LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Webinar Szenariovarianten TN-Strom

02.12.2021

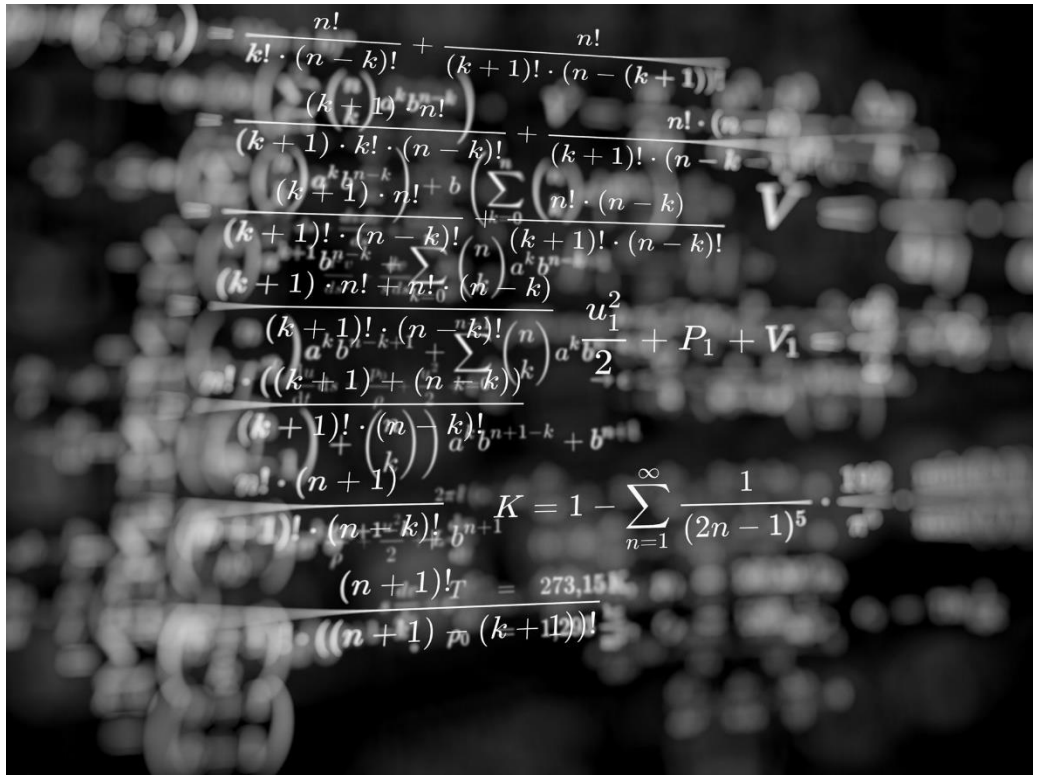
Autoren:
Sensfuß, Frank; Lux, Benjamin; Bernath, Christiane; Kiefer, Christoph; Deac, Gerda; Kleinschmitt, Christoph; Franke, Katja; Fragoso-Garcia, Joshua; Brugger, Heike; Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Herbst, Andrea; Neuwirth, Marius; Wietschel, Martin; Gnann, Till; Speth, Daniel; Krail, Michael; Mellwig, Peter; Blömer, Sebastian; Tersteegen, Bernd; Maurer, Christoph; Ladermann, Alexander; Dröscher, Tom; Willemsen, Sebastian

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

Agenda

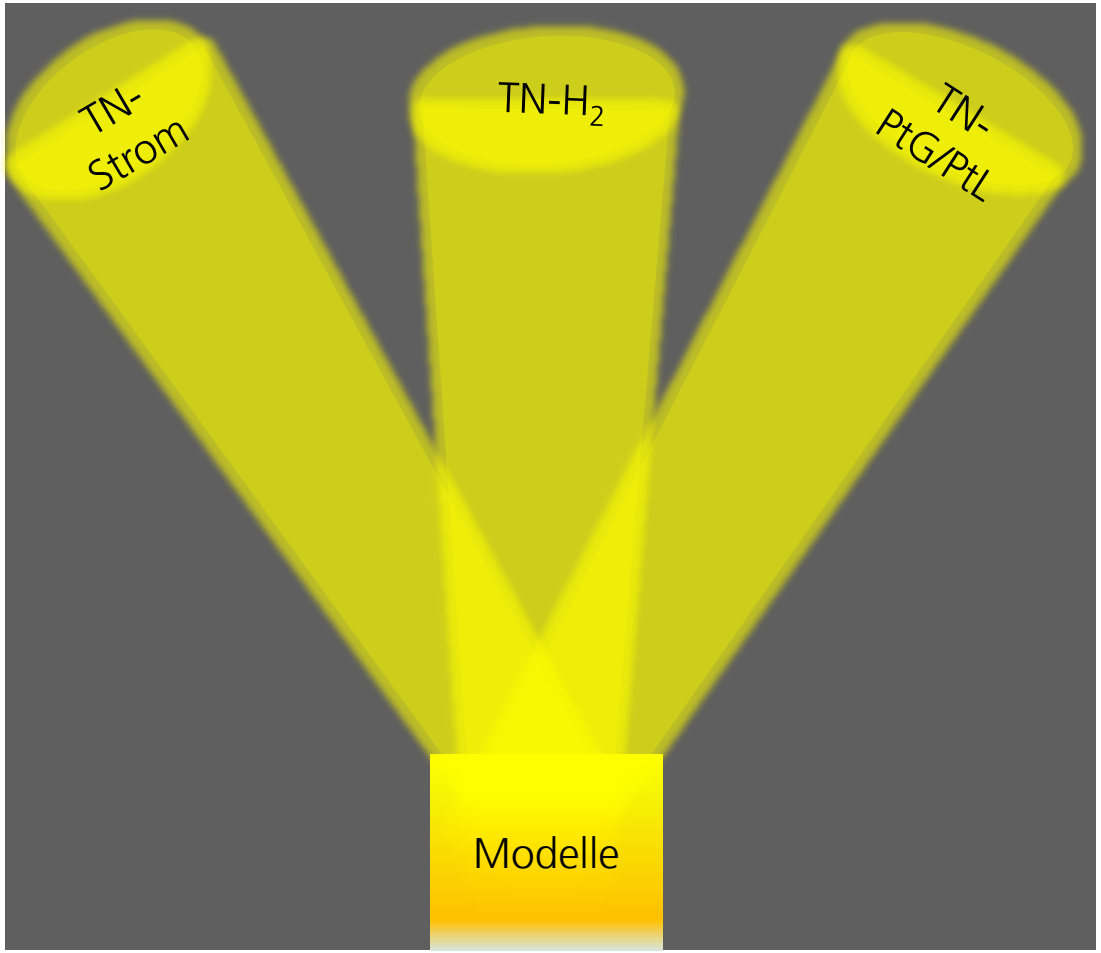
- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Stromnetze
- Gesamtperspektive & Fazit
- Diskussion

Agenda



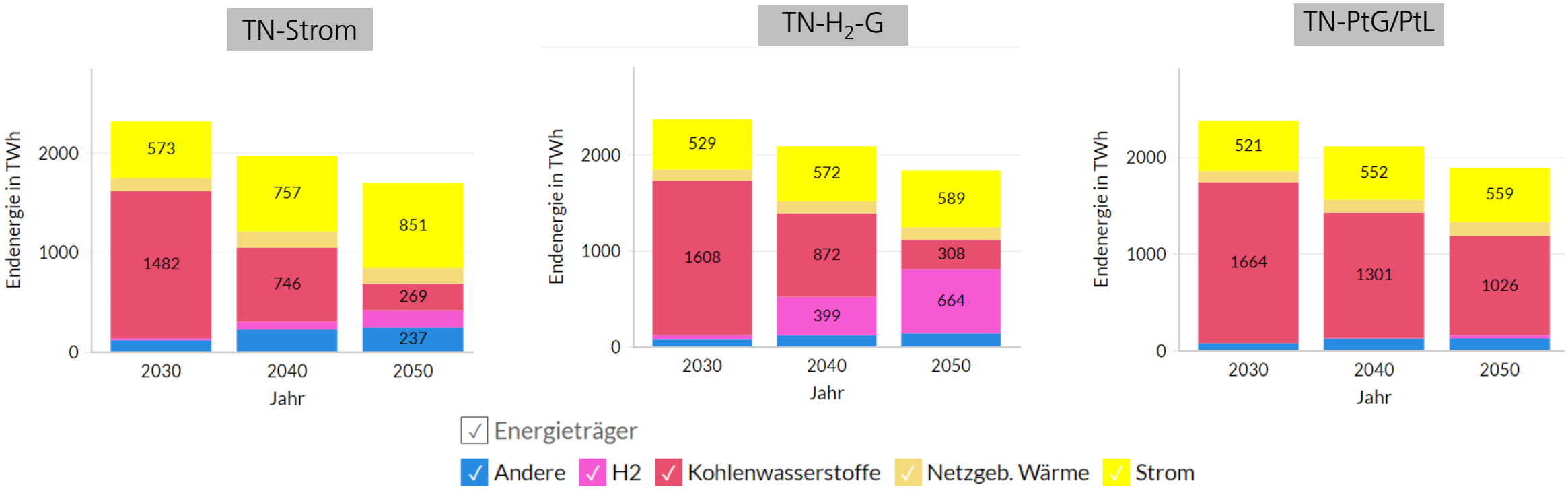
- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Stromnetze
- Gesamtperspektive & Fazit
- Diskussion

Methodik & Szenariodesign Erkenntnisgewinn durch Vergleich statt einzelnem „Leitszenario“



- **Zentrale Fragestellung:**
  - Welche techno-ökonomischen Wirkungen haben bestimmte Pfade zur Dekarbonisierung des Energiesystems?
- **Vorgehensweise:**
  - Vergleich der Dekarbonisierung des Energiesystems durch
    - sehr starken Stromeinsatz (*Szenario TN-Strom*)
    - sehr starken Einsatz von Wasserstoff (*Szenario TN-H_2*)
    - sehr starken Einsatz von synthetischen Kohlenwasserstoffen (*Szenario TN-PtG/PtL*)
  - Modellierung der Transformationspfade bis 2050 mit detaillierten bottom-up Modellen
- **Mission der Langfristszenarien:**
  - Durch ständige methodische Weiterentwicklung und eine Vielzahl von Szenarien den Lösungsraum für ein treibhausgasneutrales Energiesystem immer besser „ausleuchten“
  - Identifikation der Effekte alternativer Transformationspfade

Nachfrage nach Energieträgern der Nachfragesektoren im Zeitverlauf (inkl. stoffliche Nutzung)



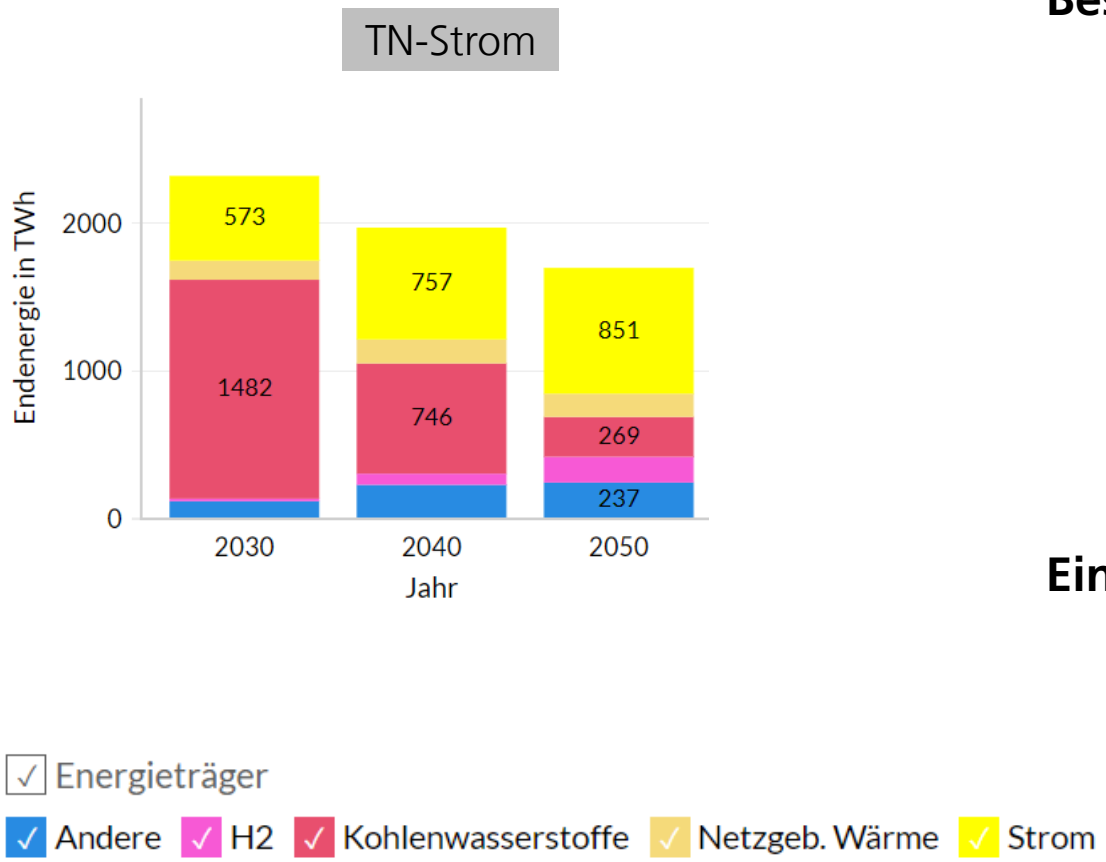
Ergebnisse

Starke Ausprägung der jeweiligen Hauptenergieträger in den entsprechenden Szenarien

Einordnung

Hier ist nur die Nachfrageseite dargestellt, zusätzlicher Strombedarf z.B. für H_2-Herstellung ist nicht erfasst

Nachfrage nach Energieträgern der Nachfragesektoren im Zeitverlauf (inkl. stoffliche Nutzung)



Beschreibung TN-Strom

- Sehr starke Stromnutzung
  - Ca. 16 Mio. Wärmepumpen (2050)
  - Ca. 31 Mio. Batteriefahrzeuge (2050)
  - Starke Stromnutzung in der Prozesswärme
- Deutliche Steigerung der Energieeffizienz in allen Sektoren
- Starker Ausbau der Erneuerbaren insbesondere der Windenergie an Land
- Starker Ausbau der Stromnetze

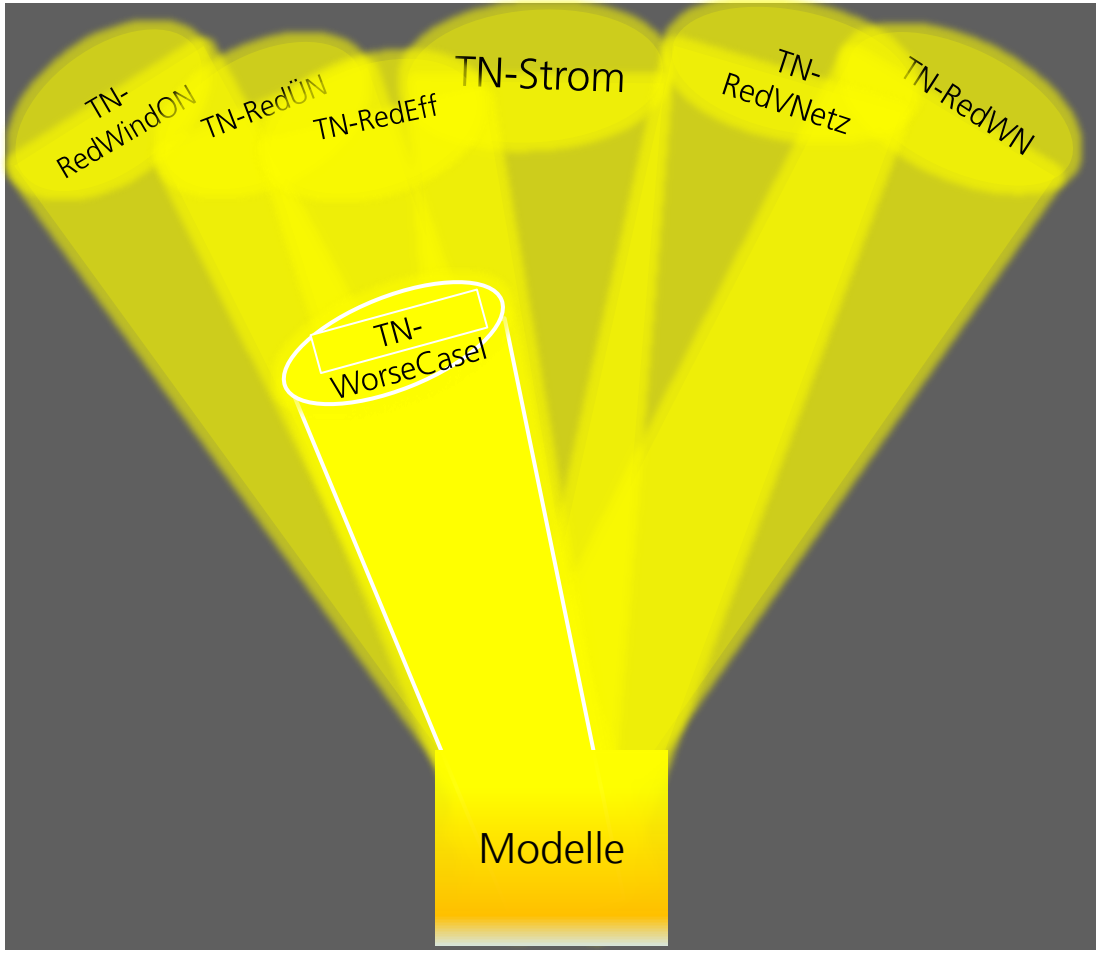
Einordnung

- Im Szenariovergleich war TN-Strom das günstigste Szenario
- Die Klimaziele 2030 und 2040 werden erreicht
- Zur Erreichung des 2045 Ziels wäre eine Beschleunigung für die Erreichung des Ergebnisses aus dem Jahr 2050 erforderlich

Fragen an die „Stromwelt“

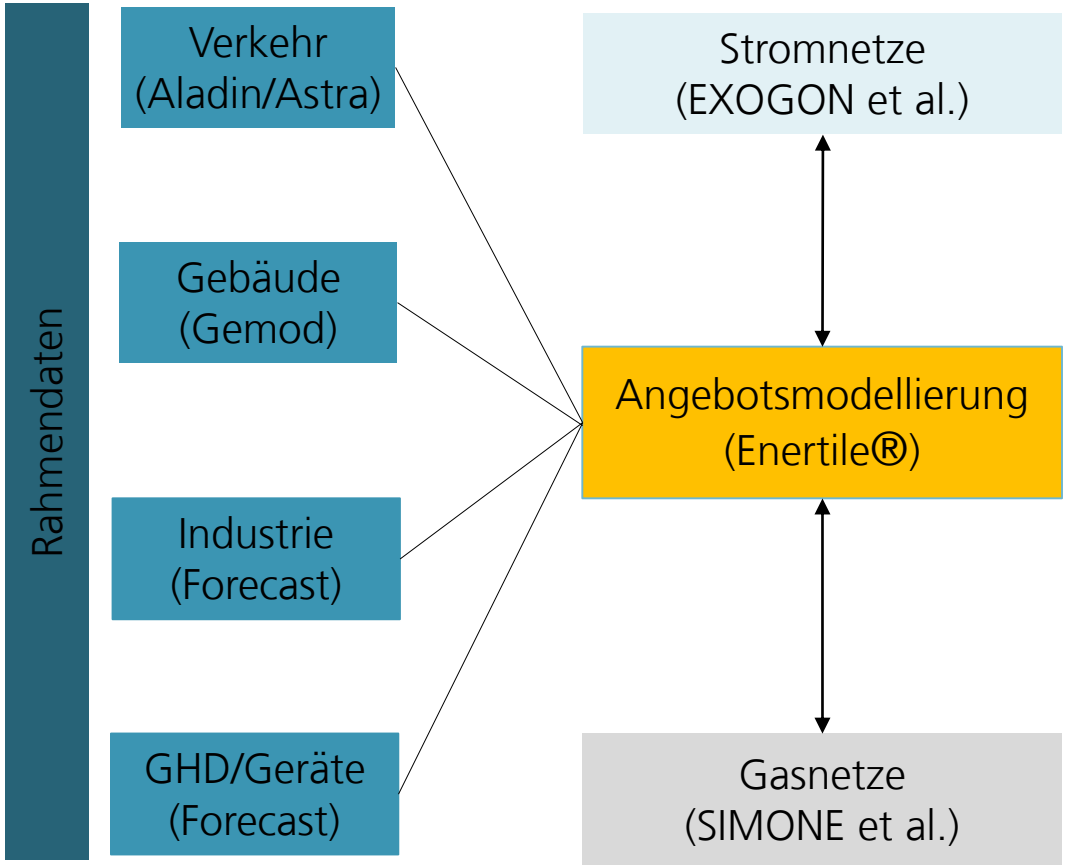
- Was passiert bei geringerer Effizienz ?
- Was passiert bei weniger Wind an Land ?
- Was passiert bei weniger Übertragungsnetz ?
- Was passiert bei einer Kombination geringer Effizienz, weniger Wind an Land und weniger Übertragungsnetz?
- Kann das Verteilnetz sinnvoll entlastet werden ?
- Was passiert bei weniger Wärmenetzen ?

Methodik & Szenariodesign
Stromwelt TN-Strom wird stärker ausgeleuchtet



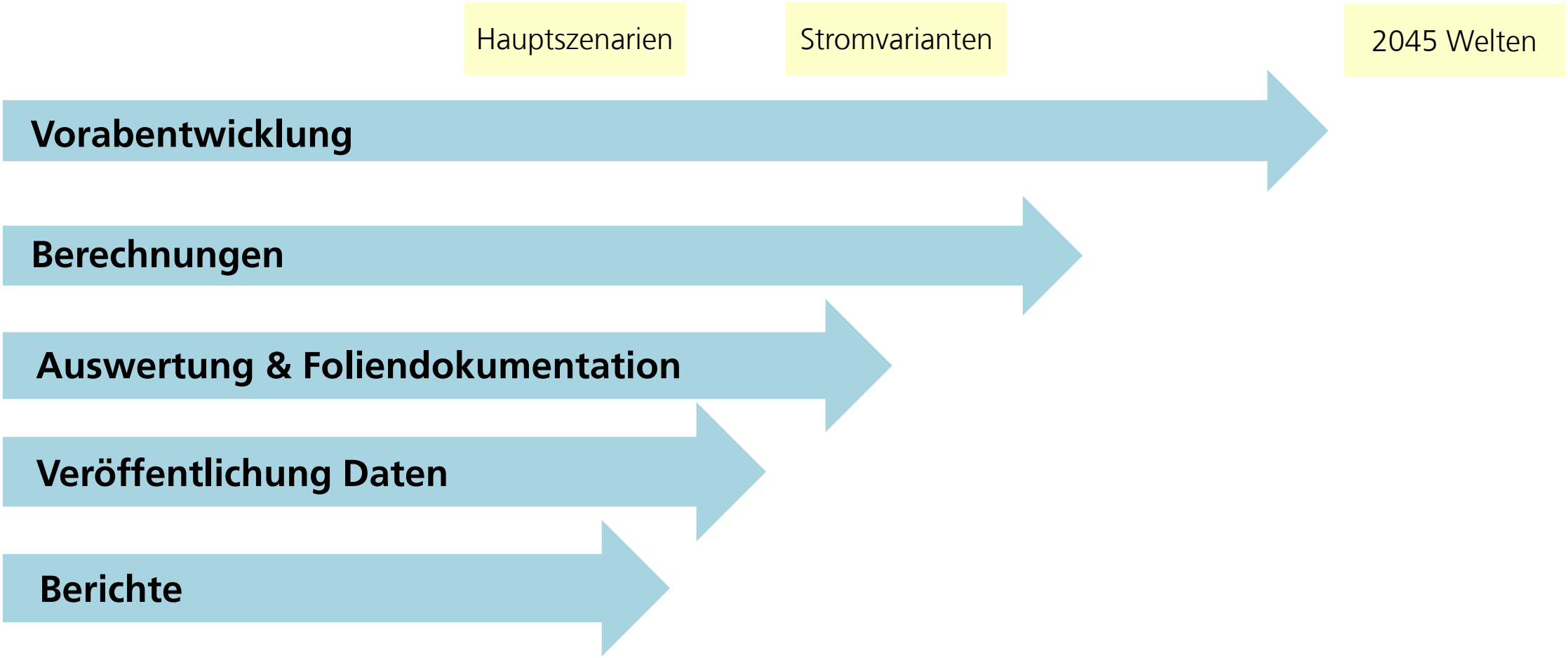
- **Zentrale Fragestellung:**
  - Welche techno-ökonomischen Wirkungen haben bestimmte Veränderungen und Einschränkungen in der Szenariowelt TN-Strom?
- **Vorgehensweise:**
  - Neurechnung **TN-Strom** mit folgenden Modifikationen
    1. Weniger Effizienz (TN-RedEff)
    2. Weniger Wind an Land (TN-RedWindOn)
    3. Weniger Übertragungsnetze (TN-RedÜN)
    4. Weniger (Kombi 1-3) (TN-WorseCaseI)
    5. Weniger Wärmenetze (TN-RedWN)
    6. Weniger Verteilnetze (TN-RedVNetz)

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
    - Beispiel Enertile (Optimierung Angebot)
      - > 130 Millionen Erzeugungsvariablen
      - Größe des Gleichungssystems > 4,4 Mio. Schreibmaschinenseiten
  - Modellkette sehr rechenintensiv und aufwändig

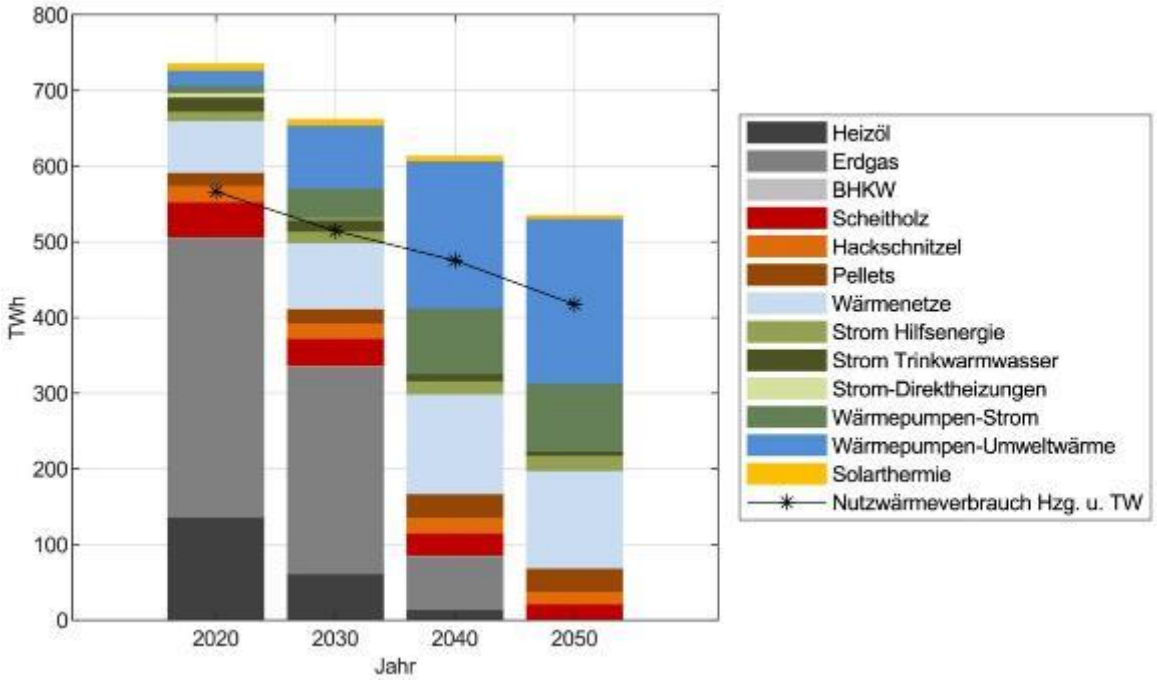
Prozesse im Projekt Langfristszenarien



Agenda

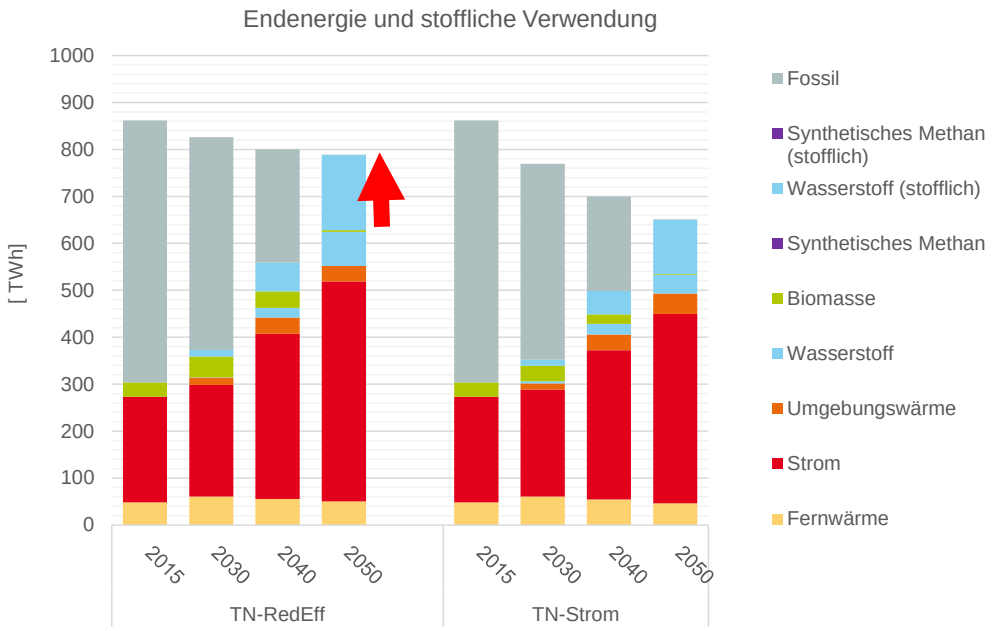
- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Stromnetze
- Gesamtperspektive & Fazit
- Diskussion

