LANGFRISTSZENARIEN FÜR DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS IN DEUTSCHLAND

Nachfragesektoren THG-neutrale Szenariowelten

Gebäudewärme sowie Gewerbe, Handel & Dienstleistungen, Privathaushalte

30. Juni 2021

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

Agenda

Raumwärme und Warmwasser

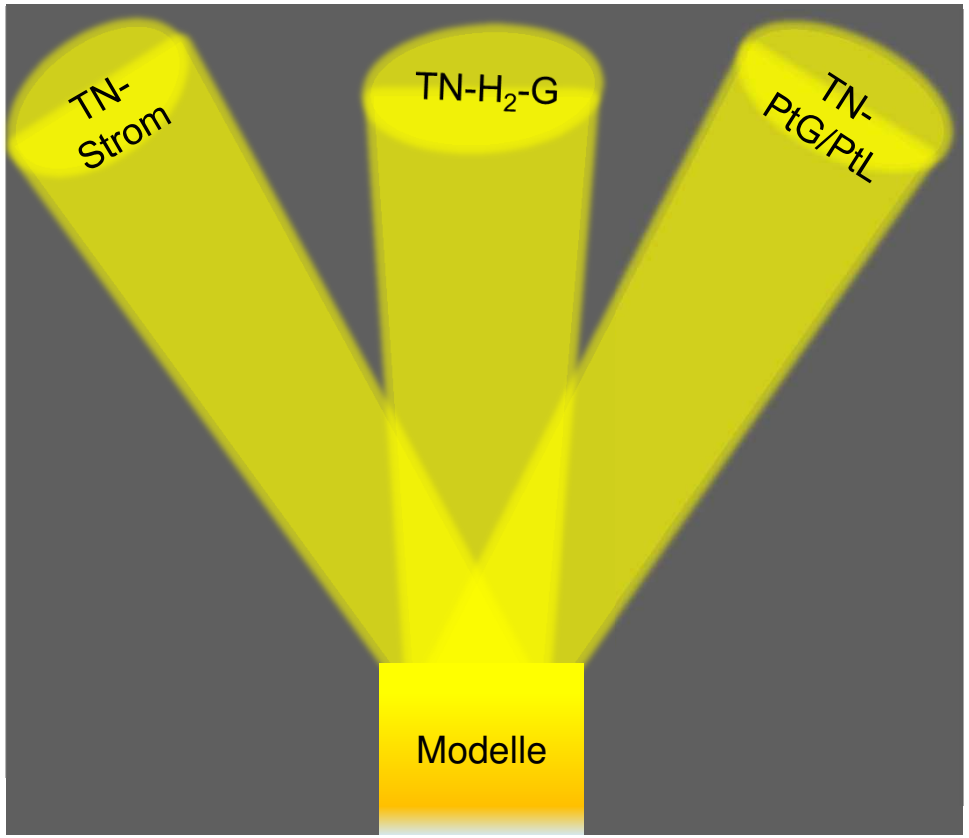
- Einordnung im Gesamtprojekt
- Methodik und Rahmendaten
- Ergebnisse: Versorgungstechnologien und Energieverbrauch
- Schlussfolgerungen
- Regionale Analysen

Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Einordnung im Gesamtprojekt

Methodik & Szenariodesign

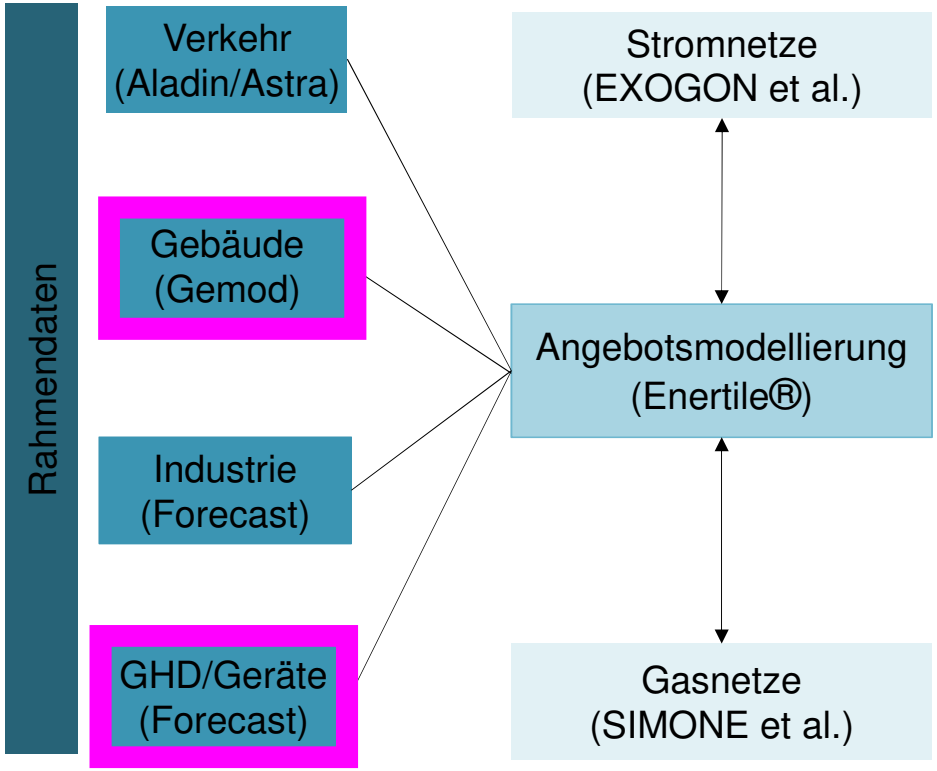
Erkenntnisgewinn durch Vergleich statt einzelnem „Leitszenario“



- **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-G*)
    - 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

