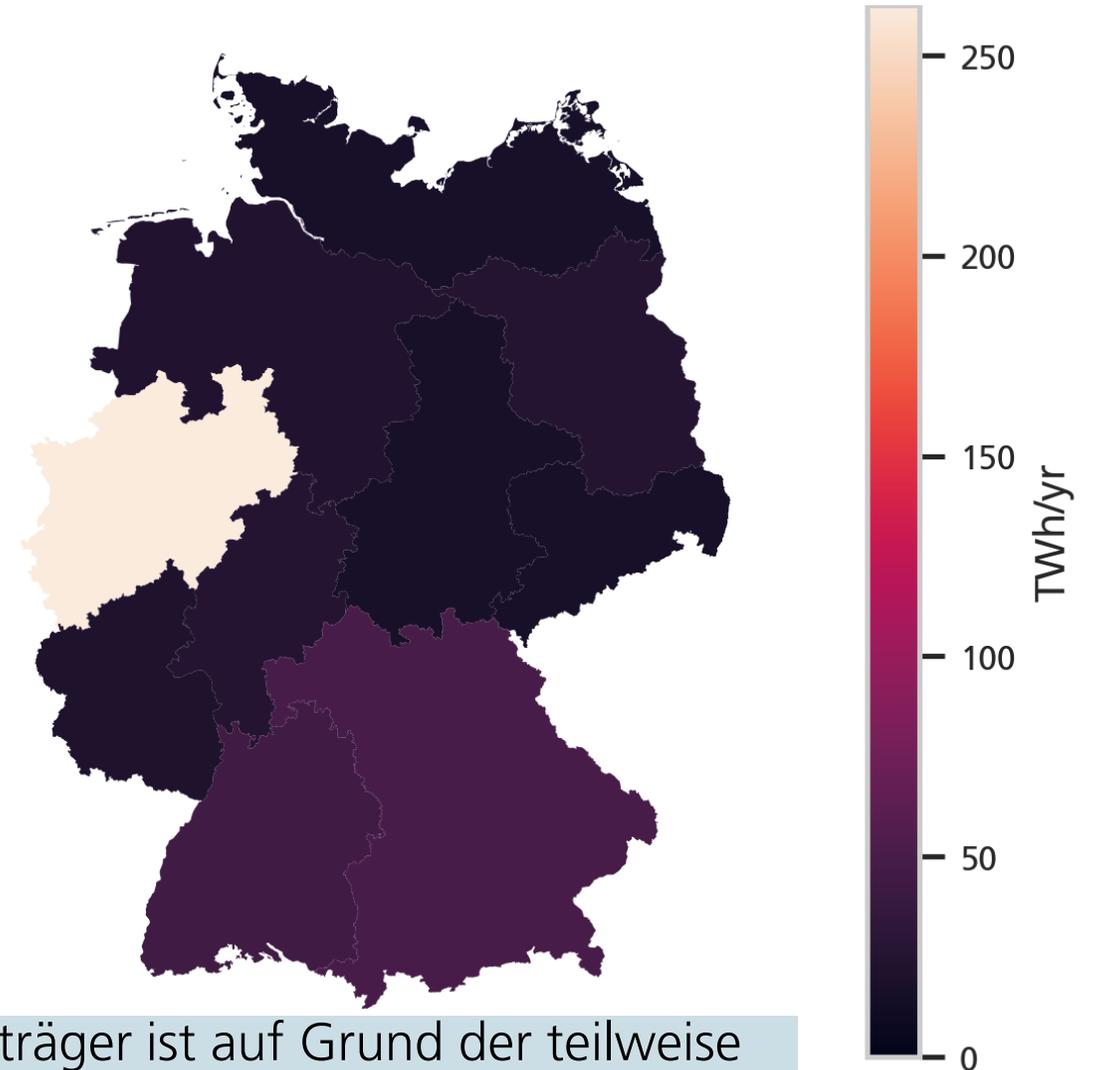


Die Erzeugung von Wasserstoff mittels Überschussstrom erscheint vor allem in windreichen Regionen sinnvoll