TN-RedEff - Energienachfrage Gebäude



- **Zentrale Annahmen**
  - Im Vergleich zu TN-Strom geringere Gebäudeeffizienz (-33% statt -47%), Mehrverbrauch in 2050: 96 TWh
  - Deckung des zusätzlichen Wärmeverbrauchs überwiegend mit Wärmepumpen und Wärmenetzen
- **Zentrale Ergebnisse**
  - Höherer Verbrauch → höhere Vorlauftemperaturen → geringere Effizienz der Wärmepumpen
  - Stromverbrauch 2050 steigt von 89 (TN-Strom) auf 114 TWh
  - Wärmenetzbedarf 2050 steigt von 109 (TN-Strom) auf 129 TWh
- **Schlussfolgerungen**
  - Zusätzlicher Stromverbrauch von 25 TWh erscheint realisierbar

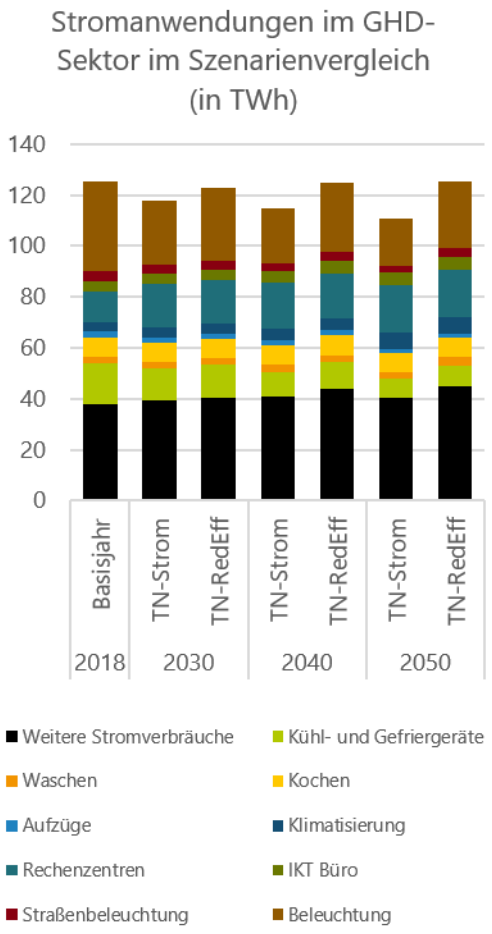
TN-RedEff - Energienachfrage Industrie

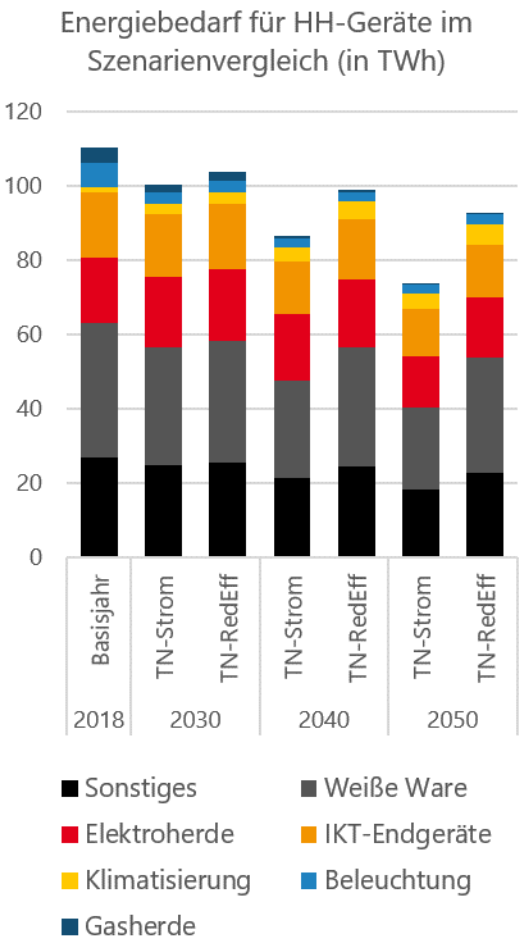


	2050		
	Energie + Stofflich	**Davon Strom**	**Davon Wasserstoff**
TN-RedEff	789	469	233
TN-Strom	652	404	156
Diff	**138**	**65**	**77**

- **Architektur des Szenarios TN-Red-Eff**
  - Grundlage: Szenario TN-Strom
  - Änderungen bei Energieeffizienz, Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft entsprechend Referenzszenario
    - TN-RedEff = Referenzszenario, „Fortschritt, heutiger Trend“
    - TN-Strom = „Beschleunigter Fortschritt“
- **Zentrale Ergebnisse TN-RedEff in 2050**
  - Summe Energieverbrauch 138 TWh höher als TN-Strom
  - Energieträgermix ähnlich wie in TN-Strom
  - Deutlicher Mehrbedarf an Wasserstoff (+77 TWh) und Strom (+65 TWh) ggü. TN-Strom
- **Schlussfolgerungen**
  - Deutliche Bandbreite beim Effizienzfortschritt, aber kein vollständig anderes Bild
  - Viele Anlagen wechseln ohnehin auf “beste verfügbare Technik“ durch den Wechsel auf neue Verfahren
  - Großer Beitrag von Materialstrategien
  - Deutlich höhere Energie- und Materialkosten

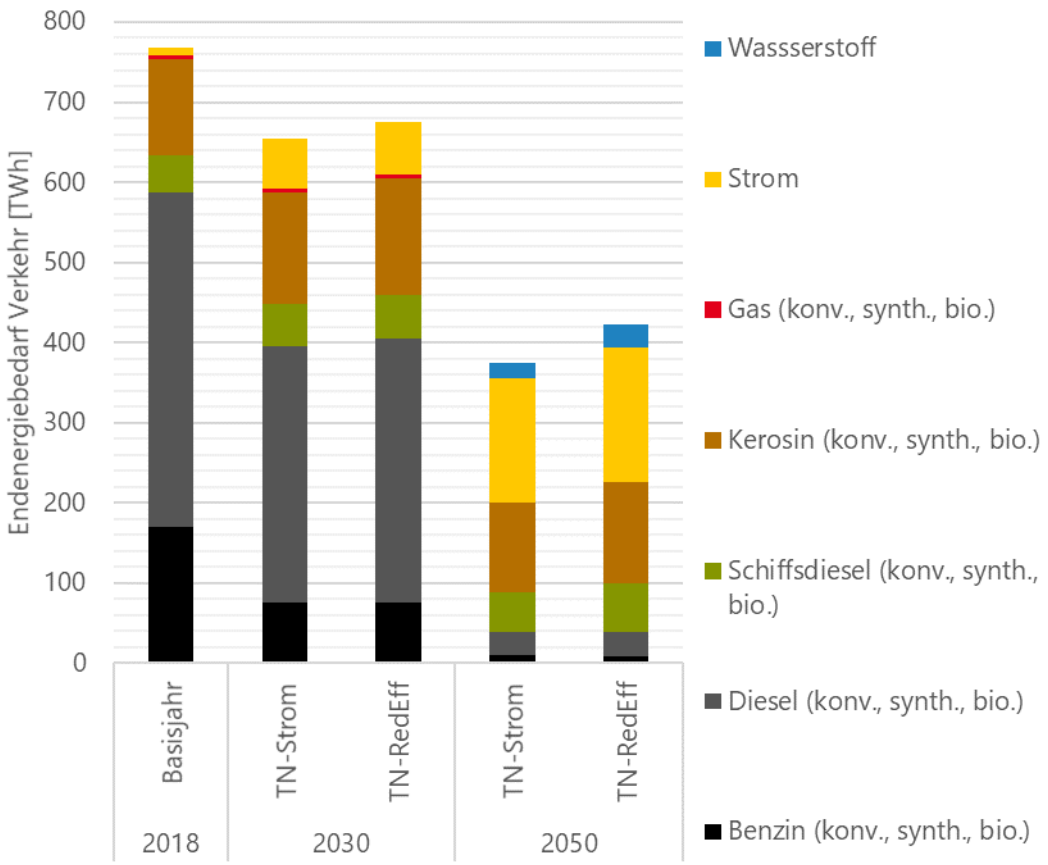
TN-RedEff - Energienachfrage GHD & Geräte





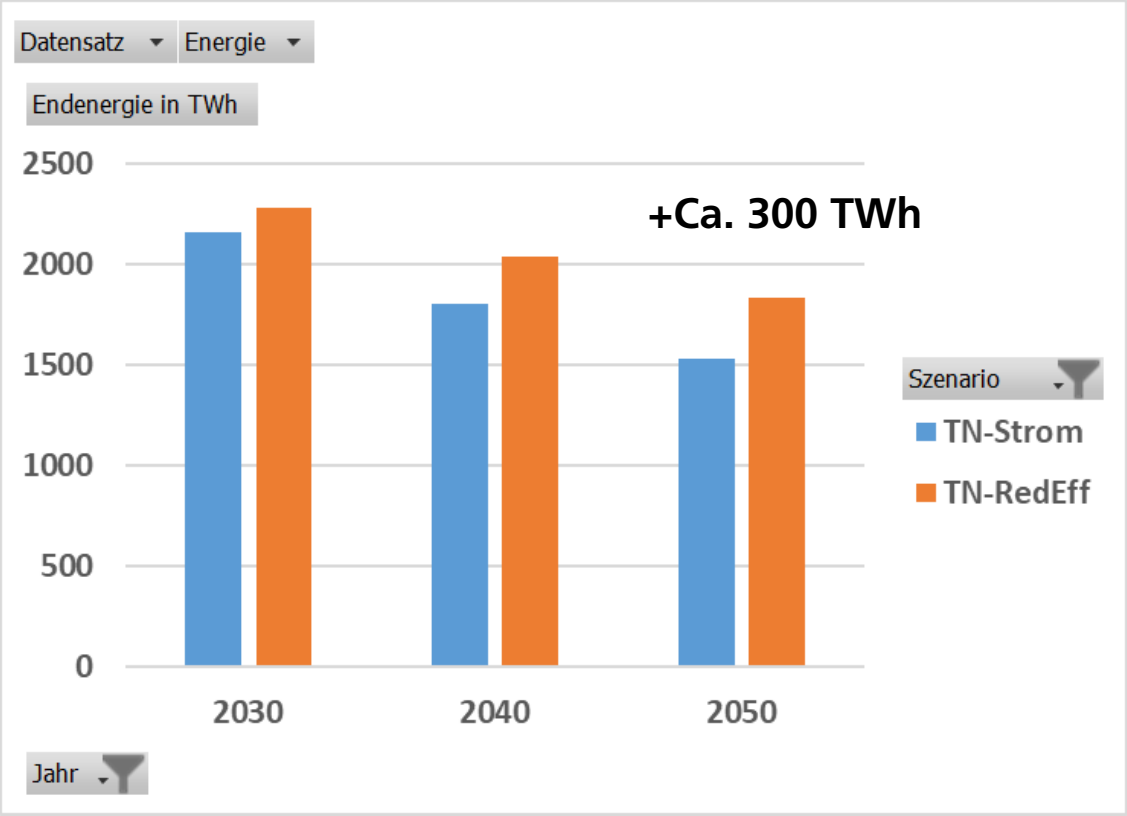
- **Zentrale Annahmen für beide Sektoren**
  - Alle Anwendungen, bei denen dies möglich ist, werden elektrifiziert
  - Die Effizienzannahmen entsprechen hierbei den derzeitigen Entwicklungen ohne verstärkte Maßnahmen
- **Zentrale Ergebnisse**
  - Der Strombedarf des GHD-Sektors im Szenario TN-RedEff liegt im Jahr **2050 13% (15 TWh)** über dem Strombedarf im Szenario TN-Strom
  - Der Gesamtenergiebedarf liegt im GHD-Sektor im Szenariovergleich 16% (20TWh) höher
  - Größere Differenzen entstehen insbesondere durch den verstärkten Einsatz nicht hocheffizienter Elektromotoren sowie durch die Elektrifizierung der Prozesswärme ohne verstärkte Effizienzmaßnahmen
  - Der Strombedarf für Haushaltsgeräte liegt im Szenario TN-RedEff im Jahr **2050 26% (19 TWh)** über dem Strombedarf im Szenario TN-Strom
- **Schlussfolgerungen**
  - Erhebliche Effizienzpotentiale, die durch die Elektrifizierung entstehen, werden im Szenario TN-RedEff nicht genutzt
  - Haushaltsgeräte sind durch schnelle technologische Fortschritte sowie eine vergleichsweise kurze Nutzungsdauer gekennzeichnet. Dies bietet Effizienzpotentiale, welche im TN-RedEff nicht ausreichend genutzt werden (insb. beim sonstigen Strom und der Weißen Ware)

TN-RedEff - Energienachfrage Verkehr
Endenergiebedarf steigt um 12%



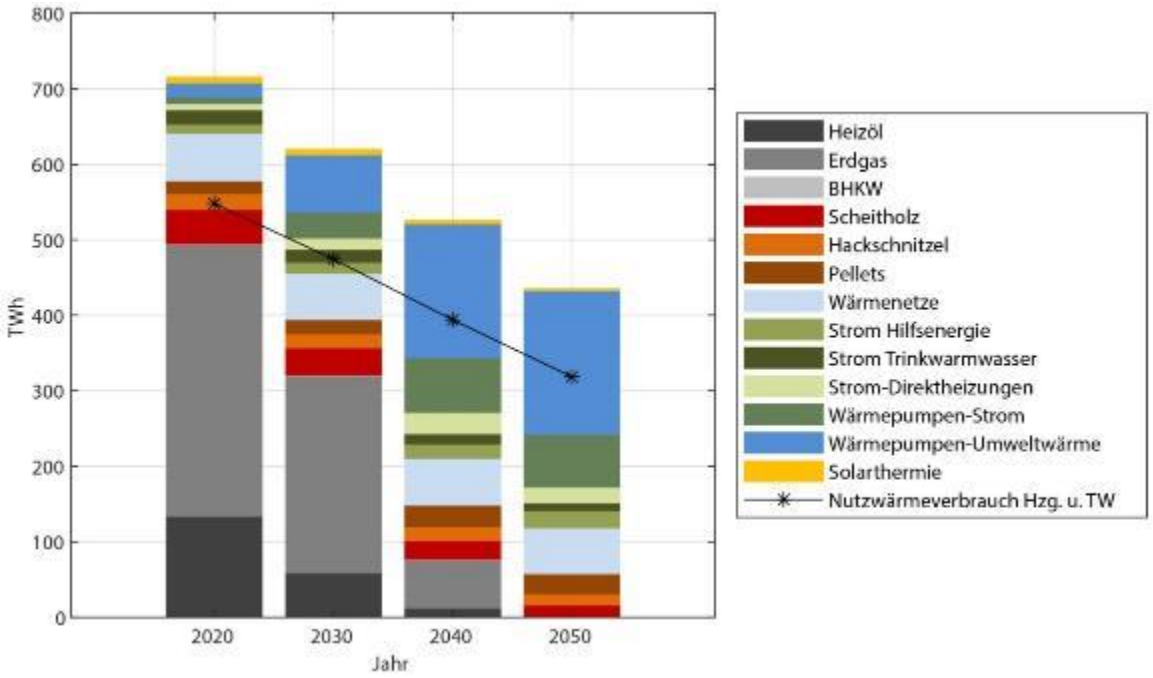
- **Zentrale Annahmen**
  - Unterstellte Effizienzsteigerung des Szenarios *TN-Strom* wird für alle Antriebsalternativen halbiert
- **Zentrale Ergebnisse**
  - Anstieg Energiebedarf 2050 ggü. *TN-Strom*: +12 % (47 TWh)
  - Anstieg Strombedarf 2050 ggü. *TN-Strom*: +8 % **(13 TWh)**
  - Endenergiebedarf für Pkw steigt um 10 %, Nfz um 8 %, andere Verkehrsmittel um 17 %
- **Schlussfolgerungen**
  - Geringer Einfluss bei straßengebundenen Verkehr, da elektrische Lösungen weiterhin dominieren und nur in geringem Umfang mehr FCEV (niedrigere Effizienz bei Batterie-Fz. führt zu geringerer Reichweite)
  - Deutlicher Anstieg des Energiebedarfs bei internationaler Schiff- und Flugfahrt aufgrund
    - hoher unterstellter Effizienzsteigerungen im Szenario *TN-Strom* sowie
    - fehlender elektrischer oder wasserstoffbasierter Antriebsalternativen

Endenergienachfrage
Deutliche Auswirkung der geringeren Effizienz



- **Zentrale Ergebnisse**
  - Endenergiebedarf steigt gegenüber TN-Strom deutlich an
    - Endenergie 2050 (Ca. +300 TWh)
      - Strom 2050 (Ca. +140 TWh)
      - Wasserstoff 2050 (ca. + 40 TWh)
      - Fernwärme (Ca. +25 TWh)
      - Kohlenwasserstoffe (Ca. + 70 TWh)
      - Andere (Ca. + 25 TWh)
- **Schlussfolgerungen**
  - Es kommt zu einem deutlichen Anstieg der Endenergienachfrage. Potentiale für Biomasse reichen nicht mehr aus.

TN-RedWN - Energienachfrage Gebäude

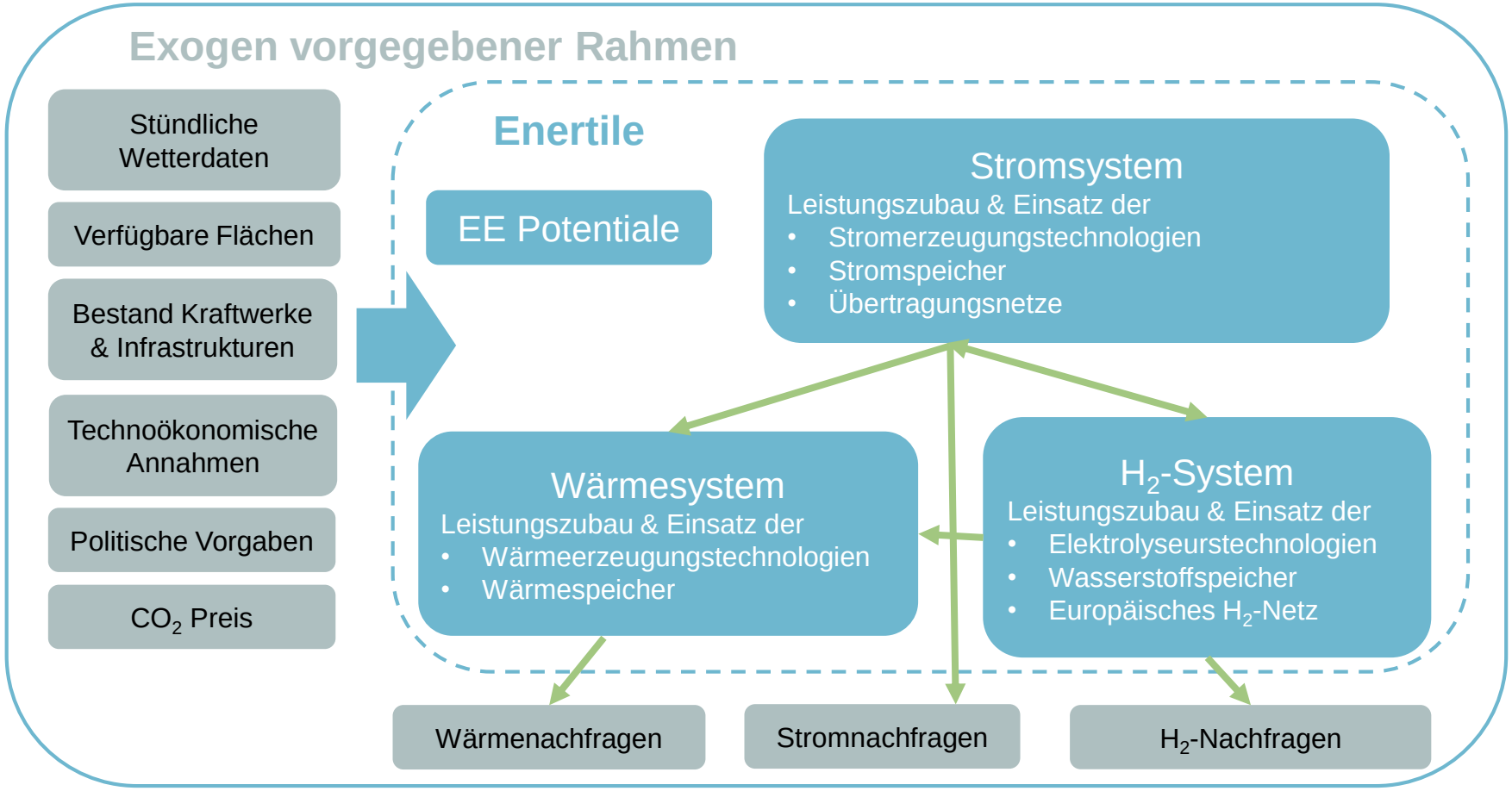


- **Zentrale Annahmen**
  - Im Vergleich zu TN-Strom geringerer Wärmenetzausbau, Wärmemenge bleibt wie in 2020 **(2050: 61 statt 109 TWh)**
  - Wärmepumpen können den zusätzlichen Wärmebedarf nicht vollständig decken (Restriktionen)
- **Zentrale Ergebnisse**
  - Der zusätzliche Wärmebedarf wird fast zur Hälfte mit direktelektrischen Heizungen gedeckt
  - Gesamter Stromverbrauch steigt von 89 (TN-Strom) auf **118 TWh**
- **Schlussfolgerungen**
  - Wenn die Potenziale von Wärmepumpen und Biomasse-heizungen ausgeschöpft sind, können Wärmenetze nur durch ineffiziente Technologien ersetzt werden

Agenda

- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Stromnetze
- Gesamtbilanzen
- Diskussion

Enertile – Überblick Modellierung

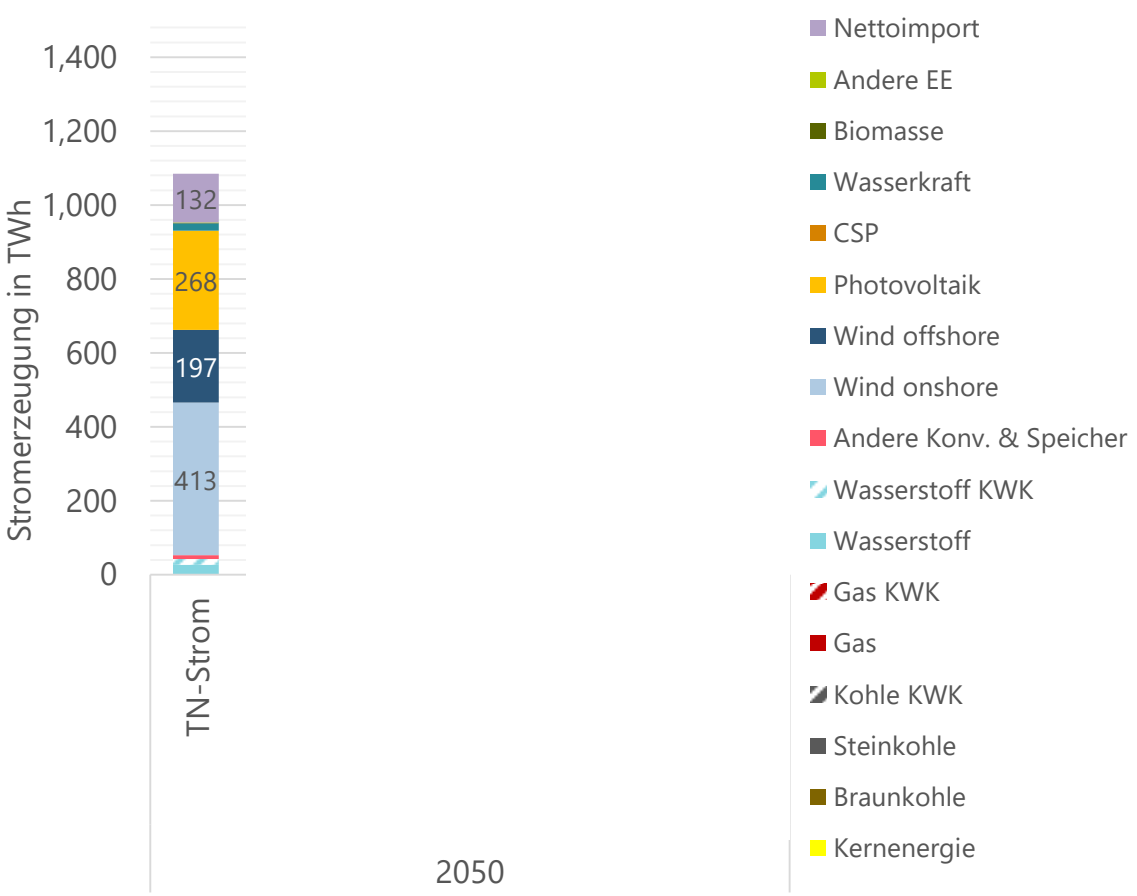


- **Ziel:**
  - Kosteneffiziente Deckung vorgegebener Energienachfragen in jeder betrachteten Stunde und Region.
- **Lösungsansatz:**
  - Simultane Kostenoptimierung des Zubaus und Einsatzes von Kraftwerken, KWK, erneuerbaren Energien, Kuppelkapazitäten, Speichern, Wärmepumpen, Elektrolyseuren, etc.
  - Abbildung von Europa für 2030, 2040 und 2050 in stündlicher Auflösung.
  - Abbildung der MENA-Region für den Import strombasierter Energieträger.

Strombereitstellung
Welche Effekte beeinflussen das Stromsystem?

- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
  - Strom
  - Wasserstoff
  - Wärmenetze
- Stromnetze
- Gesamtbilanzen
- Diskussion

Strombereitstellung – Deutschland 2050
Ausgangspunkt TN-Strom



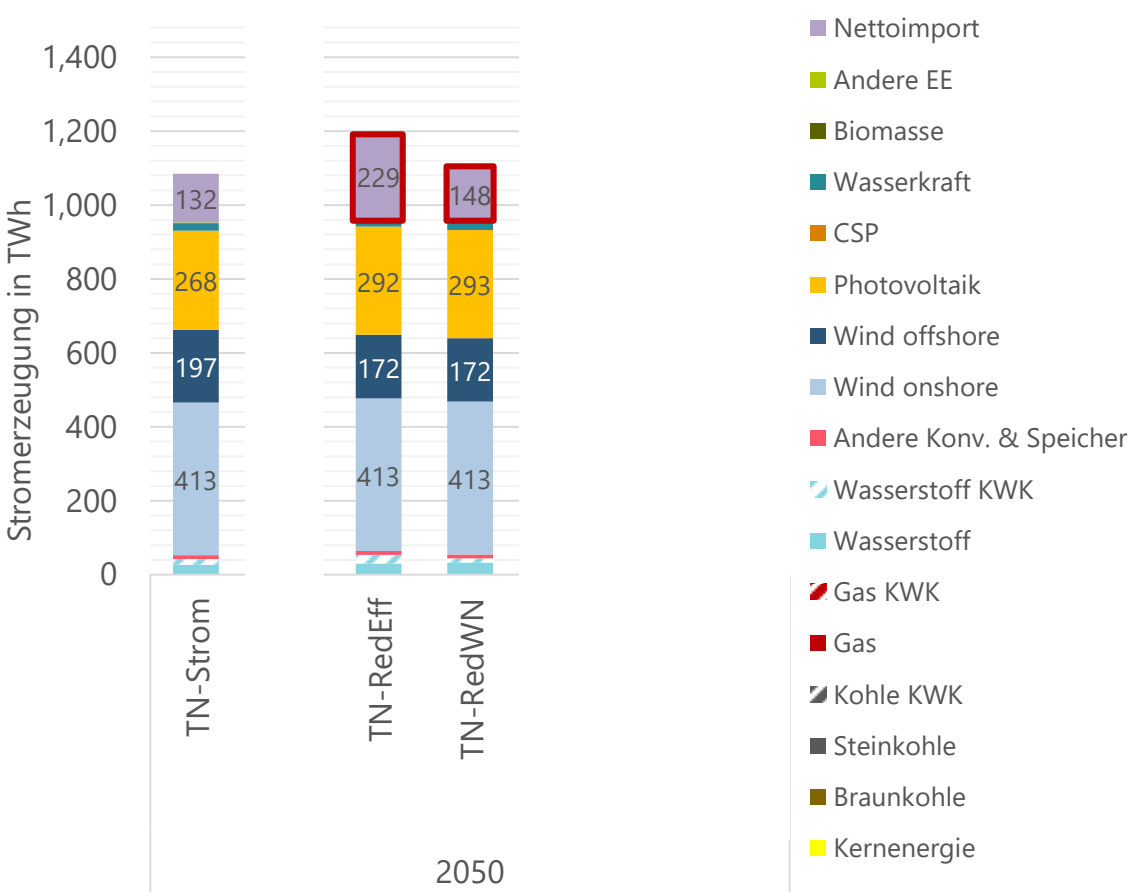
- Stromerzeugung im Zieljahr 2050
  - ca. 950 TWh
  - vollständig durch erneuerbare Energien: unmittelbar und mittelbar durch grünen Wasserstoff
- Erneuerbare Energien
  - dominieren den Strommix ab 2030
  - Potentiale für Wind an Land und PV Freifläche werden vollständig gehoben
  - Installierte Leistungen 2050
    - PV 289 GW
    - Wind an Land 155 GW
    - Wind auf See 45 GW
- Stark reduzierte Rolle der KWK
- Steigende Stromimporte ab 2030

enertile

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

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

Strombereitstellung – Deutschland 2050
Erhöhte Stromnachfragen erhöhen die Importe



- Die europäische Kooperation in der Strombereitstellung ist wichtig.
  - Erhöhte Stromnachfragen werden durch Importe ausgeregelt.