Hinweis im Gesamtprojekt werden >25 Szenarien berechnet

Modellsystem
Gekoppelte Modelle erlauben hoch aufgelöste Analysen

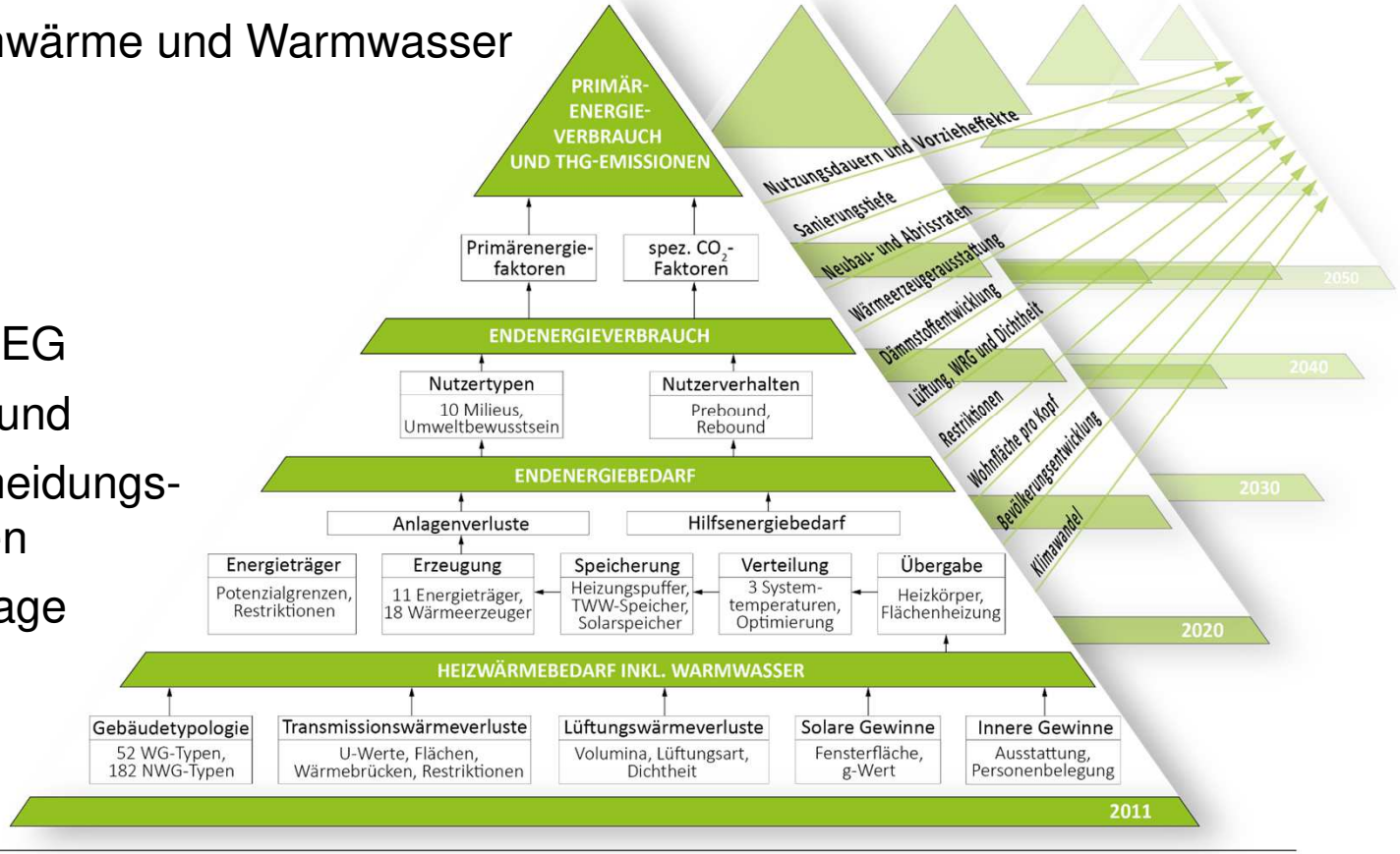


- **Vorgehensweise**
  - Detaillierte Modelle berechnen Energienachfrage
  - Energienachfrage wird **regionalisiert**
  - Potentiale Erneuerbarer Energien werden in hoher räumlicher und **zeitlicher** (stundenscharf) Auflösung berechnet
  - Bereitstellung der Energie wird optimiert und mit Netzmodellen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

Methodik und Rahmendaten

Gebäudemodell GEMOD

- Bottom-Up-Modellierung Raumwärme und Warmwasser
- 4 Wohngebäudetypen
  14 Nichtwohngebäudetypen
  13 Altersklassen
  → 234 Gebäudetypen
- Berechnungsverfahren gem. GEG
- Verbrauchsberechnung / Rebound
- Betriebswirtschaftliches Entscheidungs-modul für Heizungstechnologien
- Sanierungstätigkeit auf Grundlage der Nutzungsdauern
- Bundesebene, Bundesländer, Landkreise, Einzelgebäude

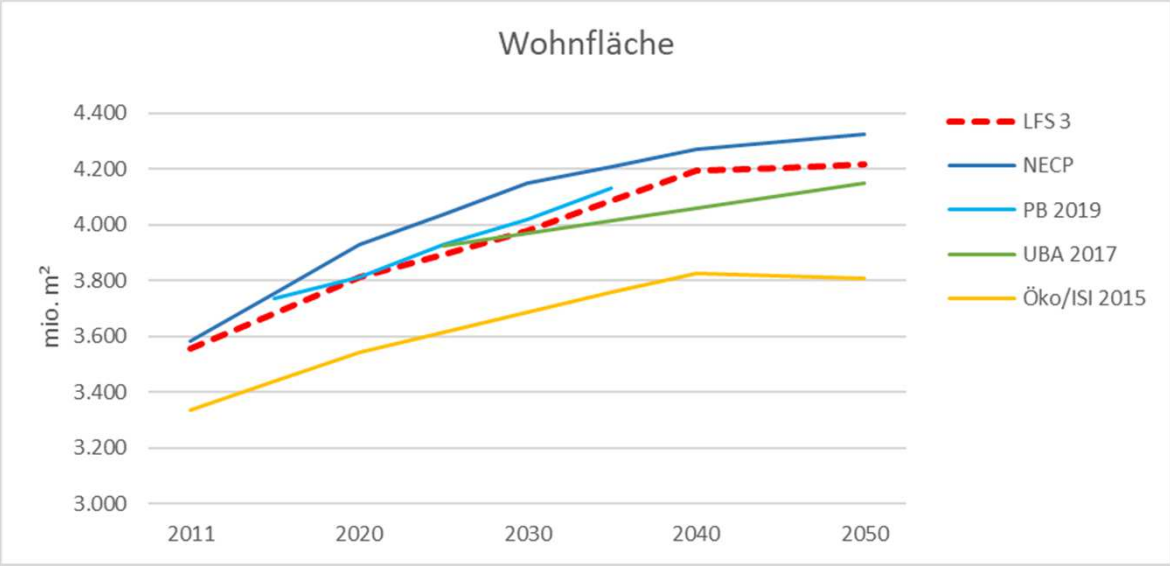


Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Rahmenbedingungen Gebäude

- Wohnflächenentwicklung in allen Szenarien gleich
- an Projektionsbericht und NECP orientiert, jedoch mit „Suffizienz-Abschlag“
  2030: 1%
  2050: 2,5%
- Wohnflächenentwicklung höher als in vielen früheren Szenarien

- Kein Anstieg des Biomasse-budgets



Storylines der TN-Szenarien

TN-Strom

- Zielszenario mit 100% THG-Minderung 2050
- Hoher Anteil von Wärmepumpen
- Hohe Bedeutung von Gebäude-Effizienz
- Anheben der Bauteil-Anforderungen um durchschnittlich 27% (Dämmung)
- Beschleunigung der Sanierungs-zyklen um durchschnittlich 20% (nicht bei Anlagen)
- 2050 sind 37% der Gebäude mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgestattet
- → keine synthetischen Energieträger in der Breite verfügbar

TN-PtG/PtL

- Zielszenario mit 100% THG-Minderung 2050
- Hoher Anteil von PtG in dezentralen Heizungen

TN-H_2-G

- Zielszenario mit 100% THG-Minderung 2050
- Hoher Anteil von Wasserstoff in dezentralen Heizungen
- Verbrennung in Heizkesseln

- **Besonderheit**: die Entwicklung von Gebäude-Effizienz und Wärmeerzeugern verläuft in TN-PtG/PtL- und TN-H_2-G-Szenario parallel
- Anheben der Bauteil-Anforderungen um durchschnittlich 15% (Dämmung)
- Keine Beschleunigung der Sanierungszyklen
- 2050 sind 21% der Gebäude mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausgestattet

Effizienzanforderungen

- Anforderungen an Hülle steigen durchschnittlich um
  - TN-Strom 27%
  - TN-PtG/H_2-G 15%
- Beschleunigung der Sanierungszyklen durchschnittlich um
  - TN-Strom 20%
  - TN-PtG/H_2-G 0%
- Gebäude mit Lüftungsanlagen (WRG) in 2050
  - TN-Strom 37%
  - TN-PtG/H_2-G 21%

TN-Strom

U-Werte in W/m²K	Neubau		konventionelle Sanierung		ambitionierte Sanierung	
	bis 2020	ab 2021	bis 2020	ab 2021	bis 2020	ab 2021
Dach	0,20	0,15	0,20 / 0,24	0,15	0,14	0,13
Fassade	0,28	0,16	0,24	0,16	0,20	0,14
Fenster	1,30	0,80	1,30	0,80	0,95	0,70
Keller	0,35	0,22	0,30	0,22	0,25	0,20

