LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Webinar zur Vorstellung der dezentralen Szenarien

Energieangebot

Datum:
15.02.2024

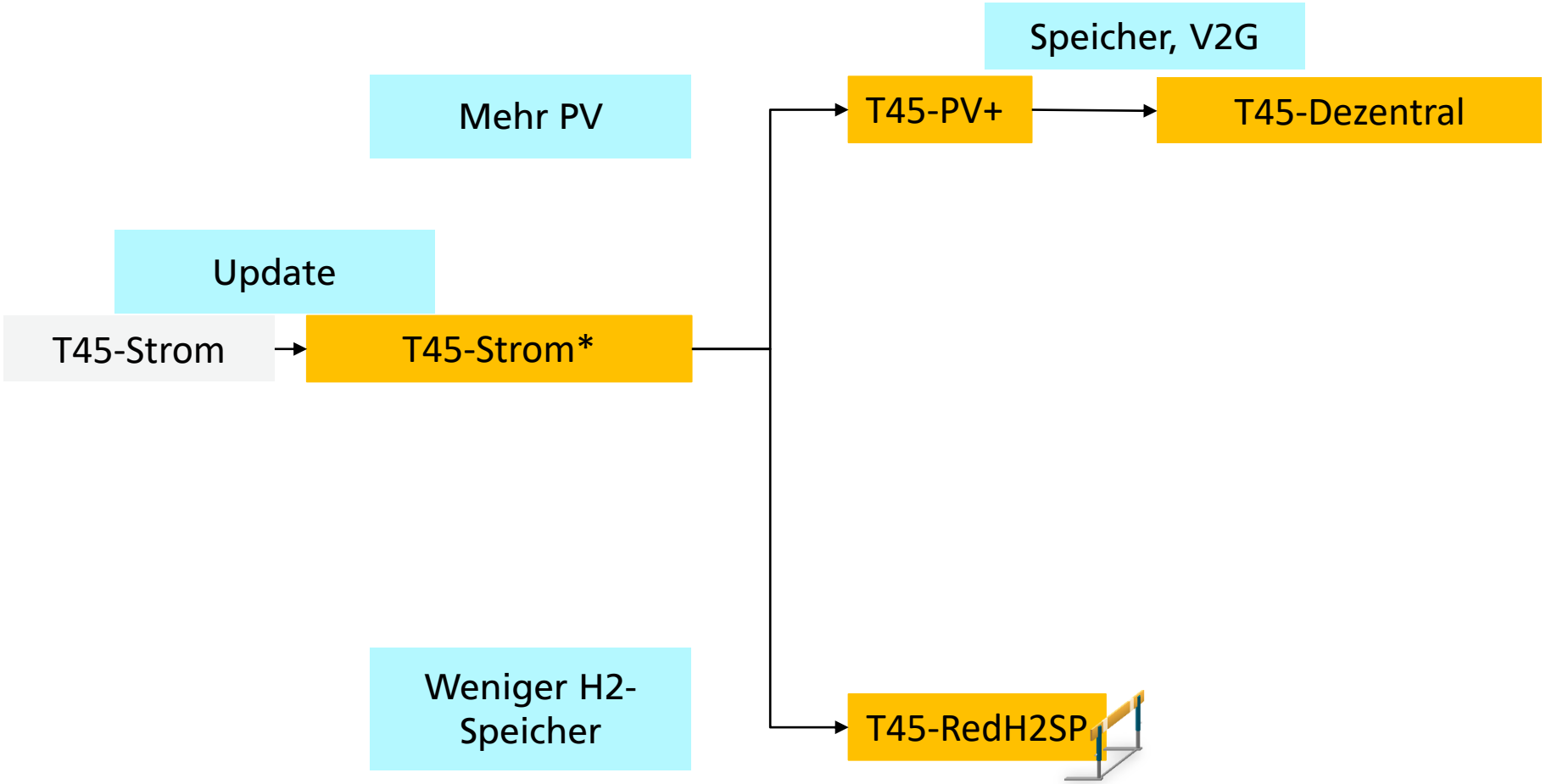
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

- **Einleitung & Zielsetzung**
- Neuerungen in der Modellierung
- Update zu T45-Strom*
- Dezentrale Szenarien
- H2-Speicher
- Fazit

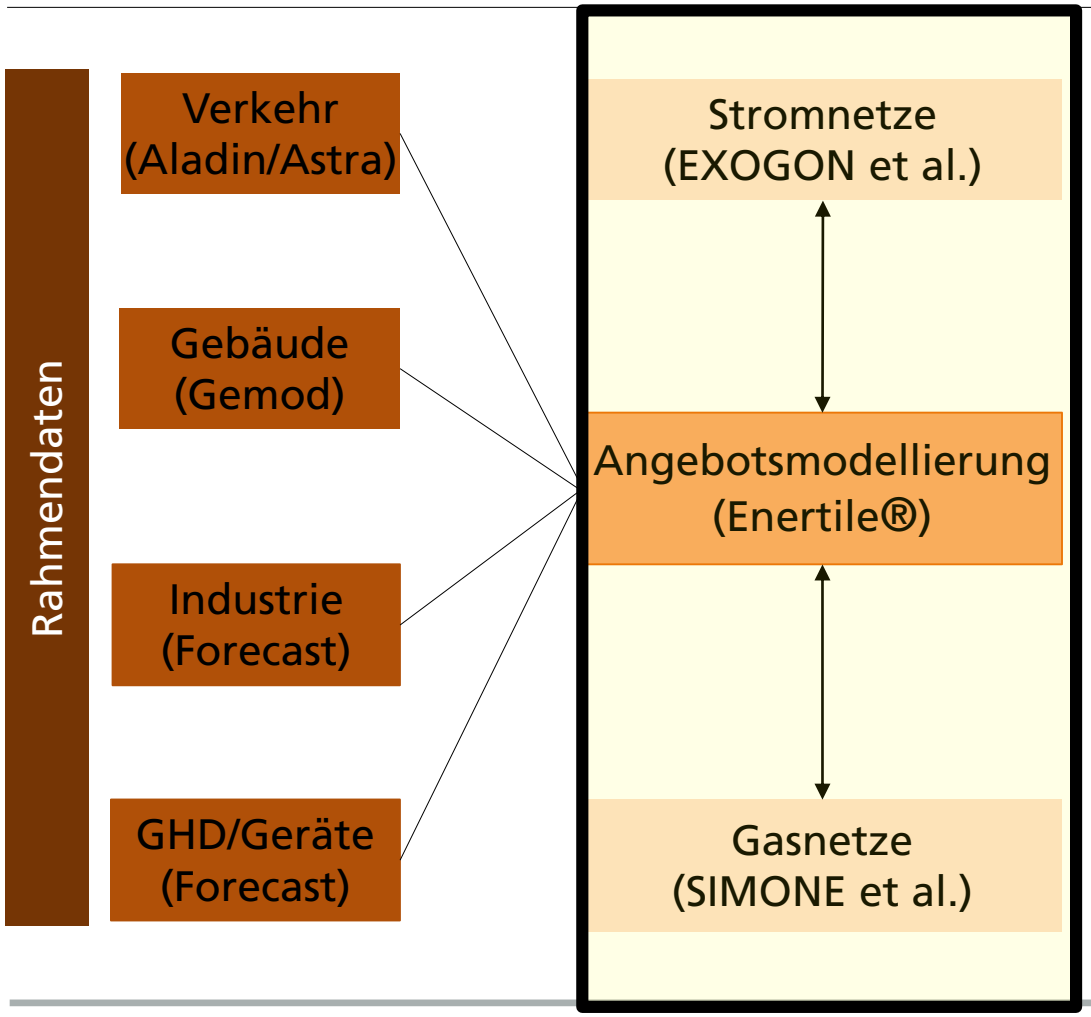
Zielsetzung

- Analyse der Auswirkungen verschiedener Einschränkungen eines optimalen Energiesystems auf:
  - Infrastrukturen
    - Erzeugung
    - Speicher
    - Netze
- Analyse der Mechanismen für den Ausgleich des Energiesystems
- Analyse der Einschränkungen auf die Kosten des Energiesystems

Parametrierung Szenarien



Modellsystem
Gekoppelte Modelle erlauben hoch aufgelöste Analysen



Vorgehensweise

- Detaillierte Modelle berechnen Energienachfrage
- Energienachfrage wird **regionalisiert**
- Potentiale Erneuerbarer Energien werden in hoher räumlicher und **zeitlicher** (stundenscharf) Auflösung berechnet
- Bereitstellung der Energie wird optimiert und mit Netzmodellen iteriert
- Auslegung der **Netze** wird berechnet

Einordnung

- Sehr hohe Auflösung des Energiesystems
- Modellkette sehr rechenintensiv und aufwändig

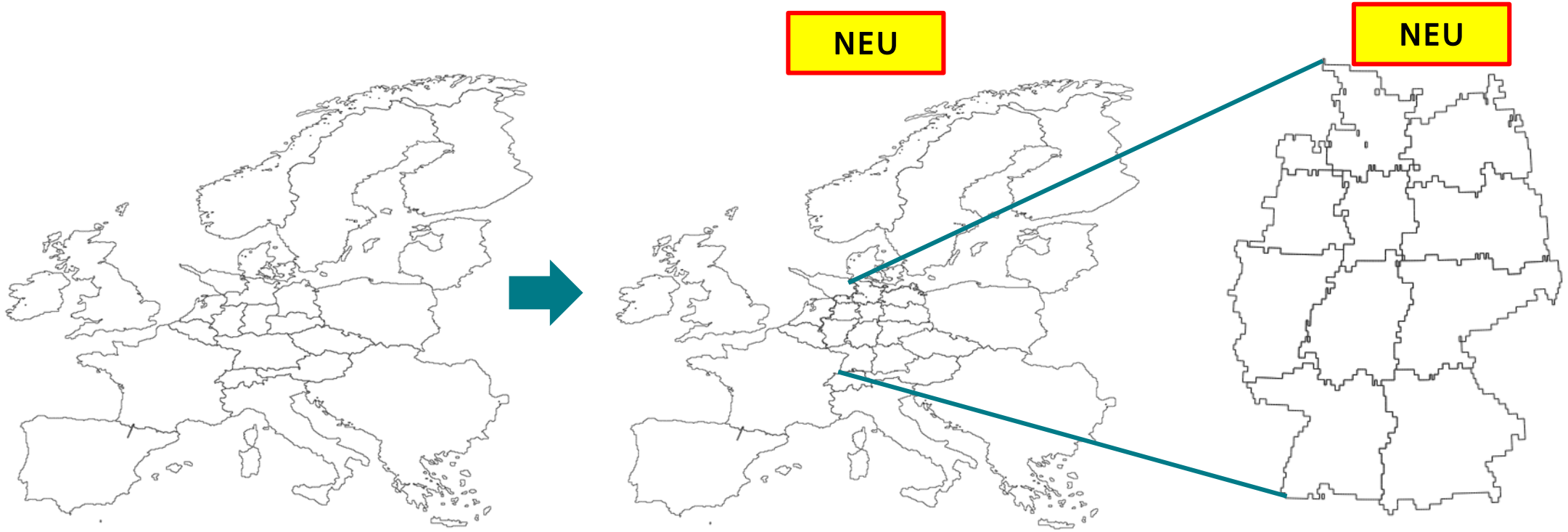
enertile

Computational analysis of
Electricity markets and infrastructures

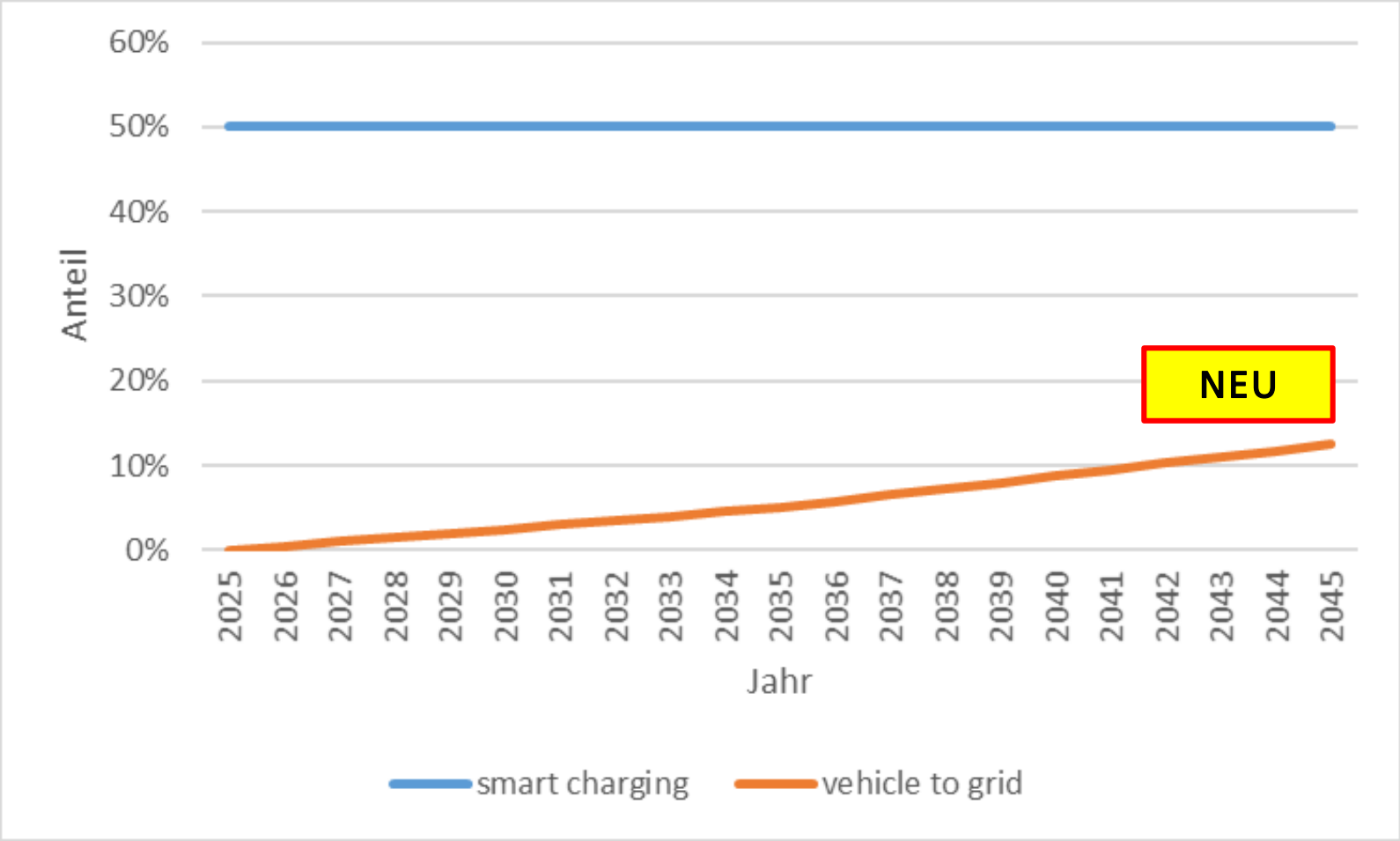
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Methodische Neuerungen - Regionenschnitt
Verbesserte Abbildung Netzengpässe in Deutschland

- Modelltechnik: Umstellung auf 11 Modellregionen für Deutschland



Methodische Neuerungen – Vehicle to grid (V2G)
Flexibilität besser erfassen



Entwicklung

- Fahrzeugbatterien sind deutlich günstiger geworden
- Nutzung von PKW als Heimspeicher und für Rückspeisung ist zunehmend in der Diskussion
- E-Fahrzeuge enthalten erhebliches Speichervolumen
- Aufgrund der oben genannten Entwicklungen wird die Nutzung von V2G wahrscheinlicher

Umsetzung

- Eine moderate Entwicklung von V2G wird in die Modellierung integriert

Spitzenkappung für die Verteilnetze:
Ein potentieller Engpass im Energiesystem

Verteilnetz kann zum Engpass für die Einspeisung der Erneuerbaren werden

Stufe 0: Keine Spitzenkappung

Verteilnetzmodellierung
Consentec mit separater Modellierung Abregelung

Mehr PV

Stufe 1: T45-Strom (alt)
Spitzenkappung statisch für Wind (3%) und PV (5%)

Verteilnetzmodellierung
Consentec mit separater Modellierung Abregelung

Mehr PV

Stufe 2: T45-Strom* (neu)
Endogene Spitzenkappung Fokus PV

Verteilnetzmodellierung
Consentec übernimmt Abregelung aus enertile

Stufe 3: Orientierungsszenarien
Endogene Spitzenkappung vertieft

Verteilnetzmodellierung
Consentec

Methodische Neuerung: Verbesserte PV-Spitzenkappung
Verteilnetzengpässe für Gesamtsystem sichtbar machen

```
DGRECanononeelGridDistributiongridlowVoltage20352035DE_06mon6540:
                                0.340243518352509 CaRenoneelsolarpvr020352025DE_06mon
                                + 0.336437463760376 CaRenoneelsolarpvr120352025DE_06mon
                                + 0.531551837921143 CaRenoneelsolarsopv020352025DE_06mon
                                + 0.413050055503845 CaRenoneelsolarsopv120352025DE_06mon
                                + 0.354106724262238 CaRenoneelsolarsopv220352025DE_06mon
                                + 0.0257222112268209 CaRenoneelwindwindonshore120352025DE_06mon
                                + 0.0374656207859516 CaRenoneelwindwindonshore220352025DE_06mon
                                + 0.340243518352509 CaRenoneelsolarpvr020352030DE_06mon
                                + 0.336437463760376 CaRenoneelsolarpvr120352030DE_06mon
                                + 0.531551837921143 CaRenoneelsolarsopv020352030DE_06mon
                                + 0.413050055503845 CaRenoneelsolarsopv120352030DE_06mon
                                + 0.354106724262238 CaRenoneelsolarsopv220352030DE_06mon
                                + 0.0257222112268209 CaRenoneelwindwindonshore120352030DE_06mon
                                + 0.0374656207859516 CaRenoneelwindwindonshore220352030DE_06mon
                                + 0.340243518352509 CaRenoneelsolarpvr020352035DE_06mon
                                + 0.336437463760376 CaRenoneelsolarpvr120352035DE_06mon
                                + 0.531551837921143 CaRenoneelsolarsopv020352035DE_06mon
                                + 0.413050055503845 CaRenoneelsolarsopv120352035DE_06mon
                                + 0.354106724262238 CaRenoneelsolarsopv220352035DE_06mon
                                + 0.025892274454236 CaRenoneelwindwindonshore120352035DE_06mon
                                + 0.0372085124254227 CaRenoneelwindwindonshore220352035DE_06mon
                                + 0.0186838414520025 CaRenoneelwindwindonshore12035999DE_06mon
                                + 0.0320282578468323 CaRenoneelwindwindonshore22035999DE_06mon
                                + 0.272884994745255 CaRenoneelsolarpvr02035999DE_06mon
                                + 0.282298266887665 CaRenoneelsolarpvr12035999DE_06mon
                                + 0.367208272218704 CaRenoneelsolarsopv02035999DE_06mon
                                + 0.302128076553345 CaRenoneelsolarsopv12035999DE_06mon
                                + 0.270850390195847 CaRenoneelsolarsopv22035999DE_06mon
                                - GeDeLFS3_T45_Strom_DE11elHeatGridELECTRICHEATER990Agg20352035DE_06monAggüh6540
                                - GeDeLFS3_T45_Strom_DE11elHeatGridheat_pumphgairAgg20352035DE_06monAggüh6540
                                - GeDeBatteryStorageelBatteryutilityScaleHighPowerpump949Agg20352035DE_06monAggüh6540
                                + GeCoBatteryStorageelBatteryutilityScaleHighPowergen949Agg20352035DE_06monAggüh6540
                                - GeRenoneelCurtailmentCurtailmentgridlevel_low20352035DE_06monüh6540
                                - GeDeHouseTerelTertiaryheat_pumpStandardHouse_air_45L20352035DE_06monglüh6540
                                - GeDeHouseIndelIndustryheat_pumpStandardHouse_air_45L20352035DE_06monglüh6540
                                - GeDeHouseReselResidentialheat_pumpStandardHouse_air_45L20352035DE_06monglüh6540
                                + GeDeemobilityelTransportPSgen20352035DE_06monüh6540
                                - GeDeemobilityelTransportPSpump20352035DE_06monglüh6540
                                - CanononeelGridDistributiongridlowVoltage20352035DE_06mon
                                <= 11866.650390625
```

NEU

Einspeisung Wind und PV

Spitzenkappung

Flexible Lasten

Kosten Netzausbau

Konstanten + Verteilnetzschwellwert

Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Methodische Neuerungen haben ihren Preis

- Optimierungsproblem deutlich vergrößert, schwer lösbar
  - 11 Regionen in DE
  - Verteilnetzgleichung
  - V2G
- Gegenmaßnahmen:
  - Methodik
    - Reduktion Potentialstufen → Leichtes Update Wind
    - Verteilnetzgleichung nur in DE
    - Verteilnetzgleichung wenn PV-Profil >10% der installierten Leistung
    - EE Profile nur in Systemgleichungen, wenn Profil > 1% der Leistung
  - Hardware
    - Beschaffung neuer Hardware
  - Software
    - Beschaffung neuer Solver

LP Größe steigt von ca. 20 GB auf 40 GB!

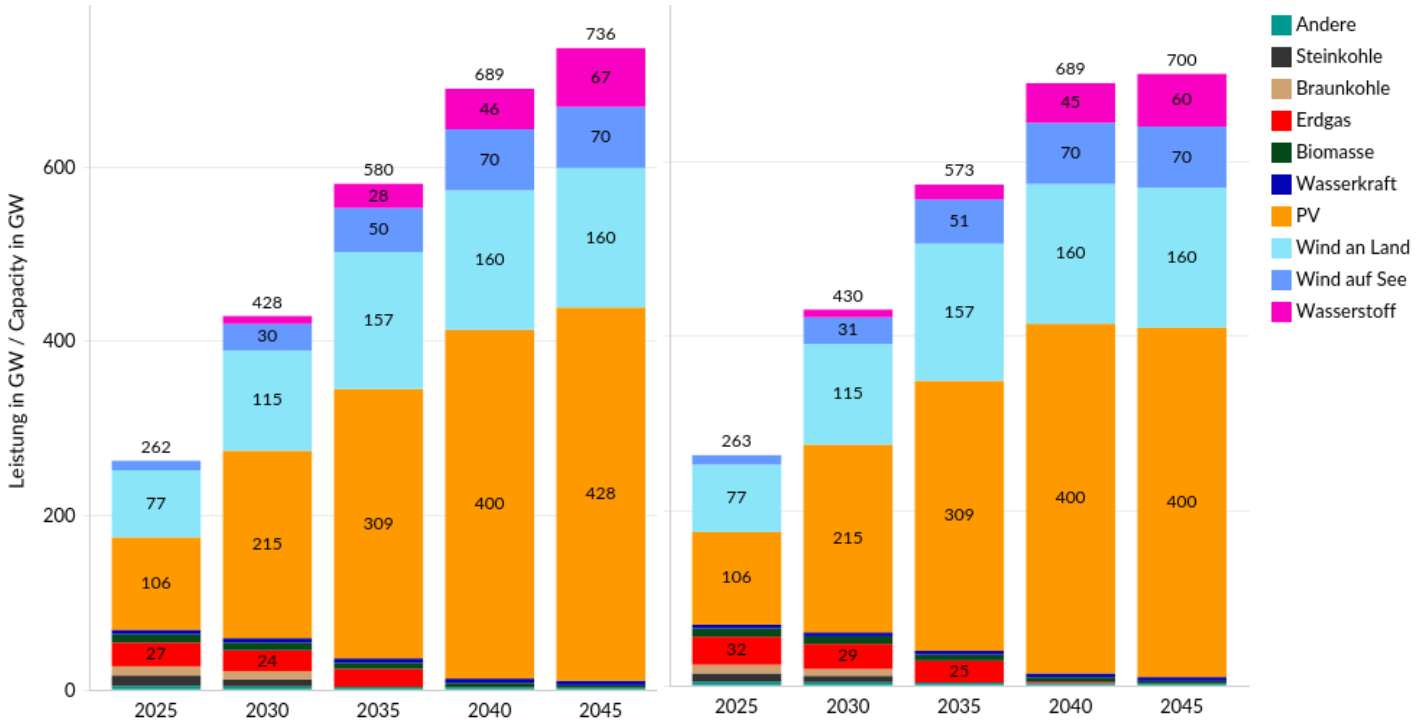
Weitere Updates

- Update Daten Bestand Erneuerbare
- Update Methodik Bestand Erneuerbare
- Windenergie
  - Geänderte Verlustdefinition
  - Update der Anlagenhöhe und des Rotordurchmessers
- Update Wasserkraft
- Beschränkung Großwärmepumpen 2025
- Minimaler Ausbau Batterien auf 12 GWh erhöht

Update

T45-Strom → T45-Strom*

Strom Leistung in Deutschland: Szenario T45-Strom*
Erkenntnisse aus Szenario-Update



T45-Strom → **T45-Strom* (Update)**

Ergebnisse

- Struktur des Energieerzeugungsparks sehr ähnlich
- Die Kapazitäten von Erdgas gehen etwas langsamer aus dem System
- PV-Ausbau 2045 etwas geringer (-28 GW)
- Etwas weniger Kapazitäten zur H2-Rückverstromung in 2045