# Ergebnisse

## Import synthetischer Energieträger nach Deutschland

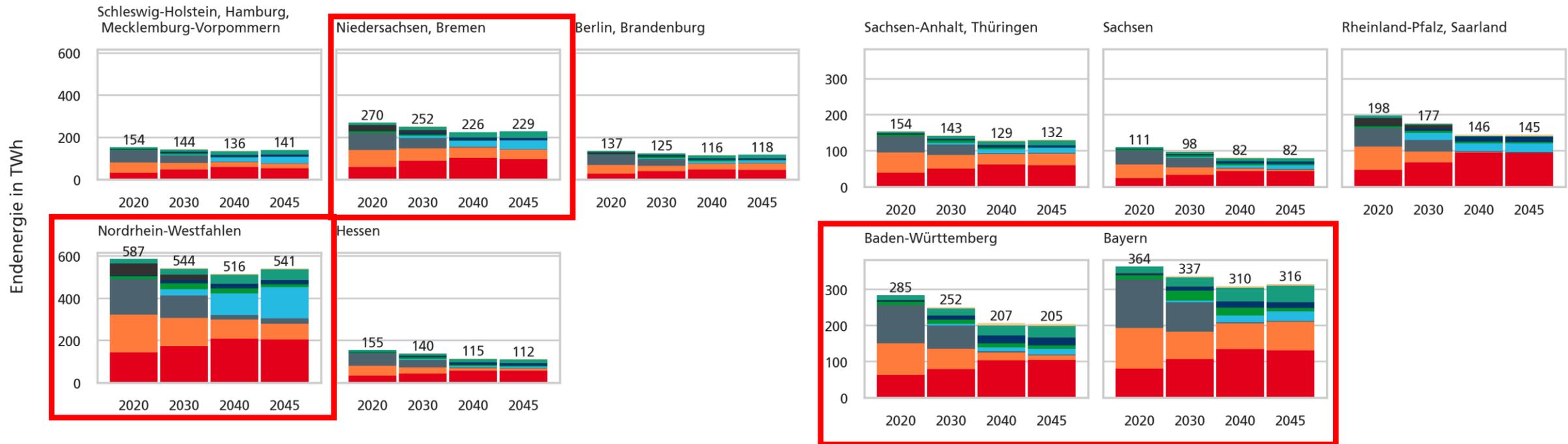
- Insgesamt werden 500 TWh synthetische Energieträger aus dem Ausland importiert
- Bundesländer mit viel Elektrolysekapazität und geringer Endenergienachfrage können Wasserstoffbedarf **nahezu lokal** decken
- Ein Großteil der Bundesländer ist **auf Importe angewiesen**
- NRW sticht mit sehr hohen Importmengen von 262 TWh auf Grund von hoher Nachfrage (viel Industrie) und geringer Erzeugungskapazität heraus



Der Import synthetischer Energieträger ist auf Grund der teilweise eingeschränkten Erzeugungspotenziale in vielen Regionen unerlässlich