TN-PtG / TN-H_2-G

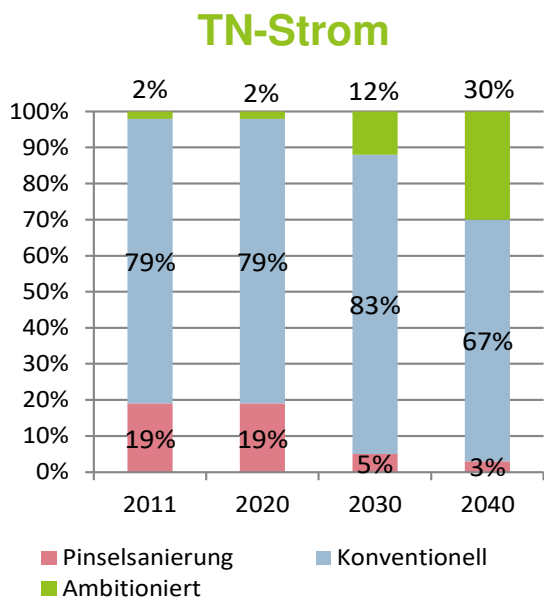
U-Werte in W/m²K	Neubau		konventionelle Sanierung		ambitionierte Sanierung	
	bis 2020	ab 2021	bis 2020	ab 2021	bis 2020	ab 2021
Dach	0,20	0,17	0,20 / 0,24	0,17	0,14	0,13
Fassade	0,28	0,20	0,24	0,20	0,20	0,18
Fenster	1,30	1,00	1,30	1,00	0,95	0,80
Keller	0,35	0,26	0,30	0,26	0,25	0,23

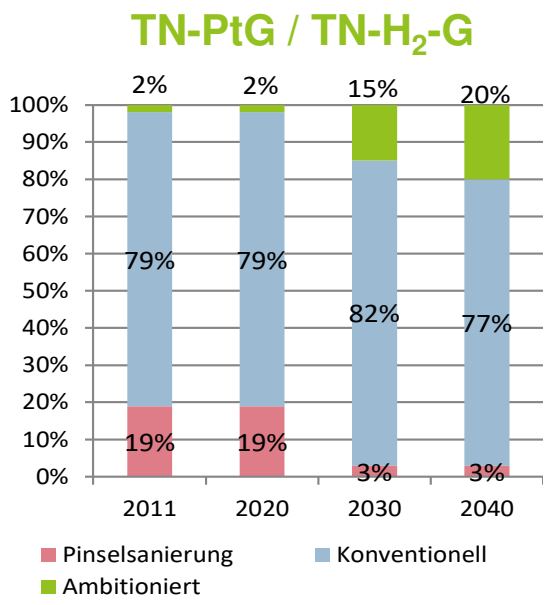
Sanierungstiefe

- **Pinselsanierungen**
  (keine Änderung des U-Werts)
  gehen in allen Szenarien deutlich zurück

- **Konventionelle Sanierungen**
  (U-Wert-Anforderungen gem. GEG)
  bleiben Standard, sinken langfristig

- **Ambitionierte Sanierungen**
  (entsprechen heute der BEG)
  steigen in allen Szenarien stark an