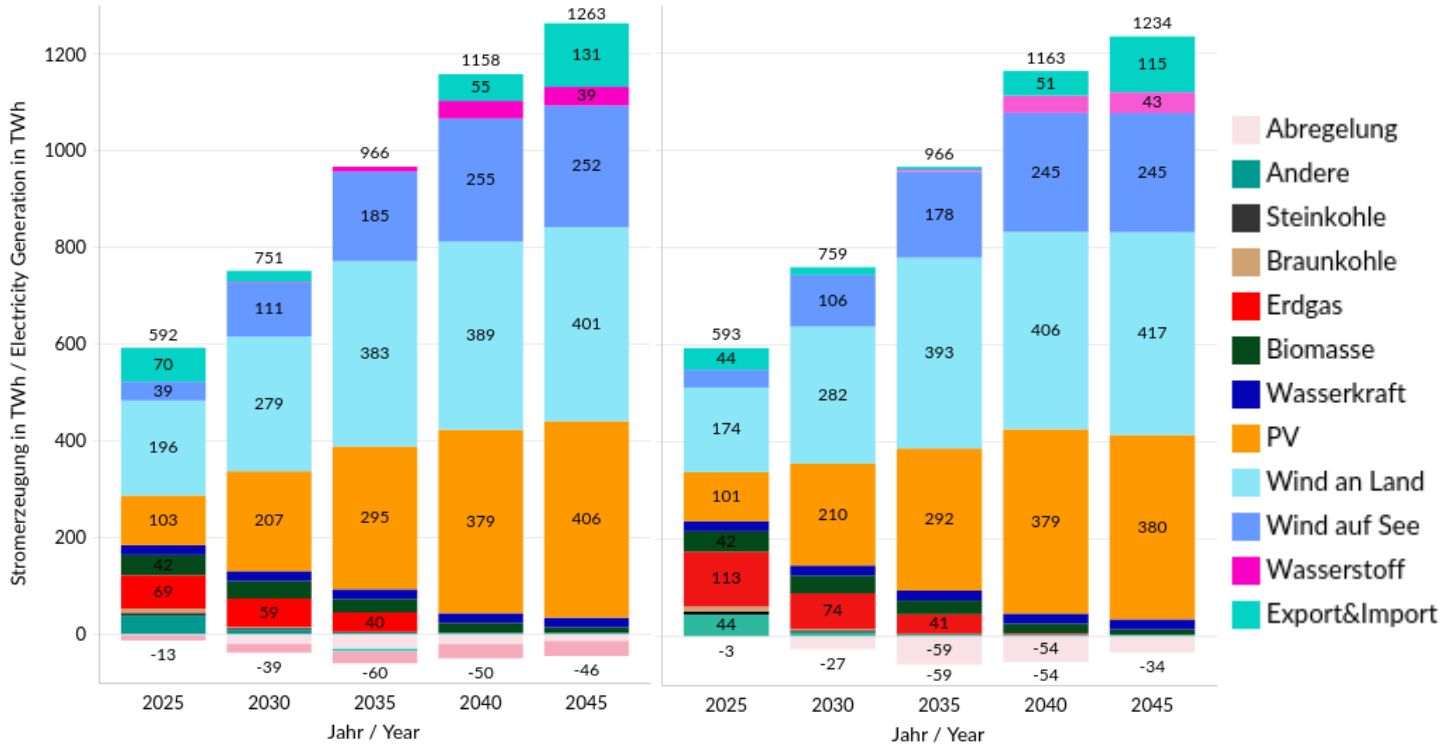
Einordung

- V2G reduziert die benötigten H2-Kraftwerke leicht
- Höhere Stromerzeugung der Windenergie und dynamische Spitzenkappung reduzieren den PV-Ausbau in DE leicht

Schlussfolgerungen

- Die generelle Struktur des deutschen Stromsystems wird durch das Update nicht verändert

Stromerzeugung in Deutschland: Szenario T45-Strom* Erkenntnisse aus Szenario-Update



T45-Strom → **T45-Strom* (Update)**

Ergebnisse

- Struktur der Energieerzeugung sehr ähnlich
- Bis 2030:
  - Mehr Erdgas, weniger Wind an Land
- 2045:
  - Weniger Importe
  - Mehr Stromerzeugung aus Windenergie

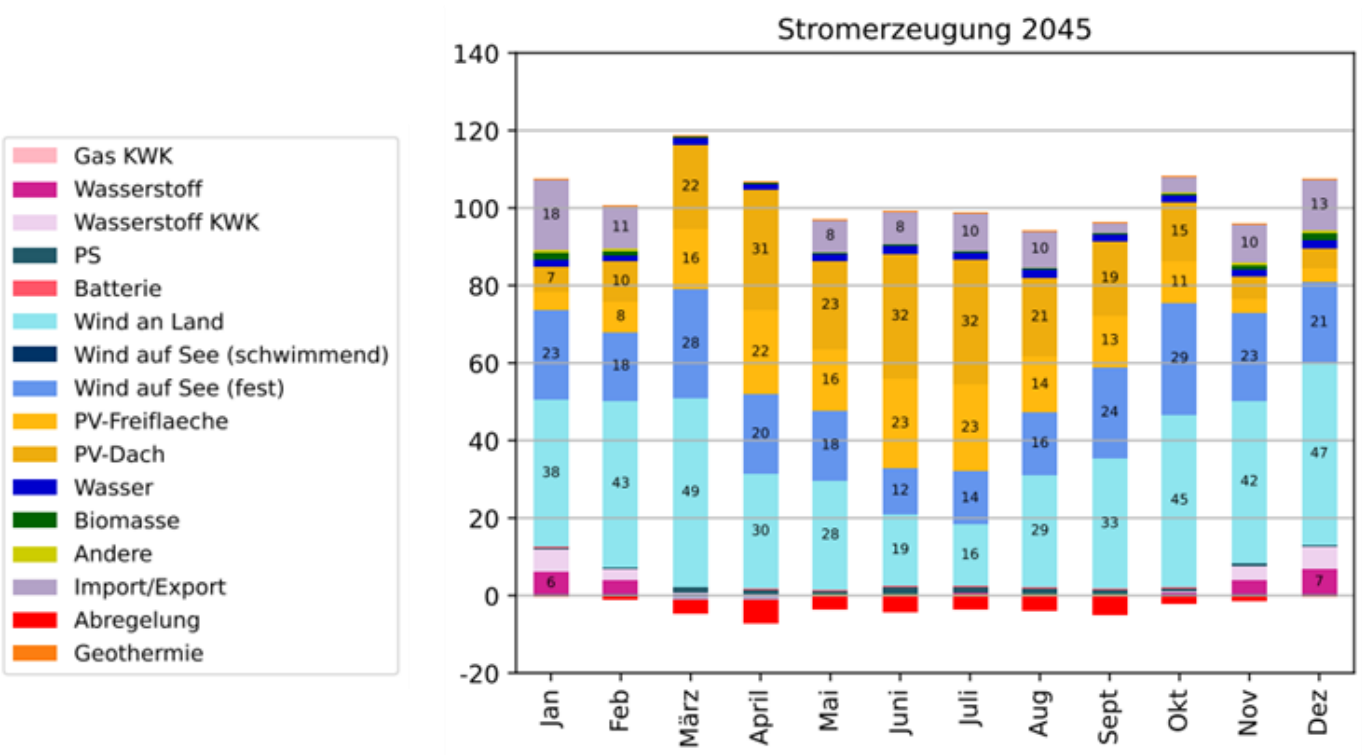
Einordung

- Achtung geänderte Darstellung im Szenario T45-Strom
- Leichte Veränderungen in der Abregelung
- Update Windpotentiale wirkt sich leicht aus

Schlussfolgerungen

- Keine großen strukturellen Änderungen durch das Update, aber verbesserte Basis für die weiteren Szenarien

Stromerzeugung in Deutschland 2045: Jahresprofil
Technologiemix unterliegt Schwankungen



Ergebnisse

- Größtes Energieangebot in den Übergangsmonaten
- Sommer wird durch PV dominiert
- Winter wird durch Windenergie dominiert

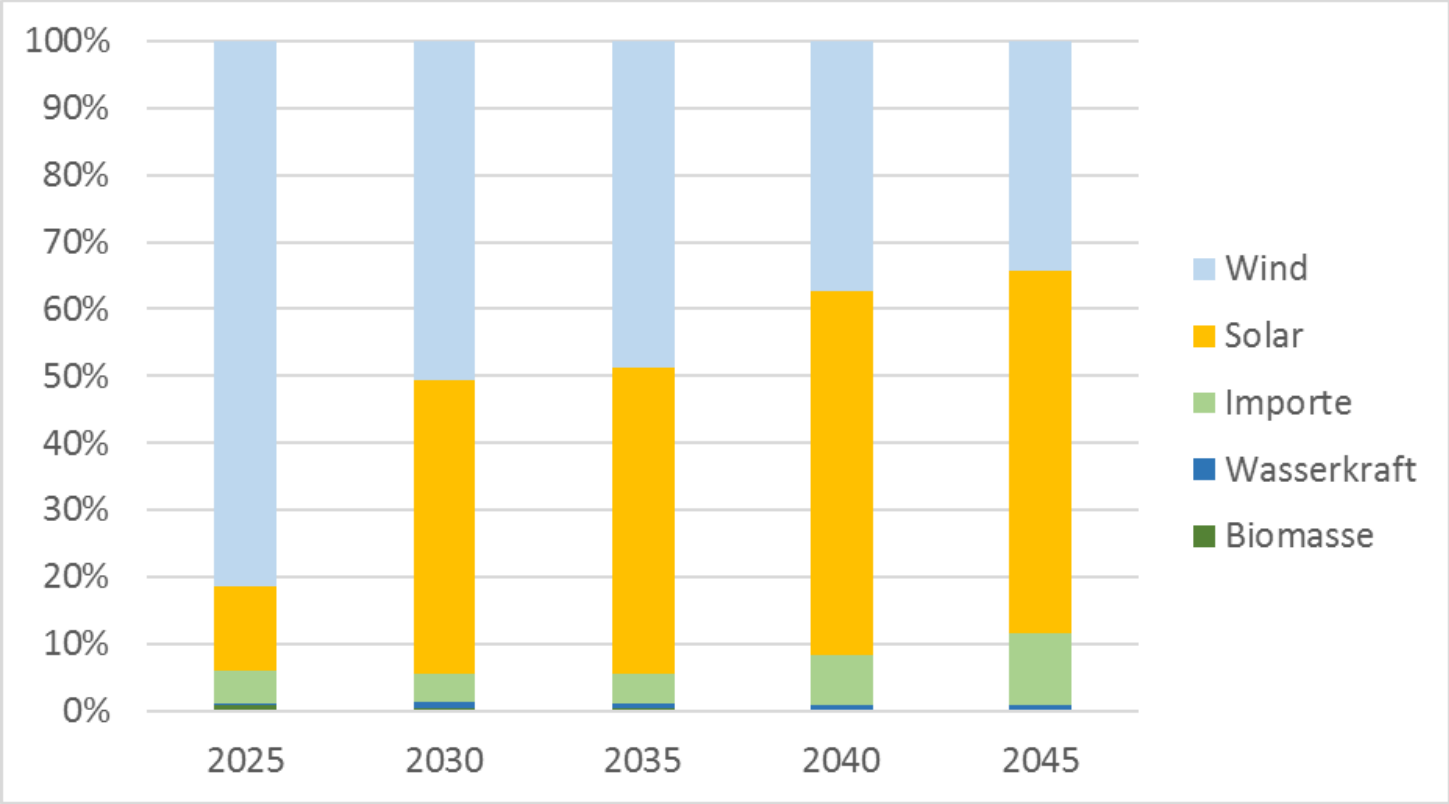
Einordung

- Einzelne Wetterjahre können hier zu den monatlichen Schwankungen führen

Schlussfolgerung

- Saisonalität beeinflusst das Energiesystem

Anteil der Stromerzeugung in DE bei aktiver Abregelung
Abregelung der PV steigt deutlich an



Ergebnisse

- Windenergie dominiert im Jahr 2025
- PV steigt stark bis 2045 an
- Auch bei Importen wird abgeregelt

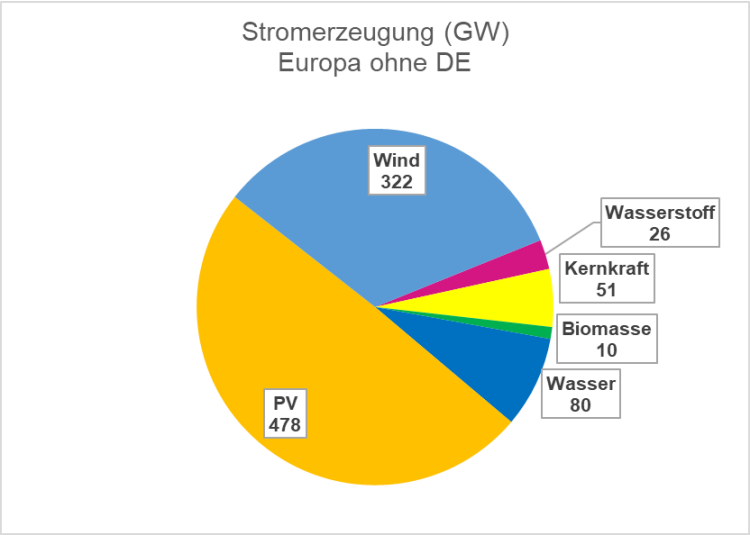
Einordnung

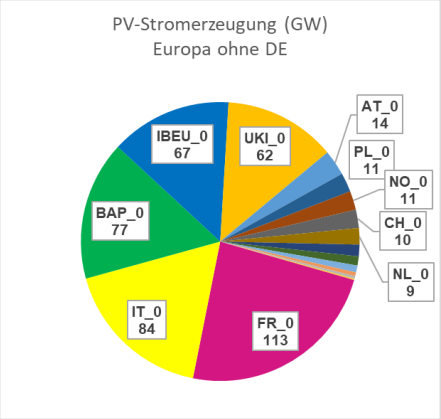
- Die Abregelung bei Importen tritt nur auf, wenn auf Ebene der Verteilnetze abgeregelt wird

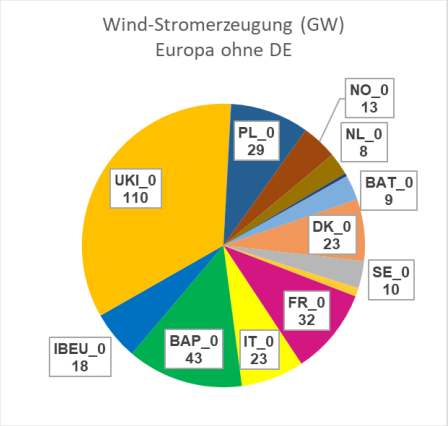
Schlussfolgerungen

- Betrachtung der Verteilnetze ist wichtig, da sonst auf Systemebene mit zu viel Strom gerechnet wird

Stunde mit höchstem Netto-Import DE
05.01.2045 11:00 (Stunde 131)







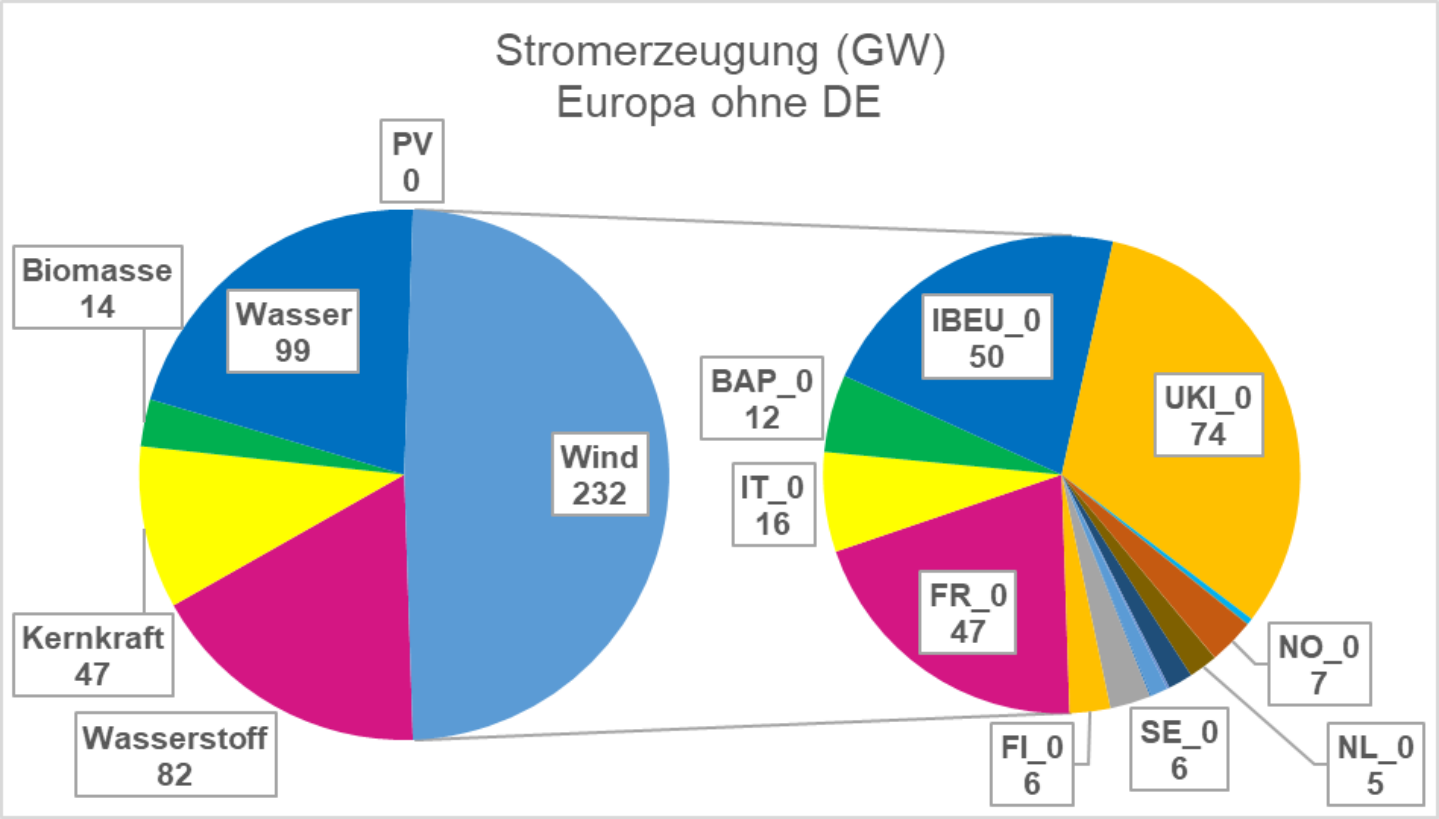
Ergebnisse

- In der Stunde mit dem höchsten Netto-Import für Deutschland in 2045 erfolgt die Stromerzeugung im restlichen Europa im Wesentlichen durch Wind und PV
- Wasserkraft, Kernkraft und Wasserstoff-Rückverstromung tragen ebenfalls zur Stromerzeugung bei

Schlussfolgerung

- Zur Stunde des höchsten Netto-Imports wird Deutschland vor allem durch Strom aus Erneuerbaren Energien im europäischen Ausland beliefert

Stunde mit maximaler H2-Rückverstromung DE
08.02.2045 04:00 (Stunde 940)



Ergebnisse

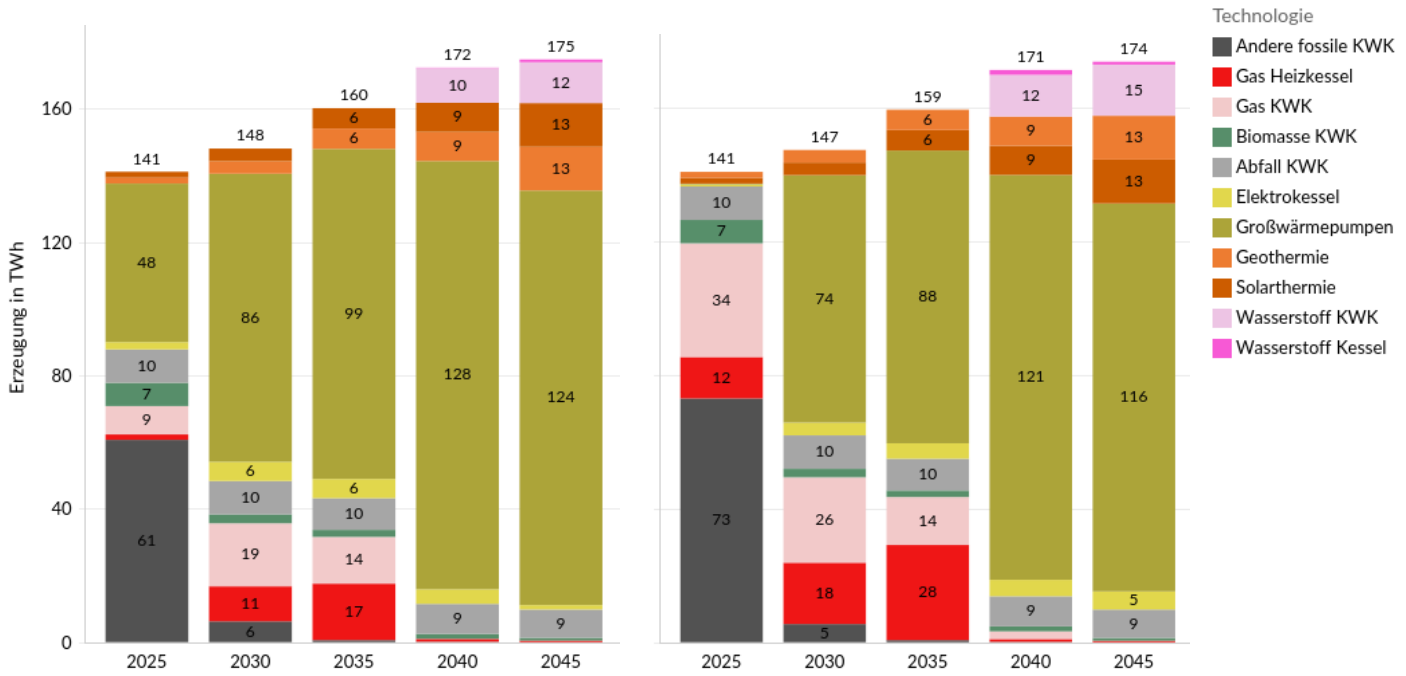
- In einer Stunde mit maximaler H2-Rückverstromung in Deutschland in 2045 erfolgt die Stromerzeugung im restlichen Europa im Wesentlichen durch Wind
- Wasserstoff-Rückverstromung, Wasserkraft, Kernkraft und tragen ebenfalls zur Stromerzeugung bei
- Wind-Strom wird zu diesem Zeitpunkt v.a. auf den Britischen Inseln, der Iberischen Halbinsel und Frankreich erzeugt

Schlussfolgerung

- Zu einer nächtlichen Stunde mit maximaler H2-Rückverstromung wird Deutschland vor allem durch Strom aus Wind- und Wasserkraft im europäischen Ausland beliefert

Wärmenetze in Deutschland: Szenario T45-Strom*
Erkenntnisse aus Szenario-Update

T45-Strom → **T45-Strom* (Update)**



Ergebnisse

- 2025: Mehr Erdgas, weniger Großwärmepumpen
- Bis 2035: Mehr Erdgas
- Bis 2045: Sehr ähnliches System

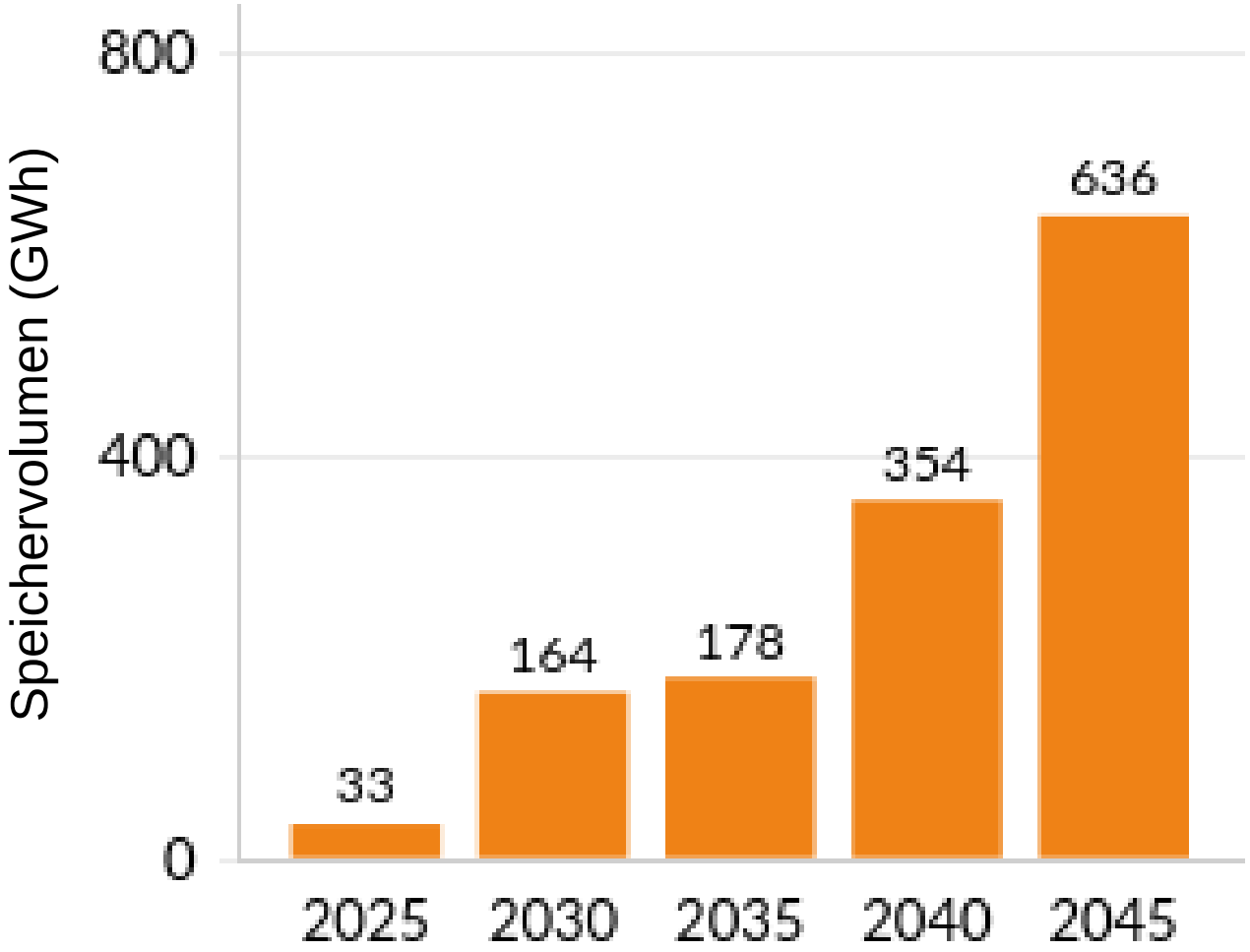
Einordnung

- Zubau für Großwärmepumpen in 2025 auf 125 MW_{el} beschränkt
- Sondereffekt Erdgas Heizkessel 2035