# Ergebnisse

## Endenergienachfrage



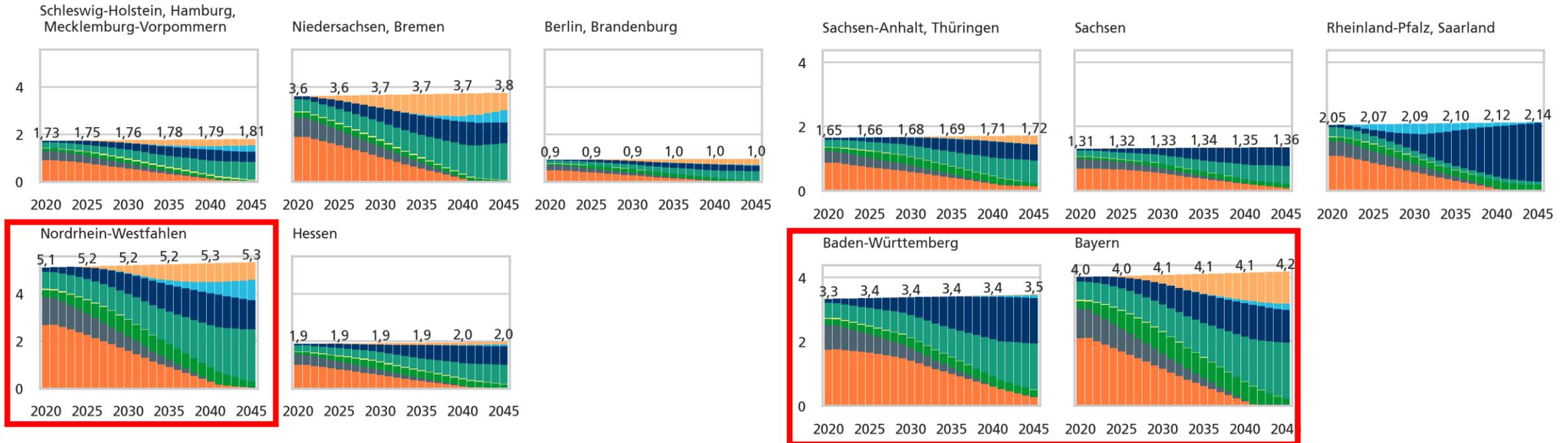
- Etwa 25% der Endenergienachfrage entfallen auf NRW, weitere 37% auf NS, BW und BY
- In Bundesländern mit viel Industrie geht die Endenergienachfrage nur gering zurück, da viele synthetische Energieträger benötigt werden
- Insgesamt Rückgang der Endenergienachfrage, jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt
- In allen Bundesländern Anstieg des Elektrifizierungsgrades

# Ergebnisse

## Transformationspfad Gebäudesektor



Anzahl in Millionen



- Wärmepumpen in allen Bundesländern stark vertreten
- In größeren Bundesländern intensiverer Ausbau von Wärmenetzen
- Durch Verbot Gaskessel (65%-Regel) werden in einigen Regionen mit knappem Stromdargebot Brennstoffzellen genutzt
- Betrachtung Lokaler (Wasserstoff-)Infrastrukturen könnten Brennstoffzellenausbau beeinflussen

# Inhalt

---

1

Forschungsfragen

2

**Methodik**  
Regionalisierung des Energiesystemmodells  
REMod

3

**Ergebnisse**  
Bundeslandspezifische Transformationspfade für  
Deutschland und Infrastrukturen

4

**Zusammenfassung und Ausblick**

# Fazit und Ausblick

## Zusammenfassung

- Die **Analyse einzelner Bundesländer** ist wichtig um regionale Unterschiede und Infrastrukturmaßnahmen analysieren zu können, da sich die deutschen Bundesländer erheblich in Bezug auf **Energieangebot und -nachfrage unterscheiden**
- Für das Erreichen der Klimaziele ist der intensive Ausbau von **Windenergie und Photovoltaik in allen Bundesländern** notwendig – insbesondere auch in südlichen
- Ein deutschlandweiter Ausbau von **Stromnetzen ist unerlässlich**, die maximalen Leistungen steigen um den **Faktor 2-5**
- Der **Ausbau von Power-to-X Anlagen** findet vor allem in **windreichen Regionen** statt – einige Bundesländer sind auf **Importe angewiesen** (aus dem Aus- oder Inland)
- Auf Grund unterschiedlicher Nachfragen und Erzeugungsprofile erscheint **ein integrierter Systeminfrastrukturplan** sinnvoll

## Ausblick

- Integration von **Infrastrukturen gasförmiger Energieträger** (CH<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>)
- Betrachtung von Wechselwirkungen zwischen Infrastrukturen (Strom und Gas)

Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit

---

# Kontakt

---

**M.Sc. Julian Brandes**  
**Gruppe Energiewirtschaft und Energiesysteme**  
**Tel. +49 761 4588-2279**  
**[julian.brandes@ise.fraunhofer.de](mailto:julian.brandes@ise.fraunhofer.de)**

Fraunhofer ISE  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg  
[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)