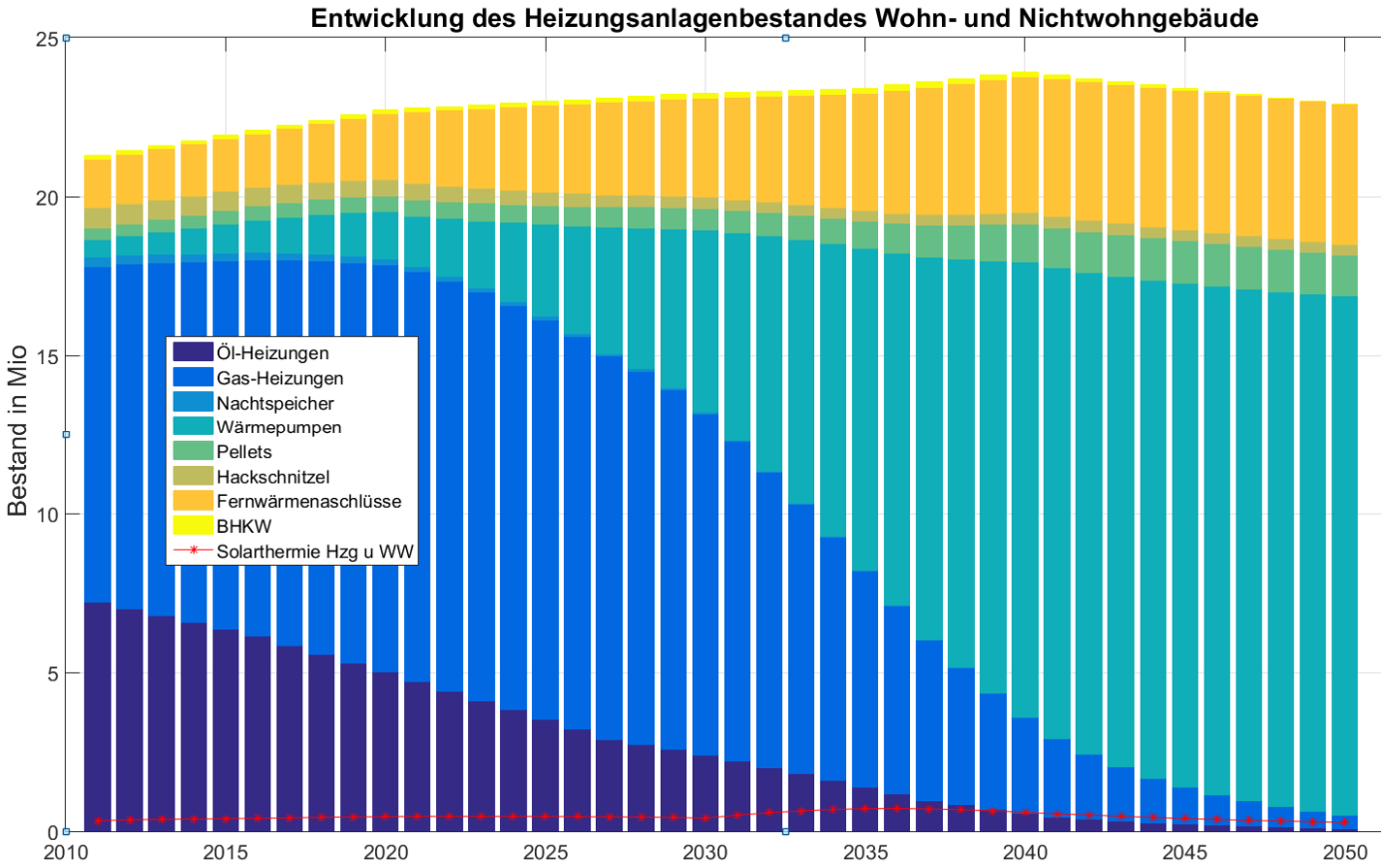


Ergebnisse:
Versorgungstechnologien und Energieverbrauch

Wärmeerzeuger
Szenario TN-Strom

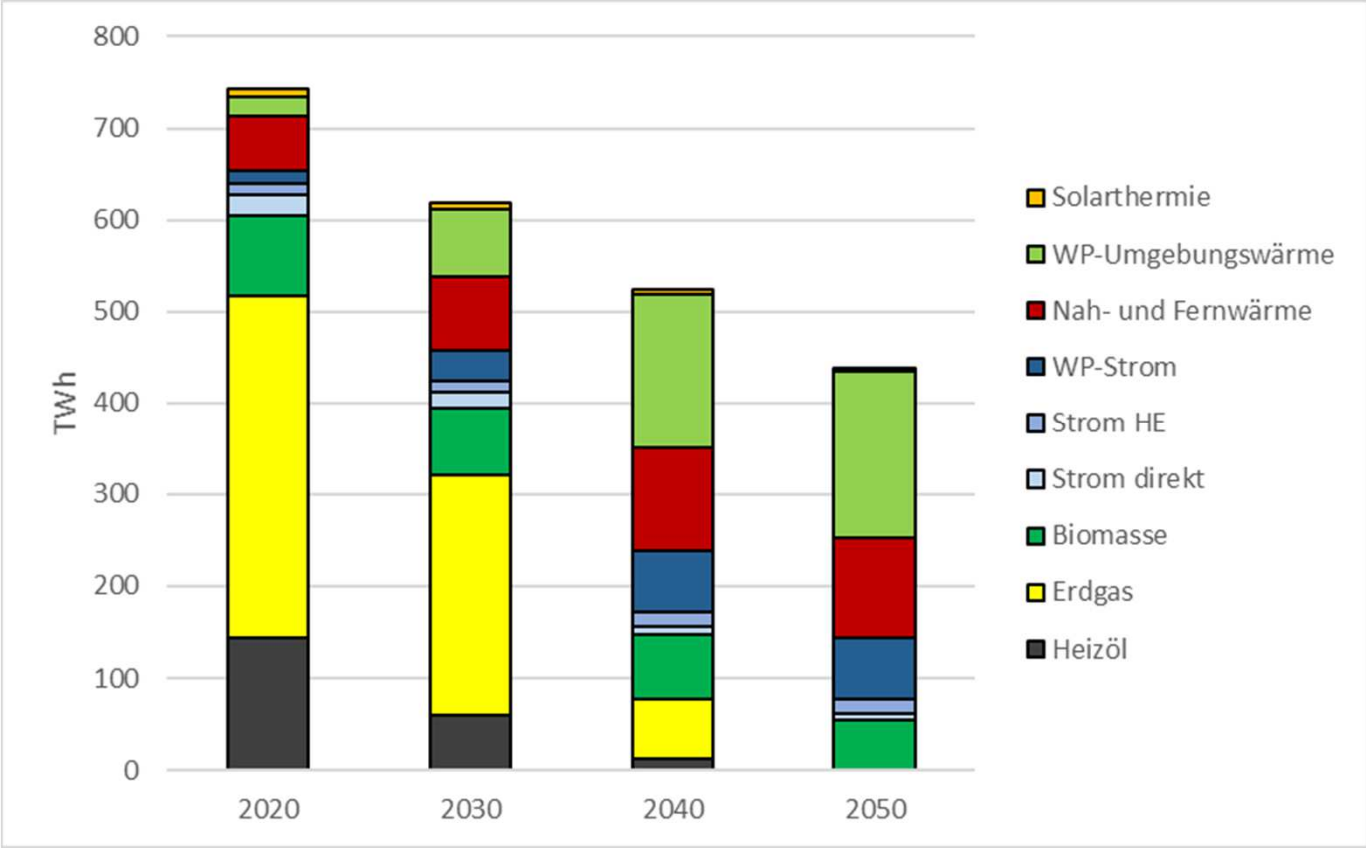
Wärmeerzeuger

- Fossile Heizkessel werden ab 2030 nicht mehr installiert, in 2050 werden 400.000 Gaskessel vorzeitig stillgelegt
- Zunahme von Wärmepumpen auf 5,8 Mio. (2030) bzw. 16,4 Mio. (2050)
- Anstieg Wärmenetz-anschlüsse um Faktor 2,4
- Anstieg Holzpelletkessel um Faktor 2,6



Endenergie
Szenario TN-Strom

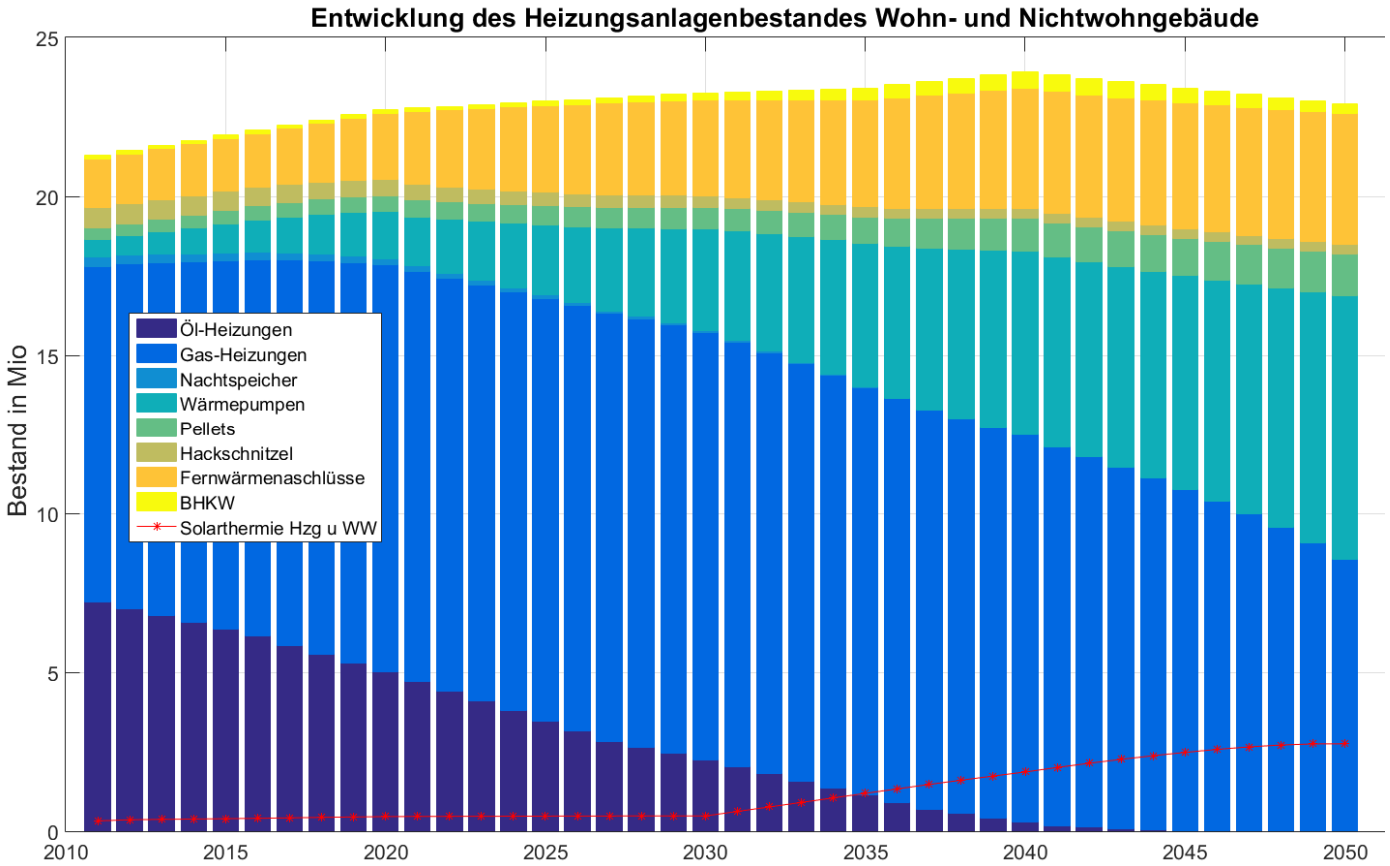
- Senkung des Endenergieverbrauchs (inkl. Umgebungswärme) um 47% ggü. 2008
- Herausforderungen
  - Hohes Effizienzniveau
  - Hochlauf Wärmepumpen
  - Hochlauf Wärmenetze
- Chancen
  - Investition in hochwertigen Gebäudebestand (langlebig)
  - Hohe Zielkonformität
  - Entlastung der Netze