Zentrale Annahmen TN-RedEff

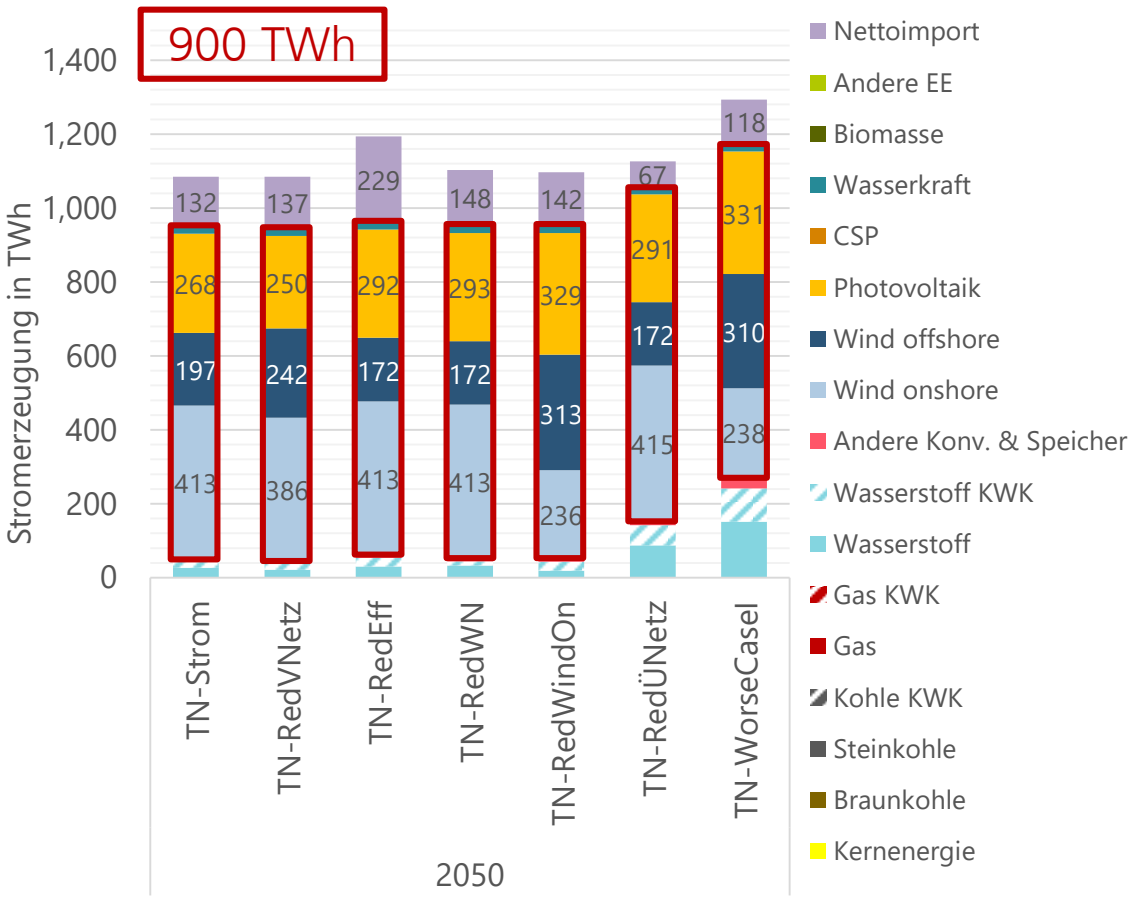
- Erhöhte Energienachfrage in Deutschland
  - + 140 TWh Strom
  - + 25 TWh Wärme in Wärmenetzen
  - + 85 TWh Wasserstoff (inkl. stoffliche Nutzung)
- Energienachfrage außerhalb Deutschlands unverändert.

Zentrale Annahmen TN-RedWN

- Wärmenachfrage in Wärmenetzen sinkt um 50 TWh_{th} und wird hauptsächlich durch elektrische Heizverfahren (+30 TWh_{el}) ersetzt.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

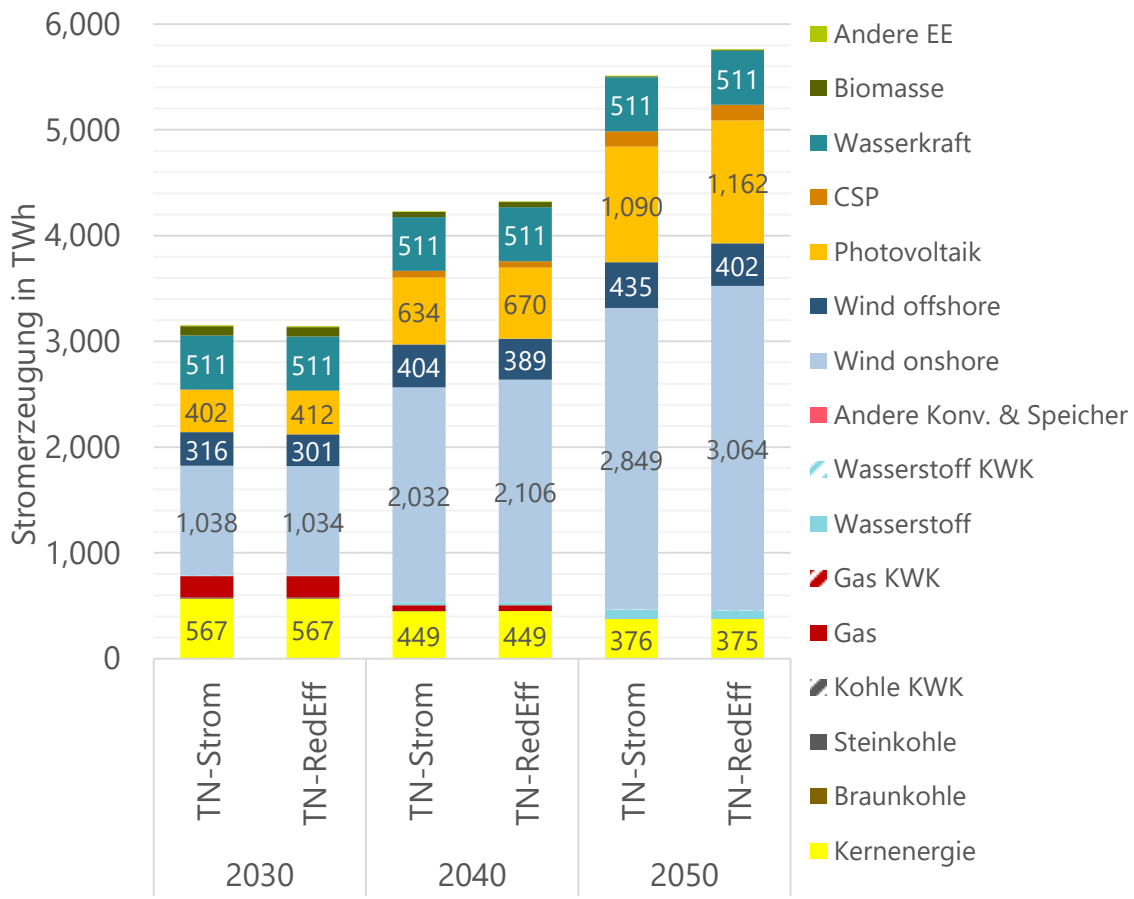
Strombereitstellung – Deutschland 2050
Erhöhte Stromnachfragen erhöhen die Importe



- Die europäische Kooperation in der Strombereitstellung ist wichtig.
  - Erhöhte Stromnachfragen werden durch Importe ausgeregelt.
  - Die Mindesterzeugung aus erneuerbaren Energien von 900 TWh in Deutschland wird in keinem Szenario übertroffen.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

Strombereitstellung – Europa 2050 (ohne Deutschland) Erhöhte Stromerzeugung durch dt. Nachfrageerhöhung

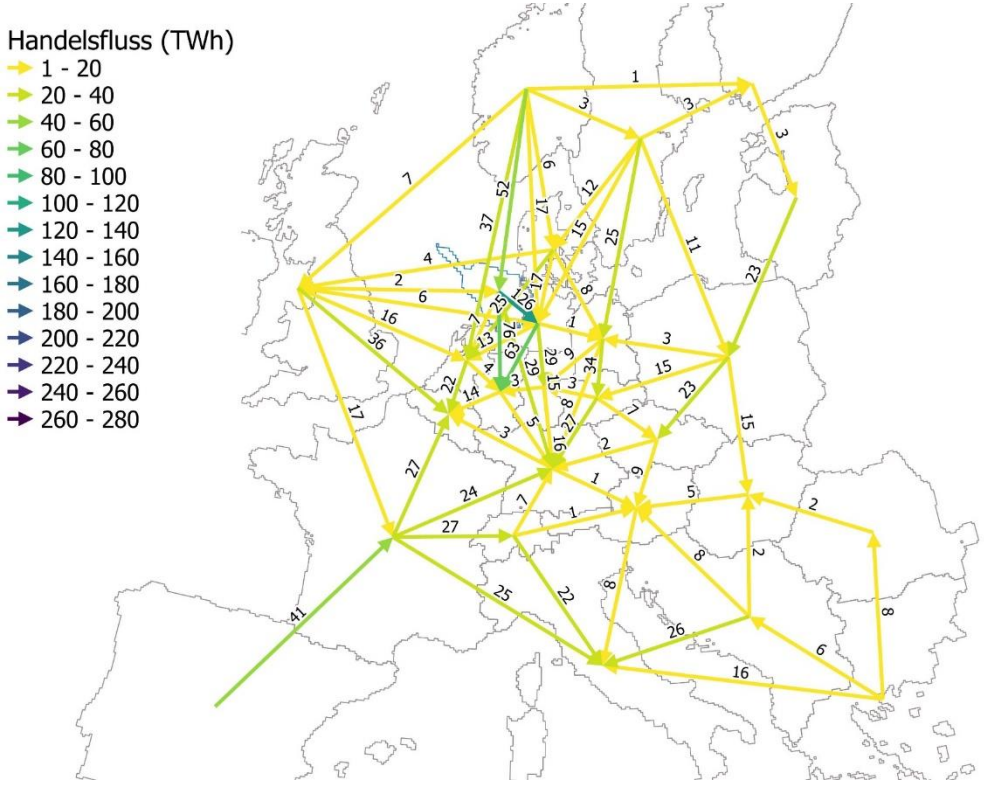


- Einordnung: Erhöhter Energiebedarf durch geringere Effizienz lediglich in Deutschland.
- Zusätzliche deutsche Energienachfrage erhöht die europäische erneuerbare Stromerzeugung außerhalb Deutschlands in 2050:
  - PV + 72 TWh
  - Wind an Land + 215 TWh
  - Wind auf See - 33 TWh

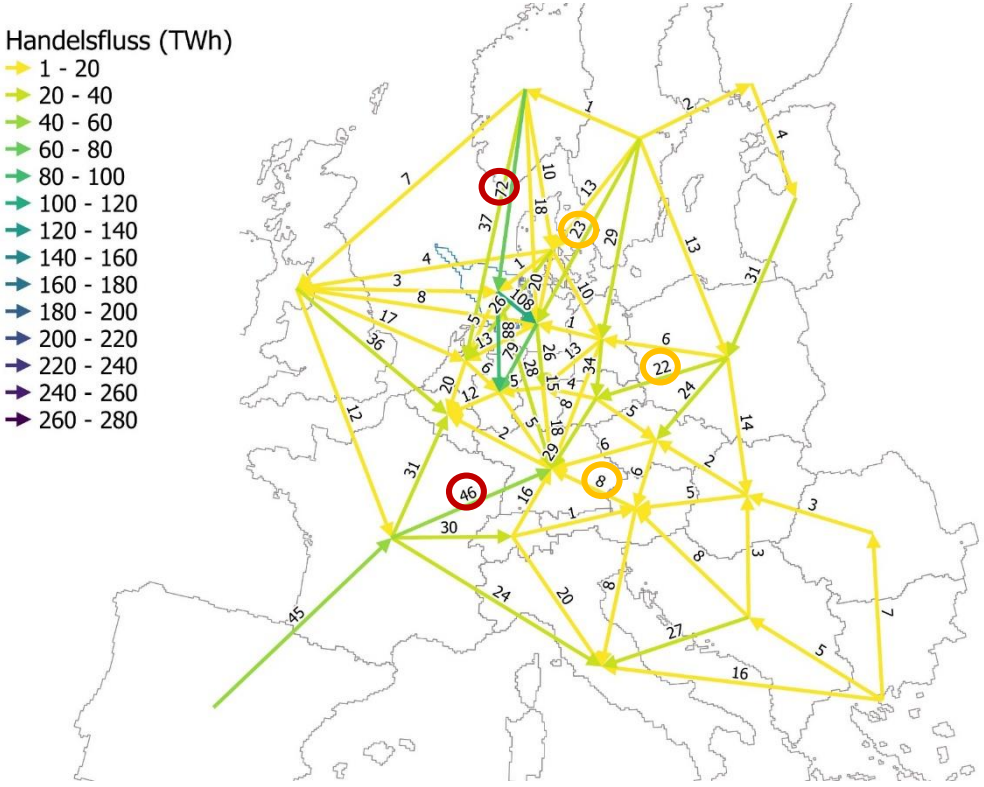
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Strombereitstellung – Europa 2050
Erhöhter Stromhandel durch dt. Nachfrageerhöhung

TN-Strom

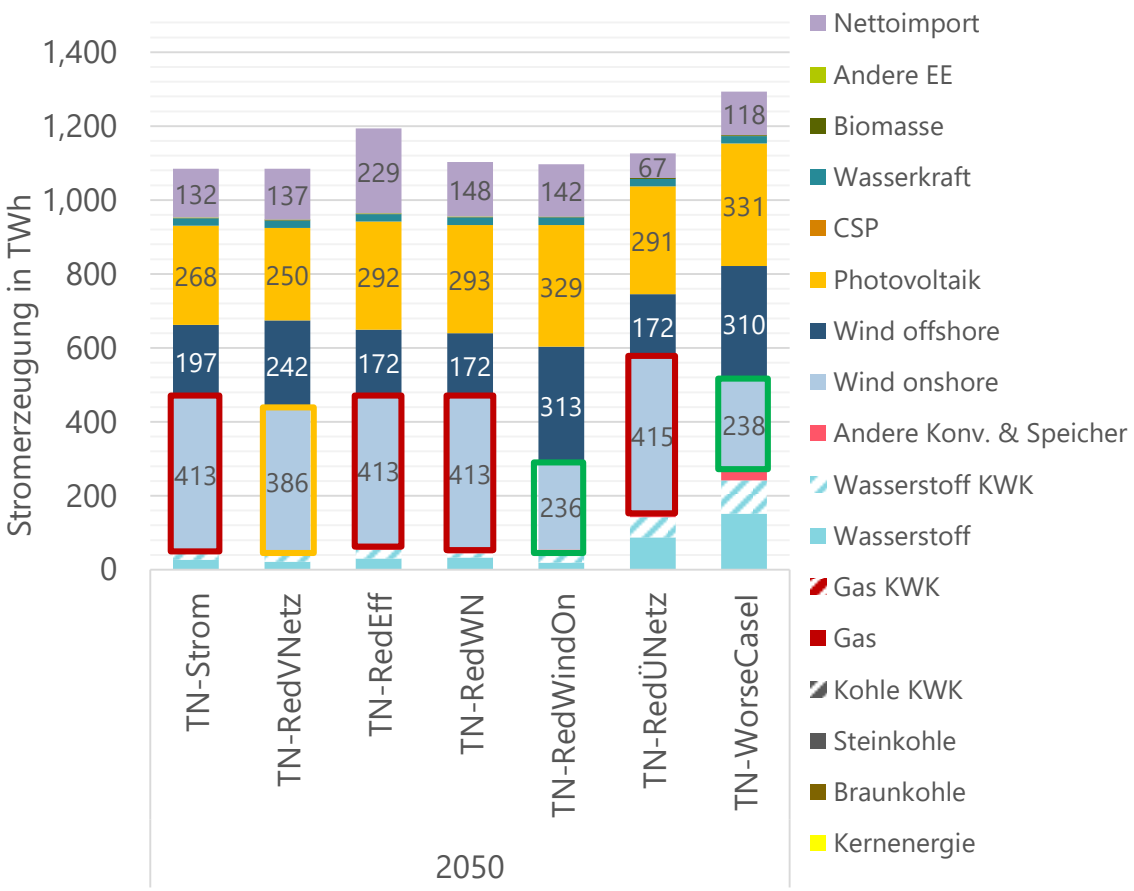


TN-RedEff



Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Strombereitstellung – Deutschland 2050
Wind an Land ist die wichtigste Erzeugungstechnologie



- Die europäische Kooperation in der Strombereitstellung ist wichtig.
- Wind an Land ist die wichtigste Technologie in Deutschland.

Zentrale Annahme TN-RedWindOn

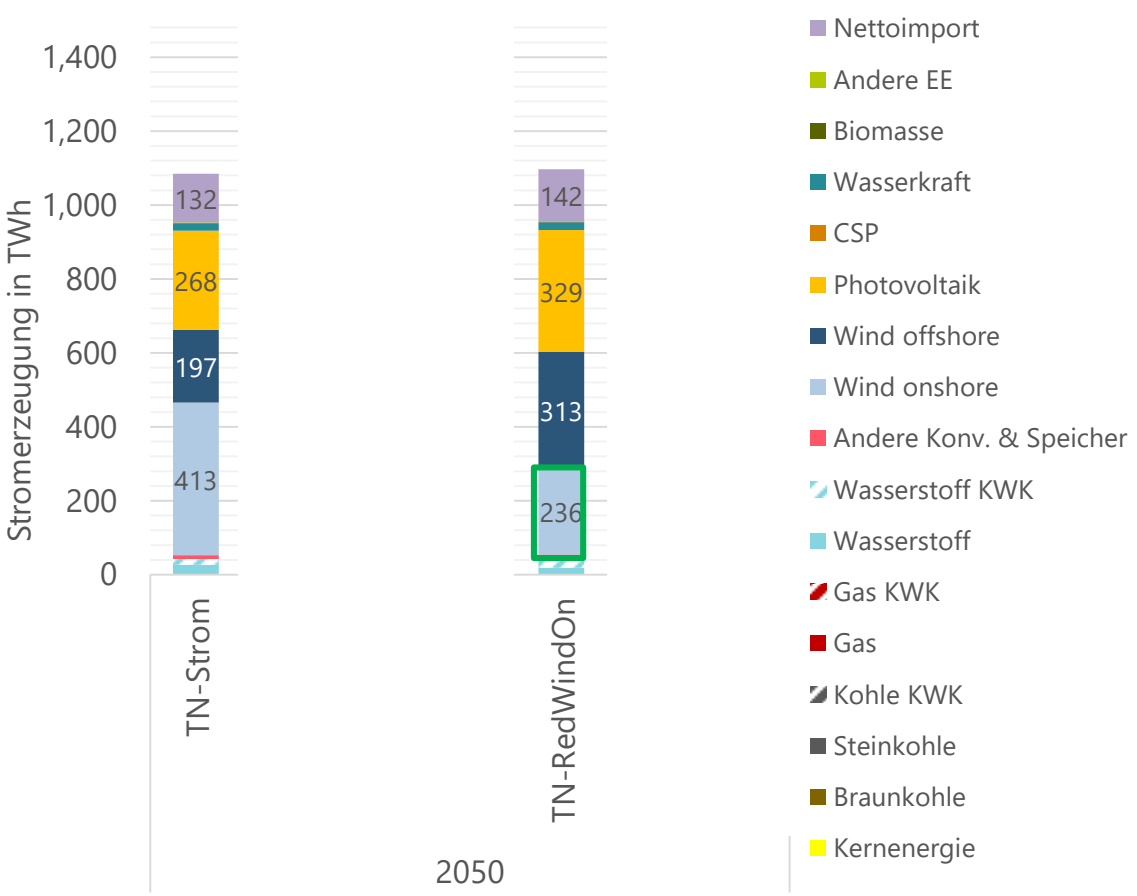
- Erzeugungspotentiale der Windenergie an Land fast halbiert.

Zentrale Annahme TN-RedVNetz

- Anhebung der Spitzenkappung bei Wind an Land und PV von 3% auf 9%.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

Strombereitstellung – Deutschland 2050
Wind an Land ist die wichtigste Erzeugungstechnologie



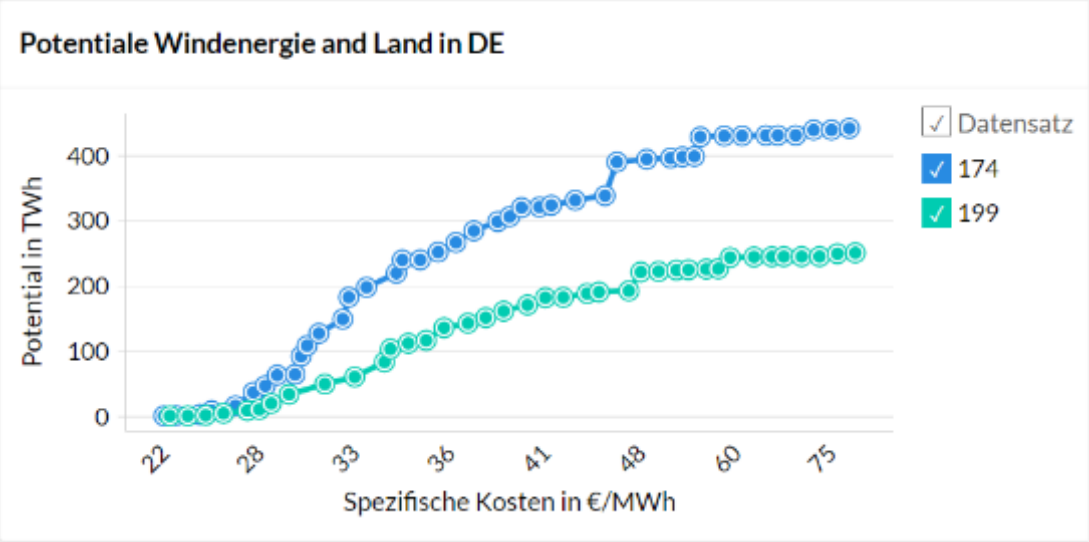
- Die europäische Kooperation in der Strombereitstellung ist wichtig.
- Wind an Land ist die wichtigste Technologie in Deutschland. Ausbauhemmnisse führen zur Ausschöpfung der verbleibenden erneuerbaren Potentiale.
  - PV 359 GW (+70 GW)
  - Wind an Land 92 GW (-63 GW)
  - Wind auf See 72 GW (+27 GW)

Zentrale Annahmen TN-RedWindOn

- Erzeugungspotentiale der Windenergie an Land fast halbiert.

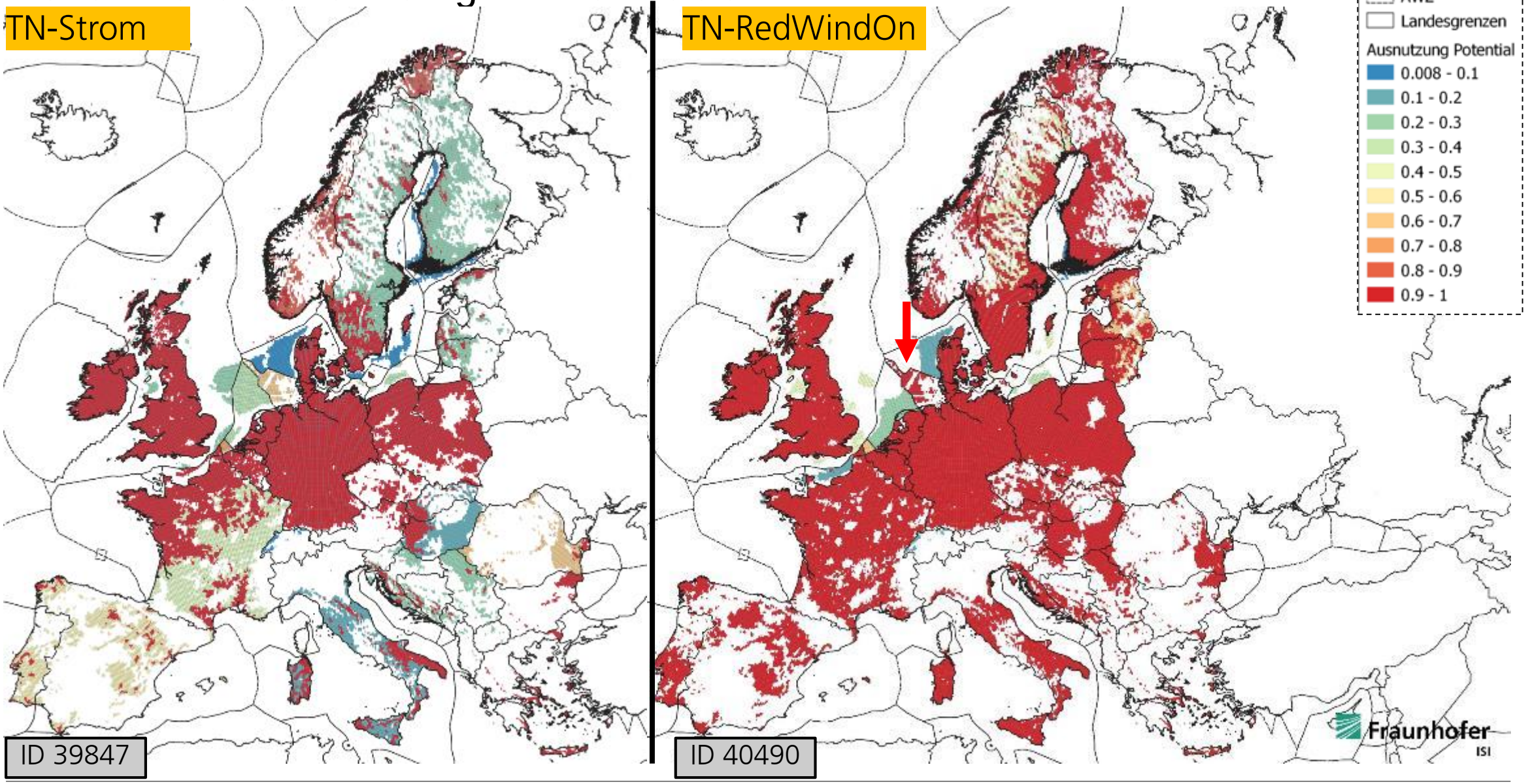
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Potentiale Windenergie an Land „Weniger Wind“ TN-RedWindOn



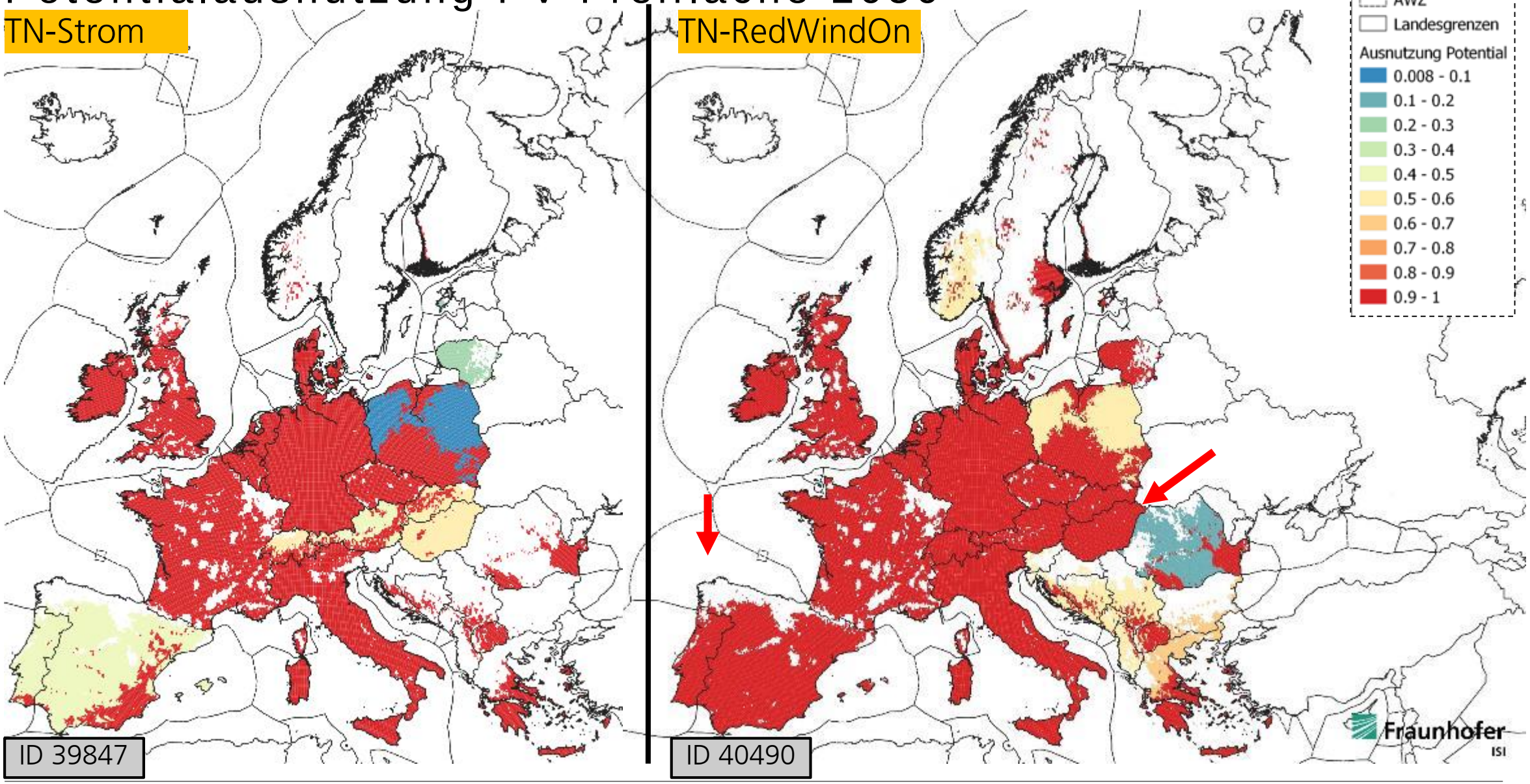
- **Zentrale Annahmen**
  - Halbierung aller Landnutzungen (außer Grasland)
  - Bei Grasland Reduzierung auf von 30% auf 10%, um die Potentiale in UK zu senken
  - Verdichtung des Anlagenbesatzes bei höheren Parkverlusten
- **Zentrale Ergebnisse**
  - Erzeugungspotentiale der Windenergie an Land in Deutschland fast halbiert.