Schlussfolgerungen

- Großwärmepumpen bleiben dominante Technologie
- Der etwas langsamere Aufbau der Großwärmepumpen verzögert die Energiewende im Wärmesektor

Wärmespeicher in Deutschland (Wärmenetze)
Volumen und Füllung



Ergebnisse

- Starker Ausbau der Wärmespeicher in Wärmenetzen
- Volumen erreicht mehr als 600 GWh in 2045

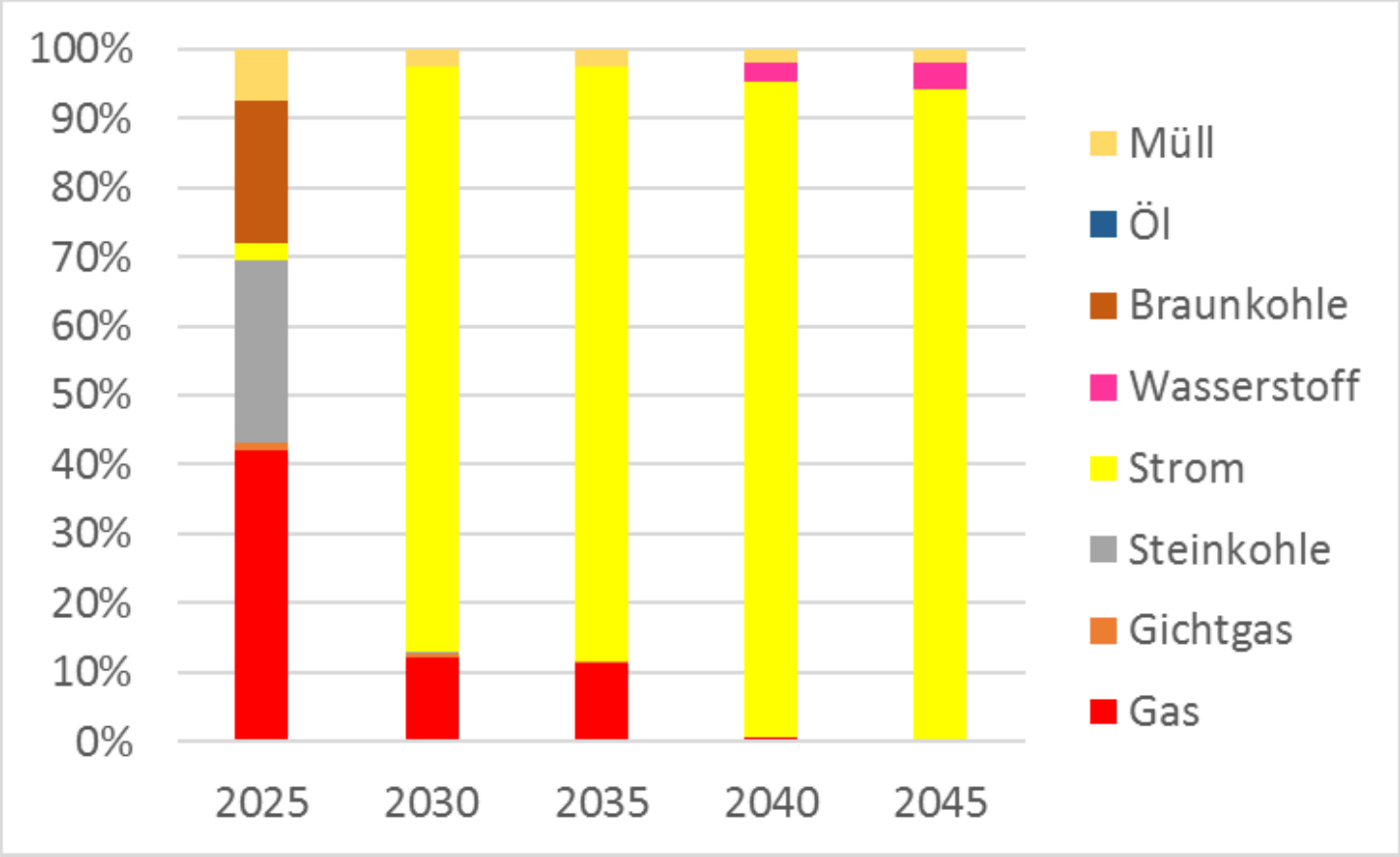
Einordnung

- Speichervolumen 2045 ist mehr als zehnmal so groß wie das energetische Volumen heutiger Pumpspeicher
- Annahme: Druckloser Wasserspeicher, mit spezifischen Investitionen von ca. 22 €/kWh sehr günstig
- Saisonale Speicher konnten hier nicht betrachtet werden

Schlussfolgerungen

- Wärmespeicher sind eine wichtige Technologie zur Flexibilisierung des Energiesystems

Wärmespeicher in Deutschland (Wärmenetze)
Anteil der Wärmeerzeugung während Speicher laden



Ergebnisse

- In den ersten Jahren werden Wärmespeicher im Wesentlichen zur Flexibilisierung der fossilen KWK eingesetzt
- Ab 2030 dominiert die Wärmeerzeugung aus Strom, insbesondere der Wärmepumpen
- Ab 2040 profitiert auch die Wasserstoff-KWK in kleinem Umfang

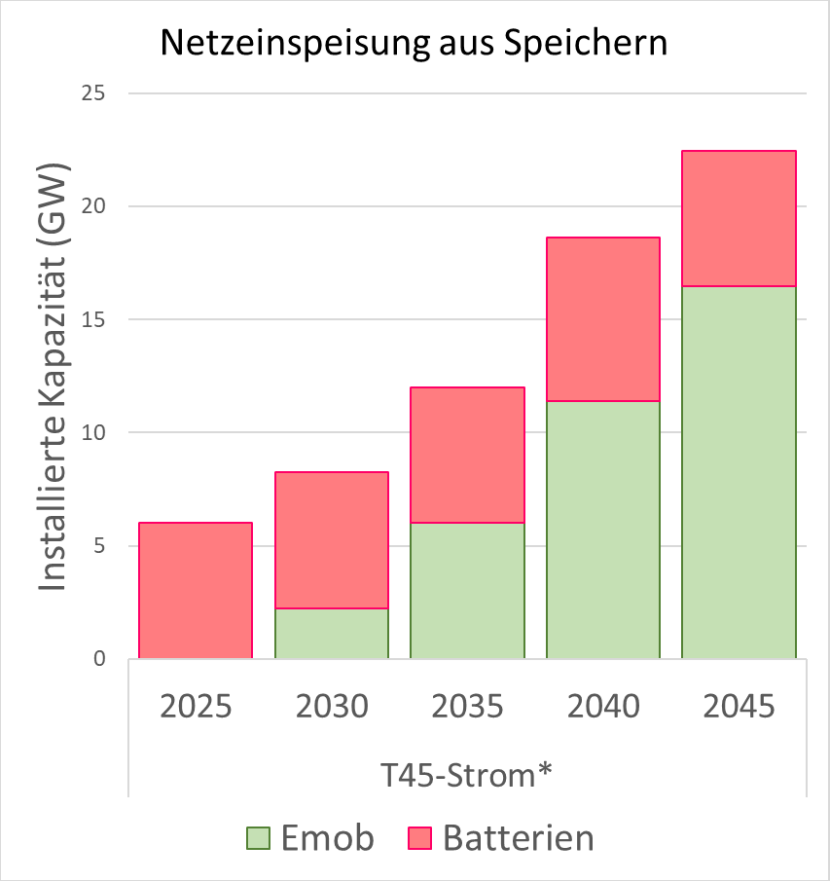
Einordnung

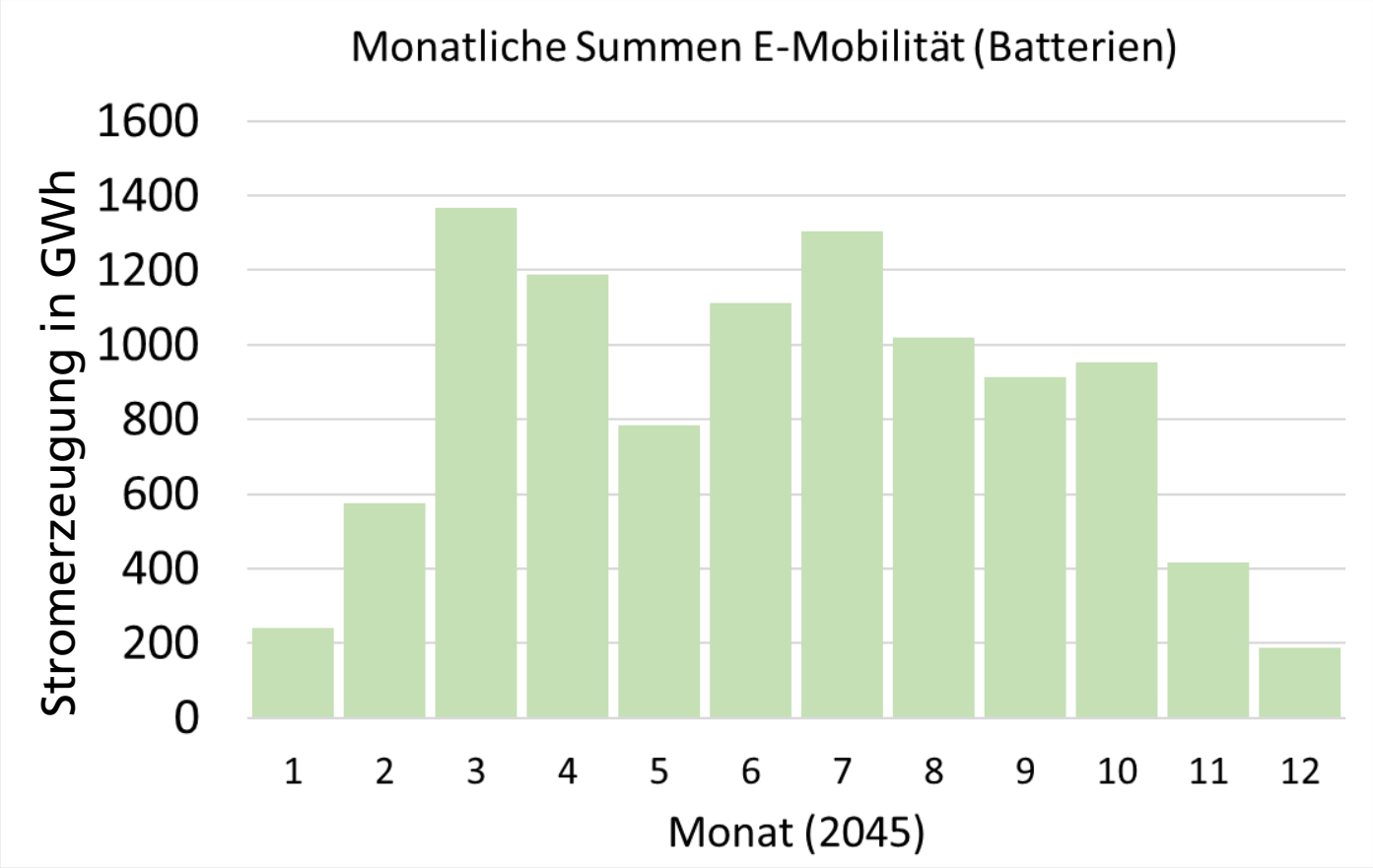
- Diese Analyse ist ein Näherungsverfahren, weil keine Grenzbetrachtung stattfindet
- Saisonale Speicher könnten den Stromanteil noch erhöhen

Schlussfolgerung

- Mittelfristig sind Wärmespeicher wichtig, um Erneuerbare Energien in Wärmenetze zu integrieren

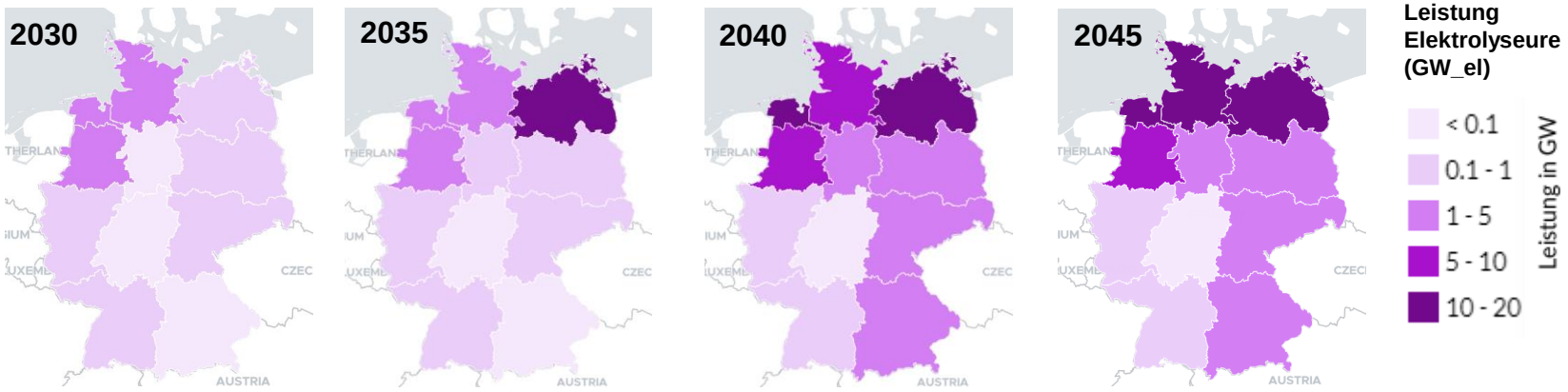
Vehicle-to-grid im Szenario T45-Strom*
Erhebliche Leistungsbereitstellung mit hoher Saisonalität



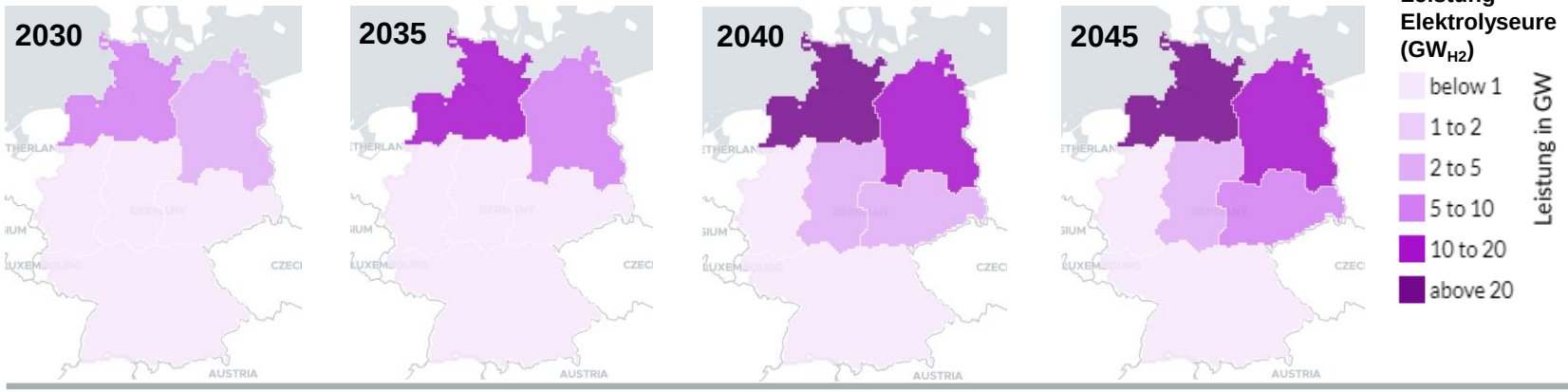


Elektrolyseure in Deutschland: Szenario T45-Strom*
Erkenntnisse aus Szenario-Update

T45-Strom* (Update) | **Neue Modellregionen ermöglichen detailliertere Analyse**



T45-Strom



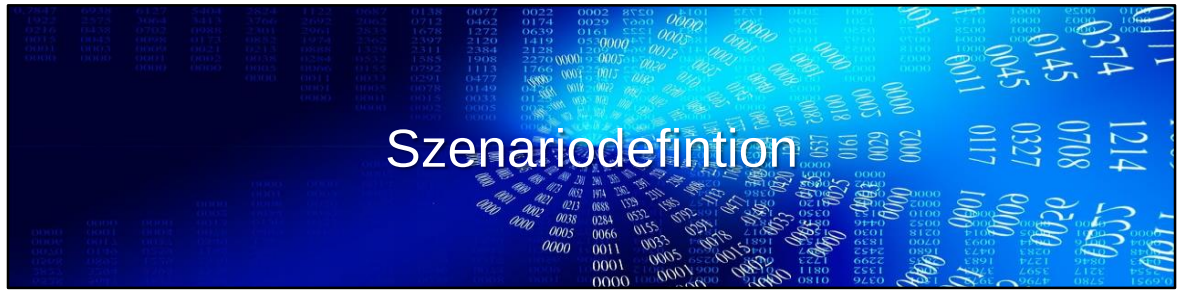
Ergebnisse

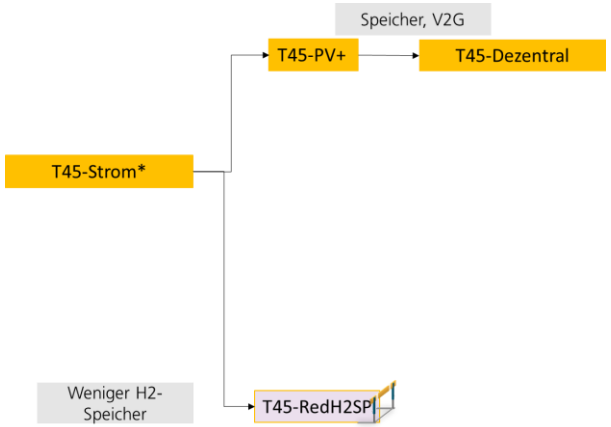
- Elektrolyse entsteht nach wie vor vorrangig im Norden und Osten
- Verbesserte Auflösung im Süden sichtbar
- Kaum Elektrolyse im Südwesten (hier sind Verbrauchszentren)

Einordnung

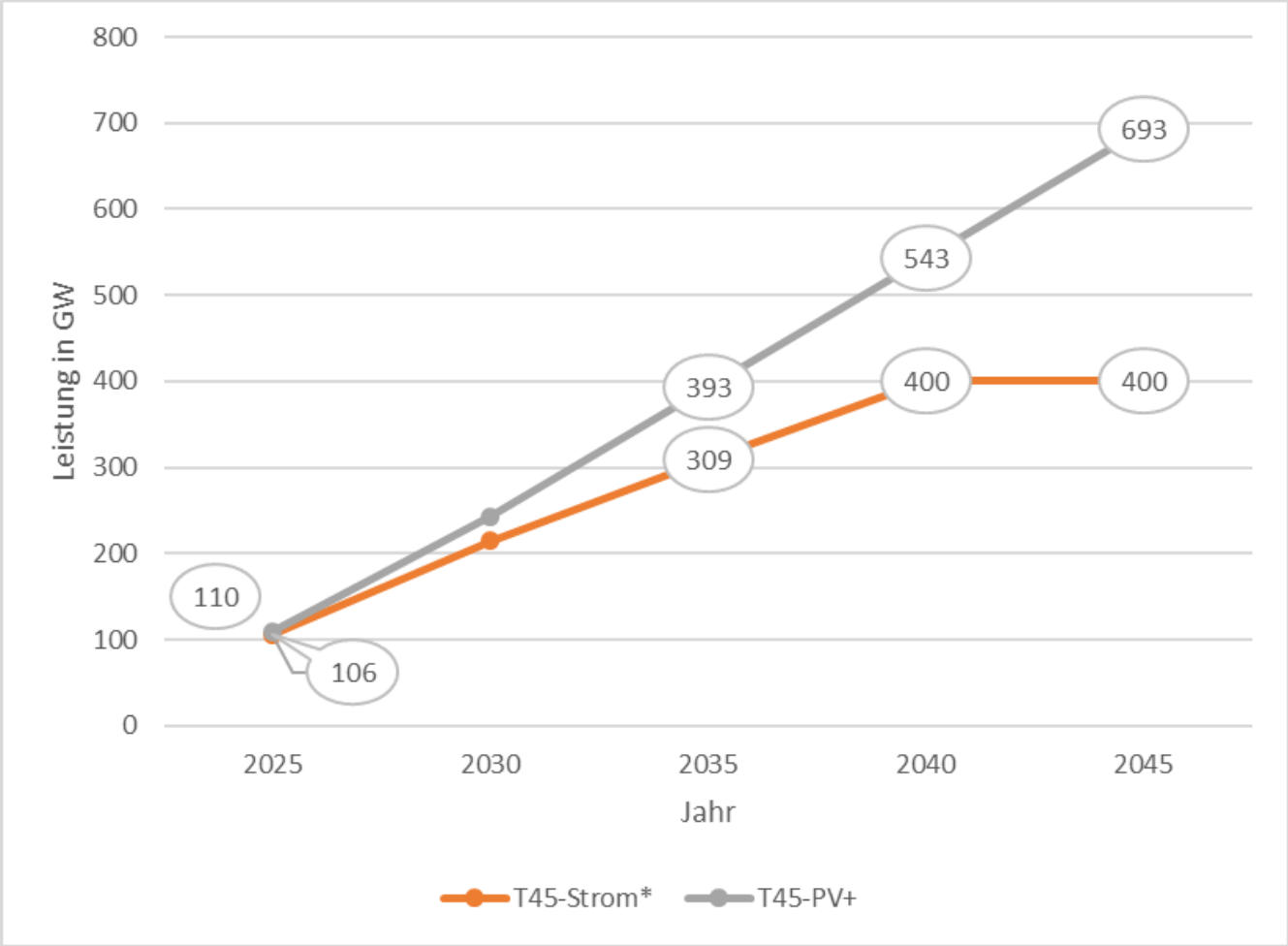
- Allokation der Elektrolyseure im Norden ist robust, aufgrund des EE-Angebotes und der Nähe zu H2-Speichern

Dezentrale Szenarien





Definition Szenario T45-PV+
Entwicklung der installierten Leistung PV in Deutschland



Ziel

- Analyse eines sehr starken PV-Ausbaus

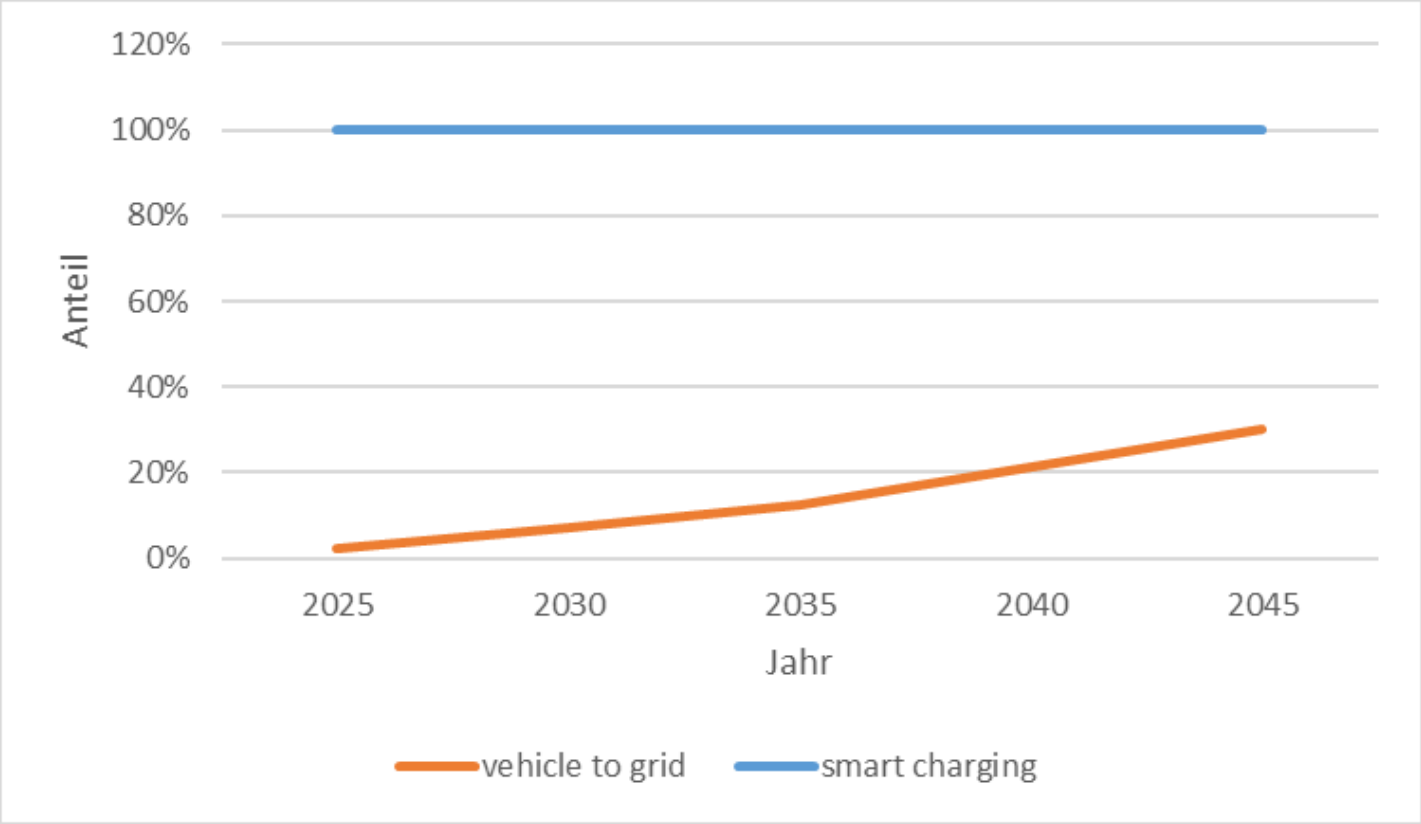
Umsetzung

- Anstieg bis 693 GW in DE bis 2045
- Ausbau in Europa analog
- Reduktion Windenergie an Land in DE auf 80% des T45-Strom*
- Keine Änderung der Windenergie auf See