Wärmeerzeuger
Szenarien TN-PtG/PtL und TN-H_2-G

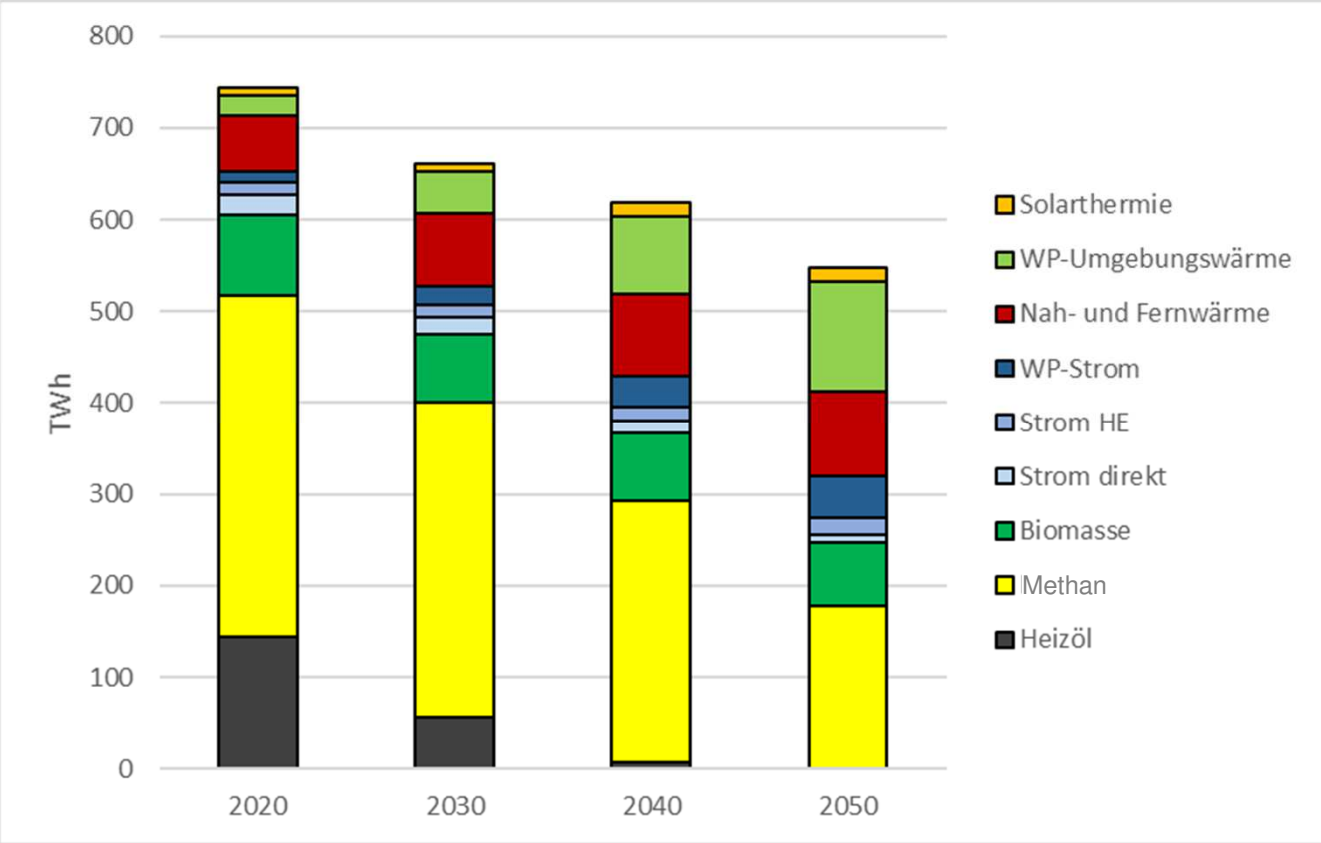
Wärmeerzeuger

- Abnahme von Gaskesseln um 36% (8,6 Mio. in 2050)
- Auslaufen von Ölkesseln
- Zunahme von Wärmepumpen auf 3,2 Mio. (2030) bzw. 8,3 Mio. (2050)
- Anstieg Wärmenetz-anschlüsse um Faktor 2,2
- Anstieg Holzpelletkessel um Faktor 2,7



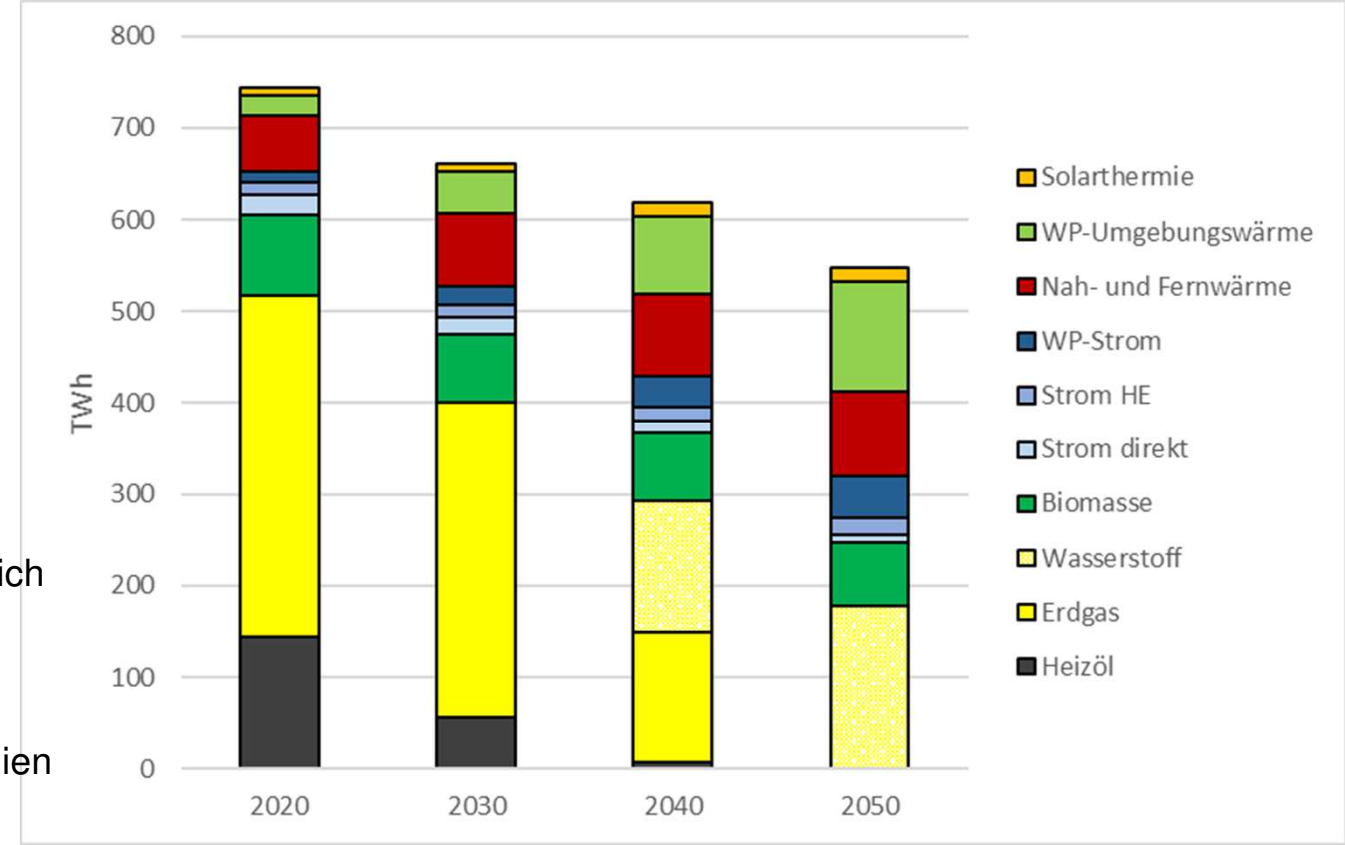
Endenergie
Szenario TN-PtG/PtL

- Senkung des Endenergiebedarfs (inkl. Umgebungswärme) um 33% ggü. 2008
- Herausforderungen
  - 2030-Ziel hängt von frühzeitigem PtG-Hochlauf ab
  - Investition in Brennstoffversorgung (konsumtiv)
  - PtG-Preisbildung unsicher, Kostenrisiko
- Chancen
  - PtG-Beimischung problemlos möglich
  - Beibehalten der Heiztechnologien