Potentialausnutzung Wind 2050



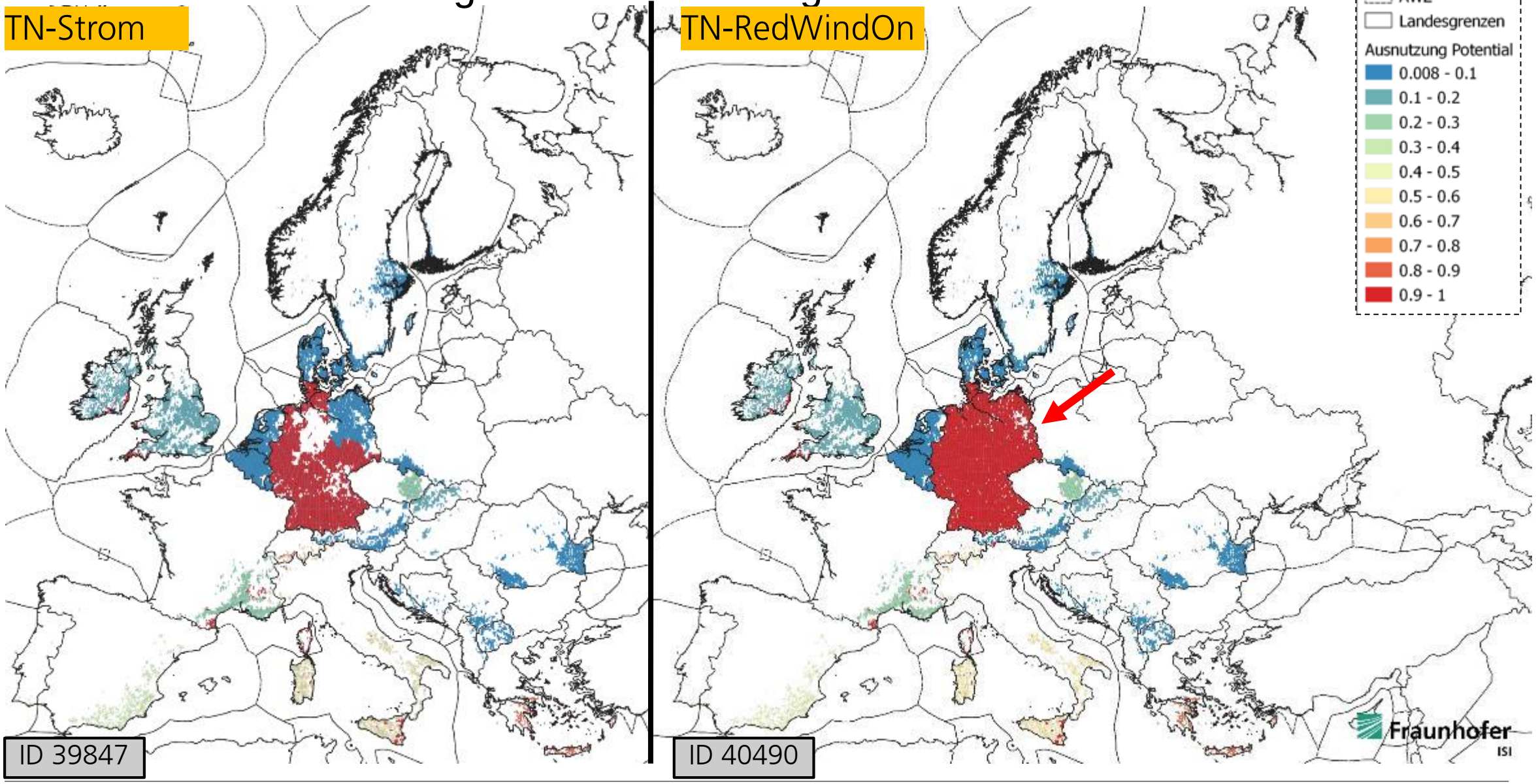
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Potentialausnutzung PV Freifläche 2050



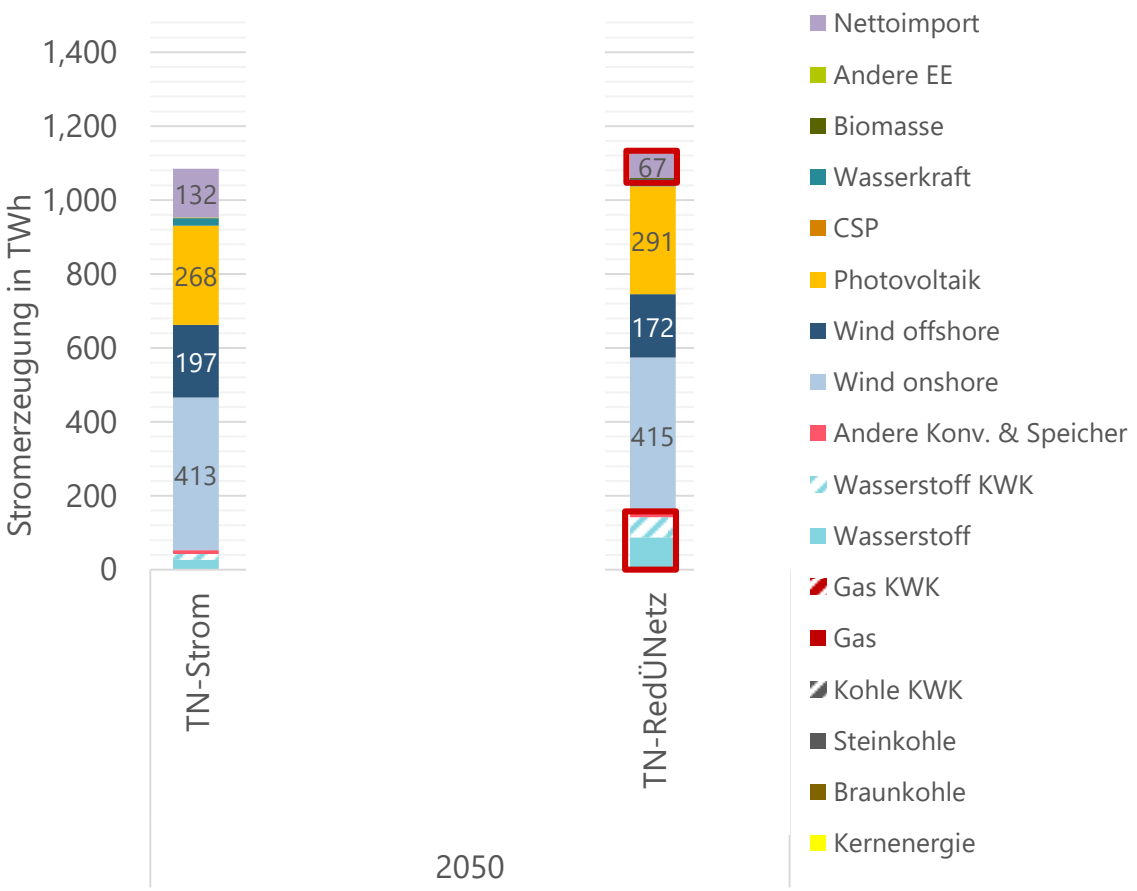
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Potentialausnutzung PV Dachanlagen 2050



Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Strombereitstellung – Deutschland 2050
Übertragungsnetz wichtige Flexibilitätsoption



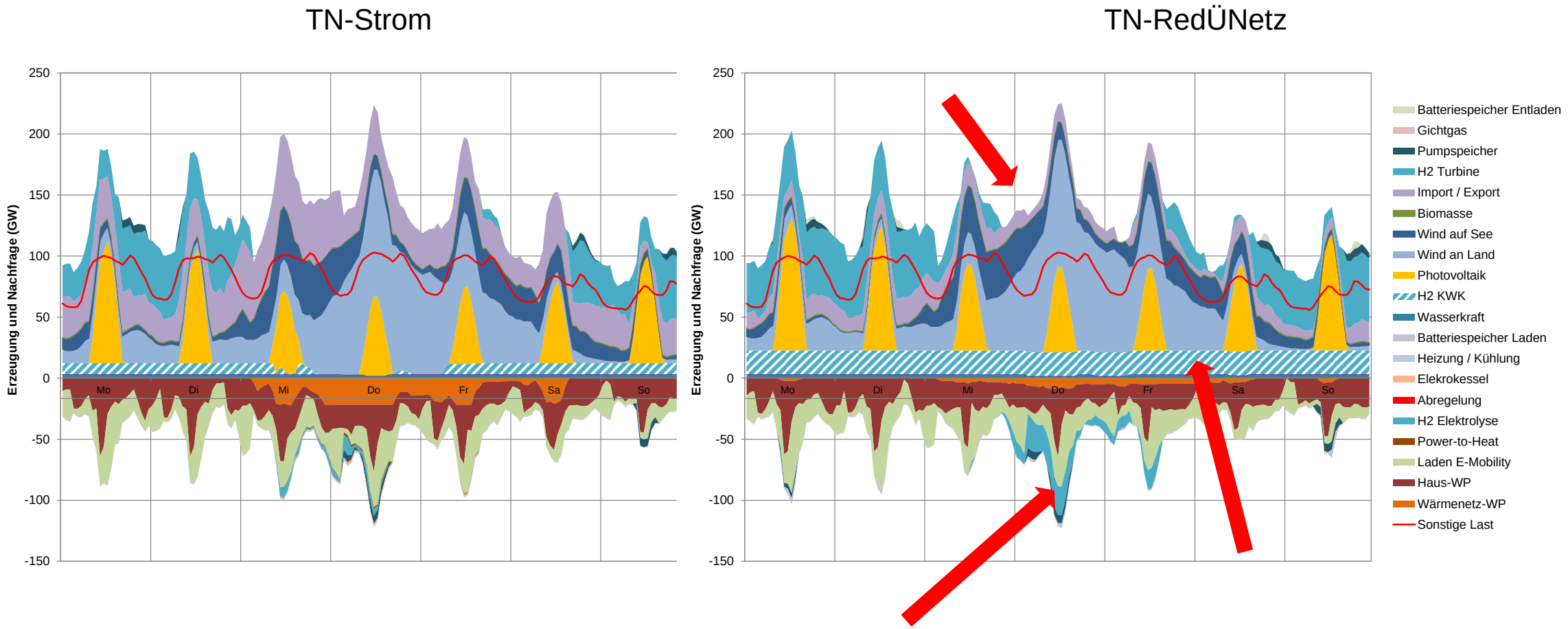
Zentrale Annahmen TN-RedÜNetz

- Geplante Netzausbauprojekte werden mit Verzögerung umgesetzt und exogen in Enertile gesetzt.
- Kein modellendogener Übertragungsnetzausbau in Enertile.

- Das ausgebaute Übertragungsnetz ist ein wichtiger Flexibilitätsgeber.
  - Beschränkter Übertragungsnetzausbau führt zu reduziertem Nettostromimport ab 2040.
  - Flexibilitätsbedarf steigt deutlich an. In 2050:
    - Batteriespeicher + 7 GW
    - Elektrolyse + 20 GW
    - Wasserstoffkraftwerke + 15 GW
  - Größere Rolle der Wasserstoff-KWK

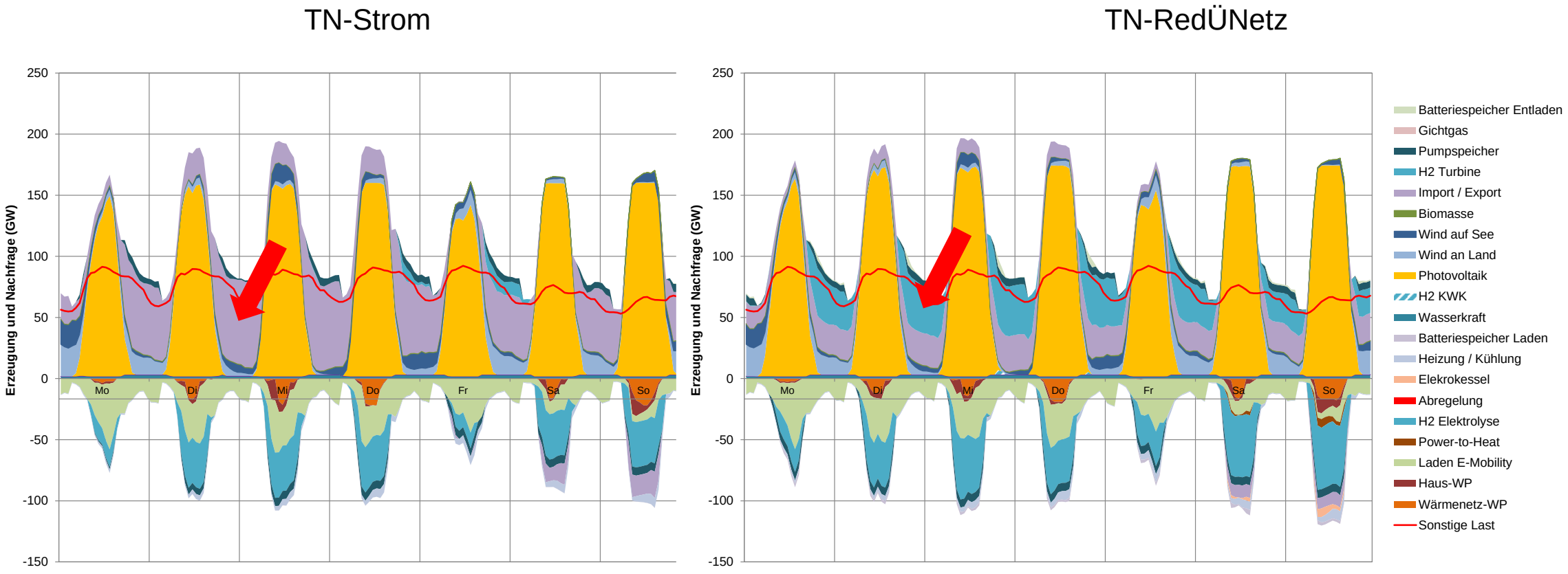
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Strombereitstellung – Flexibilitätsbereitstellung H2 Dispatch 2050 KW 5



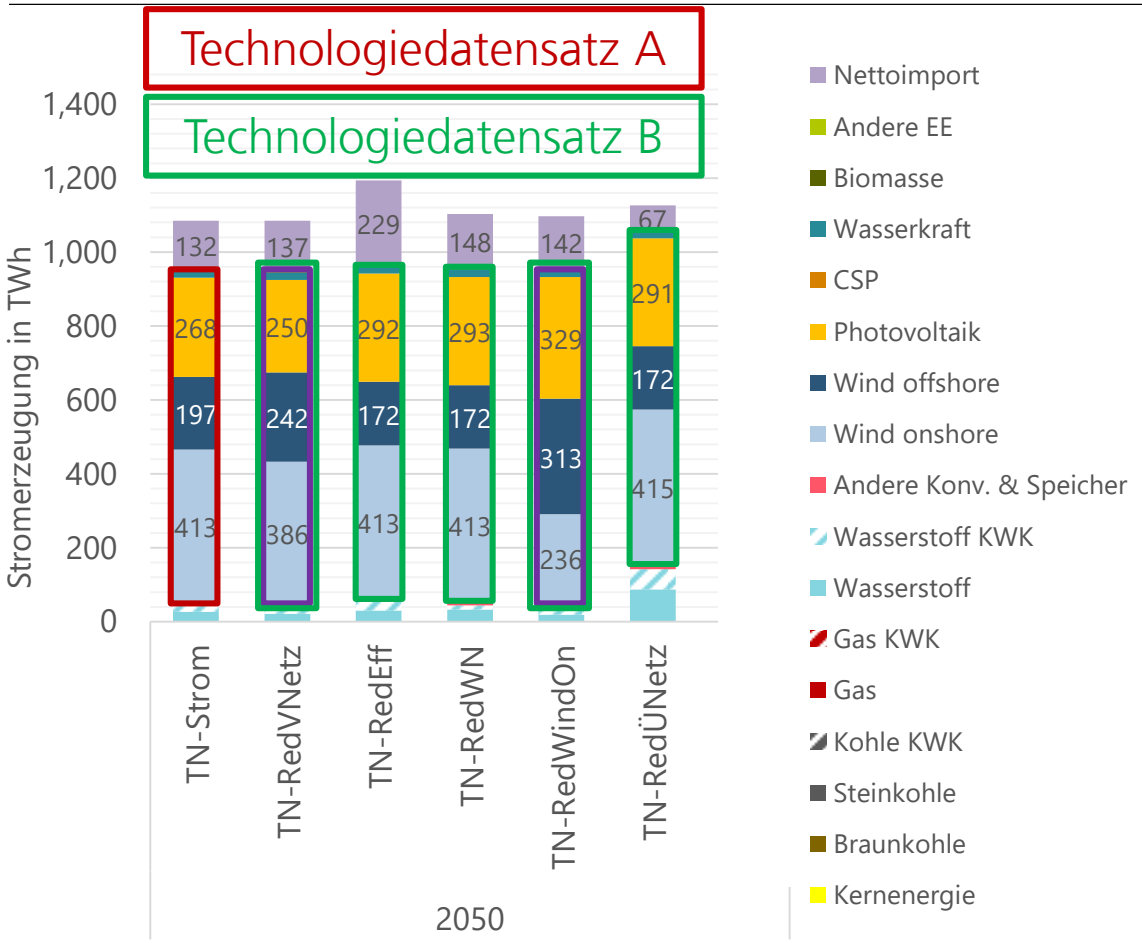
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Strombereitstellung – Flexibilitätsbereitstellung H2 Dispatch 2050 KW 24



Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Strombereitstellung – Deutschland 2050
Update Technologiedatensatz erneuerbare Energien



Zentrale Annahme TN-RedWindOn

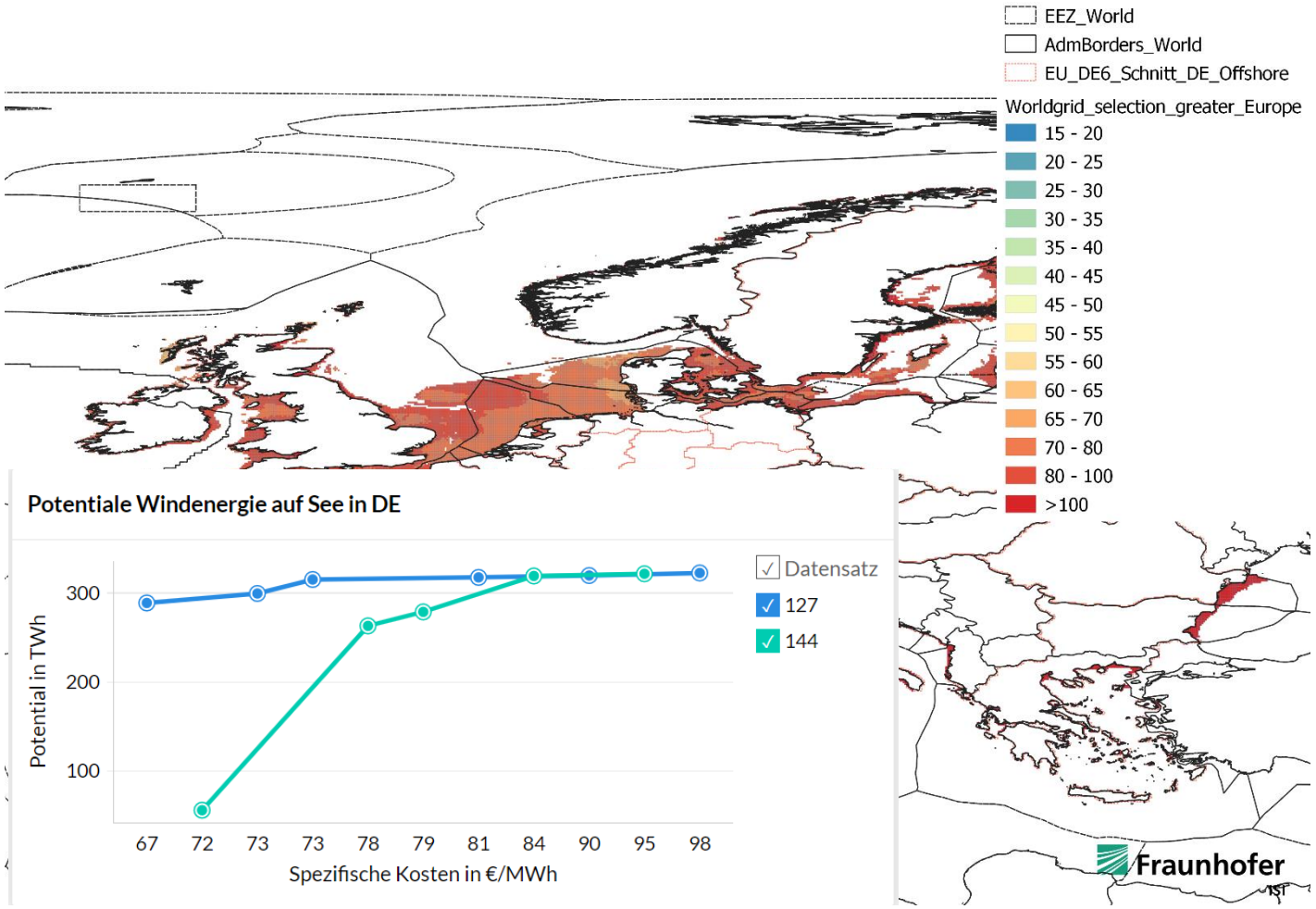
- Erzeugungspotentiale der Windenergie an Land in Deutschland fast halbiert.

Zentrale Annahmen TN-RedVNetz

- Anhebung der Spitzenkappung bei Wind an Land und PV auf 9%.
- Begrenzung der Aufdach-PV in 2050 auf die Leistungen im TN-Strom.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

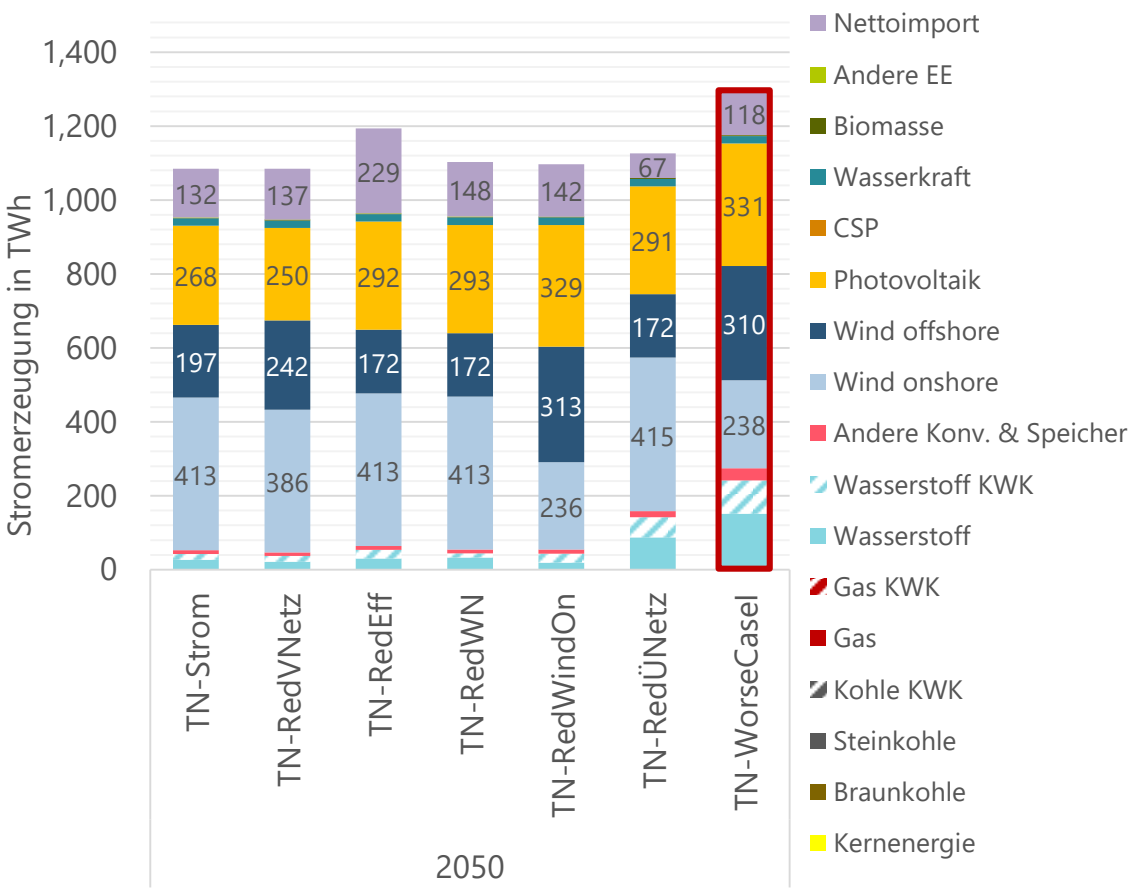
Potentiale Windenergie auf See mit fester Gründung Deutschland 2041-2050



Neuerungen in 144:

- Kostenaufschlag 4€/kW pro km Distanz zur Küste
- Kostenaufschlag 12 €/kW pro m Wassertiefe

Strombereitstellung – Deutschland 2050
Kombination unterschiedlicher Hemmnisse vermeiden