Einordnung

- Ableitung aus PV Zubau:
  - Anstieg bis auf 30 GW pro Jahr bis 2030
  - Ab 2030 30 GW Zubau pro Jahr
- Energetisch ist durch die bestehenden Importe von Strom und H2 in Szenario T45-Strom* und die Reduktion der Windenergie in diesem Szenario genügend „Platz“ im System

Definition Szenario T45-Dezentral
Fahrende Speicher: Erhöhte Flexibilität der E-Fahrzeuge



Ziel

- Abbildung einer starken Steigerung der lokalen Flexibilität

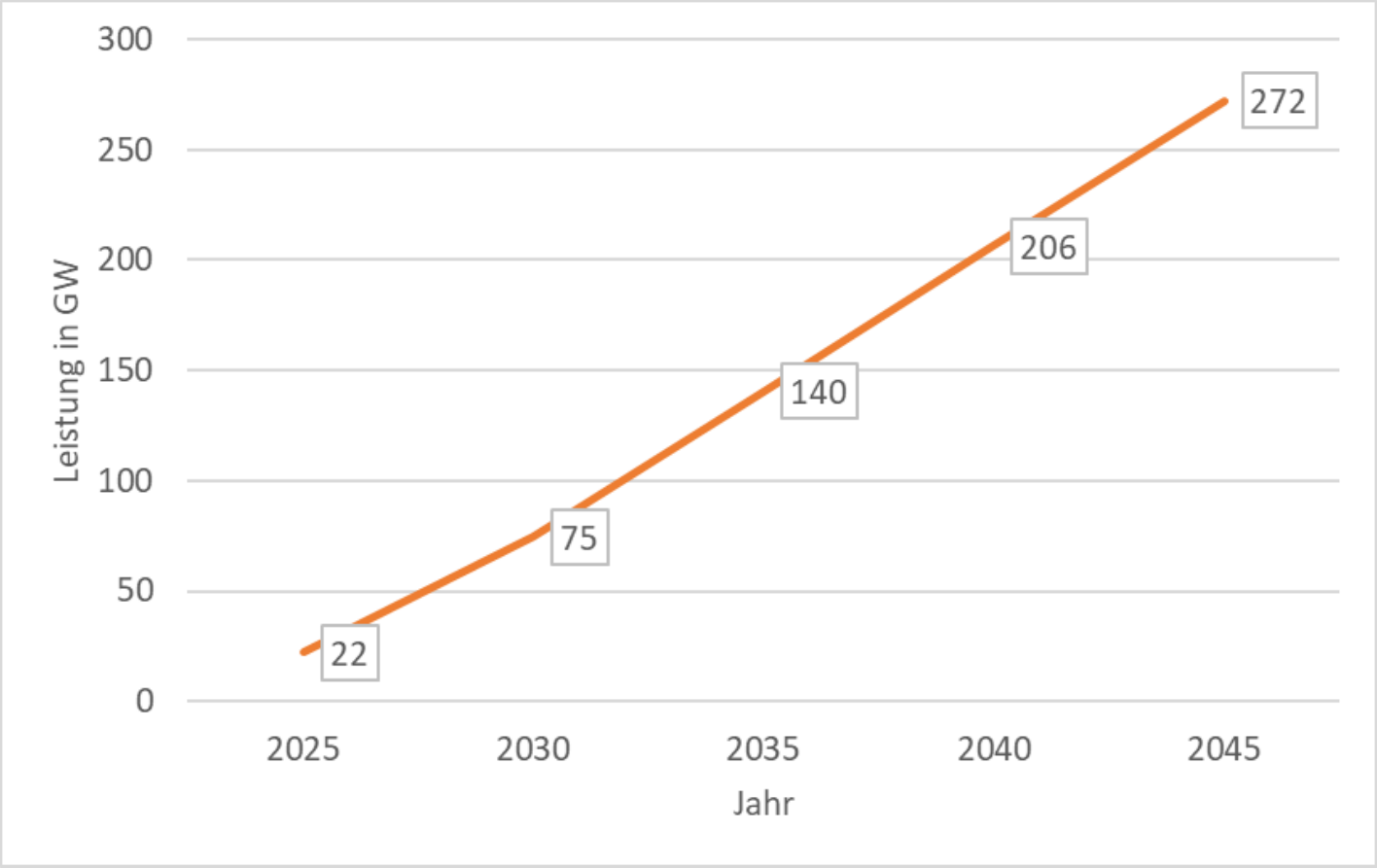
Umsetzung

- Anteil Smart Charging 100%
- Anteil von vehicle-to-grid steigt bis auf 30% bis 2045
- Die Mehrkosten in der Wallbox für vehicle-to-grid werden nicht berücksichtigt

Einordnung

- Sehr optimistische Annahme für die lokale Flexibilität

Definition Szenario T45-Dezentral
Erhöhte Flexibilität durch stationäre Batterien



Ziel

- Abbildung einer starken Steigerung der lokalen Flexibilität

Umsetzung

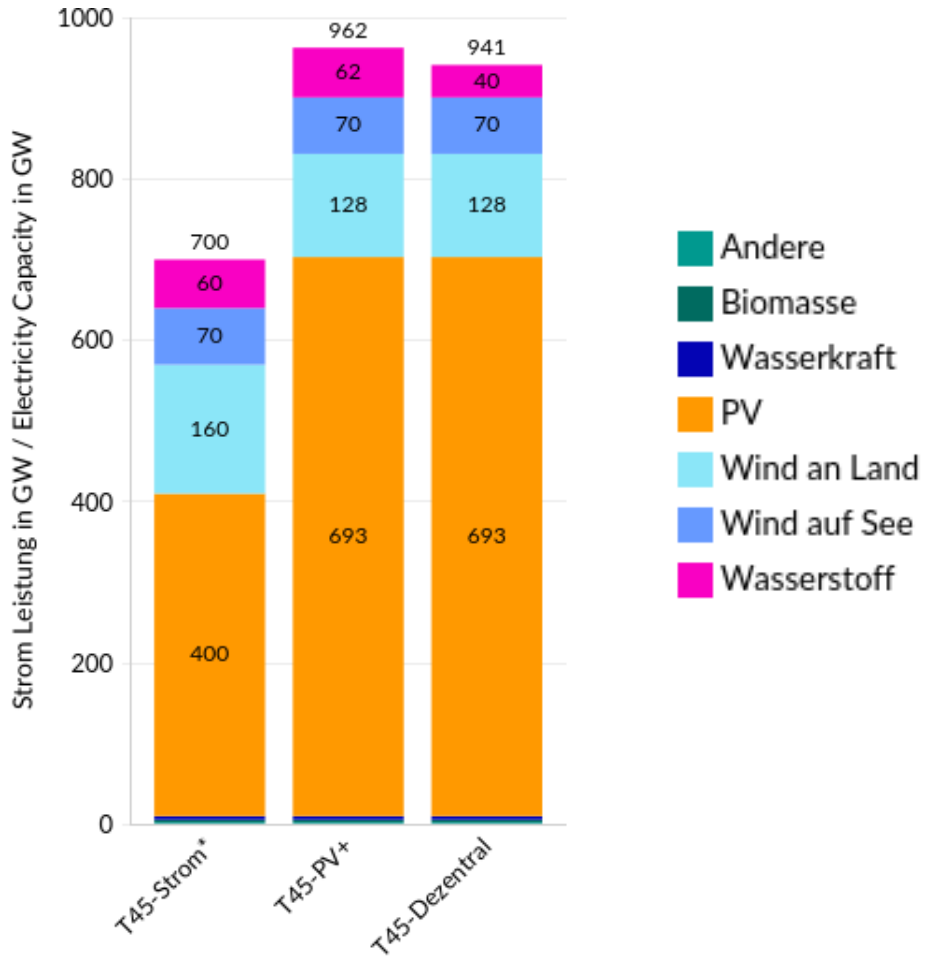
- Anstieg Batteriespeicher auf 272 GW in 2045
- Speichervolumen 544 GWh
- Entwicklung in Europa analog

Einordnung

- Ab 2032 70% der Dachanlagen mit Speicher
- Ab 2025 5% der Freiflächenanlagen mit Speicher
- Zubau in Deutschland ab 2032 mit 13,2 GW pro Jahr
- Speichervolumen ca. 10 mal so groß wie heutige Pumpspeicher in DE

Dezentrale Szenarien

Ergebnisse Strom Deutschland
Szenarienvergleich Leistung 2045



Ergebnisse

- Mehr H_2-Rückverstromungsleistung im Szenario PV+ (2 GW)
- Weniger H_2-Rückverstromung im Szenario T45-Dezentral (-20 GW)

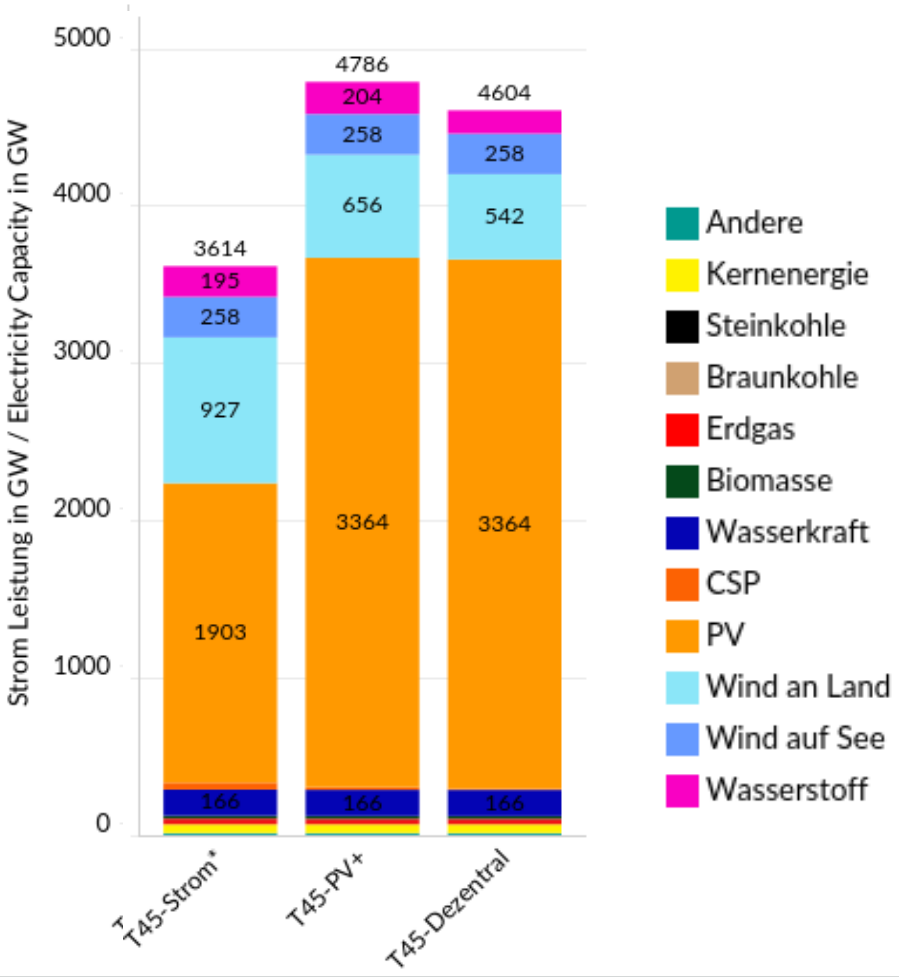
Einordnung

- Ausbau PV ist durch die Szenariovorgabe determiniert (Minimumbedingung)
- Ausbau Wind folgt der gegenüber T45-Strom* geänderten Minimalbedingung
- H_2-Rückverstromung ist Modellergebnis

Schlussfolgerung

- Bedarf an H_2-Kraftwerken kann durch viel vehicle-to-grid und Batteriespeicher in begrenztem Umfang reduziert werden.

Ergebnisse Strom Europa inkl. Deutschland
Szenarienvergleich Leistung 2045



Ergebnisse

- Anlagen-Zubau von PV in den Szenariovarianten T45-PV+ und T45-Dezentral analog zu DE (Vorgabe)
- Windausbau sinkt im Szenario PV+ und Dezentral
- Keine Veränderung der Windenergie auf See über Minimalrestriktion hinaus
- Leichtes Absinken der CSP
  - (T45-Strom*: 44 GW; T45-PV+: 16,7 GW; T45-Dez: 7,3 GW)

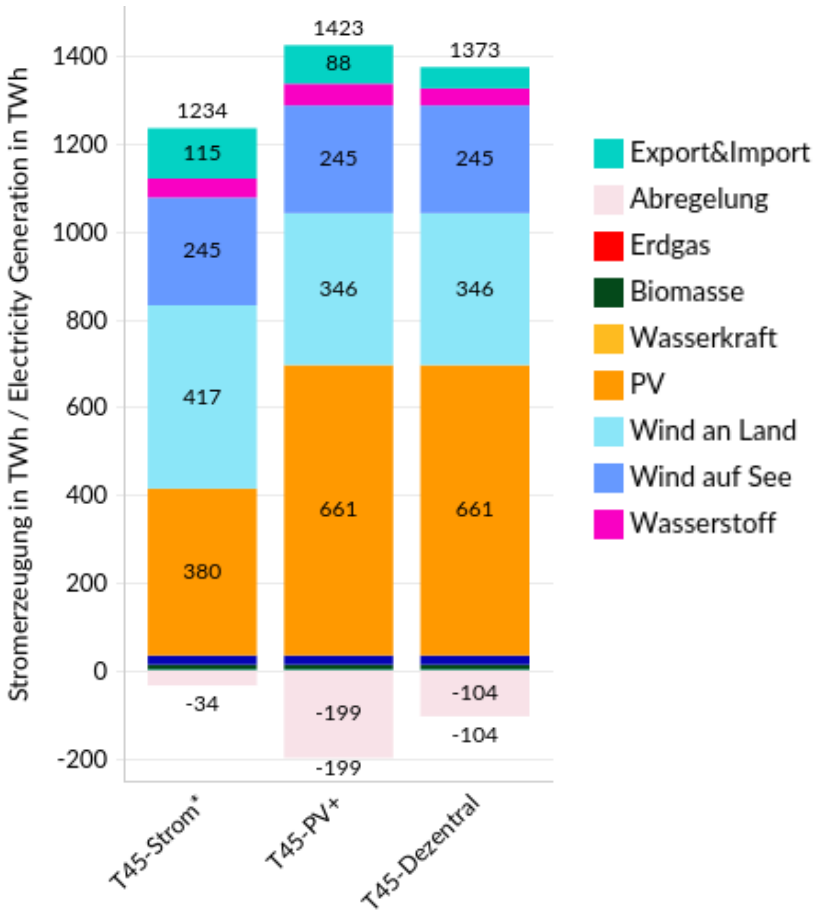
Einordnung

- Trotz starkem PV Ausbau wird Windenergie an Land deutlich über das vorgegebene Maß (ca. 200 GW) hinaus ausgebaut
- Biomasse und Nuklearenergie verbleiben im Park gemäß den nationalen Strategien

Schlussfolgerung

- Energetisch ist in Europa genügend „Platz“ für die PV
- Windenergie ist wichtig für das Energiesystem

Stromerzeugung Deutschland 2045: Szenarienvergleich
Hohe Abregelung durch sehr hohen PV Ausbau



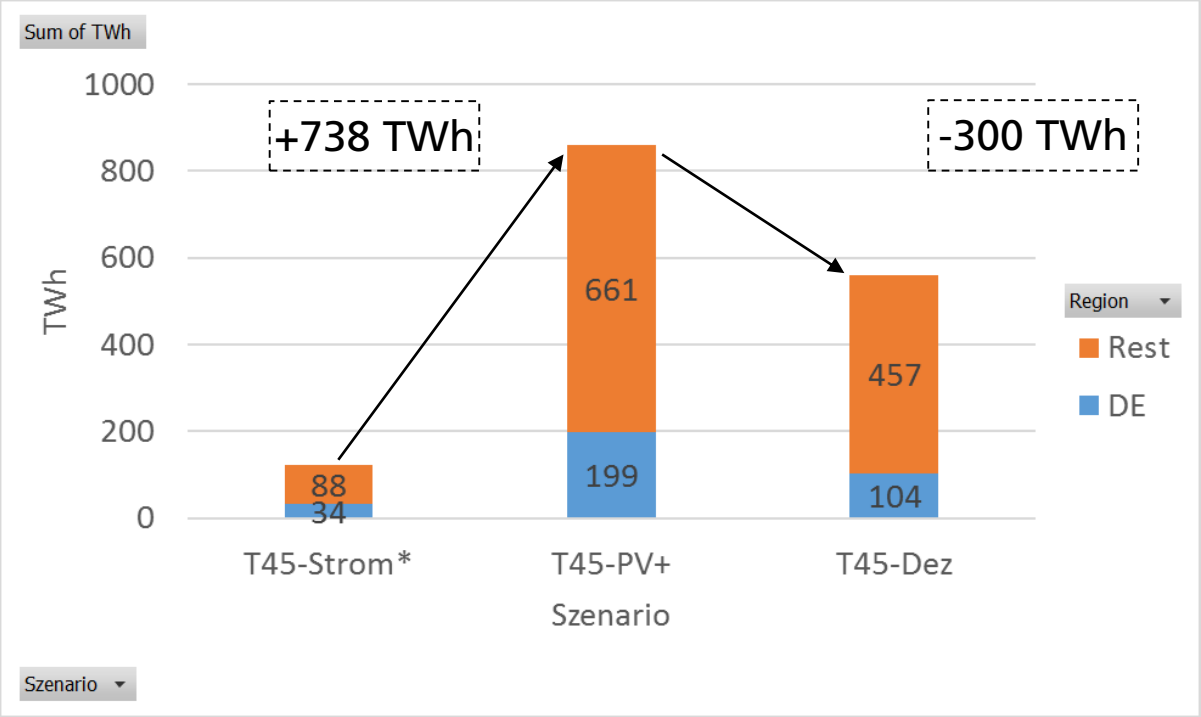
Ergebnisse

- Schnellerer und höherer Ausbau von PV im Szenario T45-PV+ und Dezentral (+281 TWh im Vergleich zu T45-Strom*)
- Geringerer Ausbau von Wind an Land (Vorgabe)
- T45-PV+: Deutlich gestiegene Abregelung, vergleichsweise geringer Rückgang der Stromimporte
- T45-Dezentral: Weniger Abregelung, weniger Stromimporte
- Wasserstoffrückverstromung stabilisiert das Stromsystem in allen Szenarien in ähnlichem Umfang

Einordnung

- Deutschland importiert (netto) im Jahr 2045 nennenswert Strom in allen Szenarien
- Ein derart hoher Ausbau der PV führt zu hoher Abregelung
- Zusätzliche Flexibilität im Energiesystem nutzt EE besser und senkt Importe
- Trotz hohem Batteriespeicherausbau bleibt die Abregelung groß

Dezentrale Szenarien: Abregelung 2045
Starker Anstieg der Abregelung in Deutschland und Europa



Ergebnisse

- Starker Anstieg der Abregelung im Szenario T45-PV+ gegenüber T45-Strom*
- Dezentrale Flexibilität reduziert die Abregelung in Europa um ca. 300 TWh

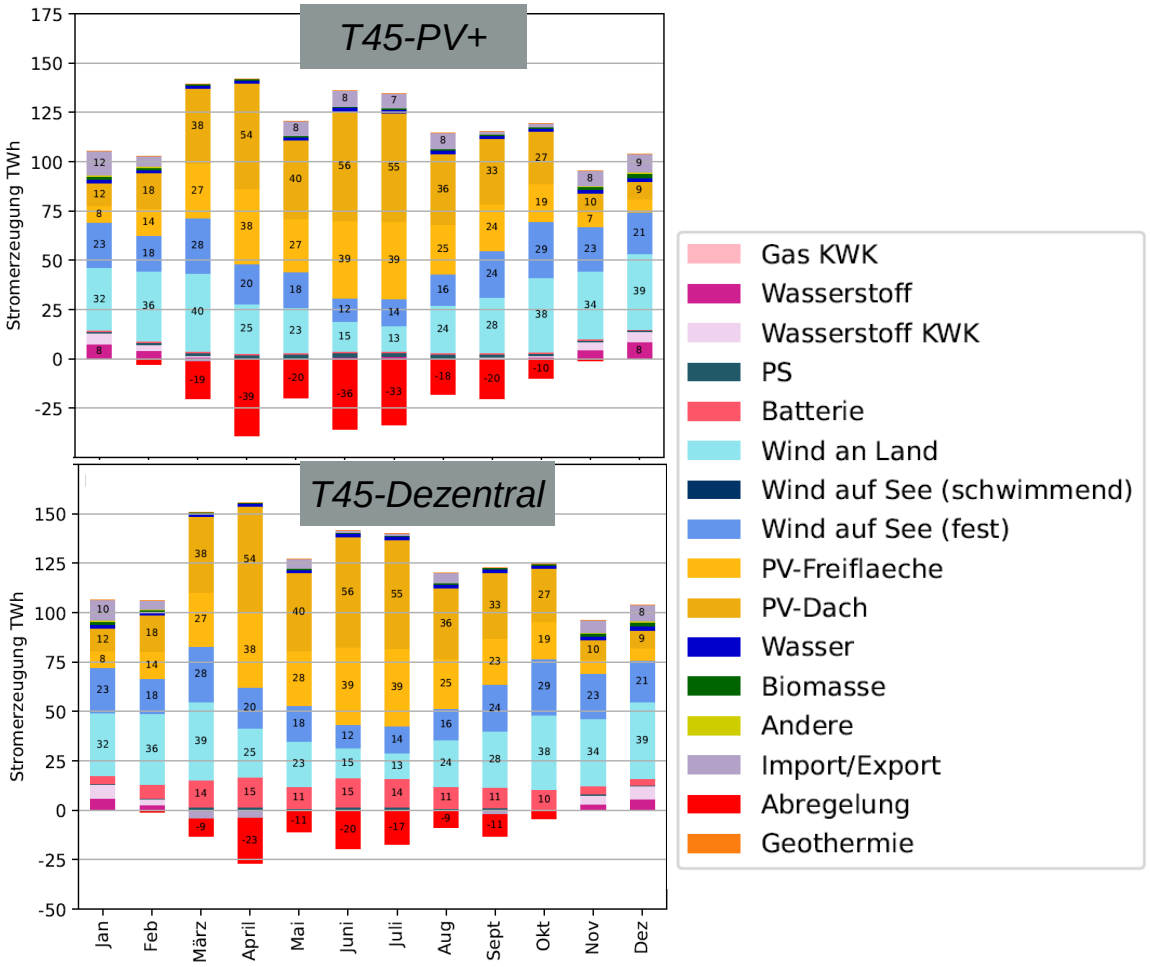
Einordnung

- Anstieg PV Stromerzeugung
  - Gesamt: 1556 TWh
  - DE: 280 TWh
- Anteil der Abregelung (vereinfachte Betrachtung)
  - Gesamt: 47% (PV+) /28% (Dez)
  - DE: 59% (PV+) / 25% (Dez)

Schlussfolgerung

- Sehr hohe Mengen PV sind schwer zu integrieren

Ergebnisse Strom Deutschland
Szenarienvergleich PV+ und Dezentral im Jahr 2045



Ergebnisse

- PV und Windkraft (nahezu) identisch in beiden Szenarien
- Reduzierte Abregelung im Szenario T45-Dezentral
- Etwas weniger Elektrolyse-Kapazität in T45-Dezentral
- Allerdings wird mehr Strom für Elektrolyse verwendet in T45-Dezentral
  - Volllaststunden für Elektrolyse in T45-Dezentral knapp 4000, anstatt 3000 bei T45-Strom* und T45-PV+