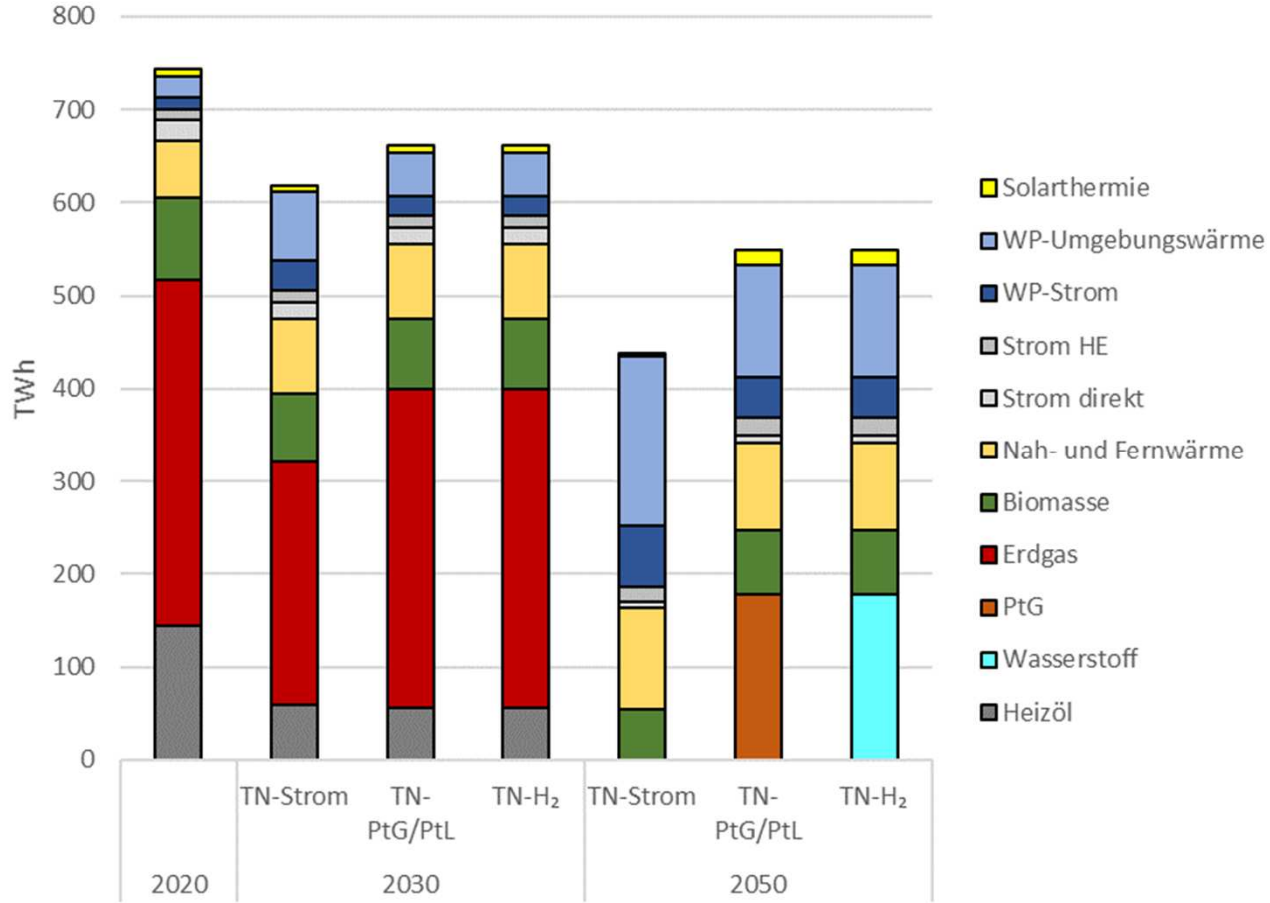
Endenergie
Szenario TN-H_2-G

- Senkung des Endenergiebedarfs (inkl. Umgebungswärme) um 33% ggü. 2008
- Herausforderungen
  - 2030-Ziel hängt von frühzeitigem H_2-Hochlauf ab
  - Investition in Brennstoffversorgung (konsumtiv)
  - Anpassung der Gas-Netze erforderlich
  - Austausch der Wärmeerzeuger erforderlich
    → aufwändige Logistik
- Chancen
  - Beibehalten von Verbrennungstechnologien
  - H_2 voraussichtlich günstiger als PtG



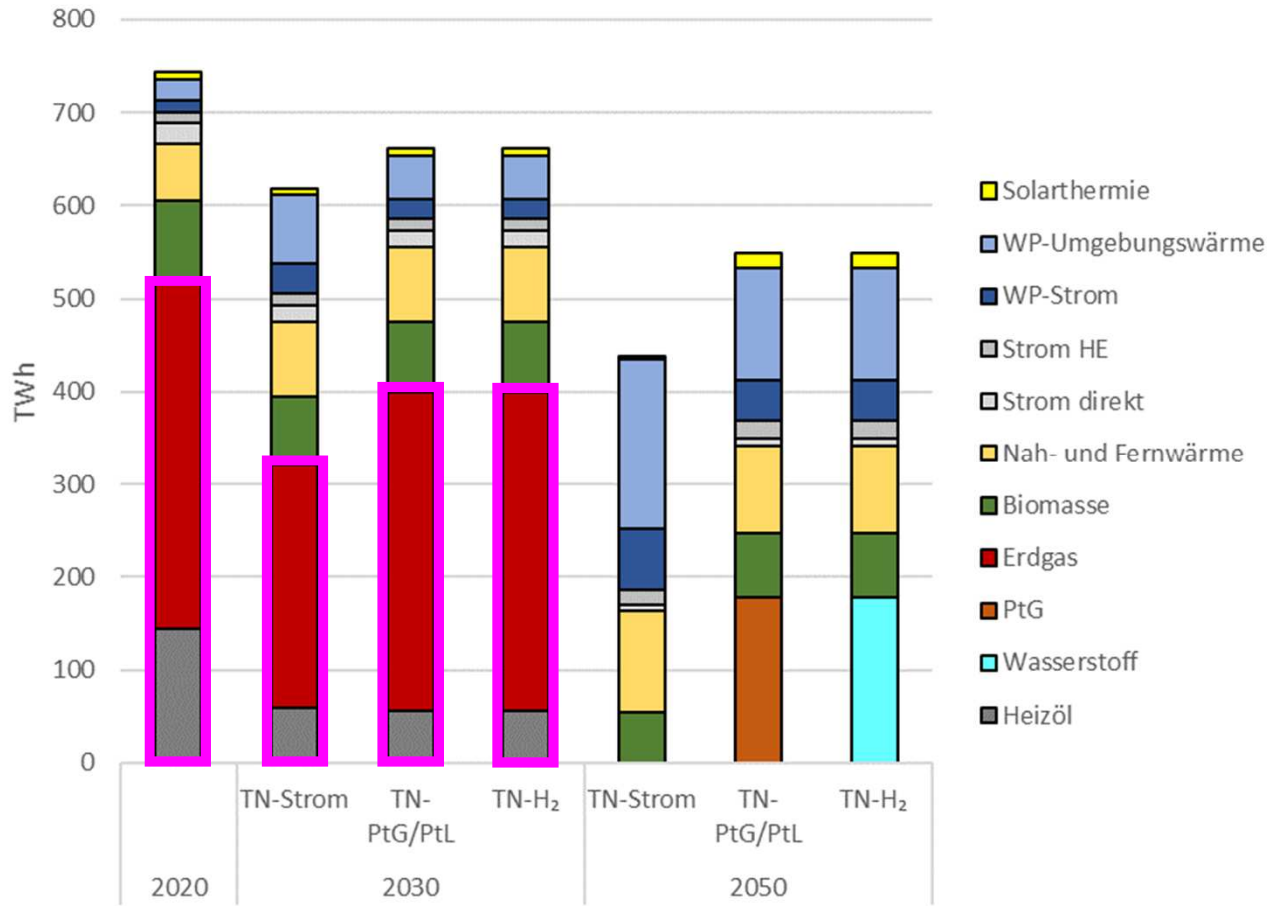
Endenergie Szenarienvergleich

- Senkung des Endenergiebedarfs (inkl. Umgebungswärme)
  - TN-Strom: 47%
  - TN-PtG/H_2-G: 33%
- Weitgehende Verlagerung der Emissionen auf den Umwandlungssektor