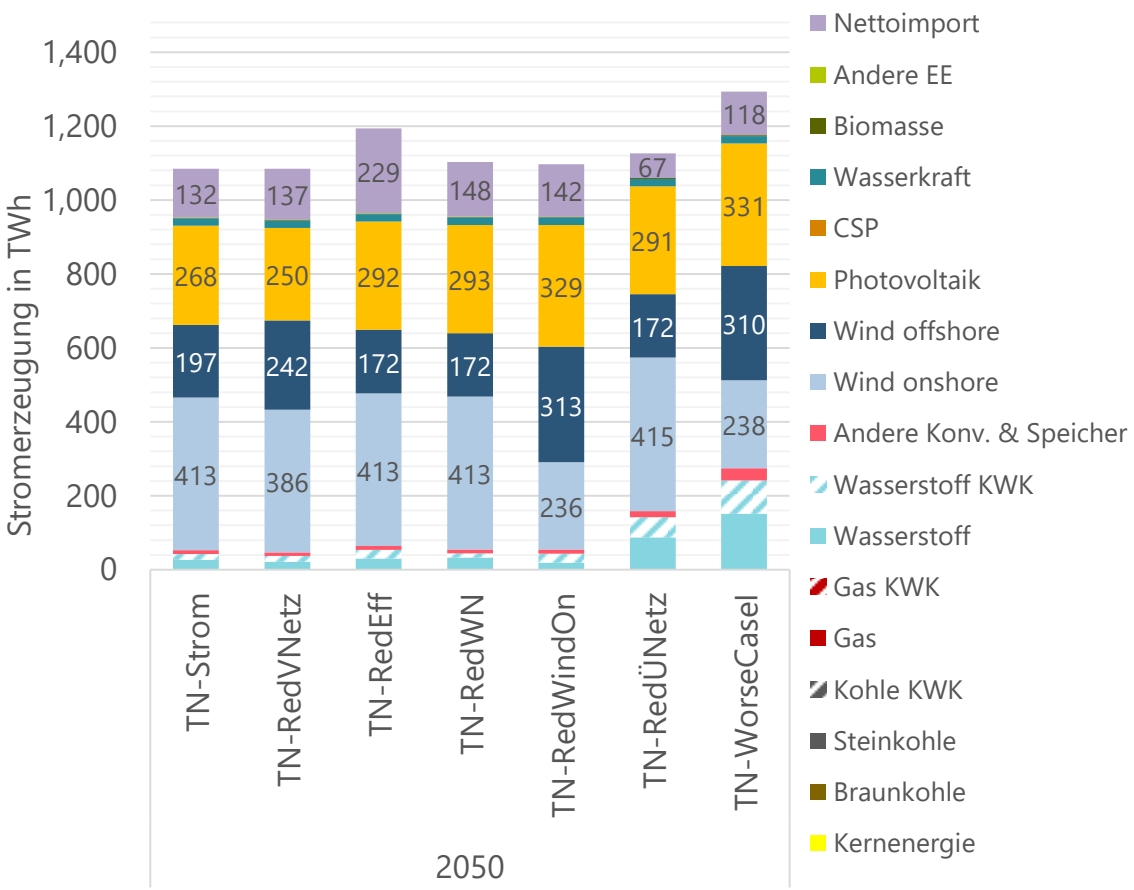
Zentrale Annahme TN-WorseCasel

- Kombination aus
  - Höhere Energienachfragen (TN-RedEff)
  - Weniger Wind an Land (TN-RedWindOn)
  - Weniger Übertragungsnetzausbau (TN-RedÜNetz)

- Die Kombination unterschiedlicher Hemmnisse sollte vermieden werden.
  - Sehr hohe Strombereitstellung in 2050.
  - In Deutschland kommen alle erneuerbaren Technologien an ihre Ausbaugrenzen.
  - Deutlich erhöhter Flexibilitätsbedarf im Stromsektor.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

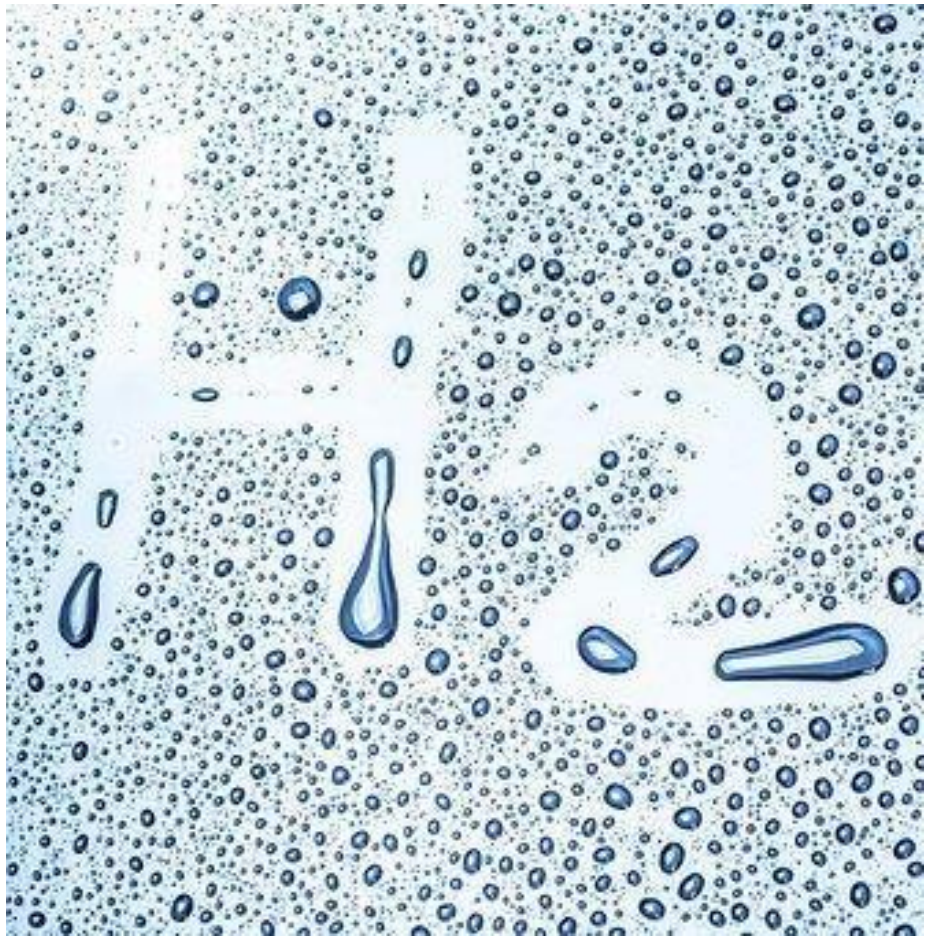
Strombereitstellung – Deutschland 2050
Welche Effekte beeinflussen das Stromsystem?



- Die europäische Kooperation in der Strombereitstellung ist wichtig.
- Wind an Land ist die wichtigste Stromerzeugungstechnologie in Deutschland. Ausbauhemmnisse führen zur Ausschöpfung der verbleibenden erneuerbaren Potentiale.
- Das ausgebaute Übertragungsnetz ist ein wichtiger Flexibilitätsgeber.
- Die Kombination unterschiedlicher Hemmnisse sollte vermieden werden.

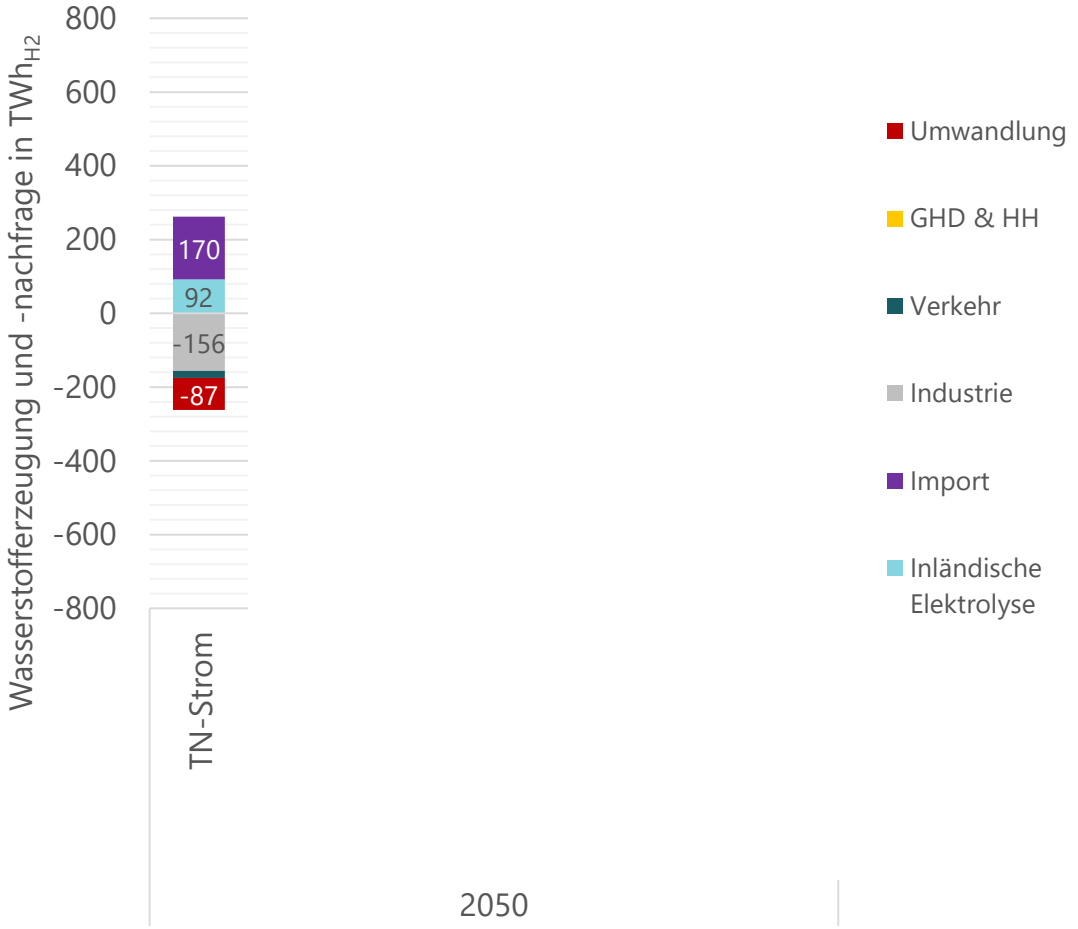
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

Wasserstoff
Welche Effekte beeinflussen das Wasserstoffsystem?



- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
  - Strom
  - Wasserstoff
  - Wärmenetze
- Stromnetze
- Gesamtbilanzen
- Diskussion

Wasserstoff – Deutschland 2050
Ausgangspunkt TN-Strom



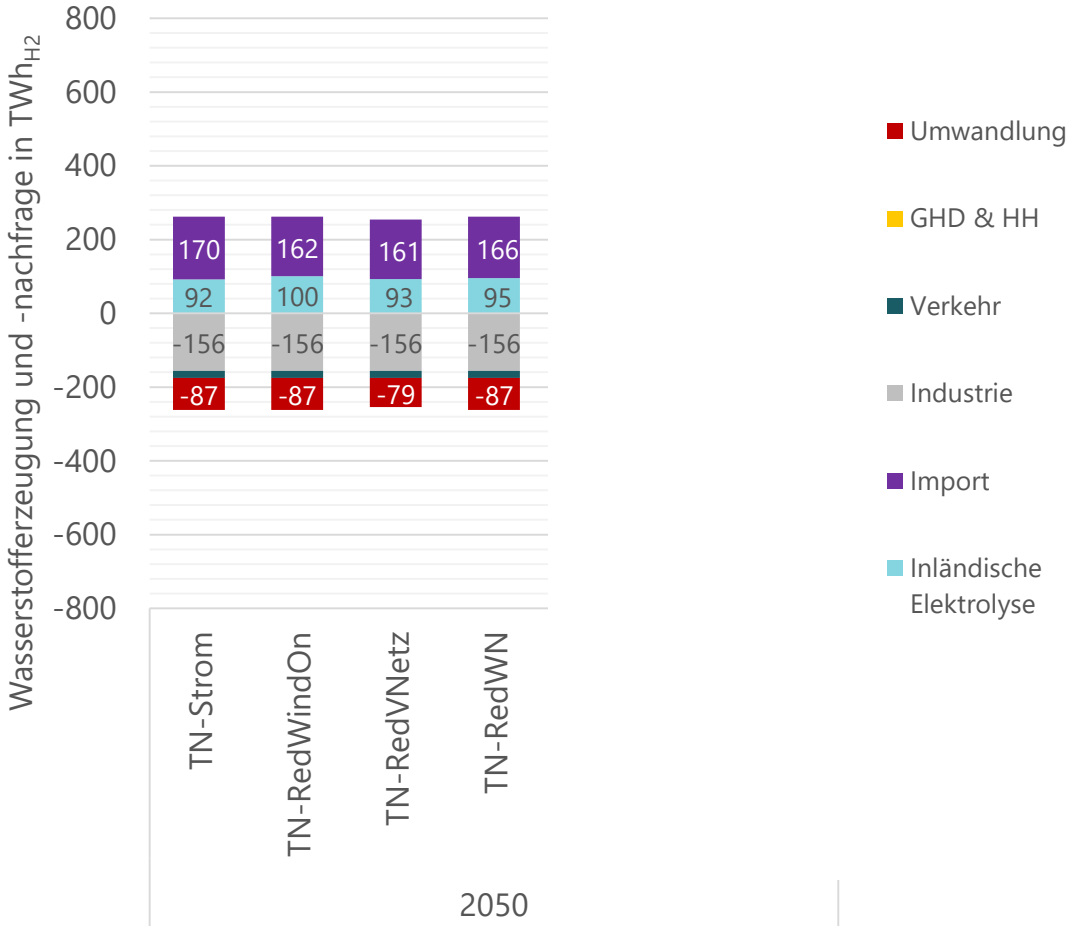
- **Wasserstoffnachfrage**
  - in 2050 etwa 260 TWh
  - geprägt durch H_2-Bedarfe in der Industrie und im Umwandlungssektor
- **Wasserstofferzeugung**
  - ca. 92 TWh in Deutschland im Jahr 2050
  - Elektrolyseleistung 2050: 41 GW_{el}
  - Speichervolumen 2050: 73 TWh_{H2}
  - hohe europäische Importe
  - kein modellendogener Import aus MENA

enertile

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

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

Wasserstoff – Deutschland 2050

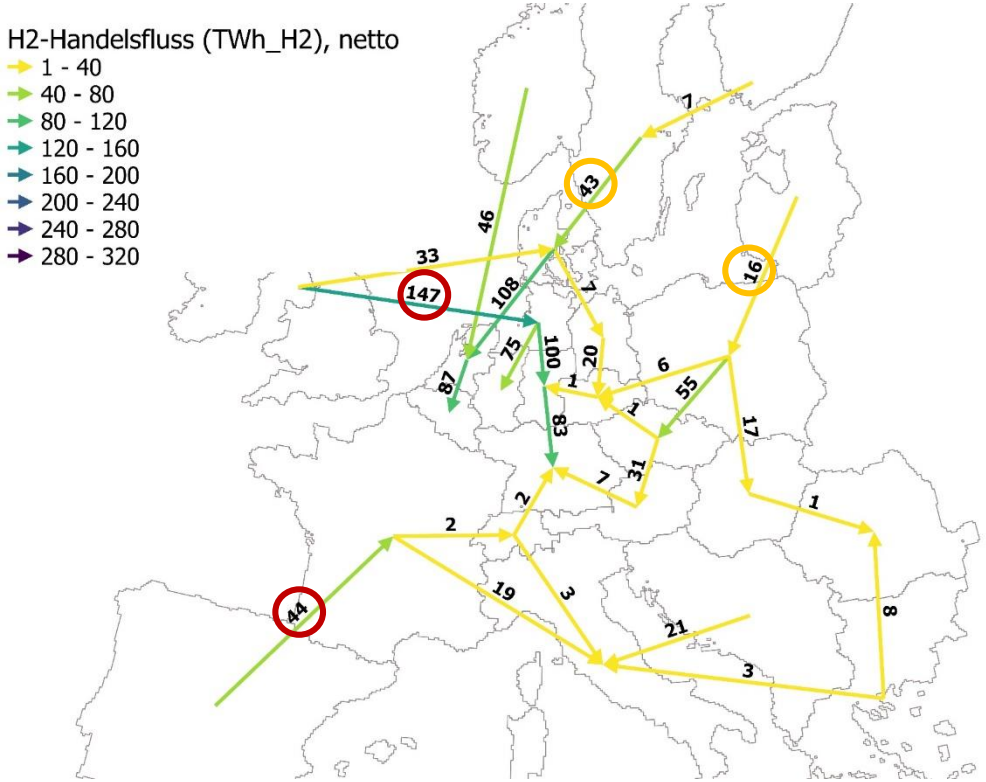


- Weniger Wind an Land, weniger Wärmenetze, und eine Entlastung der Verteilnetze haben alleine bilanziell keinen substantiellen Einfluss auf das Wasserstoffsystem in Deutschland. Aber...
- ...falls das Wind an Land Potential beschränkt ist, kippt die europäische Wasserstoffversorgung zugunsten der Iberischen Halbinsel.

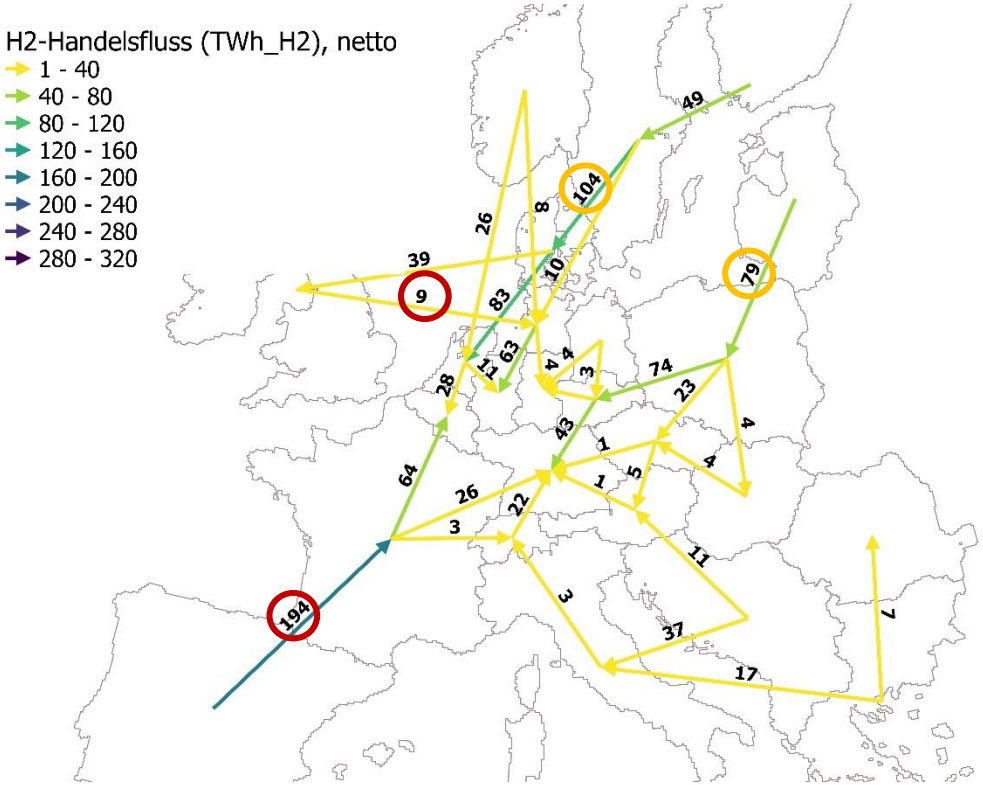
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Wasserstoff – Wind an Land vs. PV Wasserstoffhandel 2050

TN-Strom

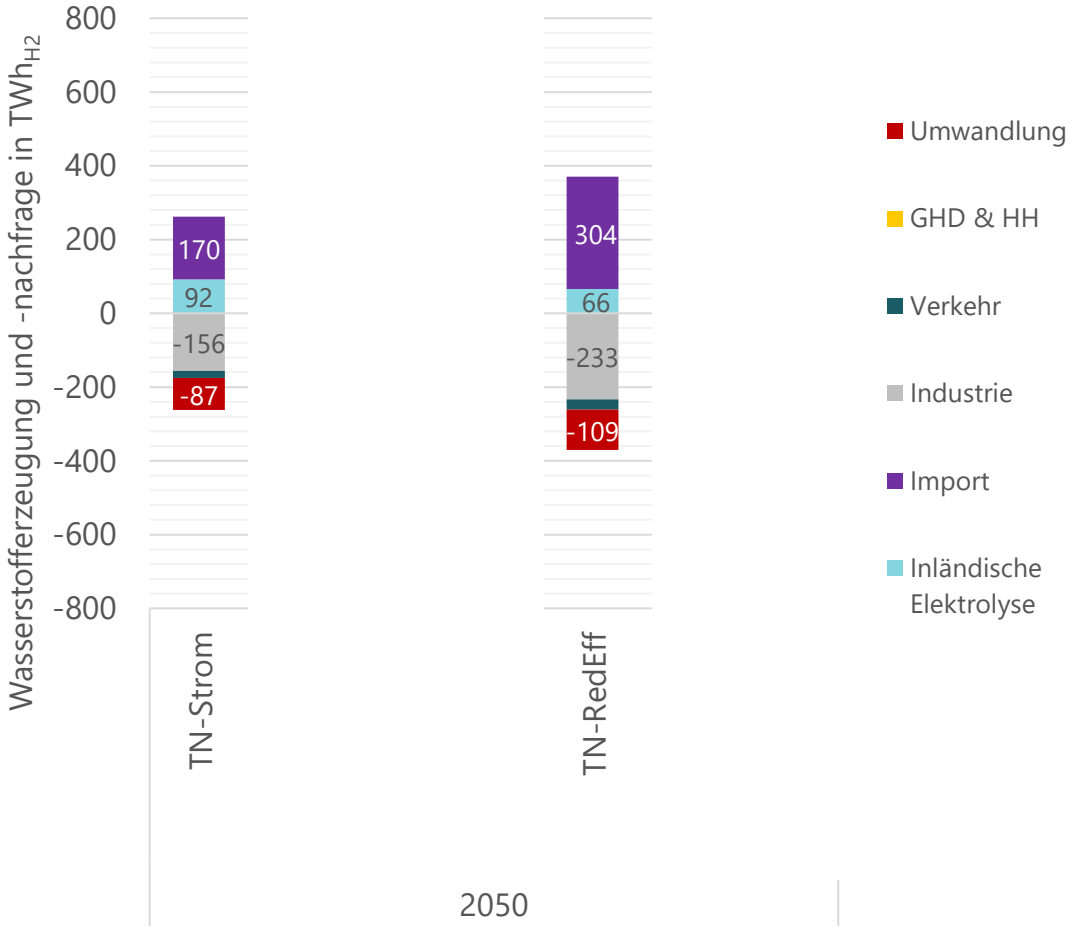


TN-RedWindOn



Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

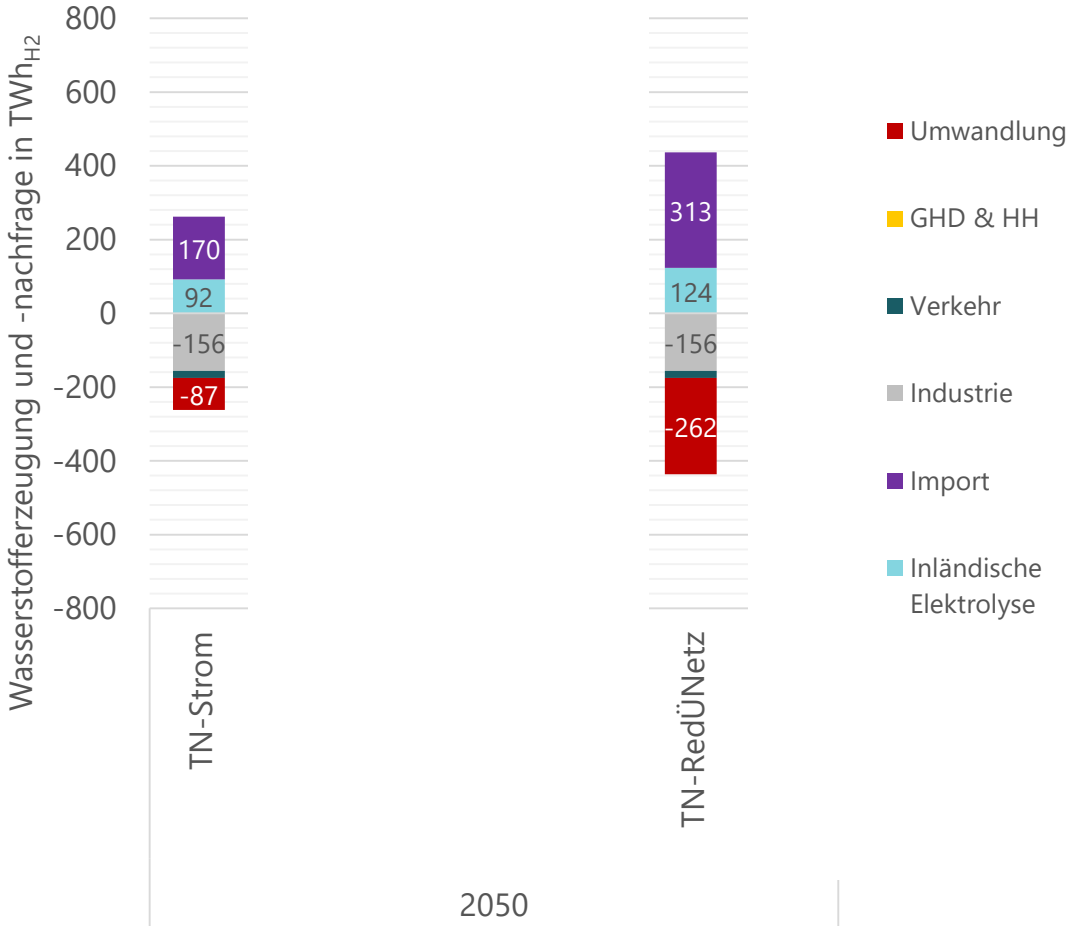
Wasserstoff – Deutschland 2050
Erhöhte Wasserstoffnachfragen erhöhen die Importe



- Weniger Wind an Land, weniger Wärmenetze und eine Entlastung der Verteilnetze haben alleine bilanziell keinen substantiellen Einfluss auf das Wasserstoffsystem in Deutschland. Aber...
- ...falls das Wind an Land Potential beschränkt ist, kippt die europäische Wasserstoffversorgung zugunsten der Iberischen Halbinsel.
- Höhere Energienachfragen erhöhen den Wasserstoffimport und -einsatz im Industrie- und Umwandlungssektor.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Wasserstoff – Deutschland 2050
Europäische Energieimporte robust

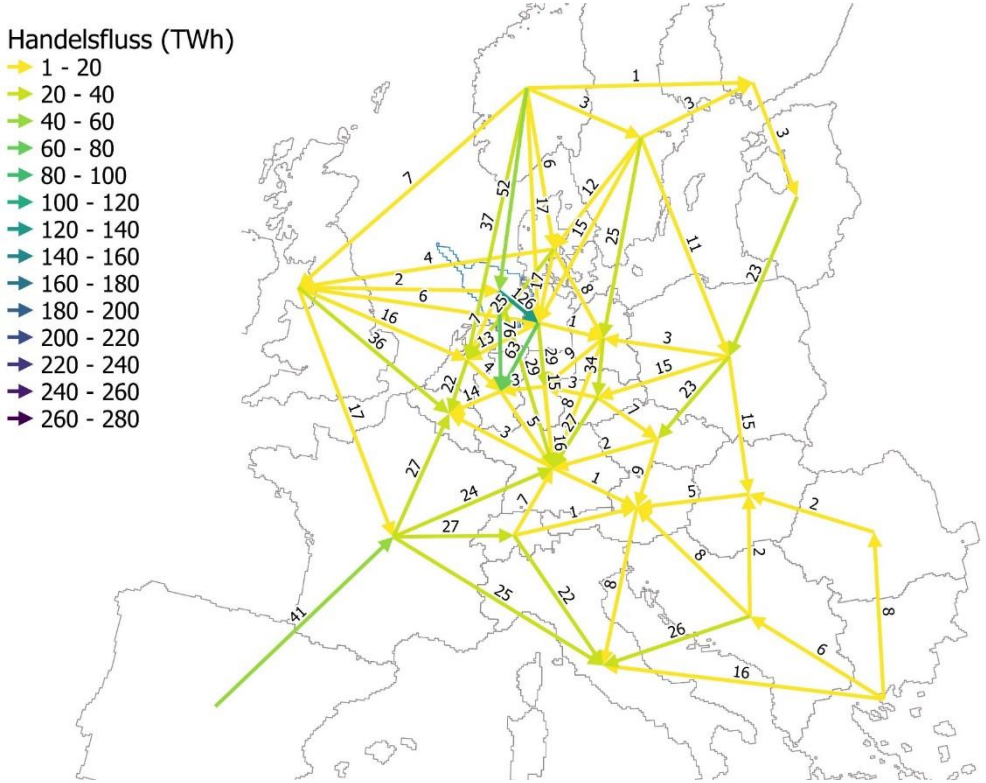


- Weniger Wind an Land, weniger Wärmenetze, und eine Entlastung der Verteilnetze haben alleine bilanziell keinen substantiellen Einfluss auf das Wasserstoffsystem in Deutschland. Aber...
- ...falls das Wind an Land Potential beschränkt ist, kippt die europäische Wasserstoffversorgung zugunsten der Iberischen Halbinsel.
- Höhere Energienachfragen erhöhen den Wasserstoffimport und –einsatz im Industrie- und Umwandlungssektor.
- Weniger Übertragungsnetzausbau führt zu einer Verlagerung der Importe von Strom auf Wasserstoff und erhöht die Flexibilitätsbereitstellung aus Wasserstoff im Umwandlungssektor.