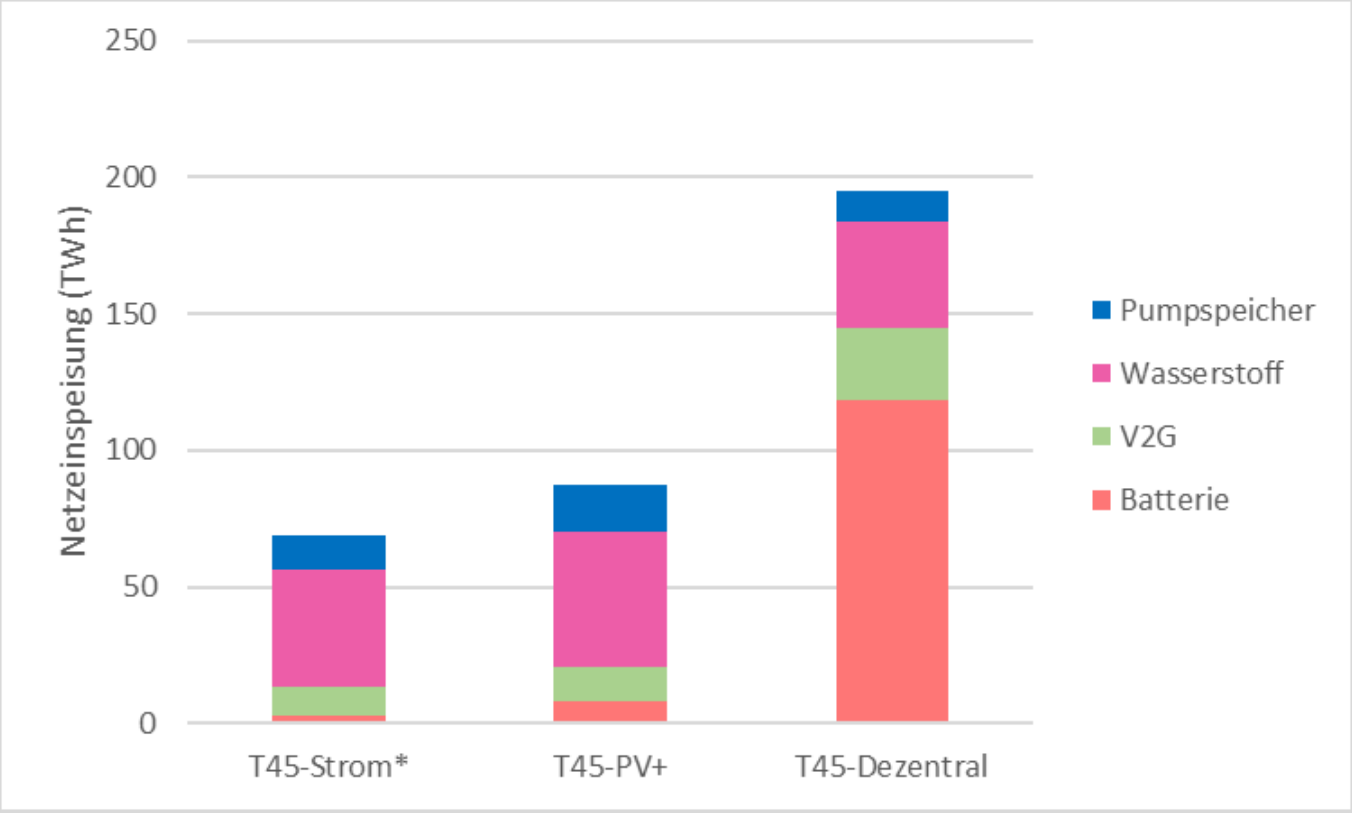
Einordnung

- Abregelung wird durch die vorgegeben stationären und mobilen Batteriespeicher deutlich reduziert
- Abregelung bleibt hoch
- In sehr dezentralen Systemen gehen Stromimporte leicht zurück, aber sie entfallen nicht gänzlich

Schlussfolgerung

- Die Versorgungsaufgabe in dezentralen Welten wird anders sichergestellt, aber Windenergie ist schwer zu ersetzen

Flexible Stromerzeugung
Dezentrale Szenarien, Deutschland 2045



Ergebnisse

- T45-PV+: Erhöhte Netzeinspeisung aus V2G und Pumpspeichern
- T45-Dezentral: Weniger Einsatz von Wasserstoff, stattdessen stark erhöhte Batterieeinspeisung und V2G nach Szenariovorgabe

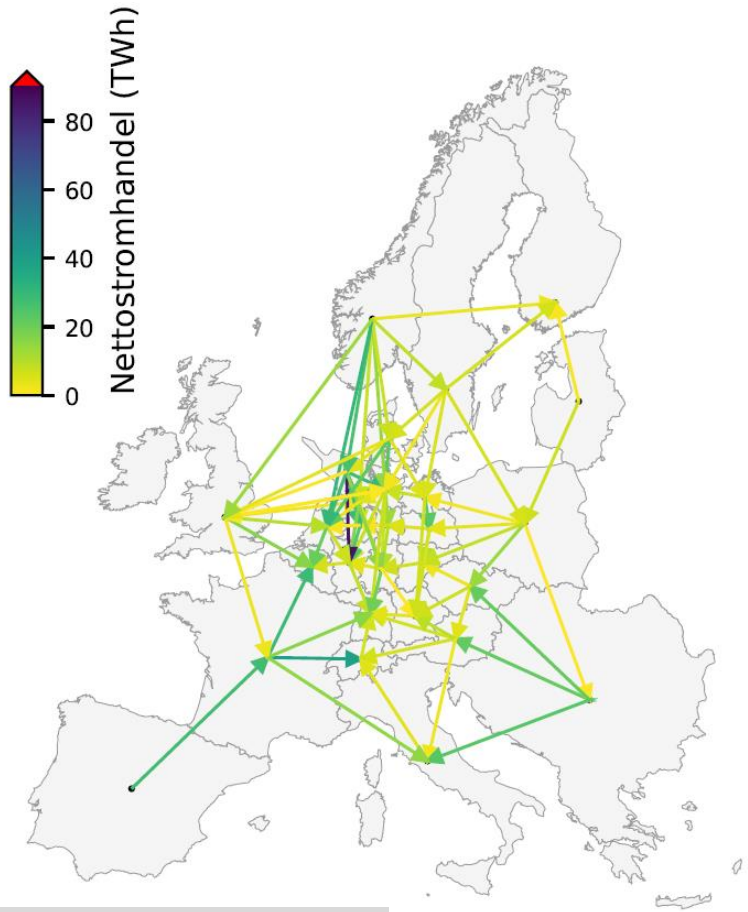
Einordnung

- V2G-Kapazität in den Szenarien vorgegeben und damit „kostenloser“ Batteriespeicher

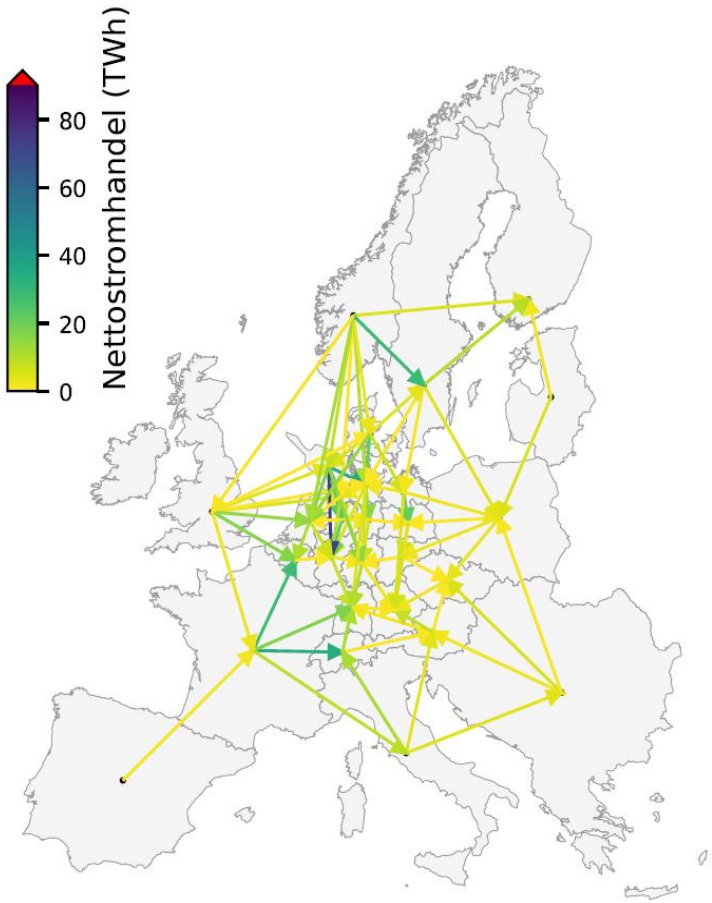
Schlussfolgerung

- Auch in dezentralen Szenarien bleibt die Rückverstromung aus Wasserstoff bedeutsam

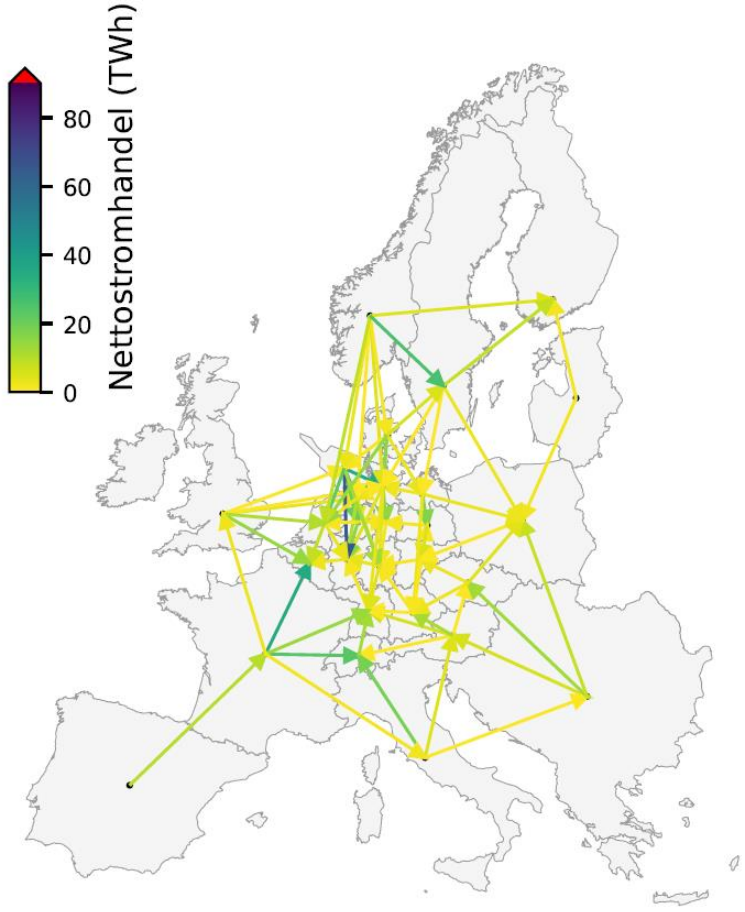
Strom-Handel Deutschland 2045: Szenarienvergleich
Begrenzte Auswirkungen, Reduktion der Importe



*T45-Strom**

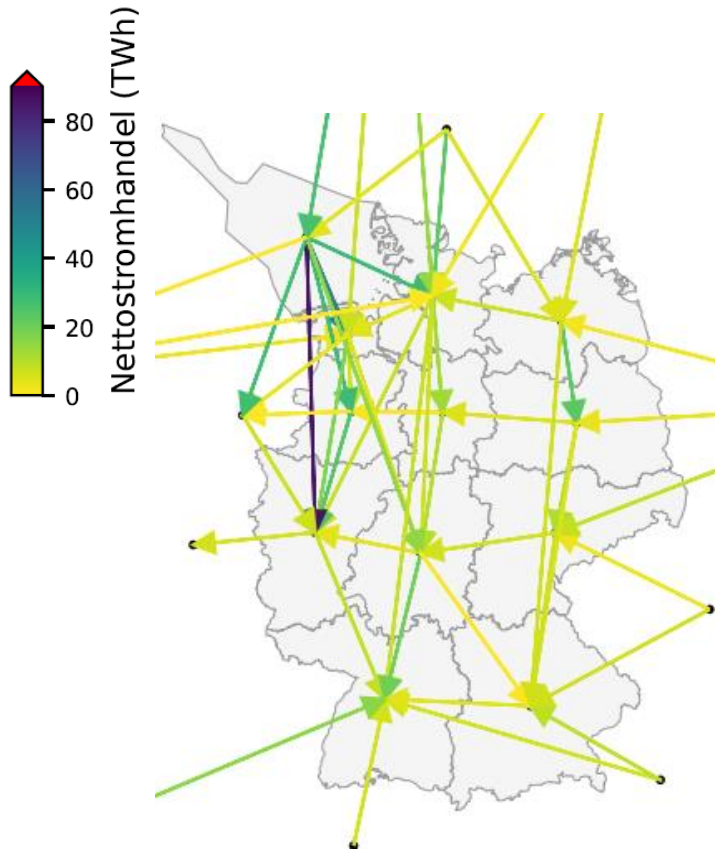


T45-PV+

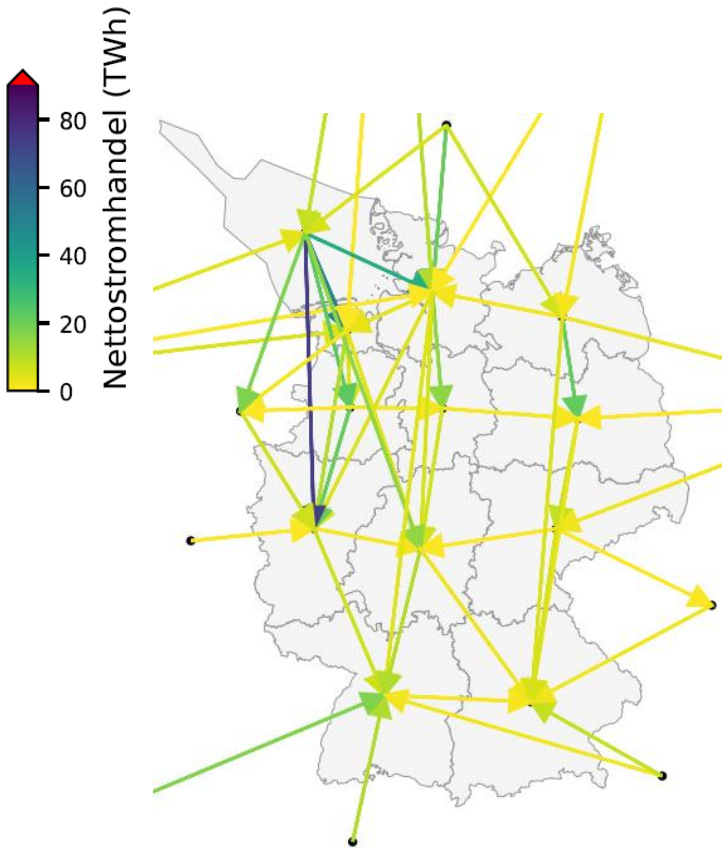


T45-Dezentral

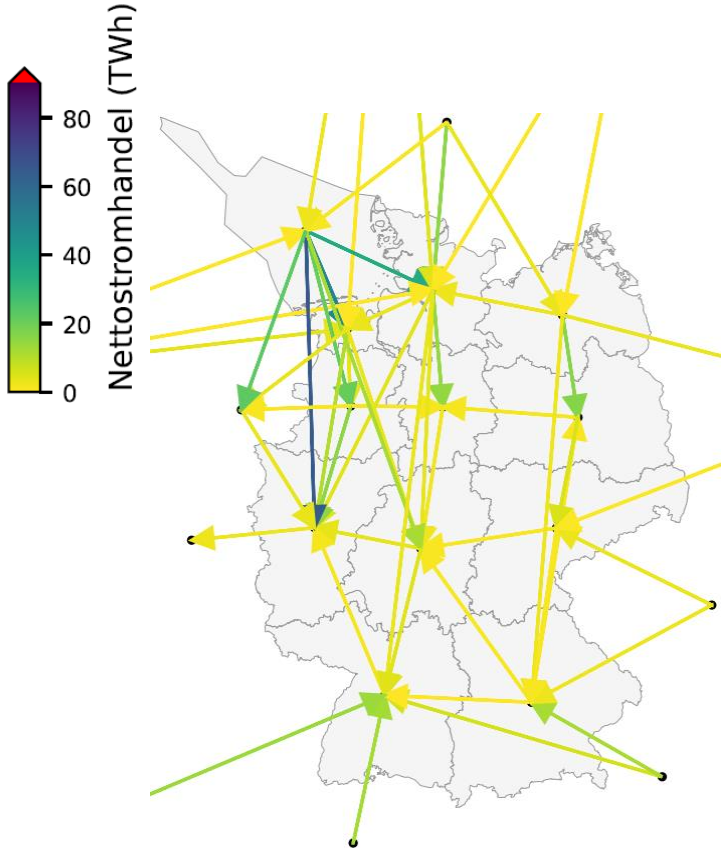
Strom-Handel Deutschland 2045: Szenarienvergleich
Begrenzte Auswirkungen



*T45-Strom**



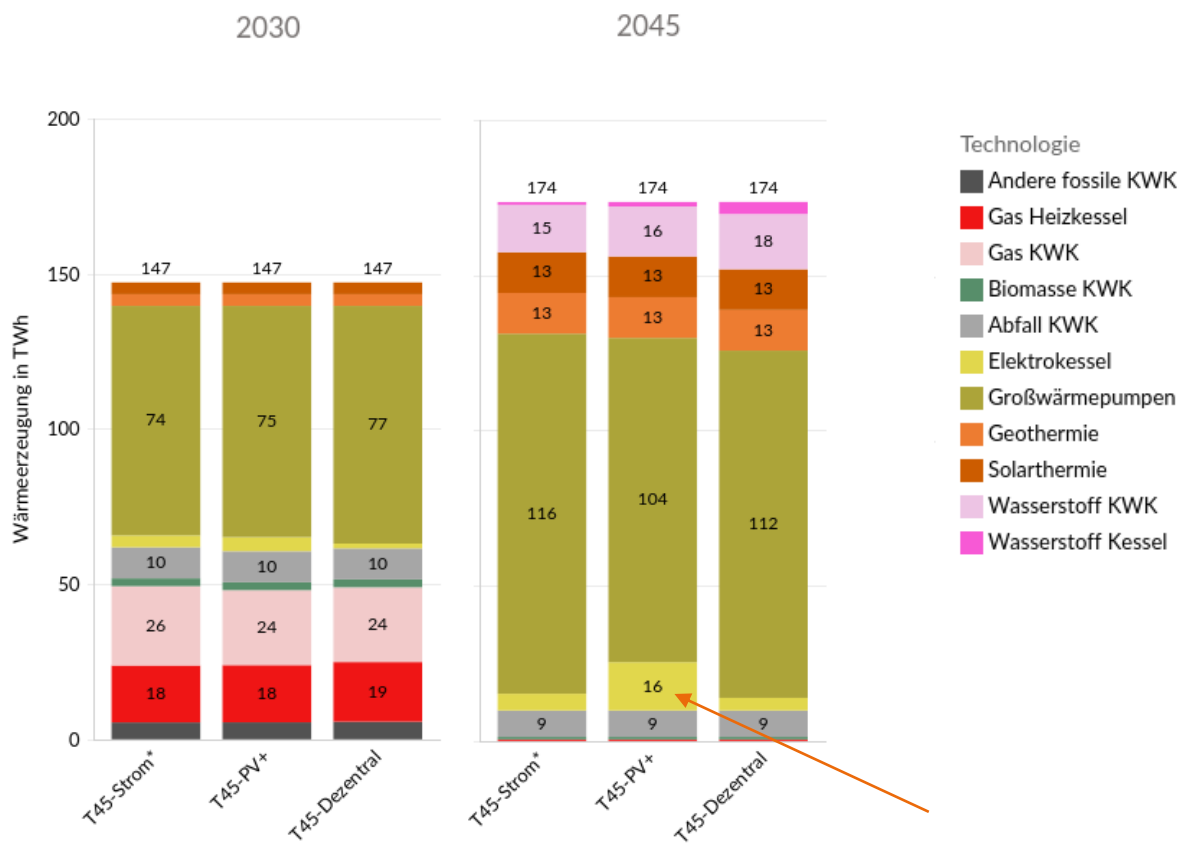
T45-PV+



T45-Dezentral

Dezentrale Szenarien

Ergebnisse Wärmenetze Deutschland
Szenarienvergleich Erzeugung



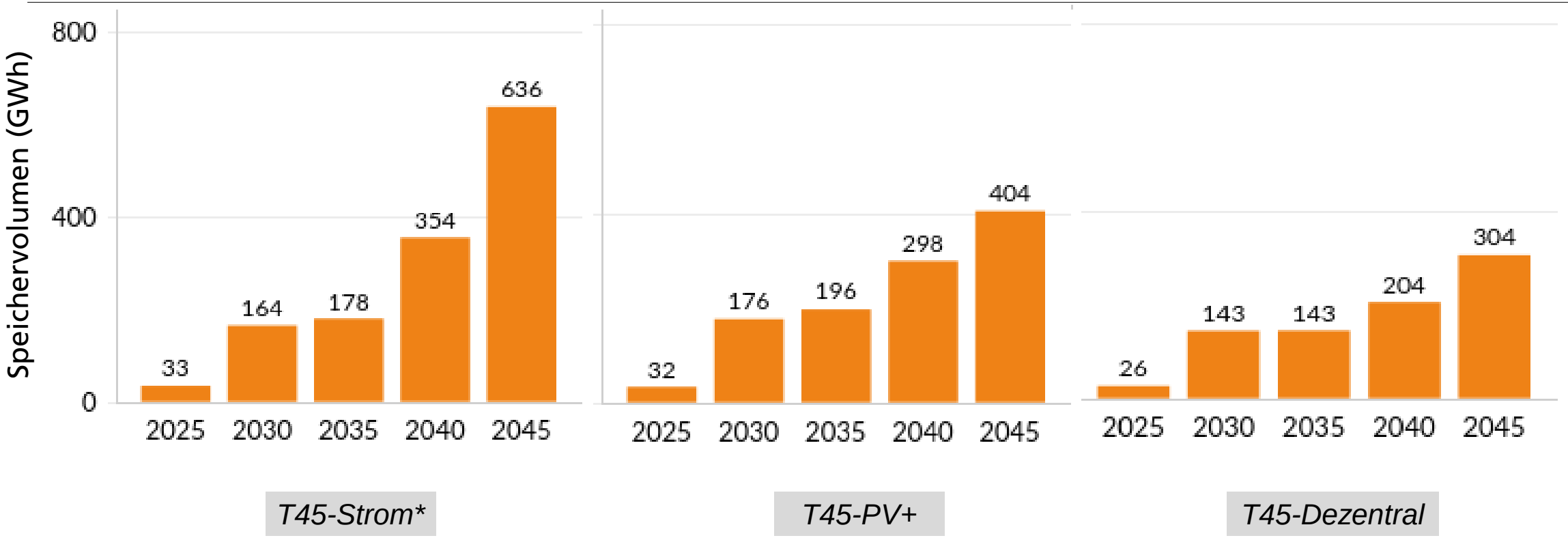
Ergebnisse

- Sehr ähnliche Entwicklung
  - Dominierende Rolle der Großwärmepumpen
  - Kleinere Anteile von Geo- und Solarthermie
  - Wasserstoff-KWK übernimmt einen Teil der Wärmeerzeugung in allen Szenarien im Zielsystem
- Deckung Spitzenlasten
  - In T45-PV+ durch mehr Elektrokessel
  - In T45-Dezentral durch mehr Wasserstoff-Kessel

Schlussfolgerung

- Der Trend zu Großwärmepumpen in den Ergebnissen ist robust.