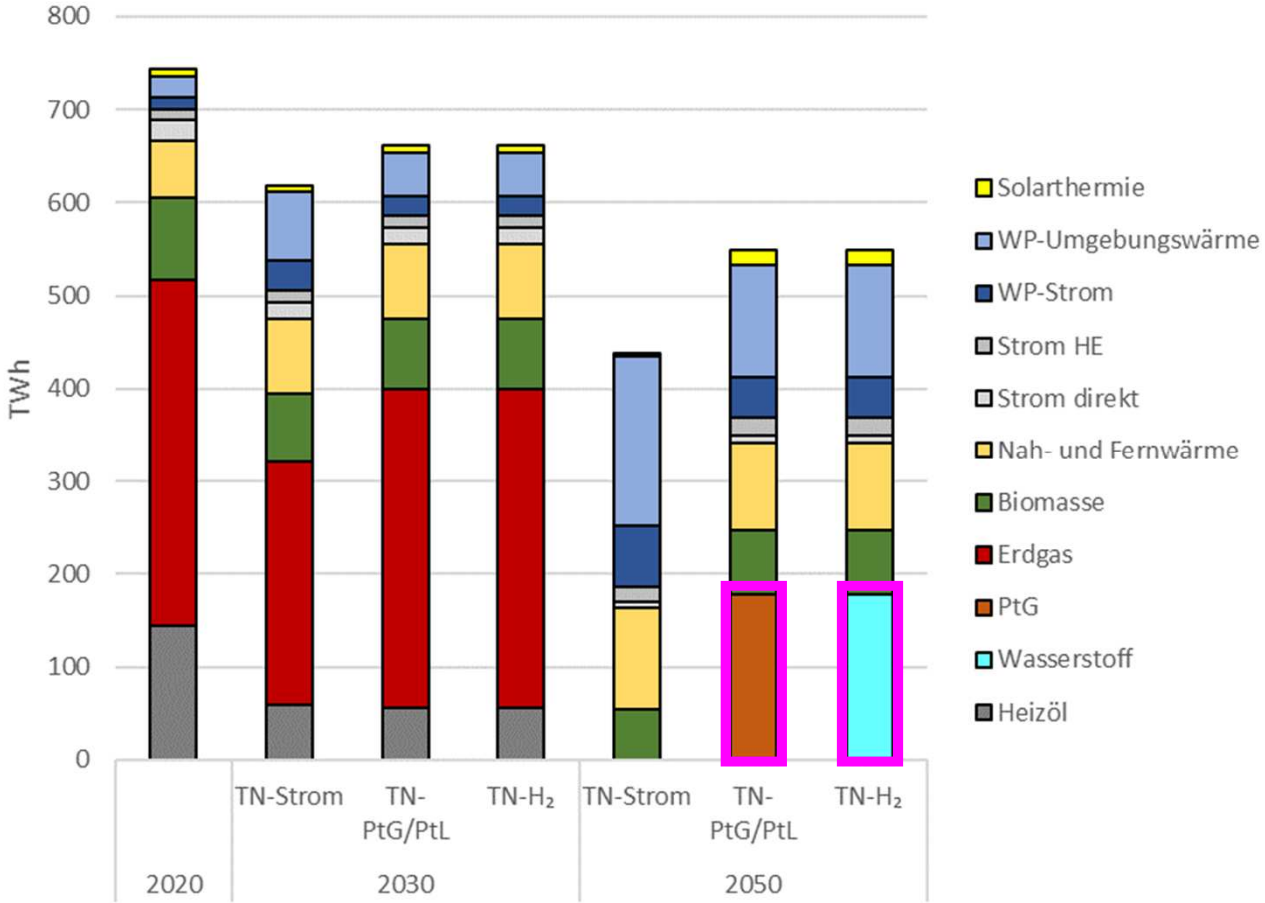
Endenergie
Szenarienvergleich – fossile Energieträger

- Fossile Energieträger werden 2050 nicht mehr verwendet
- Dieses Ziel ist auf 2045 vorzuziehen.
- Dazu müssen in TN-Strom 400.000 verbliebene Wärmeerzeuger stillgelegt werden.



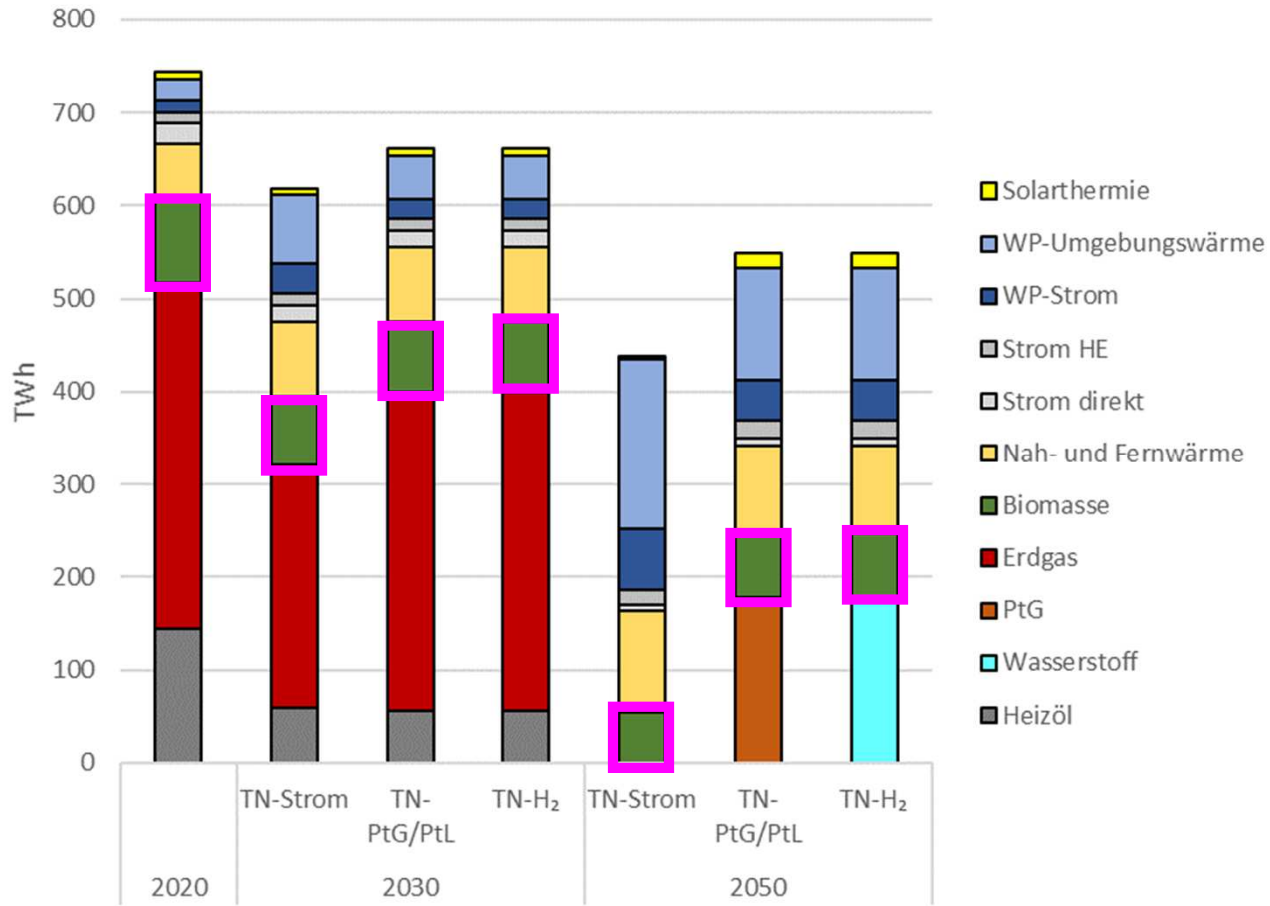
Endenergie
Szenarienvergleich – synthetisches Methan, Wasserstoff

- Der Hochlauf von PtG und Wasserstoff muss spätestens in 2030 mit 170 GWh starten und sich alle 2 Jahre verdoppeln
- PtG oder Wasserstoff decken in 2050 ein Drittel des Wärmeverbrauchs im jeweiligen Szenario
- Der Gasverbrauch in Gebäuden sinkt um die Hälfte