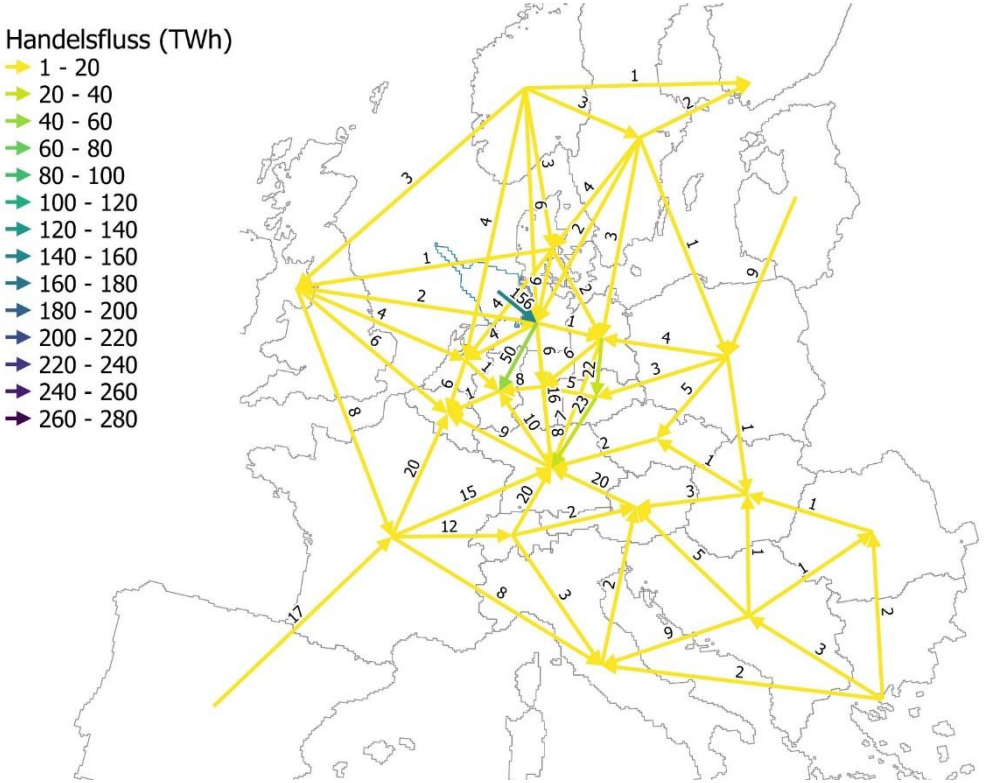
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Wasserstoff – Importabtausch Strom/H2 Stromhandel 2050

TN-Strom



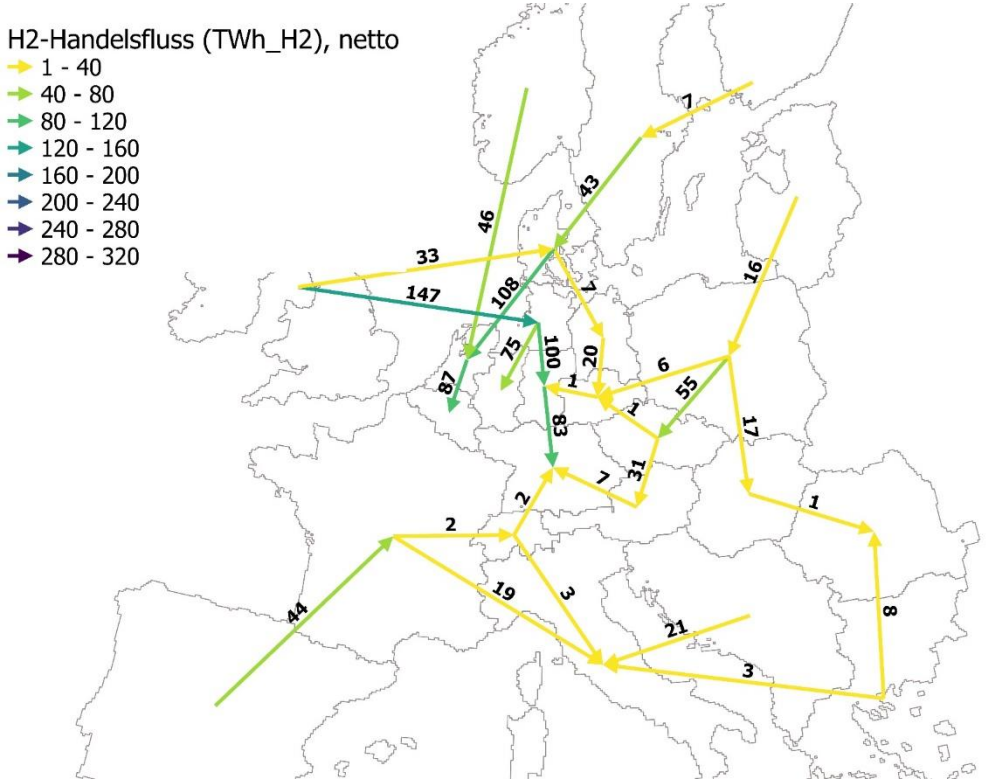
TN-RedÜNetz



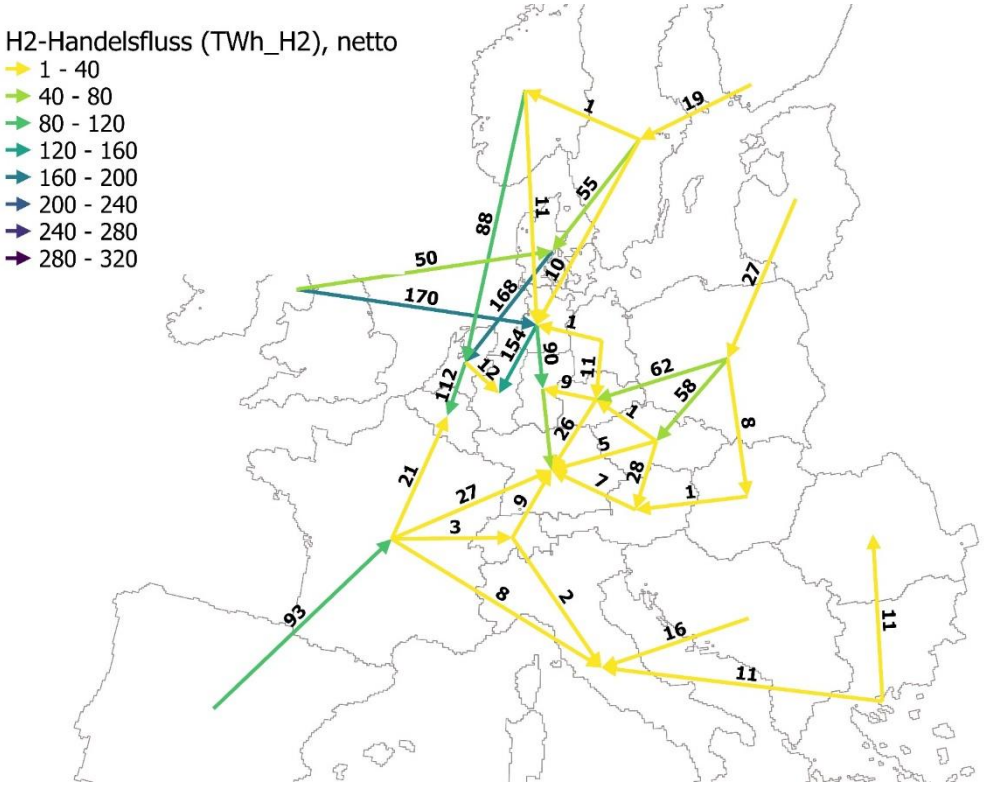
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Wasserstoff – Importabtausch Strom/H2 Wasserstoffhandel 2050

TN-Strom

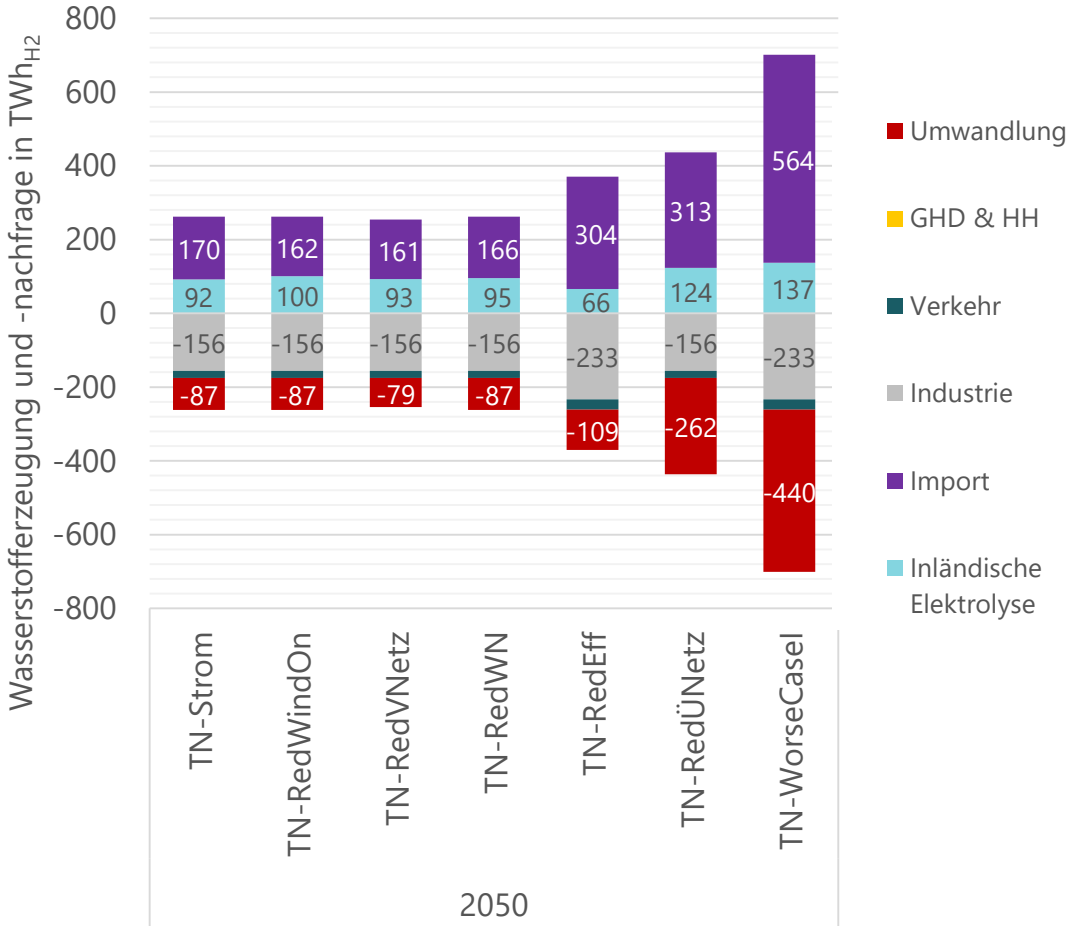


TN-RedÜNetz



Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

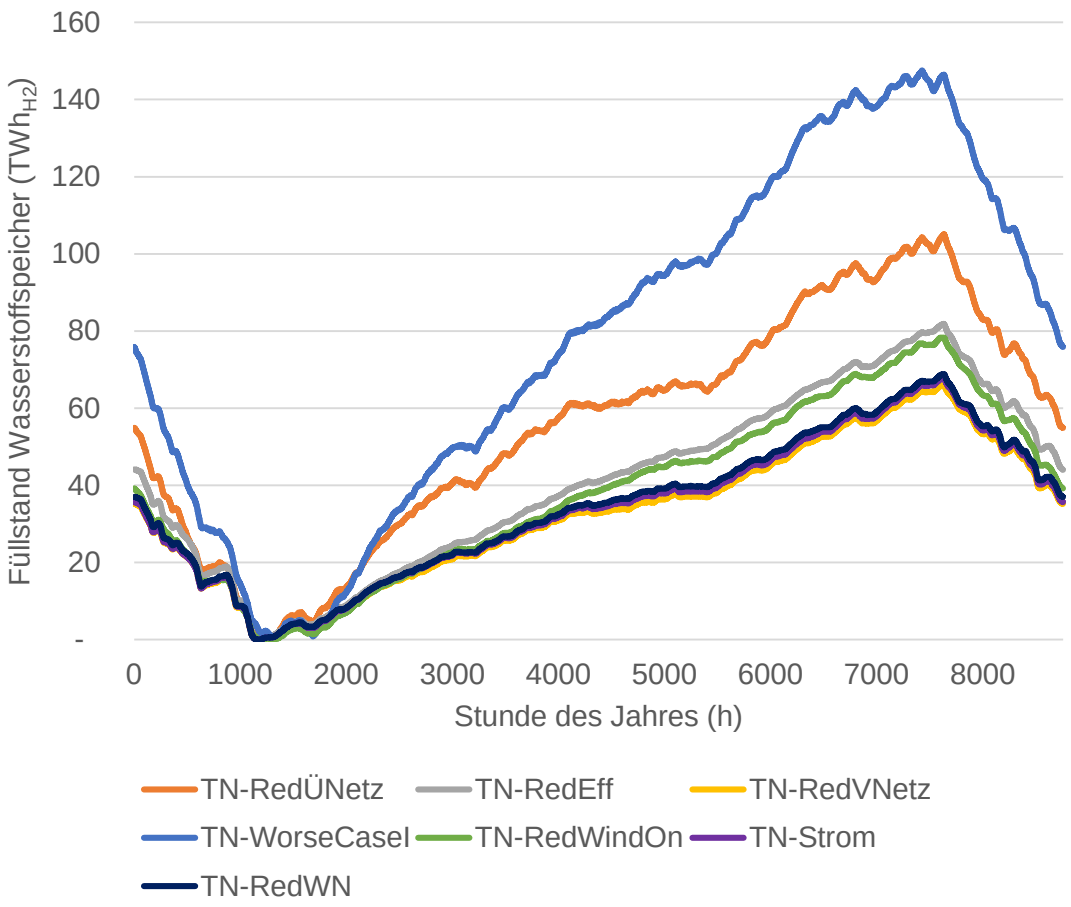
Wasserstoff – Deutschland 2050
Welche Effekte beeinflussen das Wasserstoffsystem?



- Weniger Wind an Land, weniger Wärmenetze und eine Entlastung der Verteilnetze haben alleine bilanziell keinen substantiellen Einfluss auf das Wasserstoffsystem in Deutschland. Aber...
- ...falls das Wind an Land Potential beschränkt ist, kippt die europäische Wasserstoffversorgung zugunsten der Iberischen Halbinsel.
- Höhere Energienachfragen erhöhen den Wasserstoffimport und –einsatz im Umwandlungssektor.
- Weniger Übertragungsnetzausbau führt zu einer Verlagerung der Importe von Strom auf Wasserstoff und erhöht die Flexibilitätsbereitstellung aus Wasserstoff im Umwandlungssektor.
- Kein modellendogener H_2-Import aus der MENA.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

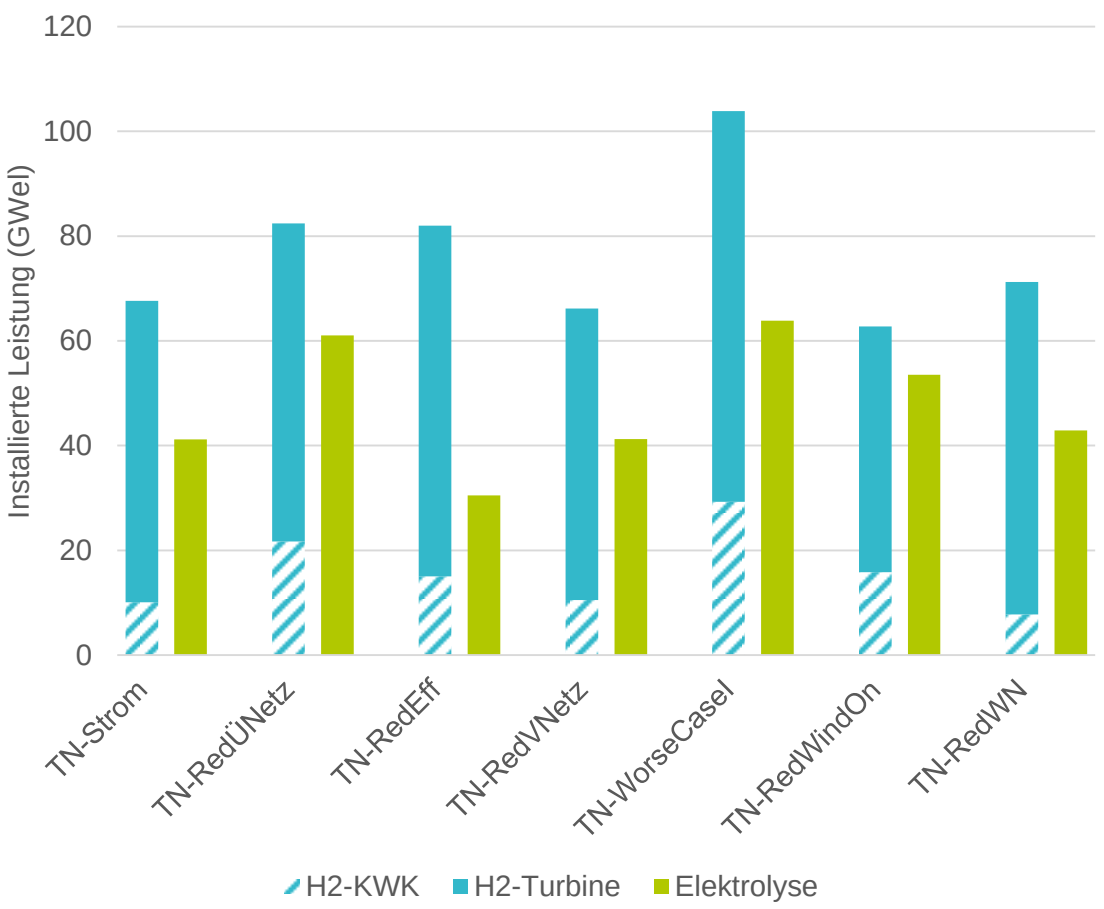
Wasserstoff – Deutschland 2050 Wasserstoffspeicher



- Saisonales Speicherprofil mit Ausspeicherung im Winter und Einspeicherung im Frühling und Herbst.
- Speicherbedarf erhöht bei
  - weniger Wind an Land und weniger Effizienz (+)
  - weniger Übertragungsnetzausbau (++)
  - Kombination weniger Wind an Land, weniger Effizienz und weniger Übertragungsnetzausbau (+++)

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

Wasserstoff – Deutschland 2050
Elektrolyse & Verstromung



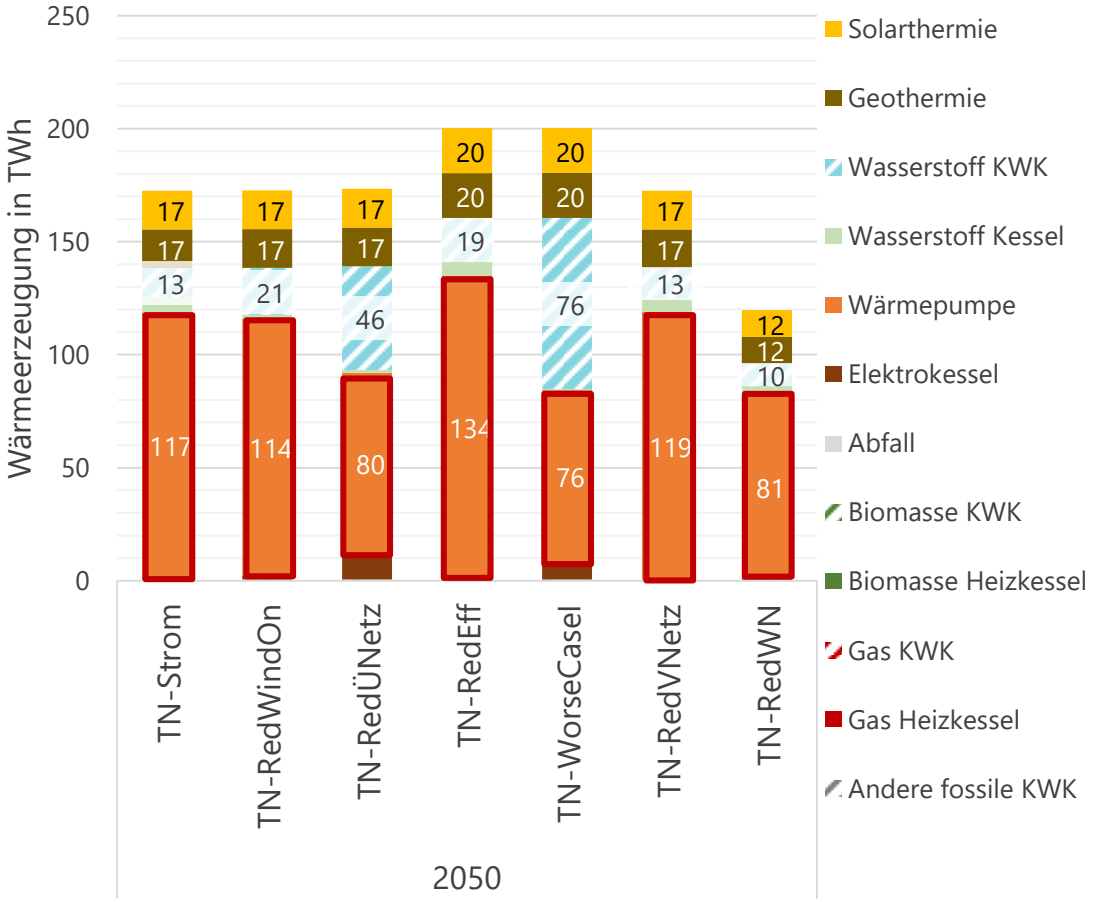
- Wasserstoffverstromungsleistungen erhöht bei
  - weniger Übertragungsnetzausbau (++), durch die Flexibilitätsbereitstellung und den Importabtausch Strom/Wasserstoff
  - weniger Effizienz in den Nachfragesektoren (++) und weniger Wärmenetzen (+), durch insgesamt höhere Stromnachfragen
  - Überlagerung von weniger Effizienz, weniger Wind an Land und weniger Übertragungsnetzausbau (+++)
- Elektrolyseleistung reduziert durch
  - geringere „freie erneuerbare Stromerzeugung“ bei höherer Stromnachfrage durch geringere Effizienz. Wasserstofffehlmengen werden importiert.
- Elektrolyseleistung erhöht bei
  - weniger Übertragungsnetzausbau, zur EE-Integration
  - weniger Wind an Land, zur Integration der erhöhten PV-Spitzenleistung
  - Überlagerung von weniger Effizienz, weniger Wind an Land und weniger Übertragungsnetzausbau

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

Wärmenetze

- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
  - Strom
  - Wasserstoff
  - Wärmenetze
- Stromnetze
- Gesamtbilanzen
- Diskussion

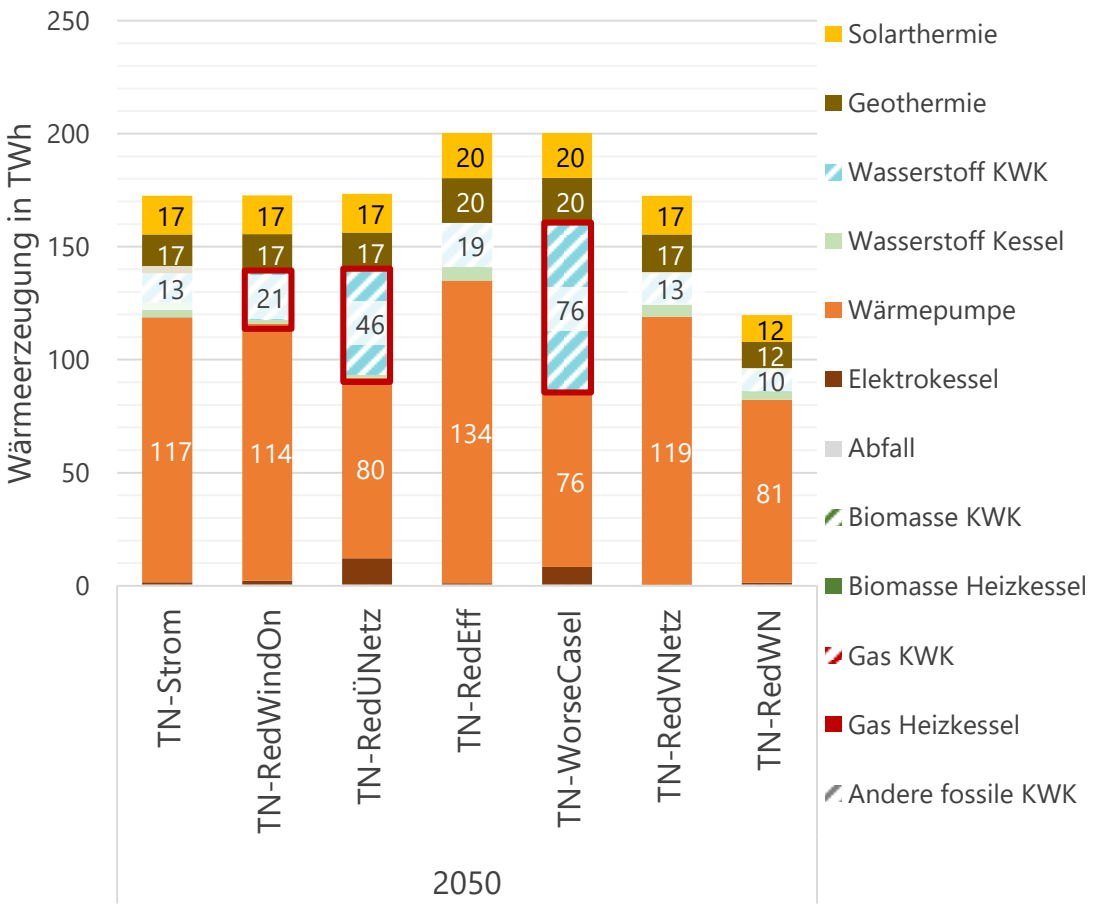
Wärmenetze – Deutschland 2050
Welche Effekte beeinflussen die Wärmenetze?



- Der Einsatz von Großwärmepumpen in Wärmenetzen ist robust.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

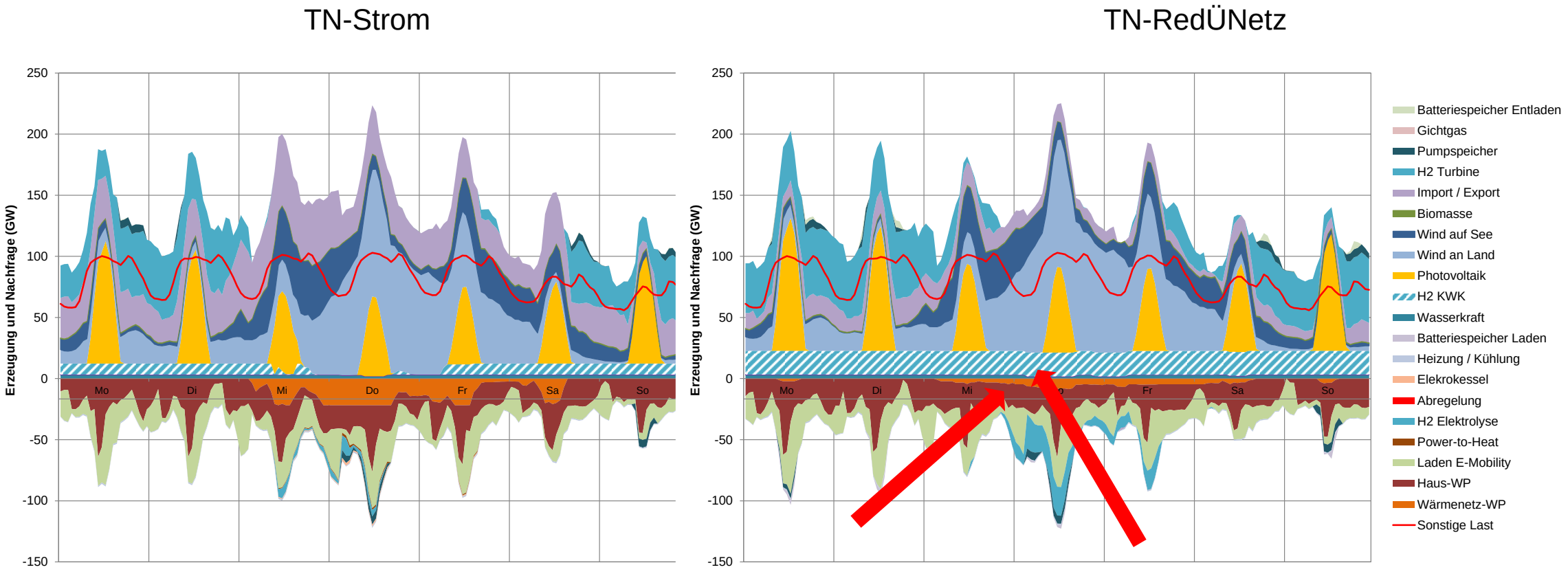
Wärmenetze – Deutschland 2050
Welche Effekte beeinflussen die Wärmenetze?