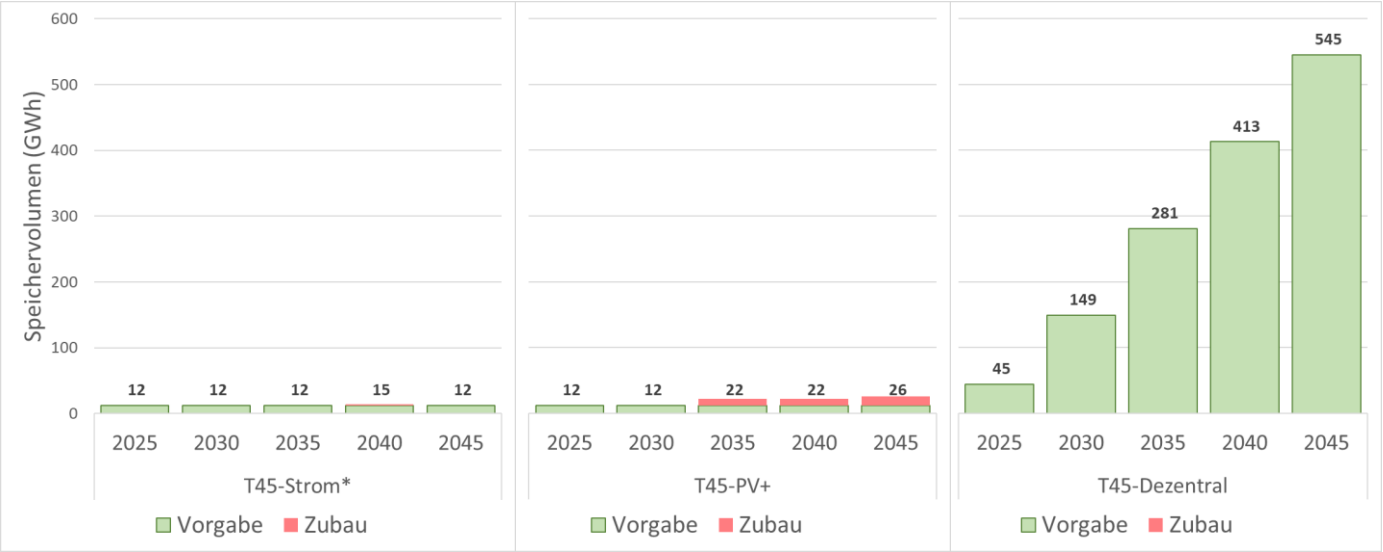
Wärmespeicher in Deutschland
Hohe Bedeutung in allen Szenarien



- Ausbau Wärmespeicher in den Varianten reduziert, aber trotzdem starker Aufwuchs

Dezentrale Szenarien

Batteriespeicher in Deutschland
Szenarienvergleich



Ergebnisse

- T45-Strom*: Stationäre Batteriespeicher werden nicht über Mindestvorgabe ausgebaut
- T45-PV+: Nur geringer Mehrausbau über Mindestvorgabe
- T45-Dezentral: Exogener Ausbau von Batteriespeichern (Vorgabe)

Einordnung

- Batteriespeicher sind als relativ teure Technologie nicht zwingend erforderlich im deutschen Energiesystem (Systemsicht)
- Batteriespeicher stehen in Konkurrenz zu anderen Speichern (z.B. Wasserstoff in Kombination mit Rückverstromungskapazitäten) und anderen EE-Erzeugern sowie (Strom-)Importen
- Wenn Batterien ins deutsche Energiesystem kommen (z.B. getrieben durch den Ausbau der "PV-Heimspeicher" können sie PV-Spitzen einspeichern und zur Netzstabilität beitragen

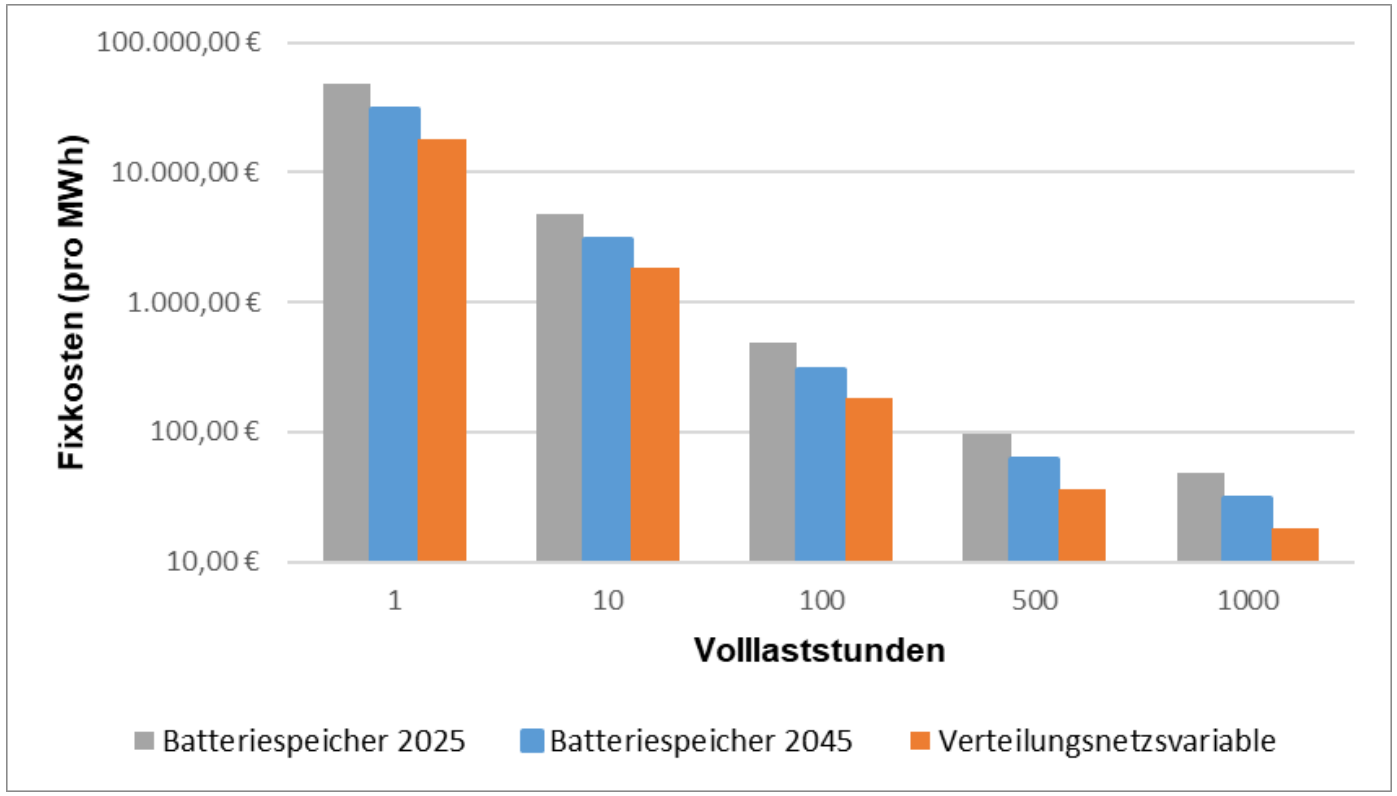
Batterien - Techno-ökonomische Parametrierung

Jahr	Effizienz	Lebensdauer (a)	Invest (€/kW)	Fixe O&M (€/kW)	Invest (€/kWh)	Variable O&M (€/MWh)
2025	90%	10	425	9,9	212,5	2
2030	90%	10	292	6,3	146	2
2035	90%	10	284	6,1	142	2
2040	90%	10	276	5,9	138	2
2045	90%	10	269	5,7	134,5	2

Einordnung

- Mischwert für Großbatterien und Heimspeicher
- Eher optimistisch für Heimspeicher
- Variable O&M aus modelltechnischen Gründen notwendig
- Preisbasis Euro 2018

Batterien – Kosten pro verschobener MWh
Geringe Auslastung ist sehr teuer



Ergebnisse

- Batterien benötigen hohe Volllaststunden für einen ökonomisch konkurrenzfähigen Betrieb
- Netzausbau ist, wenn möglich, günstiger

Einordnung

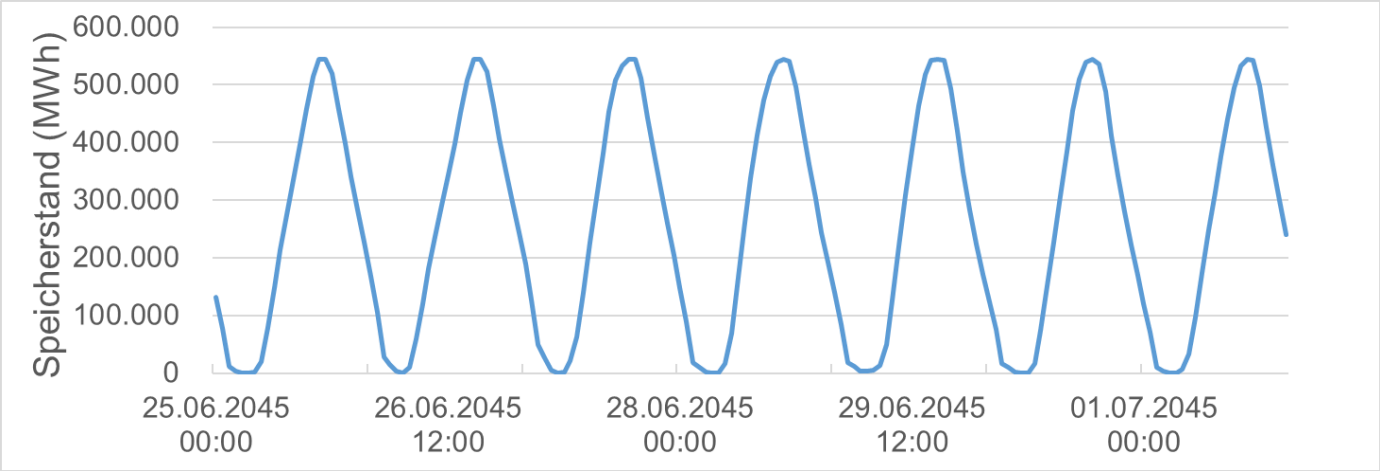
- Der Wert der Batteriespeicher für das System misst sich an der Kostenkonkurrenz zu anderen Erzeugungstechnologien
- Für das Erreichen hoher Volllaststunden benötigen Batterien aufeinanderfolgende Situationen mit günstigem Ladestrom einerseits und hoher Residuallast andererseits
- Die reine Vermeidung von PV Spitzen ermöglicht weniger als 360 Zyklen pro Jahr

Schlussfolgerungen

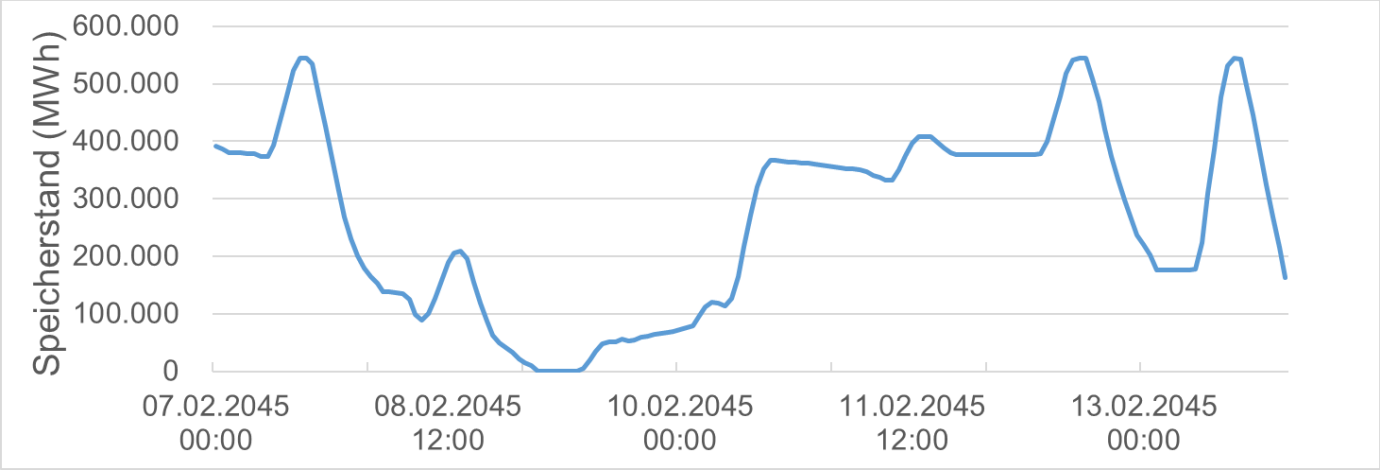
- Batterien können vielfältige Nutzen für das Energiesystem haben, aber das reine Verlagern von PV Strom ist nicht sehr kostengünstig.

Batteriespeicherstand Deutschland T45-Dezentral 2045
Tageszyklus im Winter nicht immer möglich

Sommer (KW 26)



Winter (KW 6)



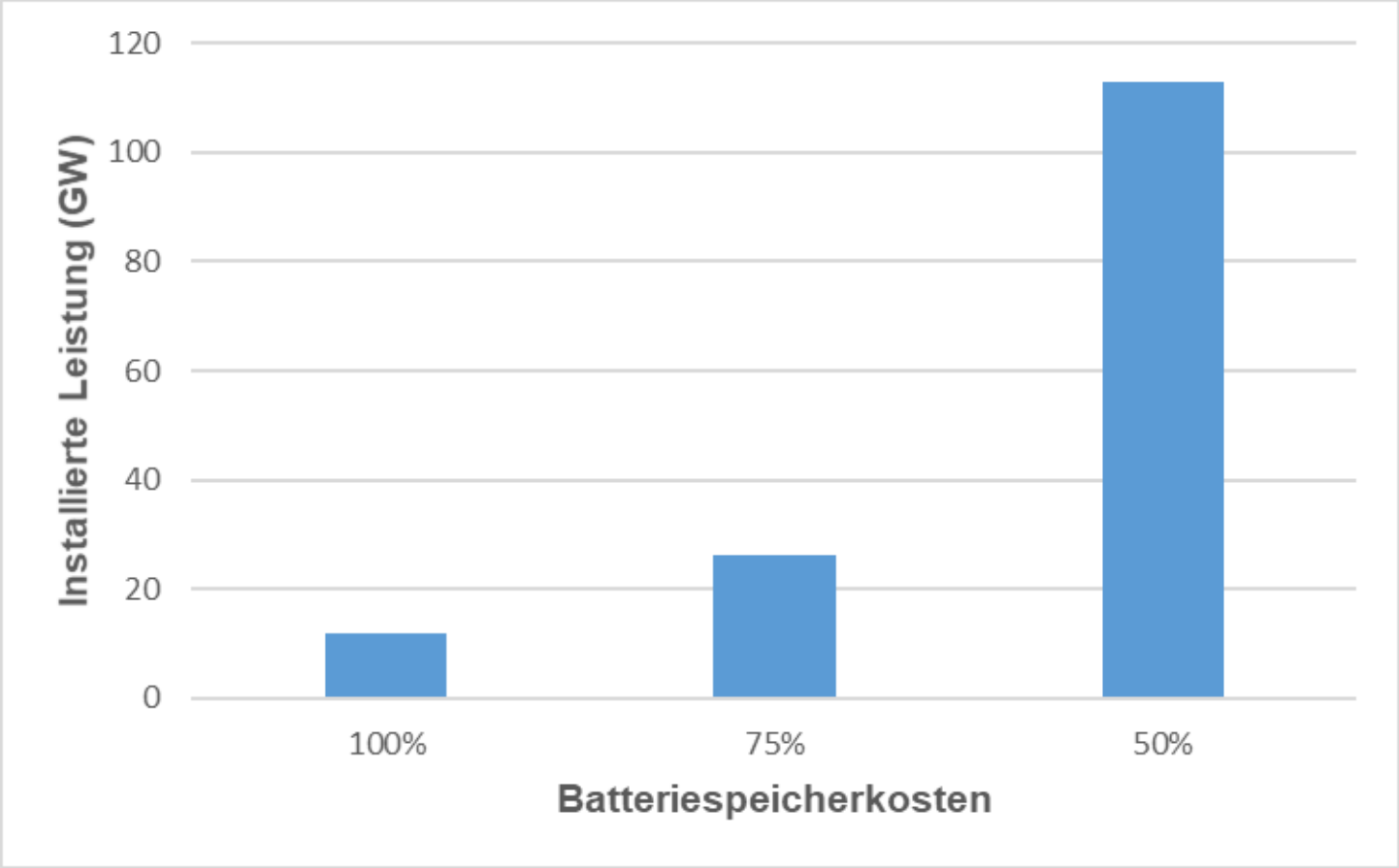
Ergebnisse

- Ein Großteil der Batteriespeicher in T45-Dezentral kommen im Winter nicht auf tägliche Ladezyklen
- Dadurch sinkt die Zyklenzahl unter 365

Einordnung

- Die Ursache liegt in zwei Aspekten:
  - Einige Tage im Winter mit zu wenig PV zum Laden
  - Einige Tage mit dauerhaft viel Windenergie, dadurch kann nicht entladen werden

Batterien - Techno-ökonomische Parametrierung-Sensitivität-Ergebnis ist ökonomisch eher robust



Ergebnisse

- Bei halbierten Batteriespeicherkosten verzehnfacht sich der Batteriespeicherausbau auf ca. 110 GW

Einordnung

- Vereinfachte Modellierung nur für 2045
- Der Ausbau ist selbst bei halbierten Kosten unterhalb der im T45-Dezentral erzwungenen Mengen

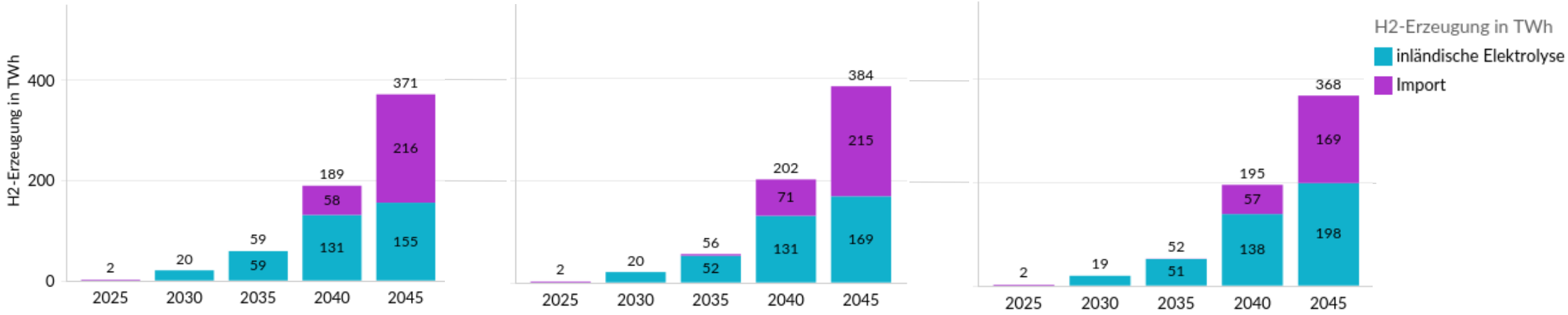
Schlussfolgerungen

- Nur wenn Batteriespeicher deutlich günstiger werden, als in den getroffenen Annahmen, dann steigt ihre Bedeutung.

Basis ist T45-PV+

Dezentrale Szenarien

Deckung inländische H_2-Nachfrage in Deutschland
Substantielle Importe in allen Szenarien



*T45-Strom**

- Importquote 2045: 58%

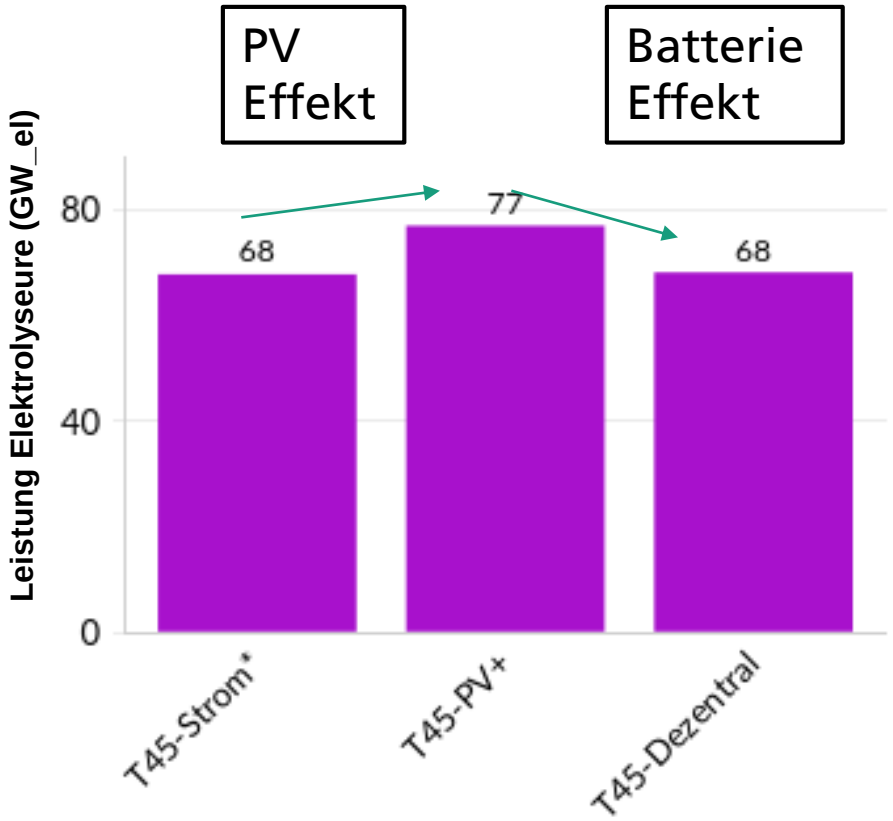
T45-PV+

- Leicht gestiegener H2-Einsatz im Stromsektor
- Inländische Elektrolyse steigt leicht, gleich-bleibende Importmengen
- Importquote 2045: 56%

T45-Dezentral

- Geringerer H2-Einsatz im Stromsektor
- Mehr inländische Elektrolyse möglich
- Importquote 2045: 46%

Installierte Leistung der Elektrolyse in Deutschland 2045
Ohne zusätzliche Flexibilität wird mehr Leistung benötigt



Ergebnisse

- Leistung steigt im Szenario PV+ um 9 GW el an.
- Im Szenario T45-Dezentral fällt die Leistung wieder auf das Niveau des Szenarios T45-Strom*

Einordung

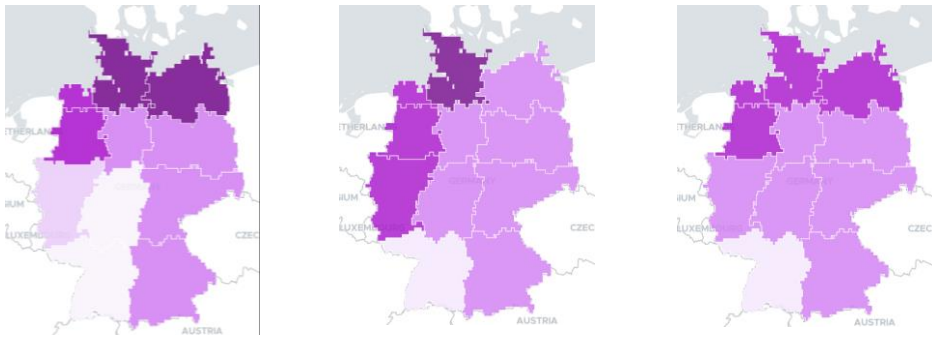
- Im Szenario T45-PV+ wird mehr Strom in die Wasserstofferzeugung umgeleitet, hierfür ist mehr Elektrolyseleistung notwendig.
- Die Flexibilität der Batterien wird im Szenario Szenario T45-Dezentral für eine Steigerung der Auslastung der Elektroklyse genutzt

Schlussfolgerung

- Hoher Bedarf an Elektrolyse ist auch in den dezentralen Szenarien robust

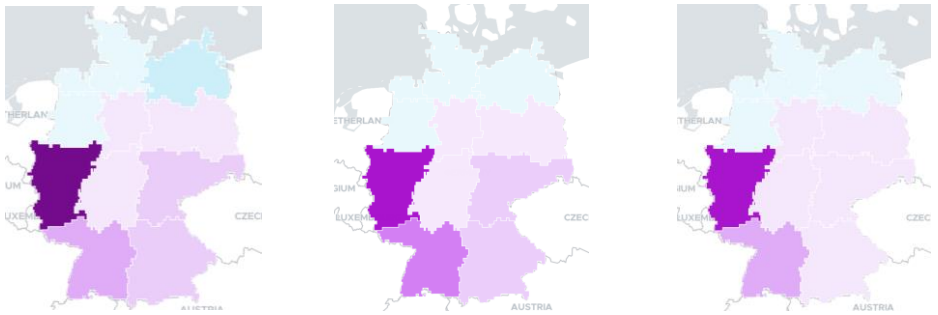
Deckung inländische H_2-Nachfrage in DE 2045 Szenarienvergleich

Leistung Elektrolyseure (GW H_2)



Leistung Elektrolyseure (GW)
- below 0.1
- 0.1 to 1
- 1 to 5
- 5 to 10
- 10 to 15

Netto-Import und -Export Regionen



- mehr als -100
- bis -100
- bis -80
- bis -60
- bis -40
- bis -20
- bis 20
- bis 40
- bis 60
- bis 80
- bis 100
- mehr als 100

Netto Export (TWh)

Netto Import (TWh)

*T45-Strom** → *T45-PV+* → *T45-Dezentral*

Ergebnisse

- Stärkere Verteilung der Elektrolyse-Standorte, Diffusion nach Mittel- und Westdeutschland (nicht jedoch Südwest) im Szenario T45-Dez

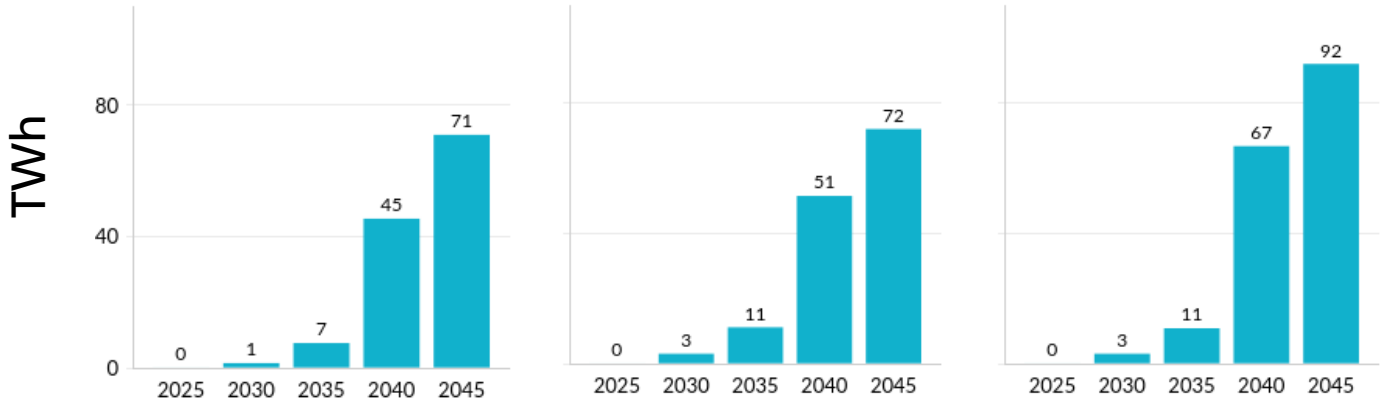
Einordnung

- Auswirkungen in der regionalen Verteilung sind moderat

Schlussfolgerung

- Die generelle Verteilung der Elektrolyseure ist robust

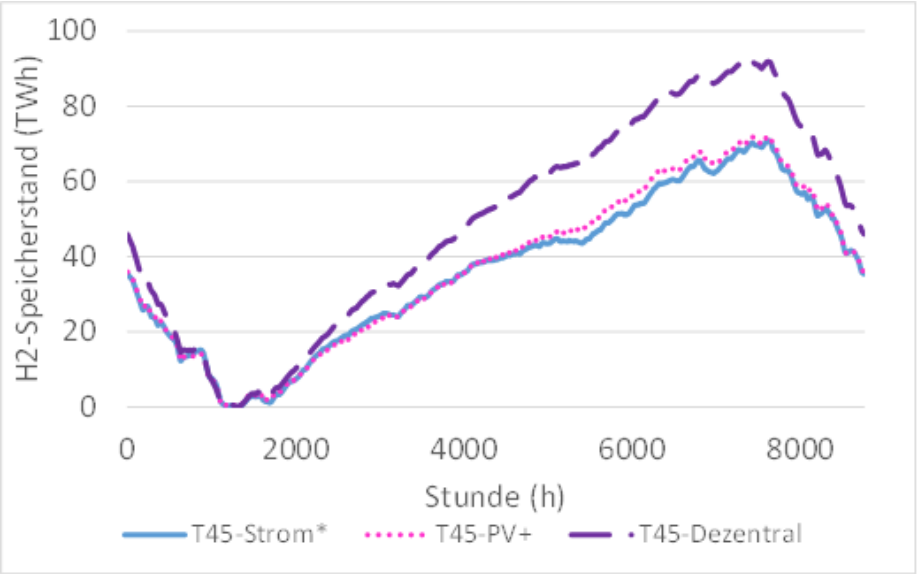
Wasserstoff-Speicher in Deutschland Szenariovergleich
Starker Ausbau in allen Szenarien