- Der Einsatz von Großwärmepumpen in Wärmenetzen ist robust.
- Wasserstoff-KWK nimmt zu Lasten von Großwärmepumpen eine größere Rolle ein, wenn
  - weniger Wind an Land verfügbar ist (+)
  - weniger Übertragungsnetz ausgebaut wird (++)
  - beide Effekte überlagert sind (+++)

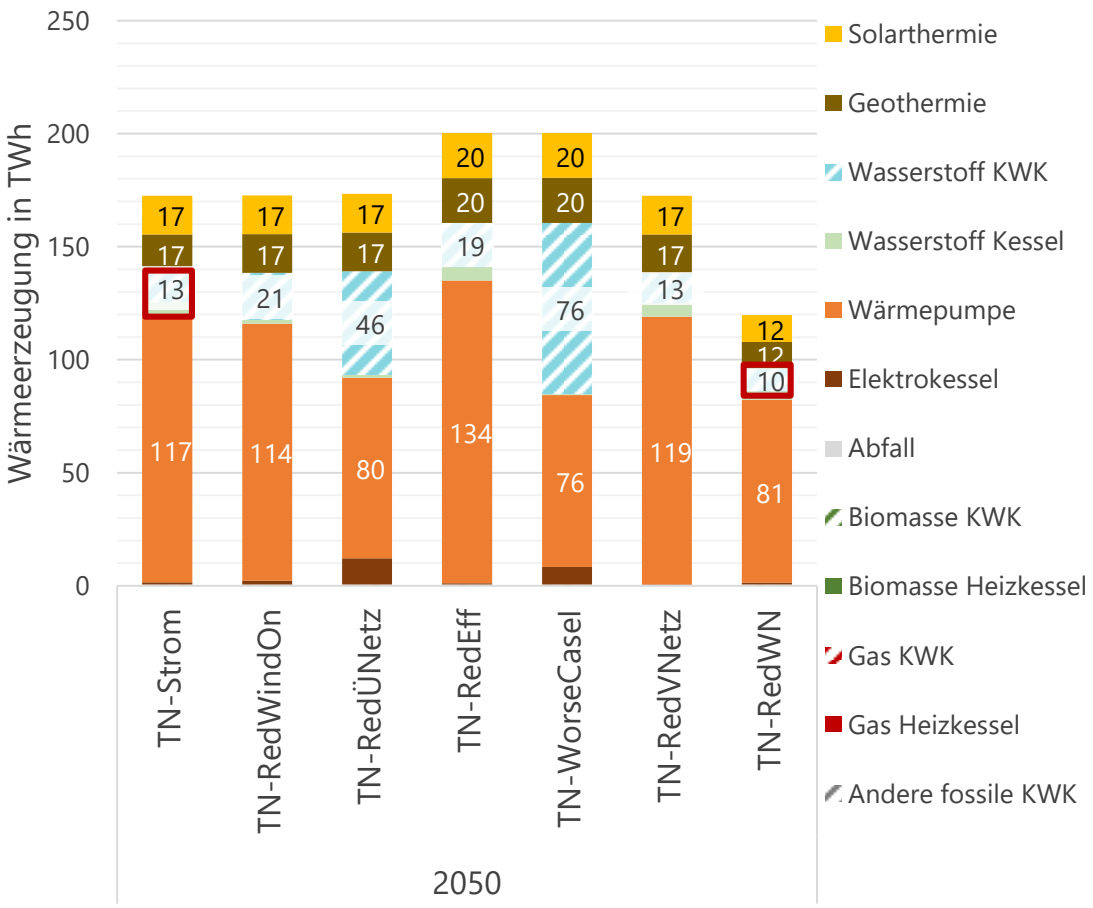
Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

Strombereitstellung – Flexibilitätsbereitstellung H2 Dispatch 2050 KW 5



Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCaseI 40484

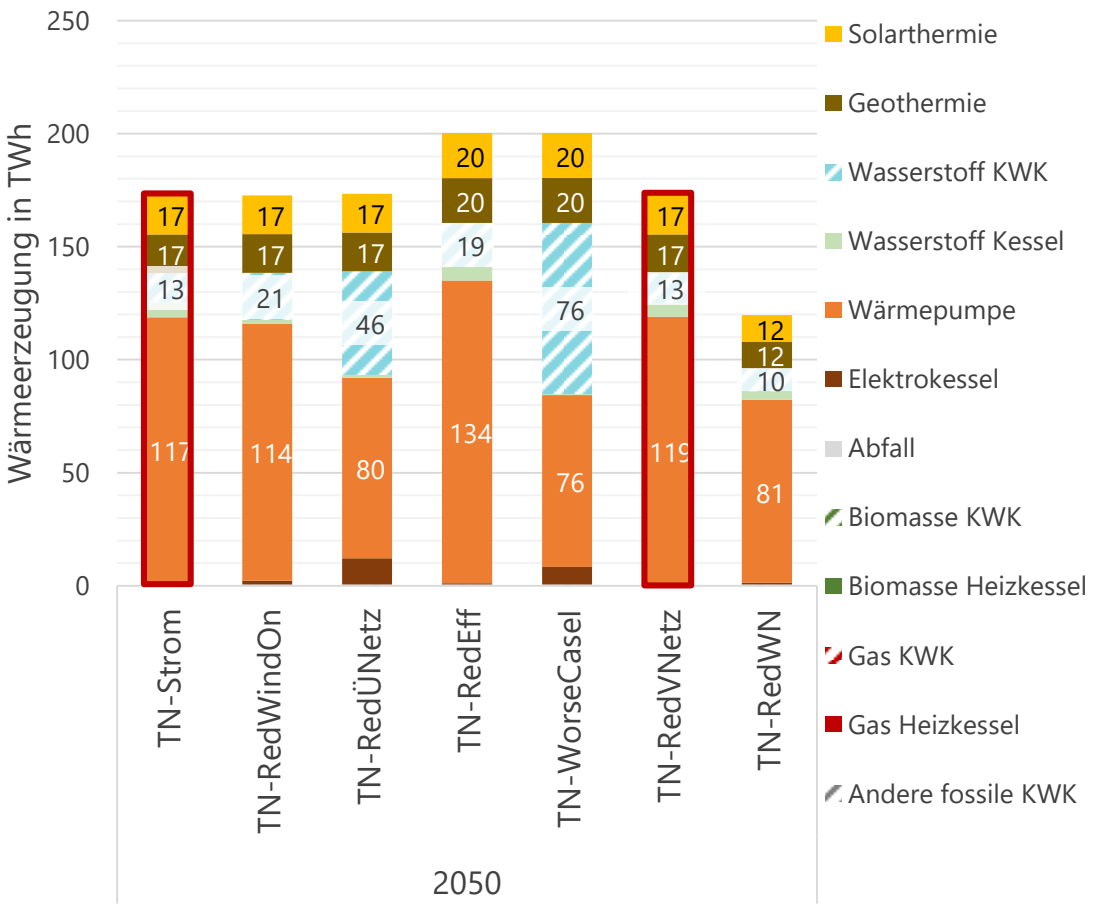
Wärmenetze – Deutschland 2050
Welche Effekte beeinflussen die Wärmenetze?



- Der Einsatz von Großwärmepumpen in Wärmenetzen ist robust.
- Wasserstoff-KWK nimmt zu Lasten von Großwärmepumpen eine größere Rolle ein, wenn
  - weniger Wind an Land verfügbar ist (+)
  - weniger Übertragungsnetz ausgebaut wird (++)
  - beide Effekte überlagert sind (+++)
- Eine Reduktion der Wärmenachfrage in Wärmenetzen verringert den Einsatz von Wasserstoff-KWK nur geringfügig.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

Wärmenetze – Deutschland 2050
Welche Effekte beeinflussen die Wärmenetze?



- Der Einsatz von Großwärmepumpen in Wärmenetzen ist robust.
- Wasserstoff-KWK nimmt zu Lasten von Großwärmepumpen eine größere Rolle ein, wenn
  - weniger Wind an Land verfügbar ist (+)
  - weniger Übertragungsnetz ausgebaut wird (++)
  - beide Effekte überlagert sind (+++)
- Eine Reduktion der Wärmenachfrage in Wärmenetzen verringert den Einsatz von Wasserstoff-KWK nur geringfügig.
- Anpassungen im Verteilungsnetz zeigen keine Auswirkungen auf die Wärmenetze.

Interne Ids: TN-Strom 39847; TN-RedWindOn 40490;TN-RedÜNetz 40235; TN-RedVNetz 40391; TN-RedEff 40275;TN-RedWN 40493; TN-WorseCasel 40484

Agenda

- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Stromnetze
- Gesamtperspektive & Fazit
- Diskussion

Szenario „Weniger Verteilungsnetzausbau“ (TN-RedVNetz) Hintergrund und Umsetzung

Hintergrund

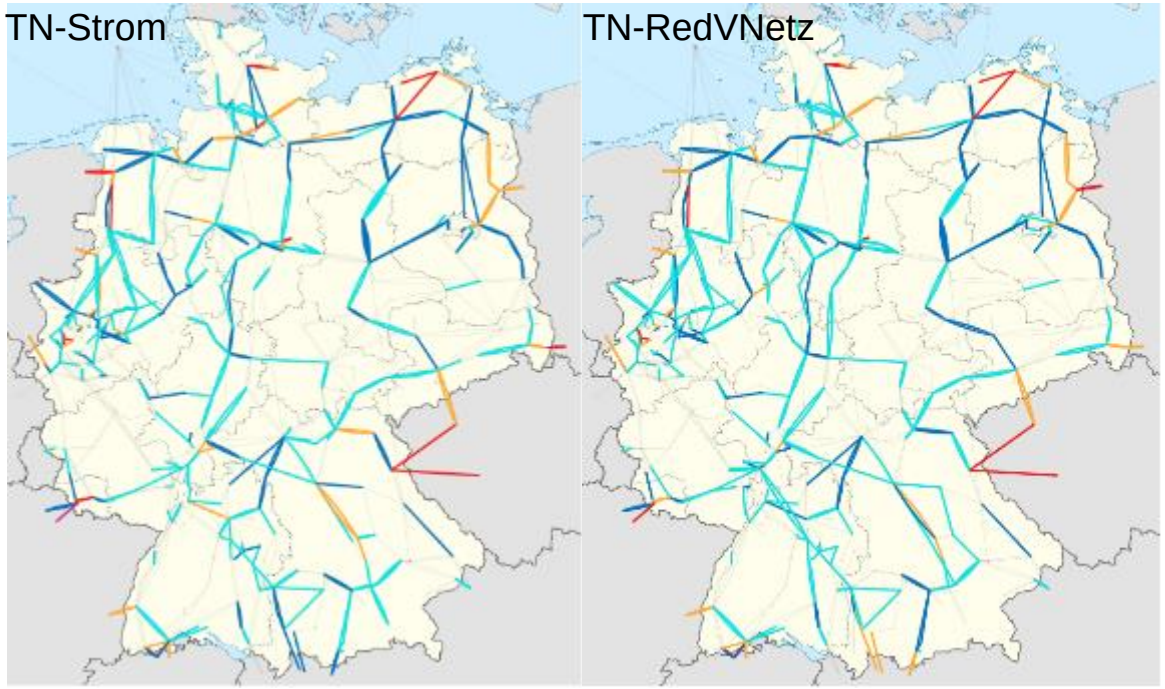
- Bisherige TN-Szenarien: sehr erheblicher Ausbau in den Verteilungsnetzen (VN) durch EE-Zubau u. Lastzuwachs
  - Kosten der Verteilungsnetze steigen in den TN-Szenarien bis 2050 um bis zu 100%
- Fragestellung: „Wie stark kann VN-Ausbau reduziert werden? Wie stark werden Kosteneinsparungen im Netz durch Anstieg bei sonstigen Systemkosten überkompensiert?“

Umsetzung / Parametrierung

- Stärkerer netzbezogener Flexibilitätseinsatz von Last und Erzeugung (kombiniert und nur für DE modelliert)
  - Last: (verteilungs-)netzdienlicher Einsatz von Lastflexibilität bei Elektromobilität und Wärmepumpen (werden in anderen Szenarien im Hinblick auf das Erzeugungssystem und tlw. Übertragungsnetz optimiert eingesetzt)
    - Wärmepumpe → Flexibilität aus 2h Wärmespeicher
    - E-Mob → 50% der Fahrzeuge mit Flexibilität unter Berücksichtigung von Fahrprofilen
  - EE: stärkere Spitzenkappung (max. 9% statt derzeit max. 3% der Jahreserzeugung) für Wind Onshore und PV
    - abgeregelte EE-Erzeugung wird durch höheren Wind Offshore Ausbau kompensiert

Ausbaubedarf des deutschen Übertragungsnetzes im Jahr 2050 (TN-Strom vs. TN-RedVNetz)

Maximale Netzbelastungen ausgehend vom Startnetz 2030

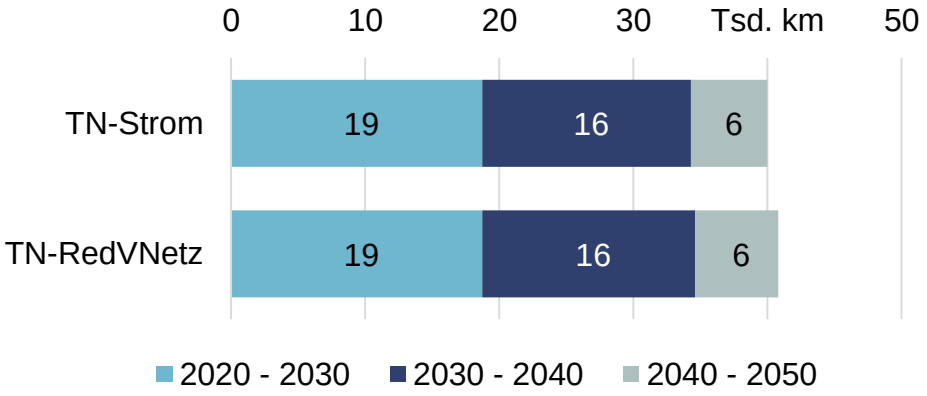


max. Belastung in (n-1)-Fall

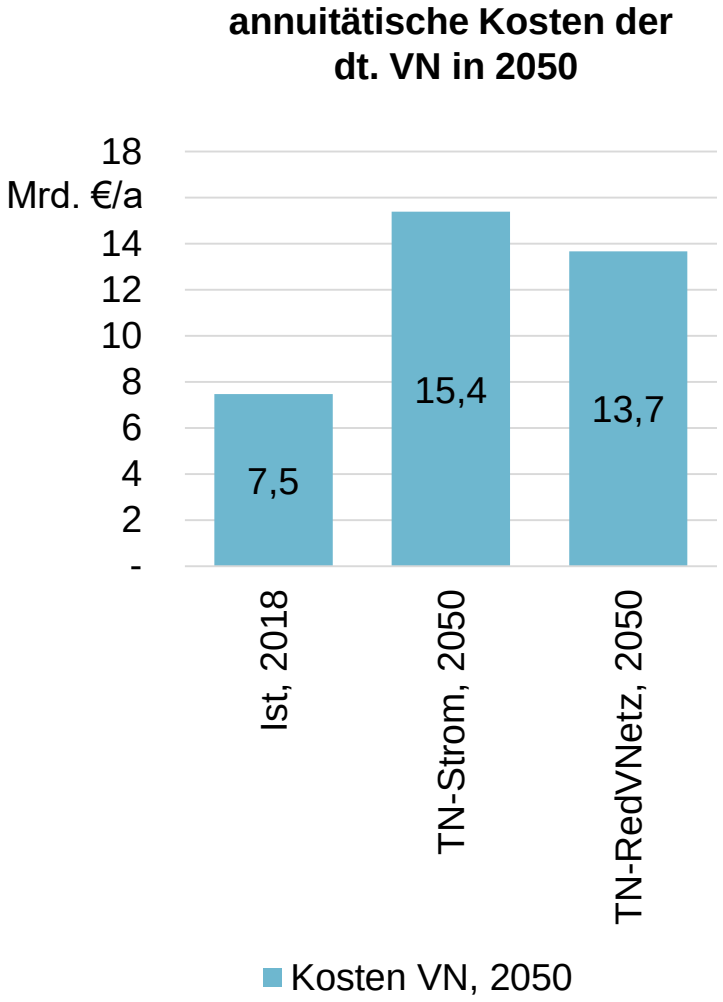
- 110 % < max < 150 %
- 150 % ≤ max < 200 %
- 200 % ≤ max < 300 %
- 300 % ≤ max < 500 %
- 500 % ≥ max

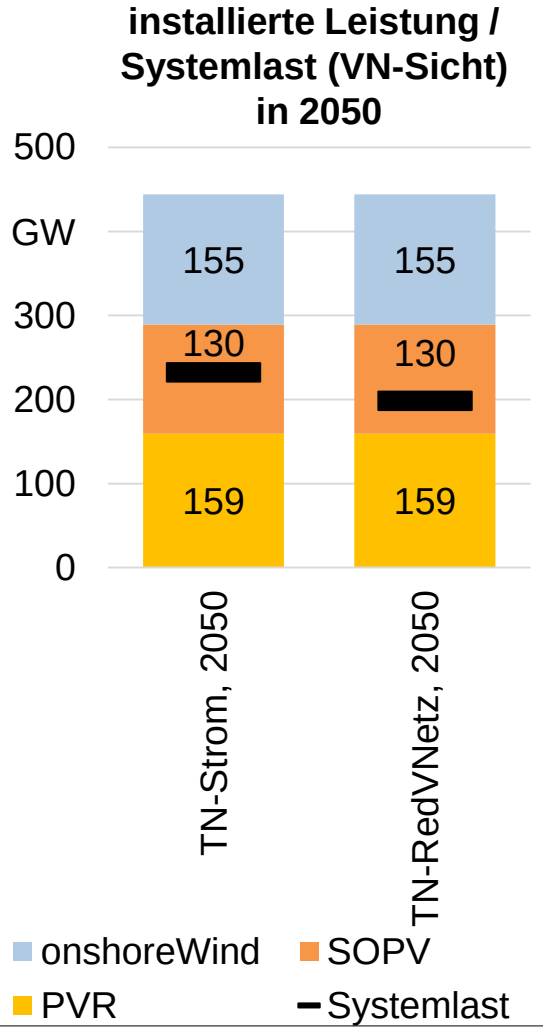
- **Ergebnisse**
  - Stärkerer verteilungsnetzbezogener Flexibilitätseinsatz von Last und Erzeugung führt deutschlandweit in geringem Umfang zu zusätzlichen Netzüberlastungen
  - Insg. 800 km höherer Netzausbau bis 2050
    - + 0,2 Mrd. €/a höhere annuitätische Netzkosten in 2050

Notwendige Ausbau- und Verstärkungsmaßnahmen im deutschen Übertragungsnetz (Stromkreiskilometer)



Ausbaubedarf der deutschen Verteilungsnetze im Jahr 2050 (TN-Strom vs. TN-RedVNetz)





- **Ergebnisse**
  - Netzdienlicher Einsatz modellierter Lastflexibilität senkt Systemlast um ca. 15 % (ca. 35 GW)
  - Identische installierte EE-Leistung im VN in 2050 wie im TN-Strom, aber mit Spitzenkappung von bis 9% (energetisch)
  - Maßnahmen erreichen eine Kosteneinsparung von gut 10 % (1,7 Mrd. €/a) in den dt. Verteilungsnetzen
    - etwa 1/3 der Kostensenkung geht auf Spitzenkappung zurück
    - ca. 2/3 auf Senkung der auslegungsrelevanten Spitzenlast
- **Schlussfolgerungen**
  - Der erhöhte und gezielt netzdienliche Flexibilitätseinsatz senkt die Ausbaukosten im Verteilungsnetz in nennenswertem Umfang
  - Die Mehrkosten im restlichen Energiesystem überkompensieren aber erreichte Kosteneinsparungen in Verteilungsnetzen deutlich

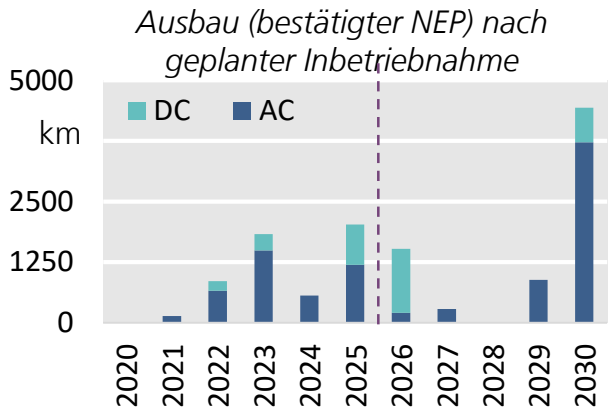
Szenario Weniger Übertragungsnetzausbau „TN-RedÜNetz“ – Hintergrund und Umsetzung

Hintergrund

- Bisherige TN-Szenarien: erheblicher Ausbau der Übertragungsnetze (ÜN) als Ergebnis der (Kosten-)Optimierung
  - in DE übersteigen zusätzlich (ggü. BBPlG) erforderliche Maßnahmen bis 2050 den bisher geplanten Ausbau um 80 % bis 120 %
- Umsetzung herausfordernd → Daher: „Wie sieht ein System aus, das Ausbau im ÜN weitestgehend vermeidet?“

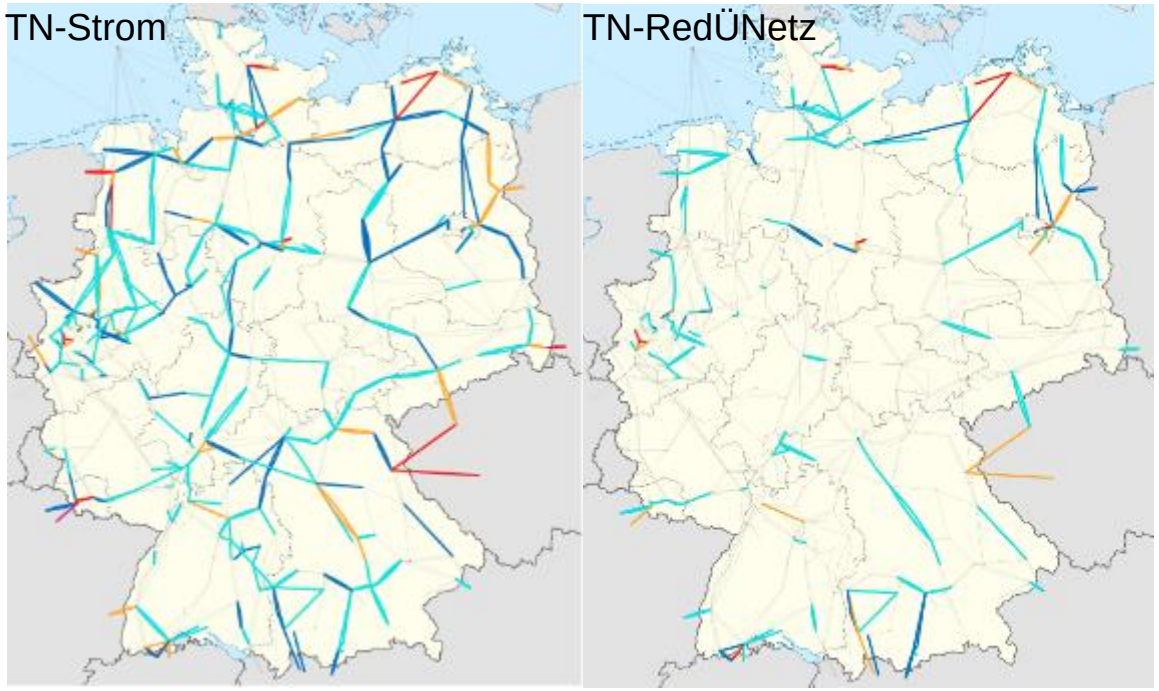
Umsetzung / Parametrierung

- Vorgegebener Mindestzubau (BBPlG / TYNDP) wird umgesetzt (mit Verzögerung)
  - Netzausbau, der „planmäßig“ nach 2026 kommt, wird auf nach 2030 verschoben
- Kein weiterer endogener Ausbau in Angebotsoptimierung (enertile)
- Bei detaillierter Betrachtung Deutschlands kann zusätzlicher Bedarf für Netzstärkung nicht ganz ausgeschlossen werden
  - dabei aber Begrenzung des weiteren Netzausbaus auf Ersatz von bestehenden Stromkreisen in existierenden Trassen
  - Zubau weiterer Phasenschiebertransformatoren (PST) und Netzbooster zulässig



Ausbaubedarf des deutschen Übertragungsnetzes im Jahr 2050 (TN-Strom vs. TN-RedÜNetz u. TN-WorseCaseI)

Maximale Netzbelastungen ausgehend vom Startnetz 2030



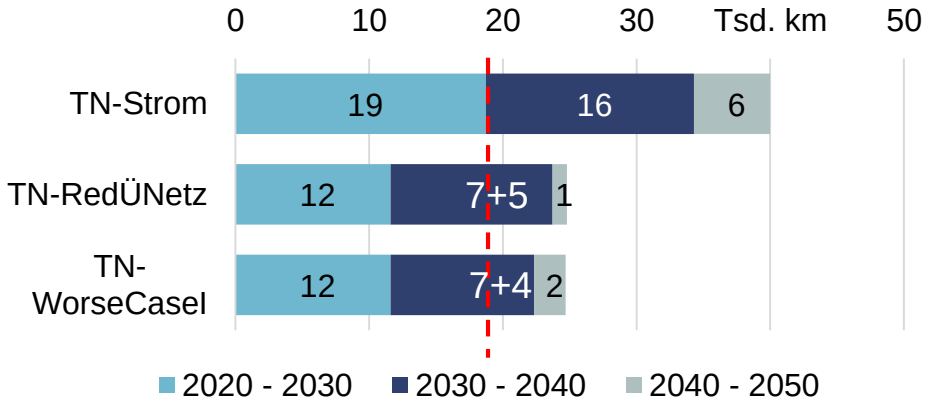
max. Belastung in (n-1)-Fall

- 110 % < max < 150 %
- 150 % ≤ max < 200 %
- 200 % ≤ max < 300 %
- 300 % ≤ max < 500 %
- 500 % ≥ max

Ergebnisse

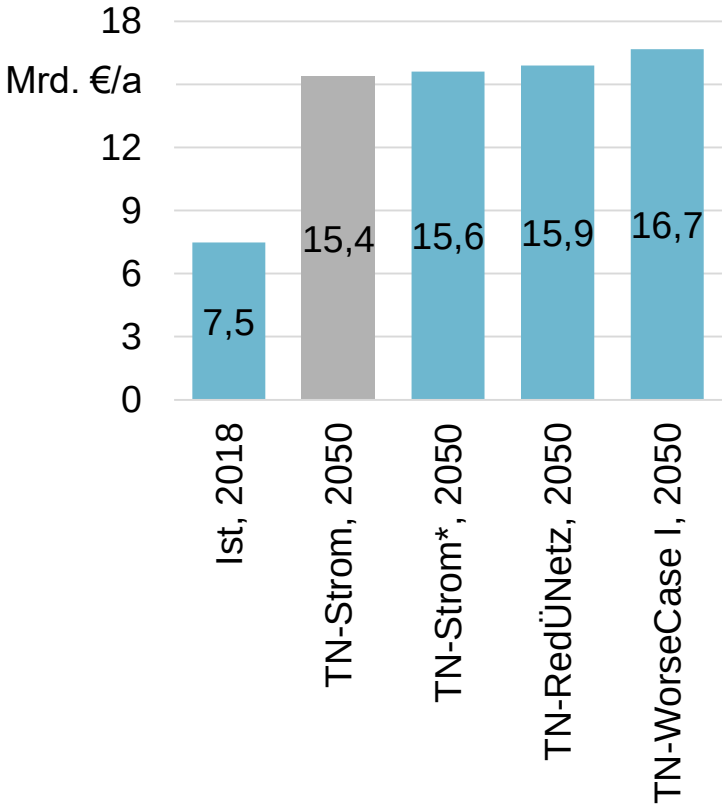
- Bis 2050 zusätzlich erforderlicher Netzausbau geht in beiden Szenarien von ca. 22.000 auf 6.000 km zurück
  - zusätzlich ca. 3 GW Netzbooster und ca. 20-25 PSTs
- Ann. Netzkosten sinken in 2050 von 4,7 Mrd. €/a (TN-Strom) auf 2,9 Mrd. €/a
- Europäische Handelskapazitäten steigen gegenüber Ausbaustand TN-Strom im Jahr 2030 nicht mehr an

Notwendige Ausbau- und Verstärkungsmaßnahmen im deutschen Übertragungsnetz (Stromkreiskilometer)