*T45-Strom**

T45-PV+

T45-Dezentral



- Signifikanter H2-Speicherbedarf in Deutschland schon ab 2030
- Speicherbedarf steigt bis 2040 leicht an
- Speicherbedarf steigt nach 2040 stark an

Sektoranalyse Angebot – Importe 2045 (netto)
Unterschiedliche Hauptenergieträger werden importiert

T45-Strom*

Importe:
216 TWh Wasserstoff
115 TWh Strom
0 TWh PtG
219 TWh PtL

➢ 862 TWh Stromäquivalente

T45-PV+

Importe:
215 TWh Wasserstoff
88 TWh Strom
0 TWh PtG
219 TWh PtL

➢ 833 TWh Stromäquivalente

T45-Dezentral

Importe:
169 TWh Wasserstoff
48 TWh Strom
0 TWh PtG
219 TWh PtL

➢ 727 TWh Stromäquivalente

Ergebnisse

- Deutschland importiert in allen Szenarien netto Energie
- Importe von H2 und Derivate dominieren
- T45-PV+: geringere Stromimporte
- T45-Dezentral: geringere Strom- und H2-Importe

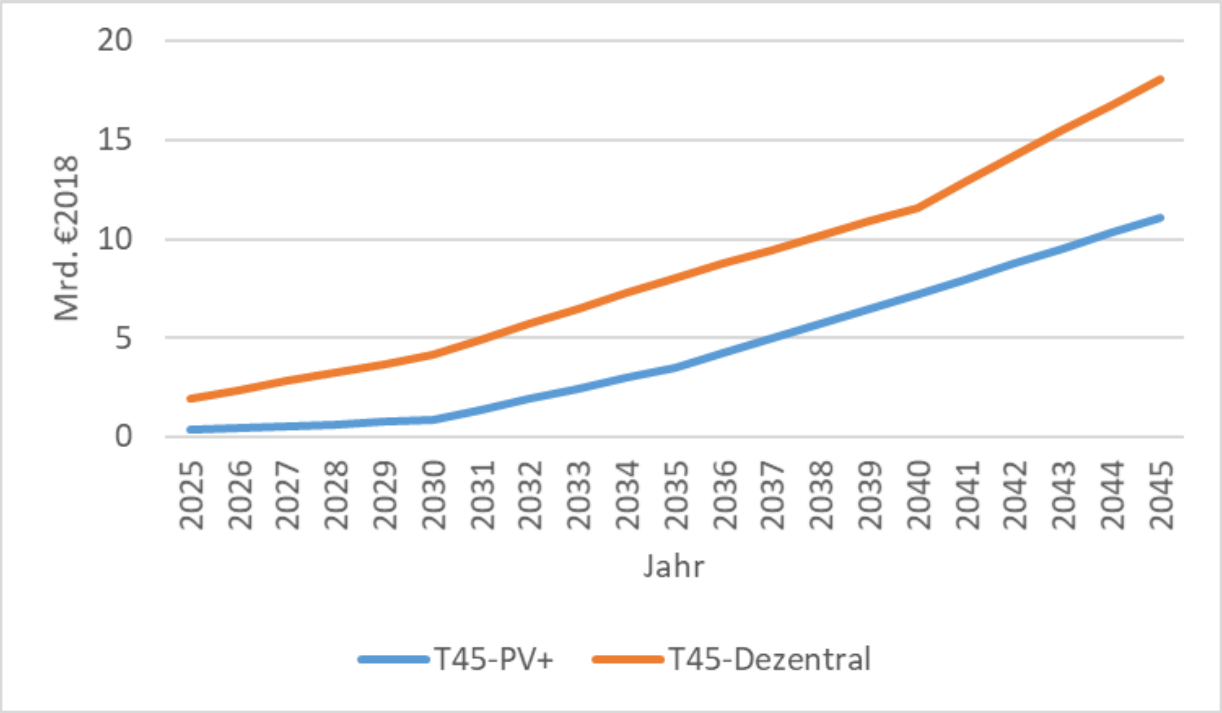
Einordung

- Letztlich wird 2045 in allen drei Szenarien Stromerzeugung im Ausland für den deutschen Energiebedarf benötigt
- Die benötigte Strommenge nimmt bei Wasserstoff und insbesondere PtG/PtL durch Verluste in der Umwandlungskette deutlich zu
- Die Importabhängigkeit Deutschlands sinkt gegenüber 2020 deutlich (auf 25-30% in 2045)

Schlussfolgerung

- Auch in den dezentralen Szenarien belegt Deutschland erhebliche Flächen im Ausland für die Energieerzeugung

Jährliche Kosten im Vergleich zu T45-Strom*
Dezentrale Szenarien mit deutlicher Kostensteigerung



Ergebnisse

- Das Szenario PV+ ist 2045 ca. 11 Mrd. teurer als T45-Strom*
- Das Szenario T45-Dezentral ist 2045 ca. 18 Mrd. € teurer als das Szenario T45-Strom*

Einordung

- Erfasste Kosten: Stromerzeugung und Netze; Wasserstofferzeugung und Netze; Wärmebereitstellung in Wärmenetzen; Strom- und H2 Handel mit dem Ausland
- Die Kostenunterschiede sind substantiell

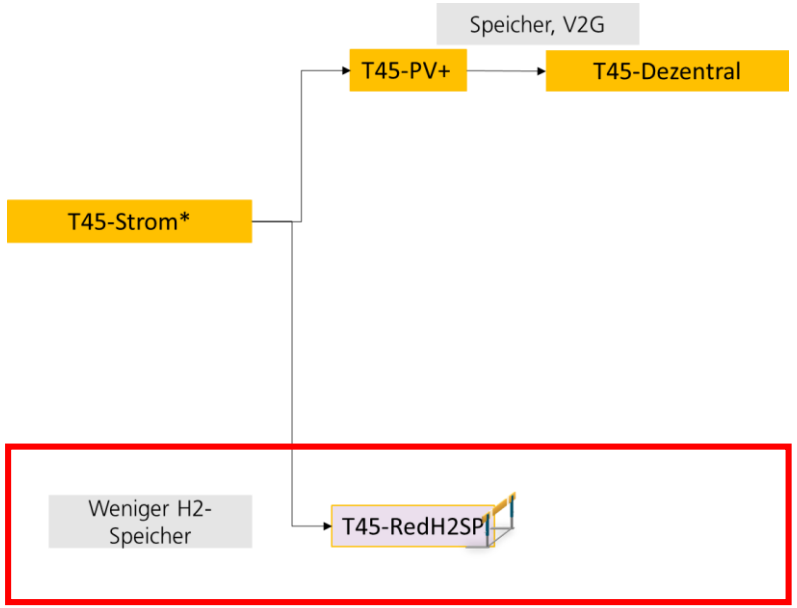
Schlussfolgerung

- Eine dezentrale Welt auf Kosten der Windenergie ist deutlich teurer

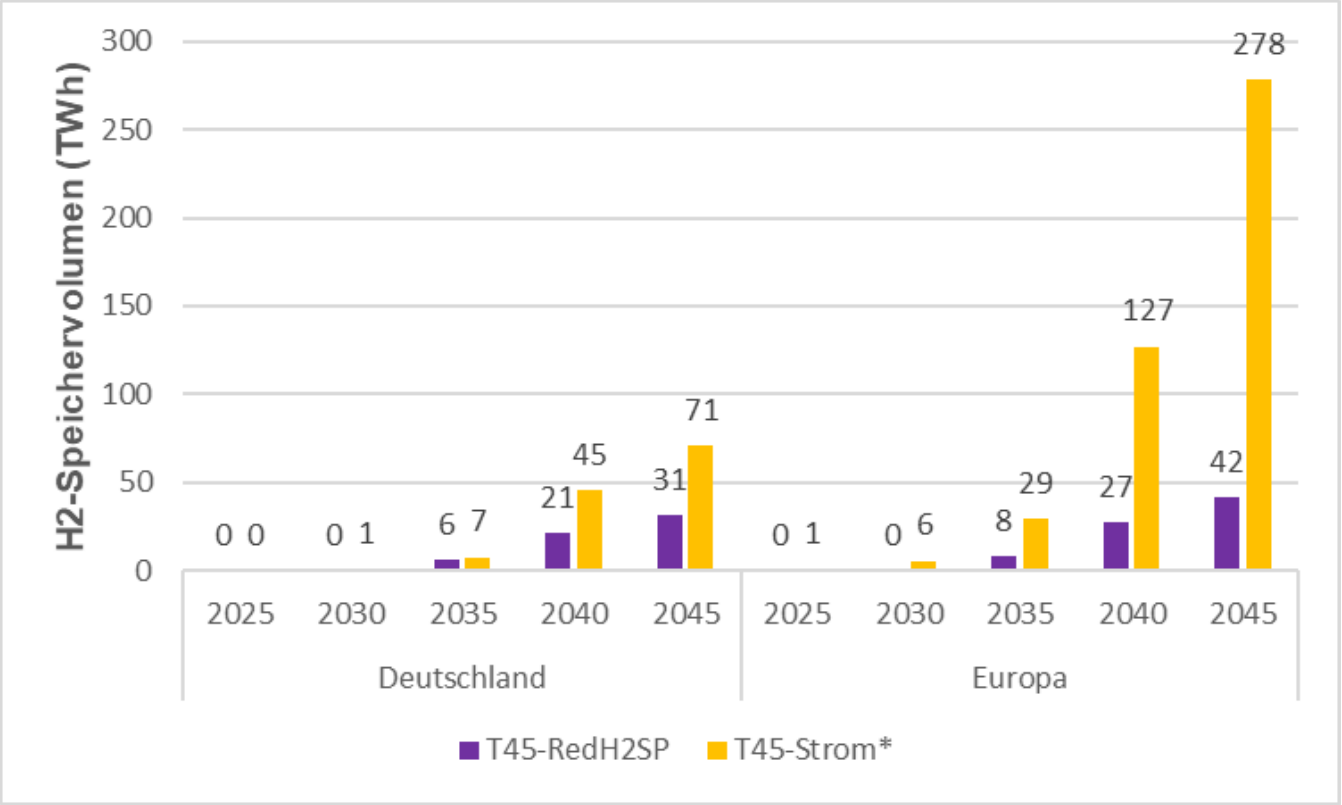
Erkenntnisse Dezentrale Szenarien

- Windenergie ist ein zentraler Baustein der Energiewende
  - Der Ersatz von größeren Mengen der Windenergie durch PV im großen Stil ist wenig sinnvoll, aber möglich
    - Hohe Abregelung ist schwer zu vermeiden
    - Die Kosten steigen sehr deutlich an
- Hohe Flexibilität im Energiesystem durch Smart Charging und V2G erleichtert Systemintegration deutlich
- Stationäre und mobile Batteriespeicher können einen wenig optimalem Mix der erneuerbaren Energien nur begrenzt kompensieren
  - Geringe Auslastung der Batteriespeicher führt zu signifikanten Kosten der verlagerten Energie
- Die Bedeutung von Netzen Großwärmepumpen, Wärmespeichern und H2-Speichern ist in den Szenarien sehr robust.

Dezentrale Szenarien



Wasserstoffspeicher im Szenario: T45-RedH2SP
Begrenzung des Speichervolumens



Ziel

- Abbildung der Auswirkungen von begrenzten H_2 Speichern

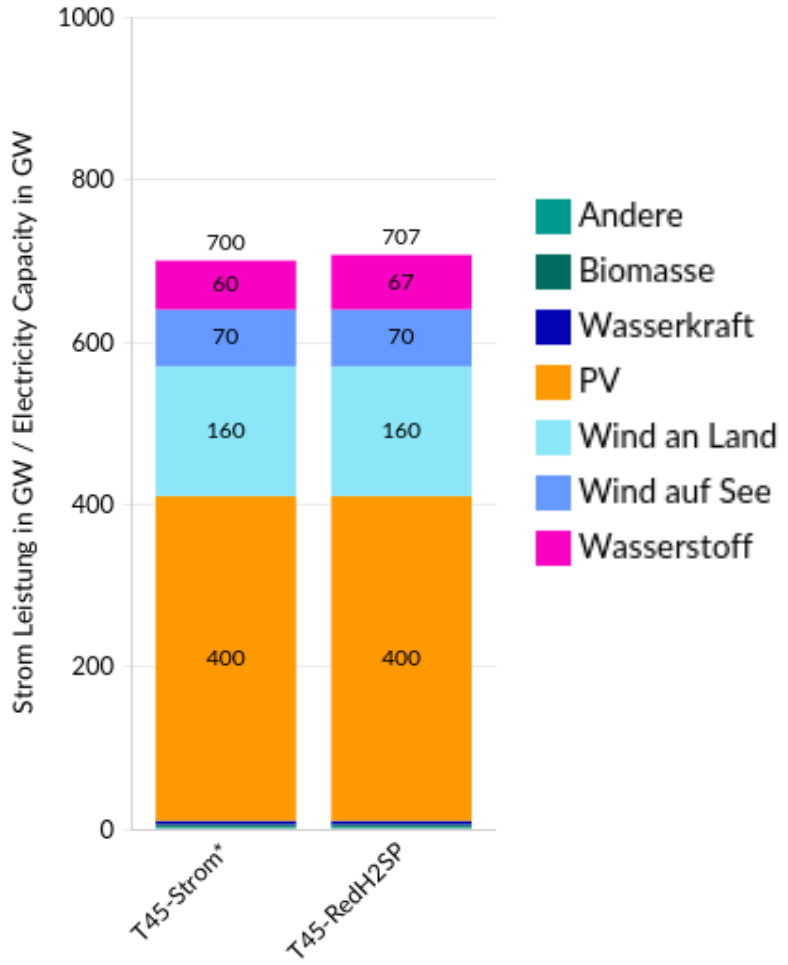
Umsetzung

- Speichervolumen wird auf umgewidmete bestehende Kavernen in DE begrenzt
- Analoge Entwicklung in Europa

Einordnung

- Sehr harte Begrenzung, in der kein Neubau stattfinden kann

Ergebnisse Strom Deutschland
Szenarienvergleich Leistung 2045



Ergebnisse

- Etwas mehr H_2-Rückverstromungsleistung im Szenario T45-RedH2SP (+7 GW)
- Installierte Leistungen der EE-Erzeugungstechnologien unverändert

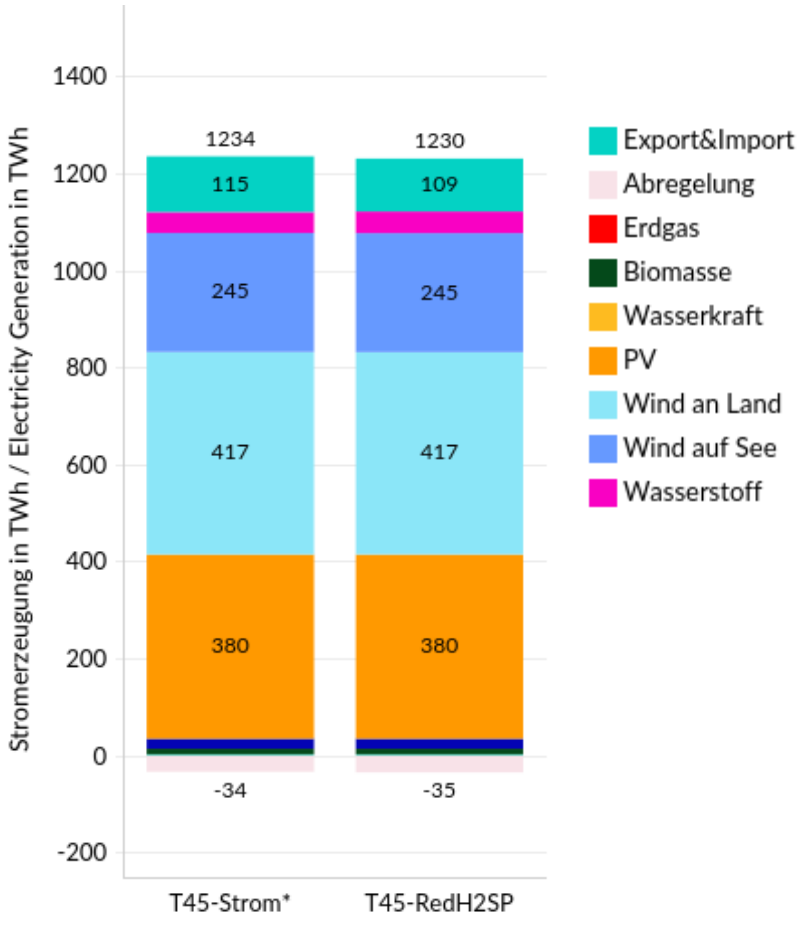
Einordnung

- Mindestbedingungen für EE-Ausbau bestimmend, deshalb bleibt die installierte PV Kapazität konstant, obwohl die PV-Spitzen ohne Wasserstoffspeicher schwer in den Winter zu verlagern sind

Schlussfolgerung

- Begrenzter H_2-Speicherausbau wirkt sich aufgrund der Nebenbedingungen zum EE Ausbau kaum auf das deutsche Stromsystem aus

Stromerzeugung Deutschland 2045: Szenarienvergleich
Ausbauziele für Erneuerbare dominieren das System



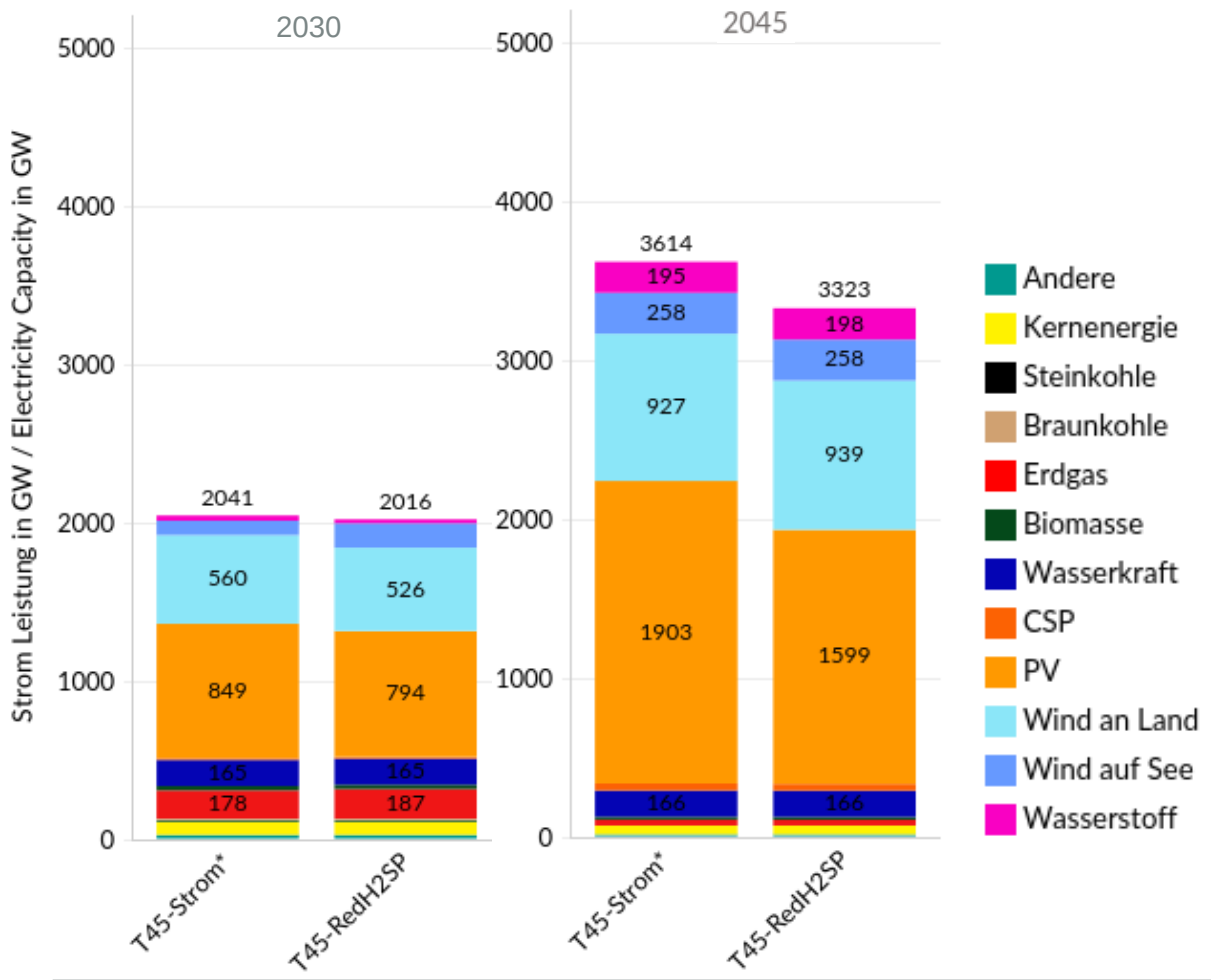
Ergebnisse

- Stromerzeugung der EE-Erzeugungstechnologien unverändert

Schlussfolgerung

- Begrenzter H_2-Speicherausbau wirkt sich kaum auf das Stromsystem aus

Ergebnisse Strom Europa inkl. Deutschland
Szenarienvergleich Leistung 2030 und 2045



Ergebnisse

- Deutliche Reduktion der PV in 2030 und insbesondere 2045
- Geringere Veränderungen bei der Windenergie

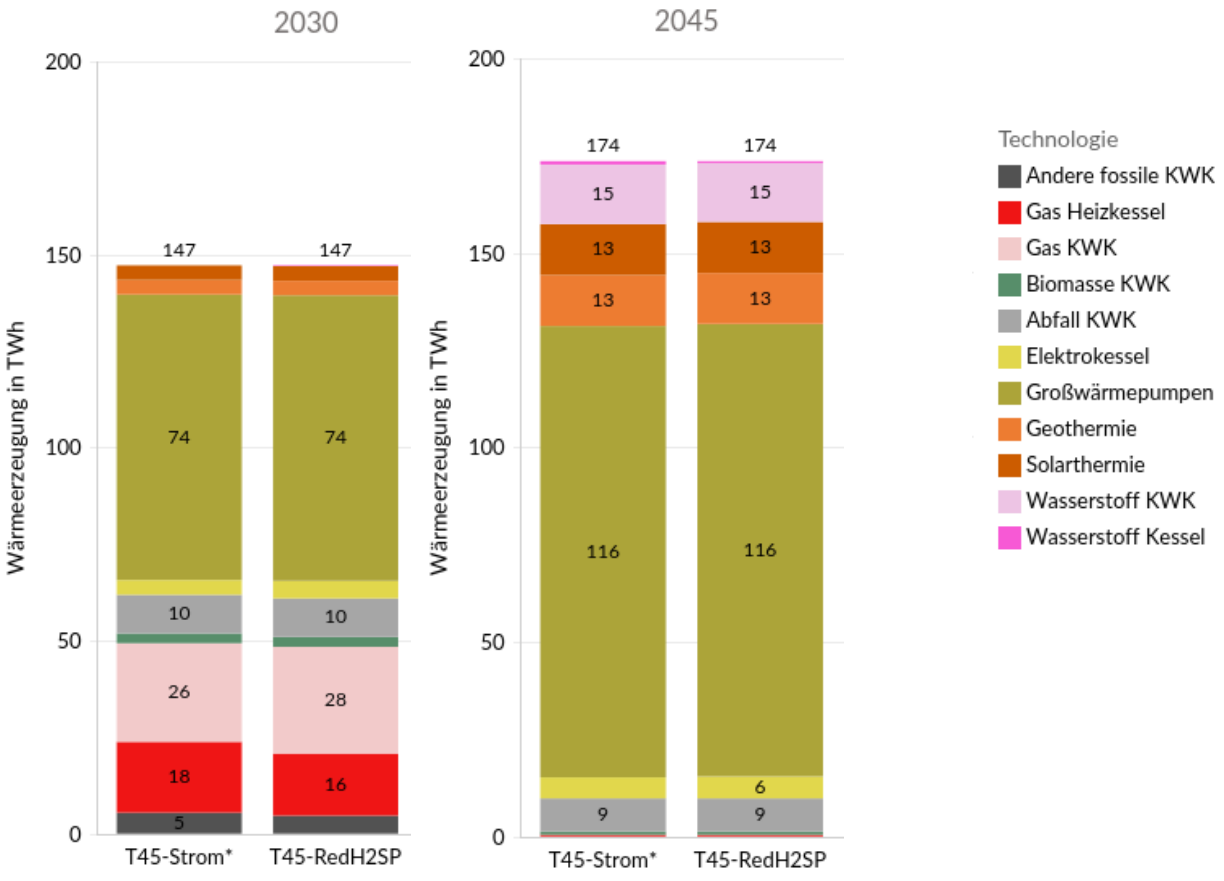
Einordnung

- Da die Erzeugungsmenge durch PV saisonal stark schwankt, werden Wasserstoffspeicher verwendet, um die Energiemenge vom Sommer in den Winter zu verschieben
- Da diese Speicheroption in T45-RedH2SP stark begrenzt ist, wird in Europa deutlich weniger PV ausgebaut