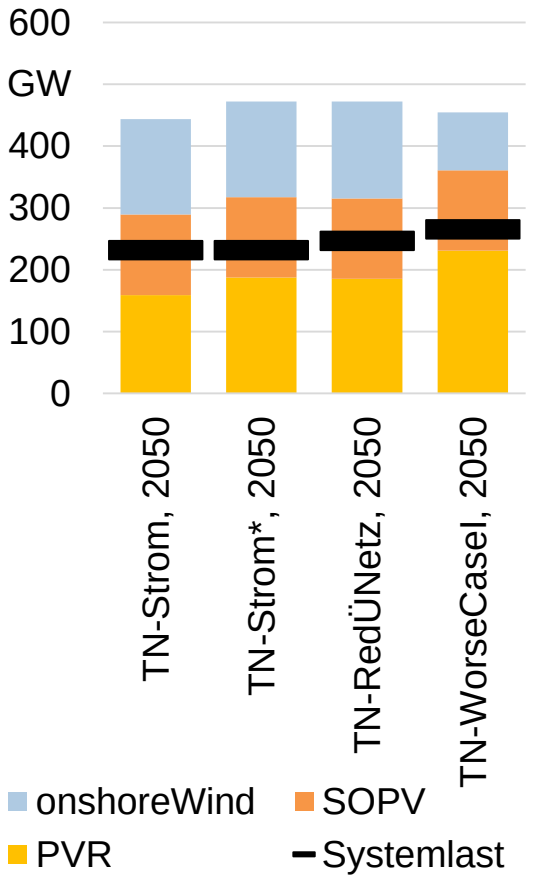


Ausbaubedarf der deutschen Verteilungsnetze im Jahr 2050 (TN-Strom vs. TN-RedÜNetz u. TN-WorseCaseI)

annuitätische Kosten der dt. VN in 2050



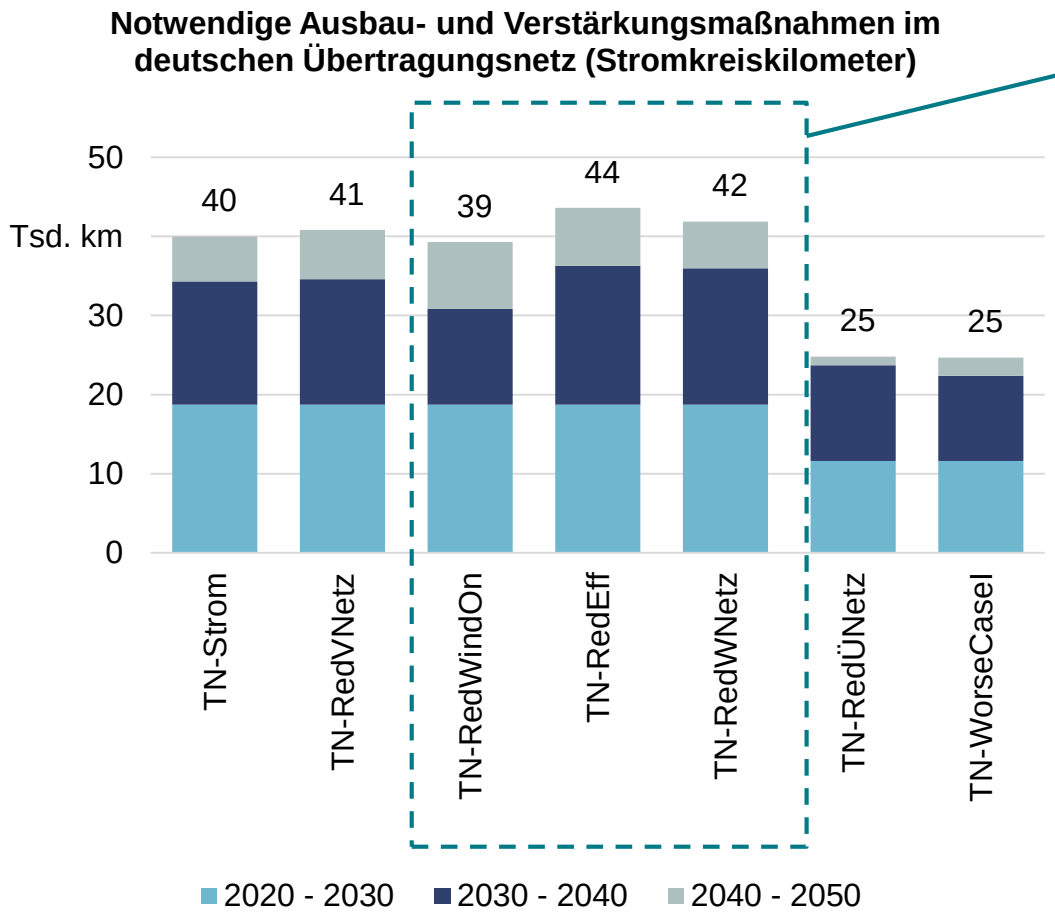
installierte Leistung / Systemlast (VN-Sicht) in 2050



- **TN-Strom***
  - Update des Offshore-Datensatzes für alle neueren Szenarien führt zu Abtausch von Wind Offshore und PV Erzeugung
  - Zur besseren Interpretierbarkeit der Ergebnisse wurde der Effekt höherer PV-Leistung näherungsweise in einem Szenario TN-Strom* als neue Referenz ermittelt
- **Ergebnisse TN-RedÜNetz**
  - VN-Kosten steigen leicht (+0,3 Mrd. €/a), i. W. aufgrund einer höheren Systemlast (primär durch anderen Flexibiitätseinsatz)
  - Netto-Kosteneinsparung in VN+ÜN (-1,5 Mrd. €/a) werden durch Mehrkosten im Restsystem deutlich überkompensiert
- **Ergebnisse TN-WorseCase I**
  - Spürbarer (+1,1 Mrd. €/a) Anstieg der Kosten aufgrund der deutlich höheren Systemlast (ca. +15%), insb. Folge der geringeren Effizienz (Teil der WorseCase-Annahme)

* mit Wirkung Offshore-Update (Näherungsrechnung)

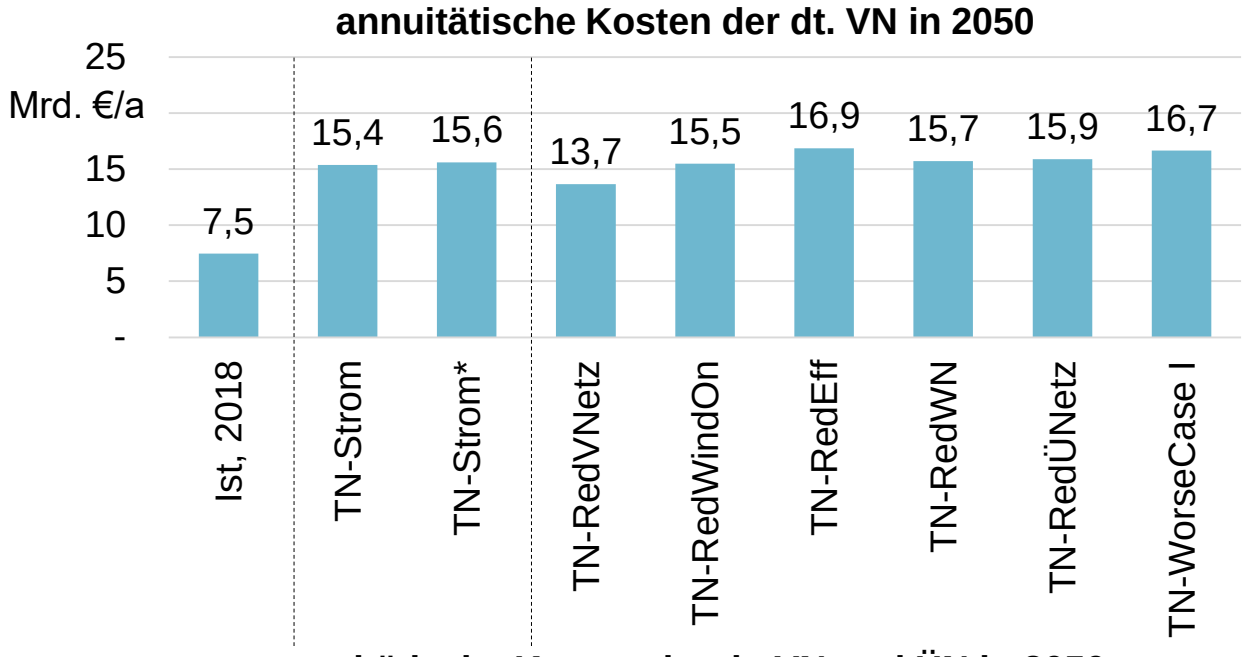
Gesamtvergleich aller Szenariovarianten hinsichtlich des Ausbaubedarfs im dt. Übertragungsnetz

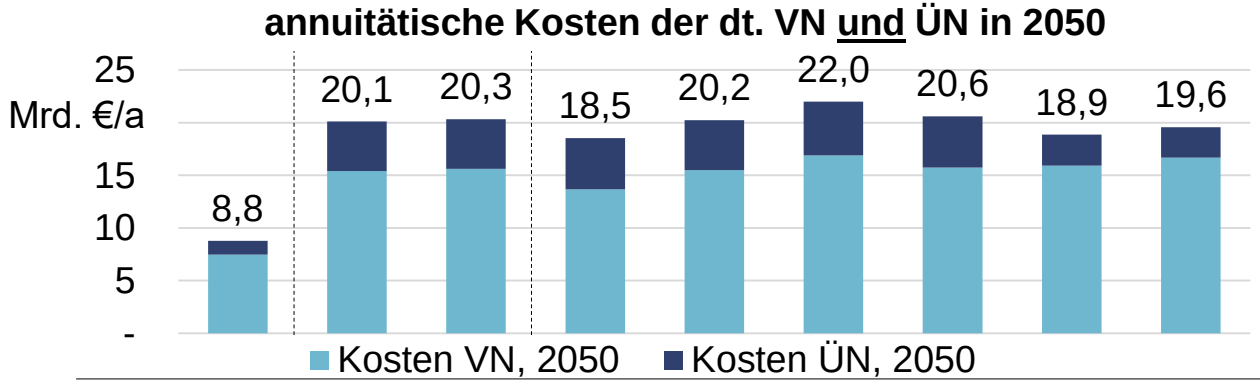


- **Ergebnisse weiterer Szenarien**
  - Leichte Einsparungen beim Netzausbau im Szenario mit weniger Wind Onshore
  - Höherer Netzausbaubedarf im Szenario mit reduzierter Effizienz, insb. durch stärkeren Importbedarf → höherer Interkonnektorausbau (ca. +15% mehr Handelskapazität ggü. TN-Strom)

- **Schlussfolgerungen**
  - Über BBPlG/EnLAG hinaus muss deutsches ÜN bis 2050 weiter deutlich verstärkt und ausgebaut werden.
  - Keine gravierenden Unterschiede zwischen Szenarien, es sei denn deutlicher geringerer Netzausbau vorgegeben (RedÜNetz / WorseCaseI)

Gesamtvergleich aller Szenariovarianten hinsichtlich des Ausbaubedarfs in dt. Stromnetzen

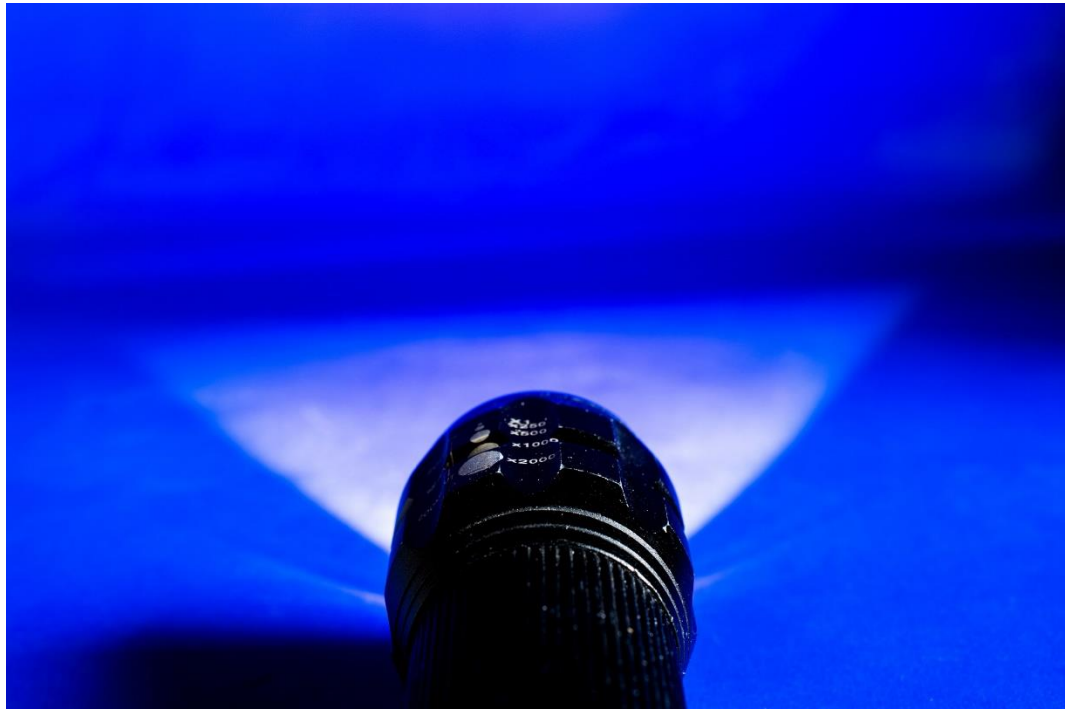




- **Ergebnisse**
  - Szenarien mit reduzierter Effizienz (RedEff und WorseCase I) führen zu höheren Netzkosten, insb. aufgrund der höheren Systemlast
  - Außer im Szenario RedVNetz ansonsten im VN keine gravierenden Unterschiede zwischen den Szenarien
  - RedEff sowohl im ÜN wie im VN mit den höchsten Kosten
  - Ansonsten zum Teil gegenläufige Kosteneffekte in ÜN und VN, so dass Unterschiede in Netzkosten zwischen den Szenarien tendenziell weiter nivelliert werden

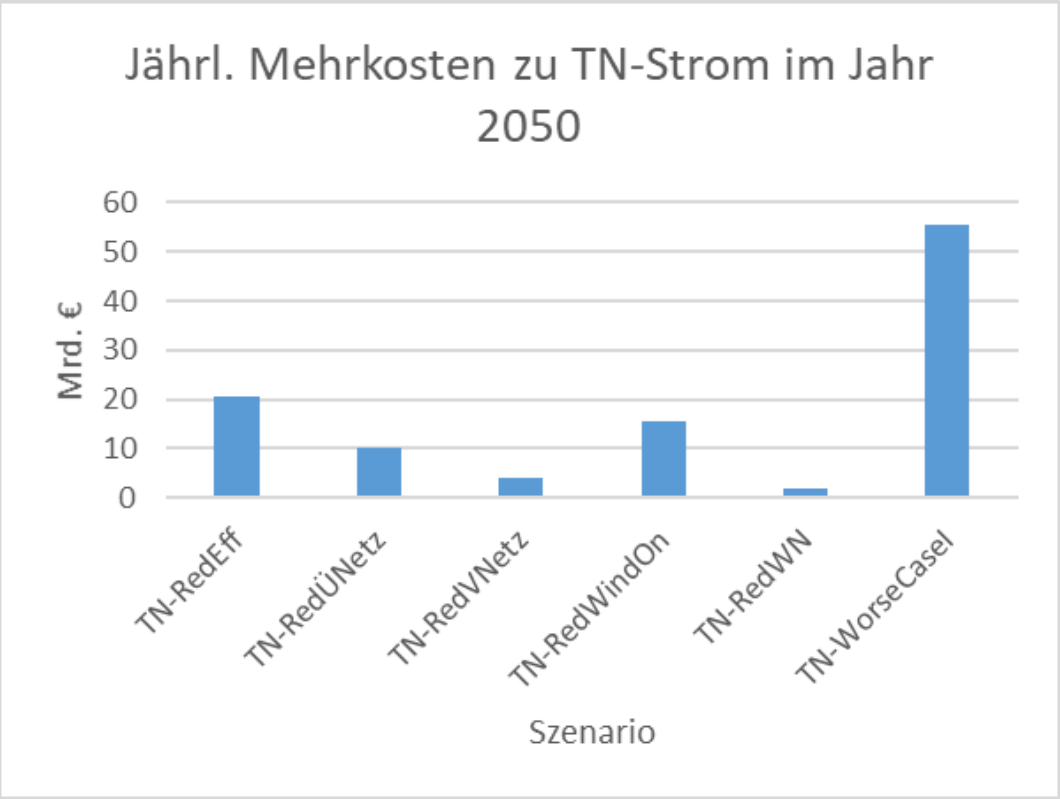
* mit Wirkung Offshore-Update auf VN- Kosten (Näherungsrechnung)

Agenda



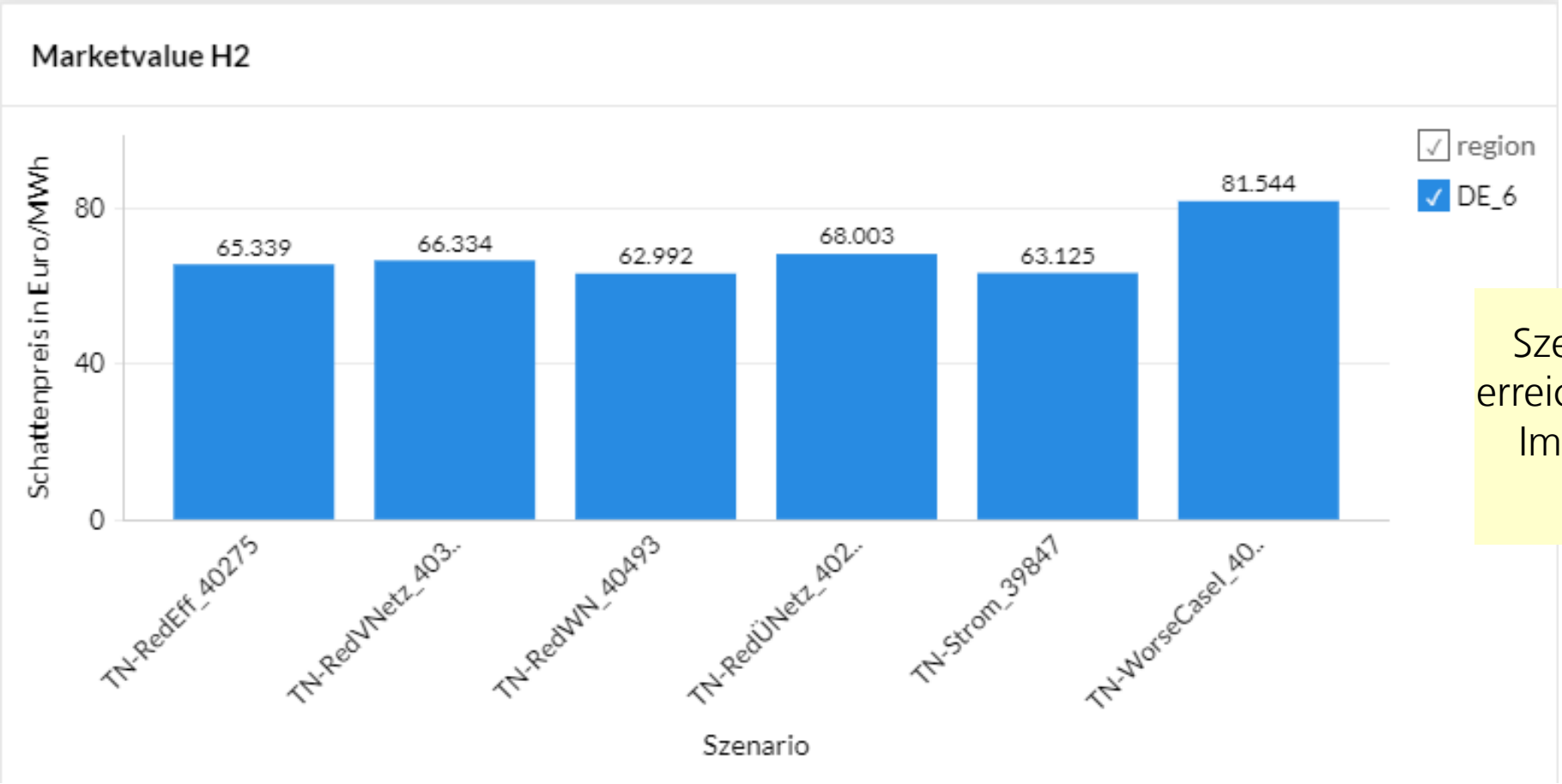
- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Stromnetze
- Gesamtperspektive & Fazit
- Diskussion

Gesamtkosten
Mehrkosten im Jahr 2050 im Vergleich zu TN-Strom



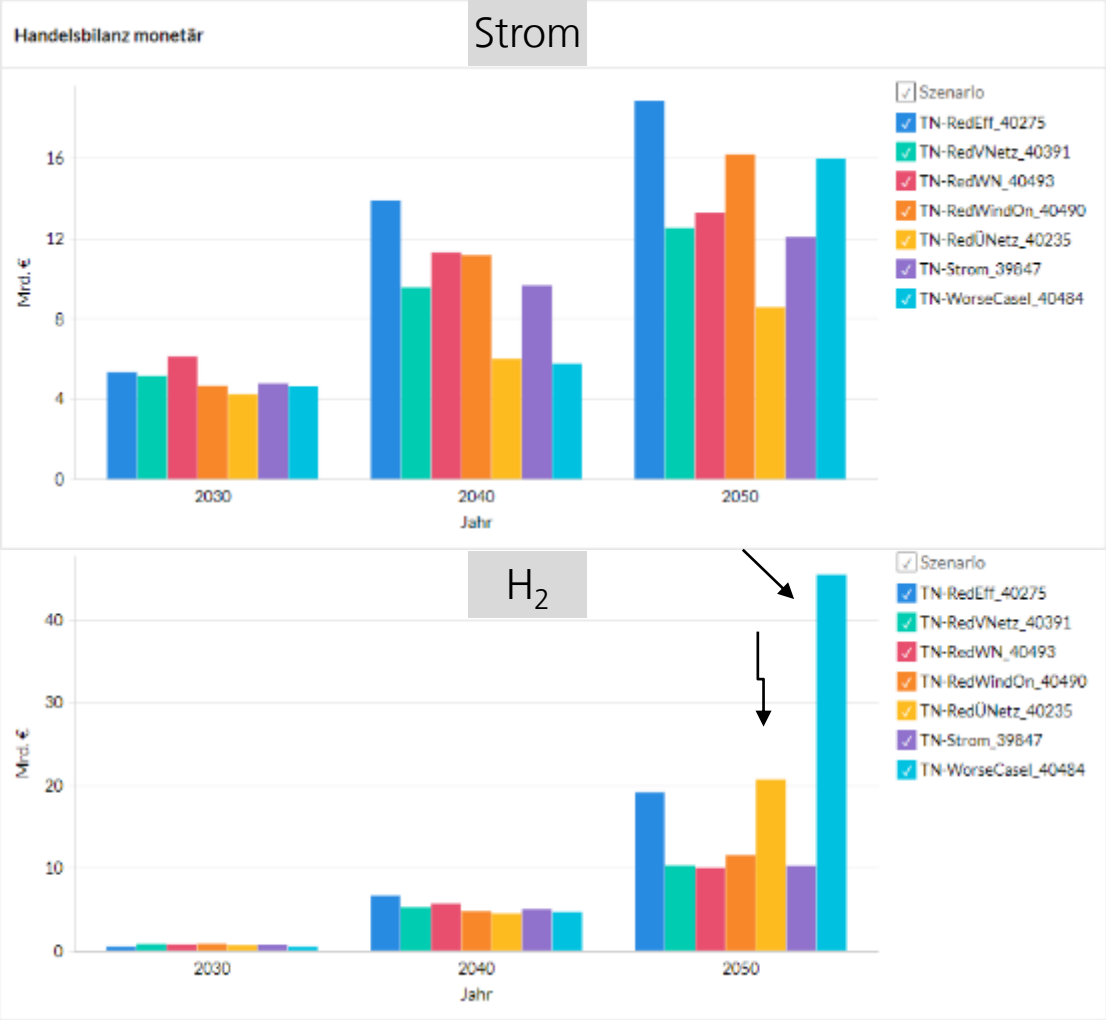
- **Zentrale Ergebnisse**
  - „Weniger Effizienz“ führt zu deutlichen Mehrkosten
  - „Weniger Übertragungsnetz“ führt zu deutlichen Mehrkosten
  - Europaweit „Weniger Wind an Land“ führt in Deutschland zu deutlichen Mehrkosten
  - Die Kostenvergleich des Verteilnetzszenarios ist ebenfalls negativ
  - Das Szenario TN-WorseCasel ist vermutlich prohibitiv teuer (Mehrkosten >50 Mrd.€)
- **Hinweise**
  - Kostensteigerung durch neuen Offshoredatensatz von ca. 1,9 Mrd. € enthalten.
- **Schlussfolgerung**
  - Die hier untersuchten Einschränkungen des TN-Strom sollten möglichst gering gehalten werden

Schattenpreis für Wasserstoff
Szenariovergleich Region DE6 (Süden)



Szenario TN-WorseCasel erreicht Grenzbereich für H2 Importe aus der MENA-Region

Handelsbilanz (monetär) Szenariovergleich



- Bei reduziertem Ausbau der Stromübertragungsnetze Ausweichbewegung von Strom auf H2 Handel erkennbar

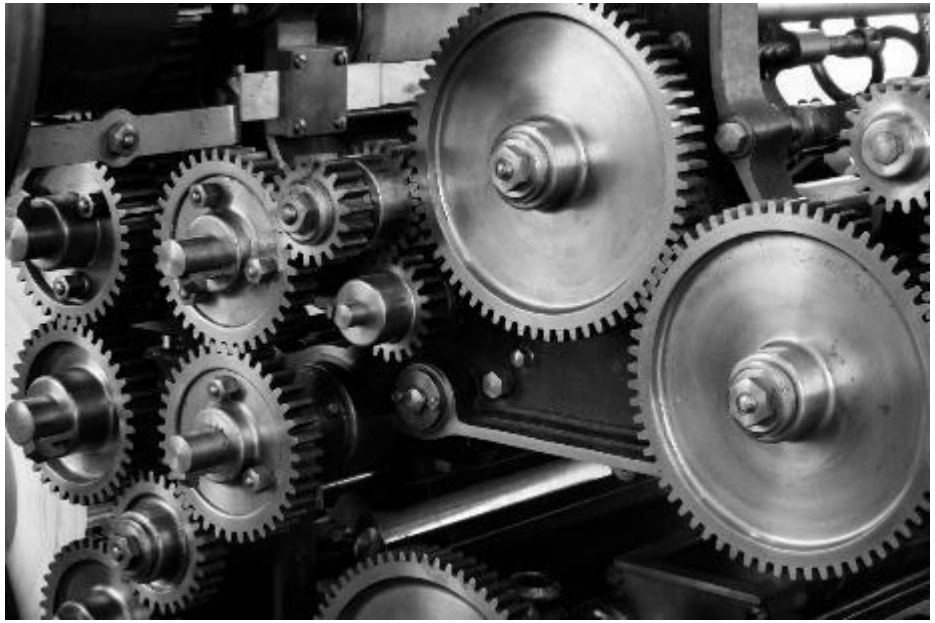
Zusammenfassung
Zentrale Effekte

Was passiert bei geringerer Effizienz ?				
Kosten ++	**Strom-Import +**	**H_2-Import +**	**H_2 Speicher +**	**Stromnetz +**
Was passiert bei weniger Wind an Land ?				
Kosten ++	**Wind Offshore +**	**PV +**	**H_2 Speicher +**	**Strom-V-Netz +**
Kann das Verteilnetz sinnvoll entlastet werden ?				
Kosten +	**Strom-Ü-Netz +**	**EE Leistung +**		
Was passiert bei weniger Wärmenetzen ?				
Kosten (+)	**Stromimport +**			
Was passiert bei weniger Übertragungsnetz ?				
Kosten ++	**H_2-Stromerz. +**	**H_2-Import +**	**H_2 Speicher +**	
Was passiert bei Kombination von geringer Effizienz & weniger Wind an Land & weniger Übertragungsnetz?				
Kosten ++++	**Wind offshore +** **PV + H_2-Stromerz. +**	**H_2-Import ++**	**H_2 Speicher ++**	**Batteriespeicher ++**

Fazit

- Ein Verzicht auf (ggf. unpopuläre) starke Anstrengungen für den Stromnetzausbau, den Ausbau der Windenergie an Land und die Steigerung der Energieeffizienz erschwert die Energiewende und steigert die Kosten erheblich
- Ein kombinierter Misserfolg in allen drei Elementen der Energiewende sollte unbedingt vermieden werden.
- Flexibilität im Wasserstoffsystem durch Wasserstoffspeicher und ein internationales Wasserstoffnetz ist ein zentrales Element für die Absicherung der Risiken in den oben genannten Bereichen

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Ansprechpartner:	
Projektleitung:	Dr. Frank Sensfuß
Energieangebot:	Benjamin Lux
Gasnetze:	Prof. Dr. Müller-Kirchenbauer
Gebäude:	Peter Mellwig
Geräte & GHD:	Dr. Heike Brugger
Industrie:	Dr. Tobias Fleiter
Stromnetze:	Dr. Christoph Maurer
Verkehr:	Prof. Dr. Martin Wietschel

www.langfristszenarien.de

Agenda

- Begrüßung durch BMWi
- Überblick Langfristszenarien
- Energienachfrage
- Energieangebot
- Stromnetze
- Gesamtbilanzen
- Diskussion