Schlussfolgerung

- Wasserstoffspeicher sind eine wichtige Basis für starken Ausbau der PV

Ergebnisse Wärmenetze Deutschland
Szenarienvergleich Erzeugung



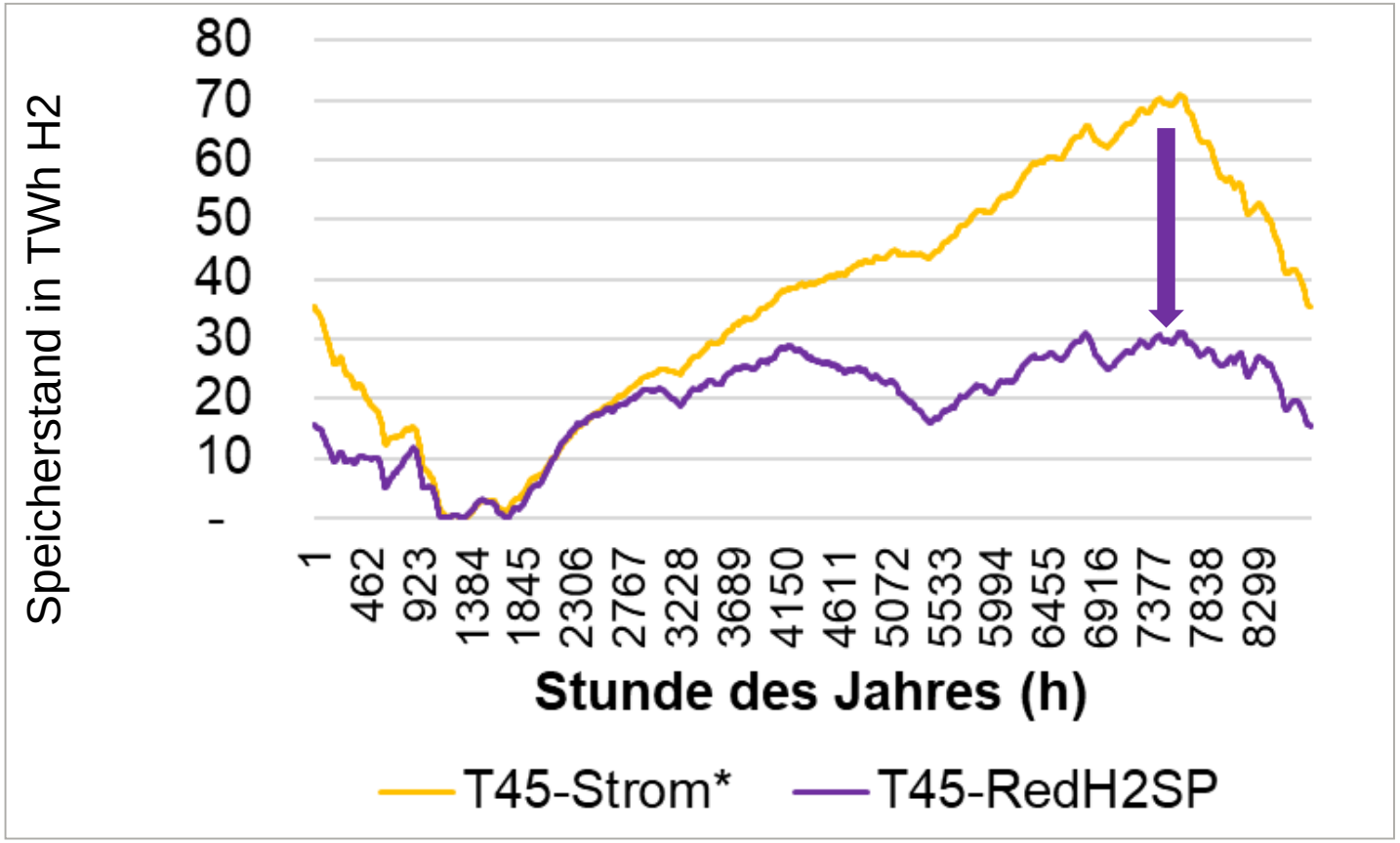
Ergebnisse

- Das System in T45-RedH2SP ähnelt stark dem Referenzszenario T45-Strom* - sowohl im Zwischenjahr 2030 wie auch im Zieljahr 2045

Schlussfolgerung

- Der kostenoptimale Ausbaupfad der Wärmenetze ist robust

Wasserstoffspeicher in Deutschland
Saisonalität im Jahr 2045



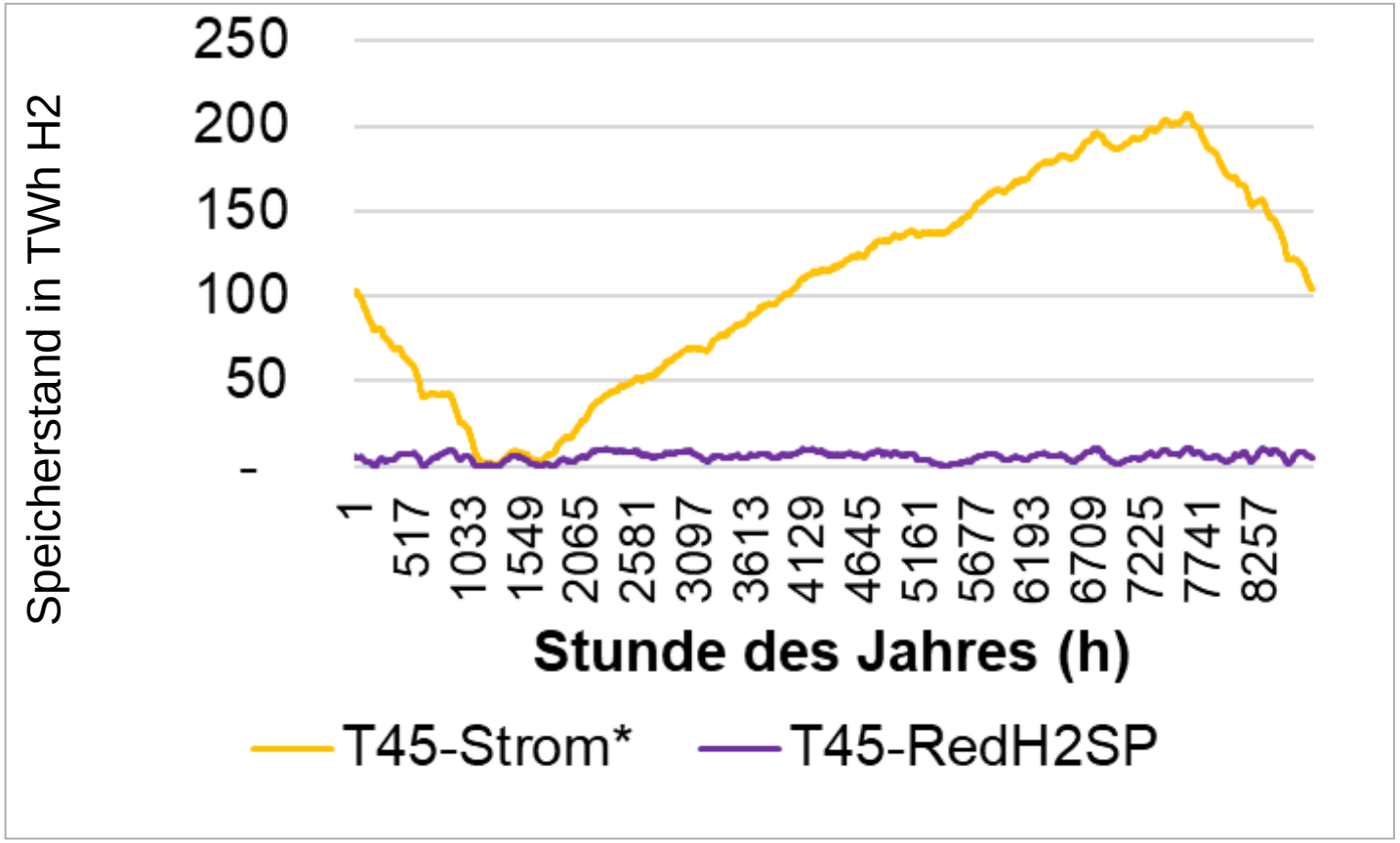
Ergebnisse

- Starke Restriktionen führen zu stark abweichendem Speicherfüllstand im T45-RedH2SP Szenario
- Speicher in Deutschland werden im Spätsommer zwischengeleert, um Platz zur Speicherung von Wasserstoff (v.a. aus Windenergie) zu schaffen

Einordnung

- Das notwendige saisonale Profil wird über andere Mechanismen hergestellt

Wasserstoffspeicher in Europa (ohne DE)
Kaum saisonale Speicherung möglich (T45-RedH2SP)



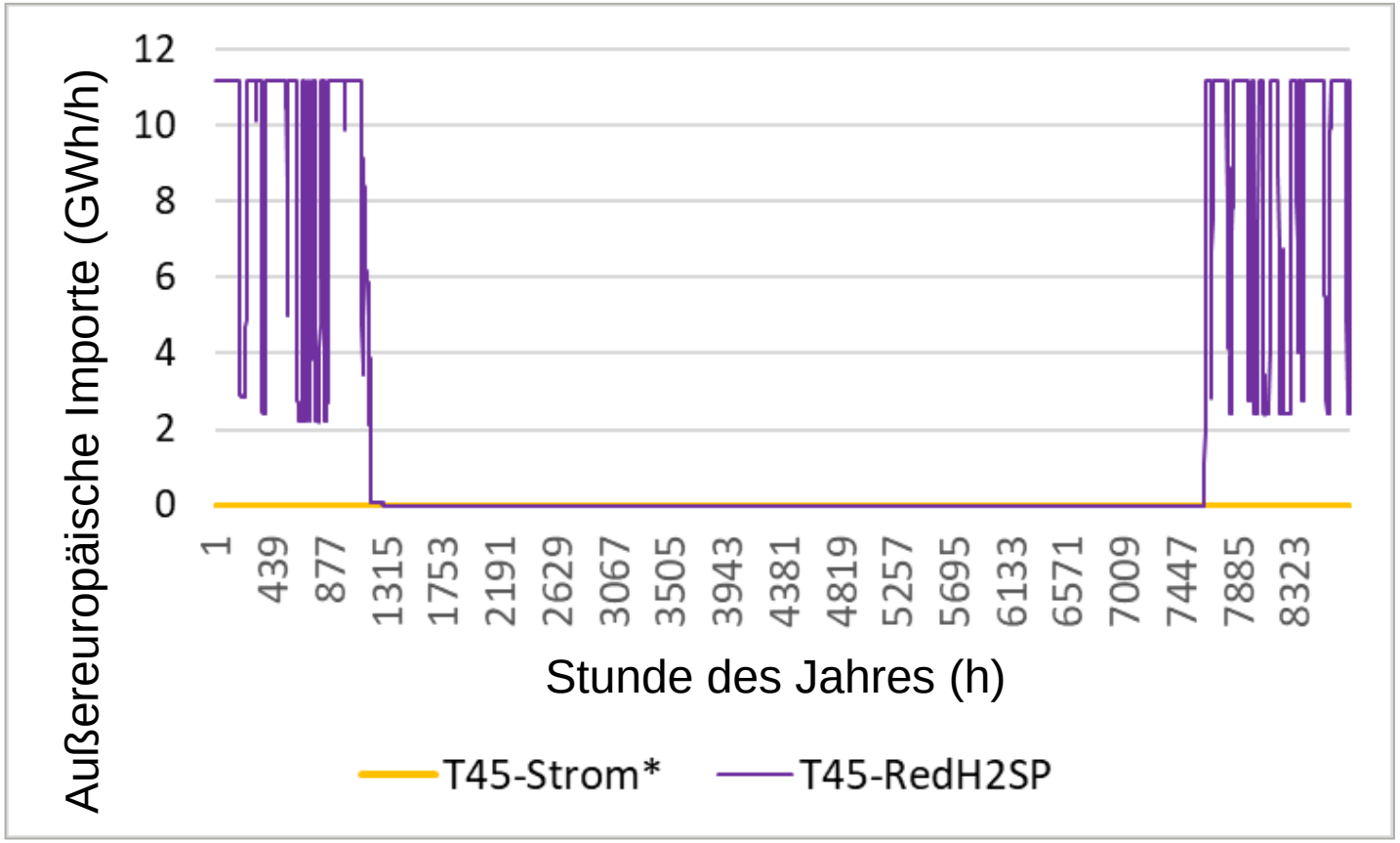
Ergebnisse

- Starke Restriktionen führen zu sehr stark begrenztem Speicherausbau im europäischen Ausland
- Saisonale Speicherung von H2 wird dadurch im europäischen Ausland verhindert → Ausweichen auf außereuropäische Importe/Speicher notwendig

Einordnung

- Der Bestand an Kavernen zur Umwidmung ist im europäischen Ausland sehr gering und ermöglicht keine saisonale Speicherung von Wasserstoff

Schiffsimporte statt heimische Speicher
Dispatch 2045 (Deutschland)



Ergebnisse

- Schiffsimporte finden ausschließlich im Winter statt
- Hier werden hohe Leistungen mit geringer Auslastung abgerufen

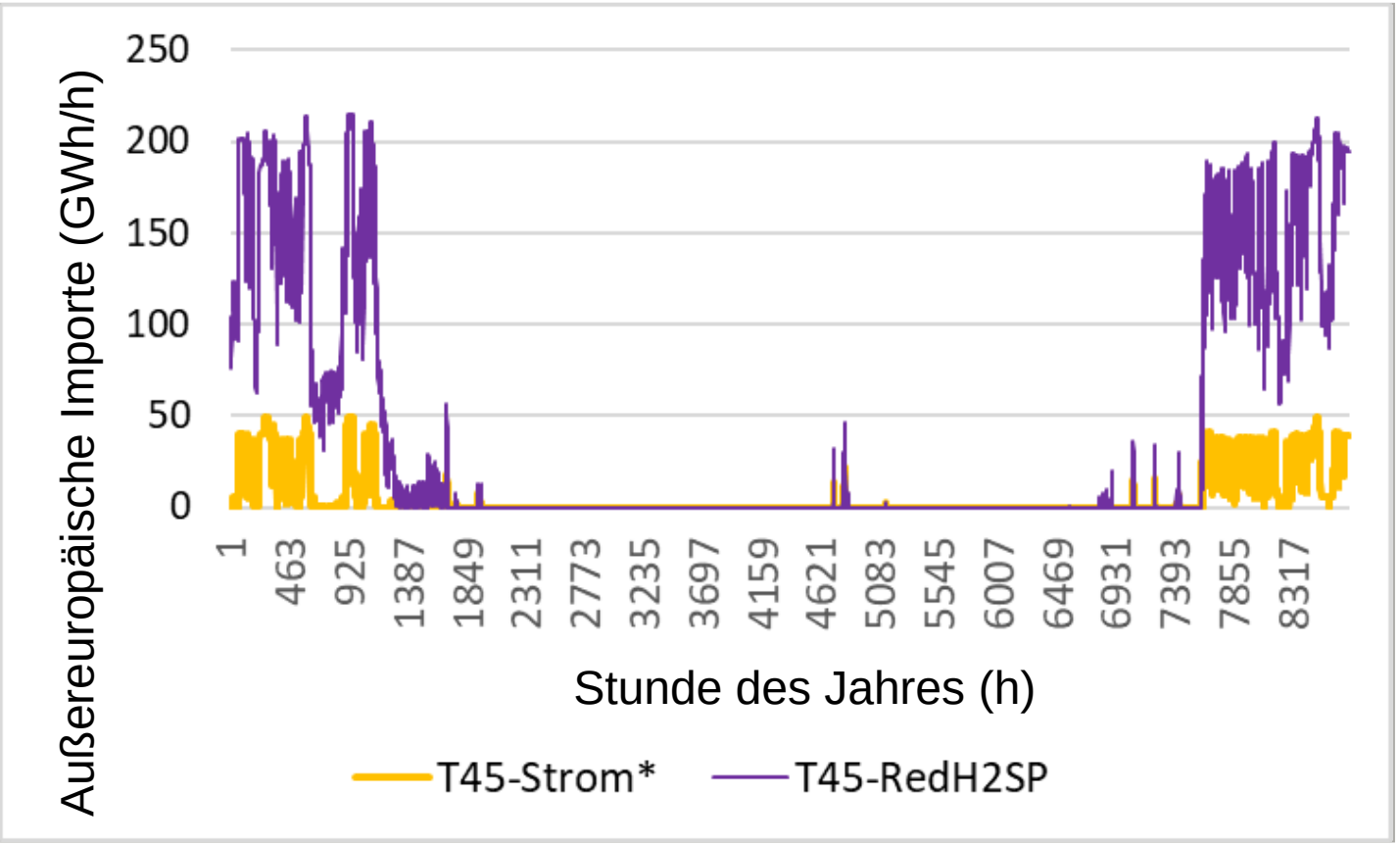
Einordnung

- Dieses Ergebnis erfordert Speicher außerhalb Europas bzw. eine teure Schiffsflotte als Speicher

Schlussfolgerung

- Eine Entwicklung mit sehr wenig H2-Speichern ist sehr riskant und teilweise außerhalb des realistischen Lösungsraumes

Importe nach Europa 2045: Dispatch
Starke Importe nur im Winter



Ergebnisse

- Fehlende Speichervolumina werden durch Importe aus dem außereuropäischen Raum teilweise kompensiert
- Importe finden auch hier vor allem im Winter mit hohen Leistungen statt

Einordnung

- Begrenzung der Wasserstoffspeicher führt zur Verwendung von außereuropäischen Speichern
- Die Leistungsbereitstellung im Stromsystem durch H2-Kraftkwerke hängt hier stark von der Leistungsbereitstellung durch H2-Importe ab

Schlussfolgerung

- Eine Entwicklung mit sehr wenig H2-Speichern ist sehr riskant und teilweise außerhalb des realistischen Lösungsraumes

Erkenntnisse des Szenarios T45-RedH2SP
H2-Kraftwerke brauchen Speicher

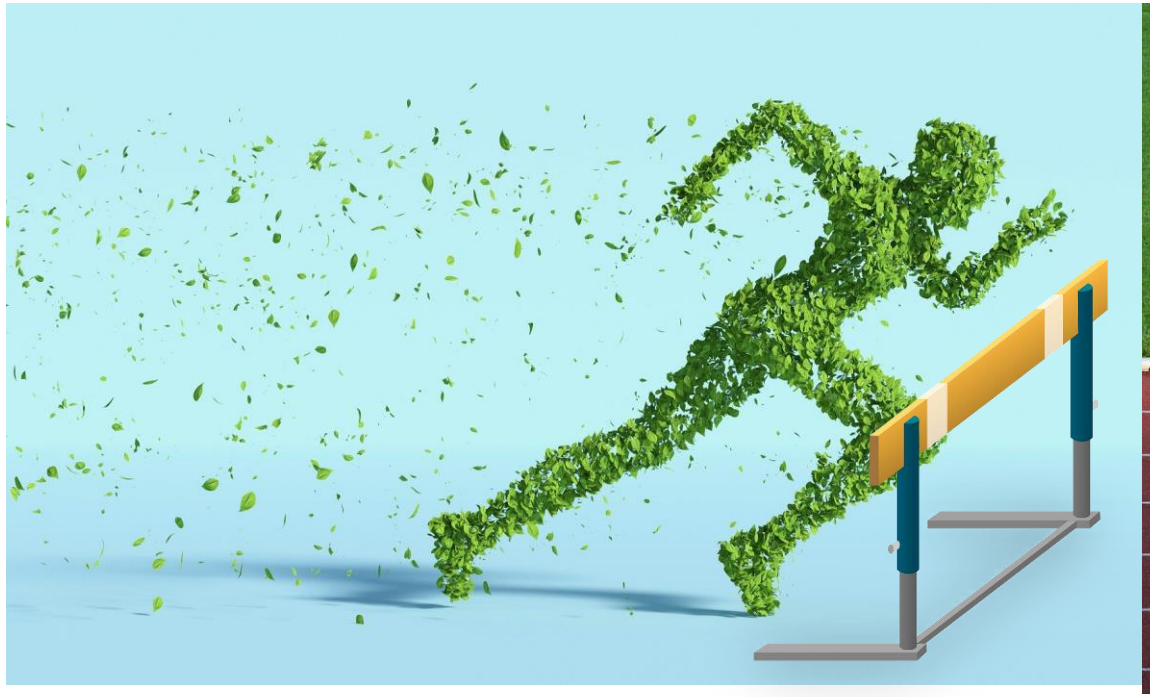
- Ein Szenario ohne Ausbau der Wasserstoffspeicher ist schwierig
  - H2-Kraftwerke benötigen den Wasserstoff im Winter im großen Leistungen
    - Eine entsprechende Form der H2-Speicherung wird direkt oder indirekt benötigt
  - Das Szenario war mathematisch lösbar, hat aber die Grenzen der Bilanzierung in der Modellierung an einigen Stellen überschritten
    - Über verschiedene Mechanismen wurde die Funktion der Speicher ‚nachgebaut'
    - Aus eine Ausweisung der Kosten wird deshalb hier verzichtet.
- **Schlussfolgerung:** Wenn H2-Kraftwerke nicht mit entsprechenden Speichern besichert werden, wird ein anderer Energieträger für Backup-Kraftwerke benötigt.

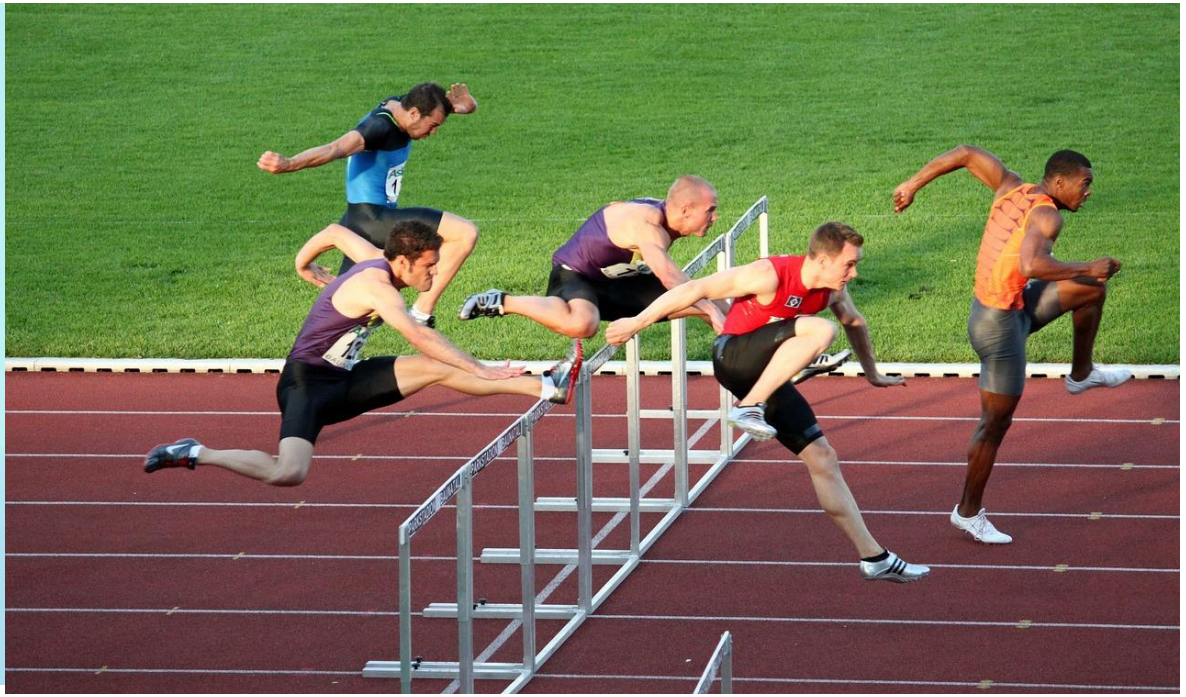
Fazit

Fazit

- Wenn H2-Kraftwerke nicht mit entsprechenden Speichern besichert werden, wird ein anderer Energieträger für Backup-Kraftwerke benötigt. Winter determiniert das Energiesystem
- Die hohe Bedeutung der folgenden Technologien hat sich als robust erwiesen
  - Wasserstoffspeicher, Großwärmepumpen, Wärmespeicher
  - Windenergie
- Dezentrale Szenarien sind vor dem Hintergrund des Ressourceneinsatzes kritisch zu sehen
  - Eine Dekarbonisierung mit sehr viel PV und ggf. sehr vielen Batterien ist teuer
  - Abregelung ist in berechneten Szenarien sehr hoch
- Batterien (stationär & mobil) können H2-Kraftwerke reduzieren aber nicht vollständig ersetzen
- Die Allokation der Elektrolyseure im Norden war den in Szenarien sehr robust
- Robuste Netze für Strom (Verteilung und Transport) und Wasserstoff (Transport) sind insbesondere für die Erreichung sehr hoher Dekarbonisierung sehr wichtig

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!





www.langfristszenarien.de