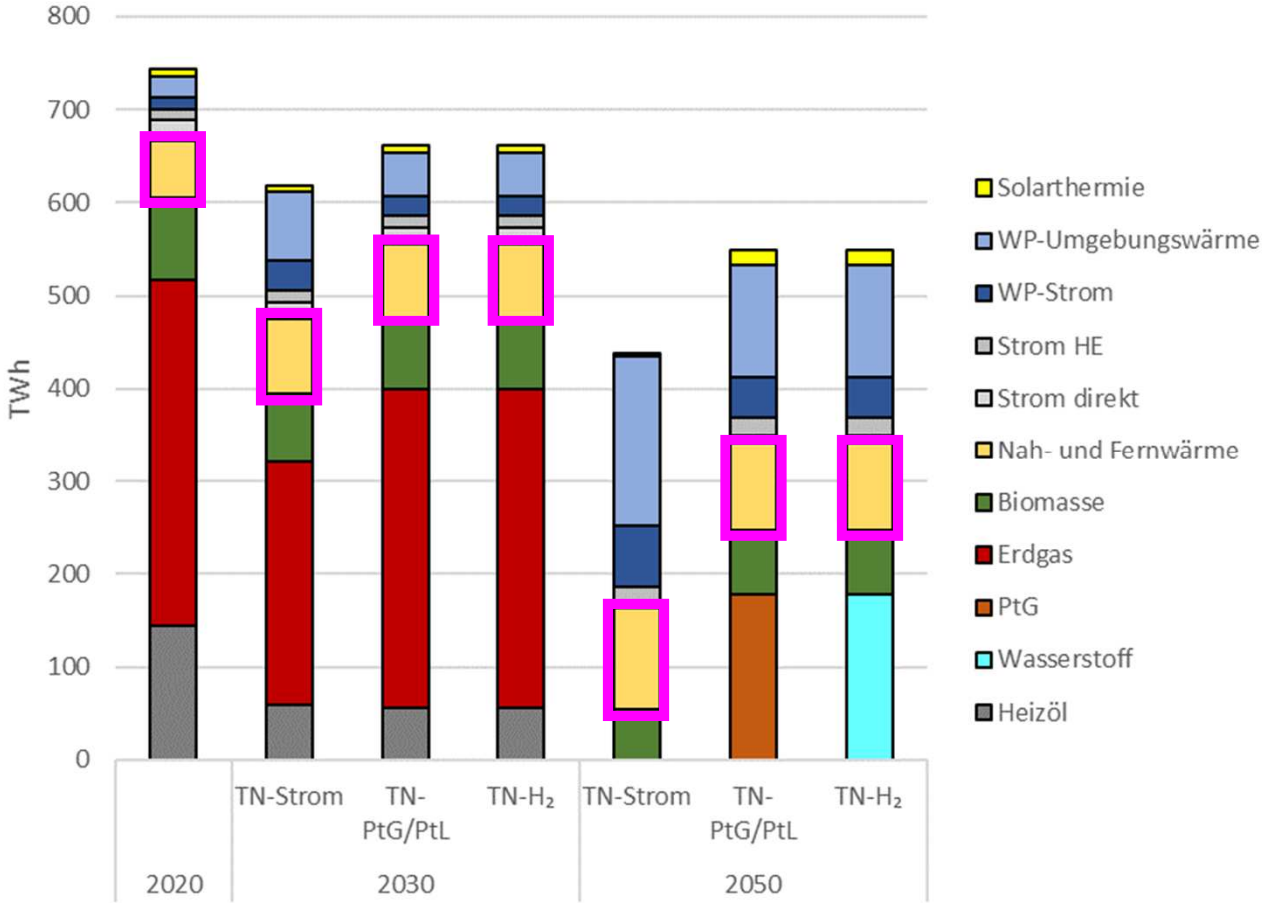
Endenergie
Szenarienvergleich - Biomasse

- Biomasse bleibt annähernd konstant bzw. geht leicht zurück
- Einsatz vornehmlich in ländlichen Gebieten und bei traditioneller Holzfeuerung
- Verschiebung von Scheitholzfeuerung zu Pellets und Hackschnitzeln



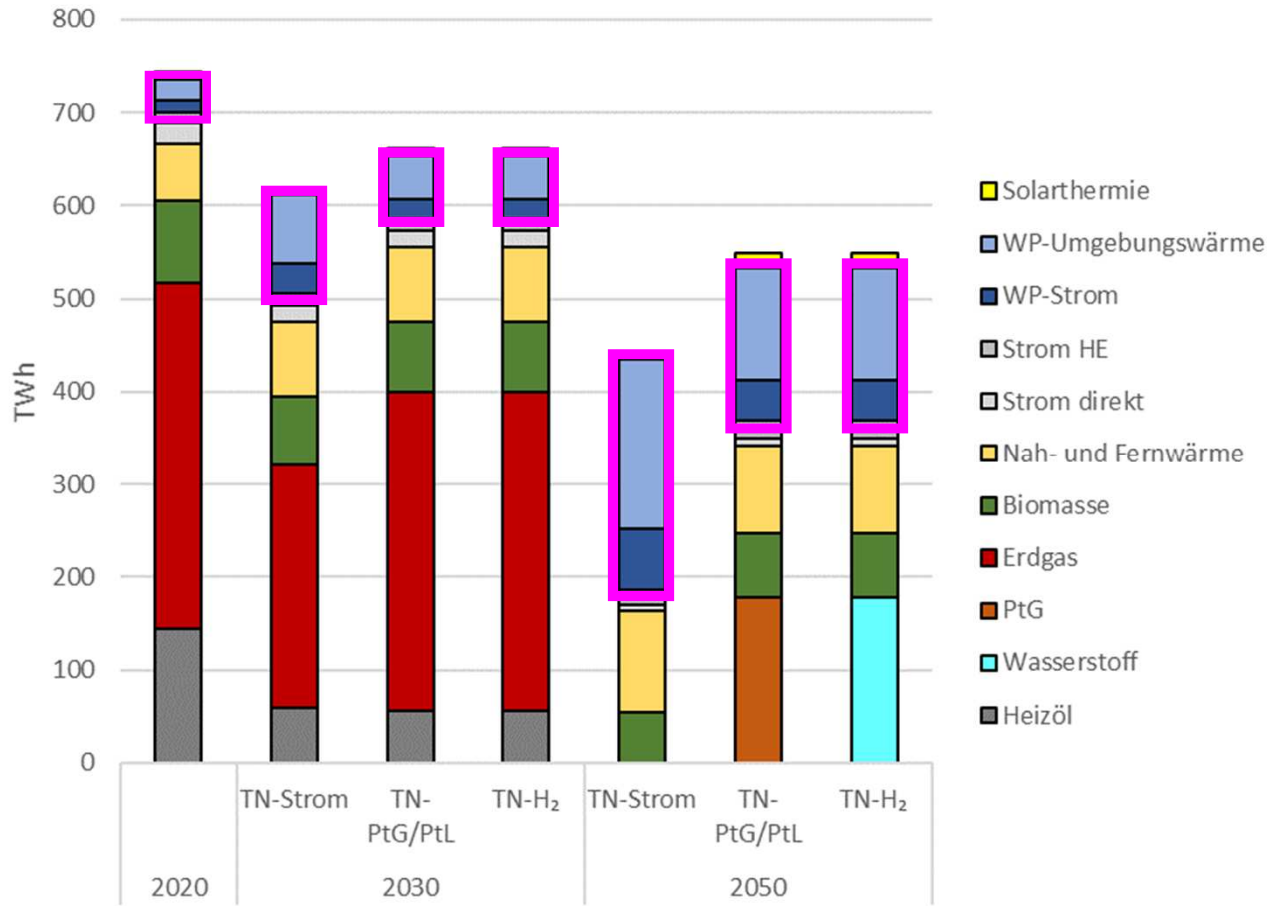
Endenergie
Szenarienvergleich - Wärmenetze

- Der Wärmeabsatz von Nah- und Fernwärme steigt um 55 bis 80%
- Da der Wärmeverbrauch der Gebäude gleichzeitig sinkt, steigt die Zahl der angeschlossenen Gebäude um 120 bis 140%
- Nachverdichtung vorhandener Netze und Errichtung neuer Netze in allen Szenarien erforderlich



Endenergie
Szenarienvergleich - Wärmepumpen

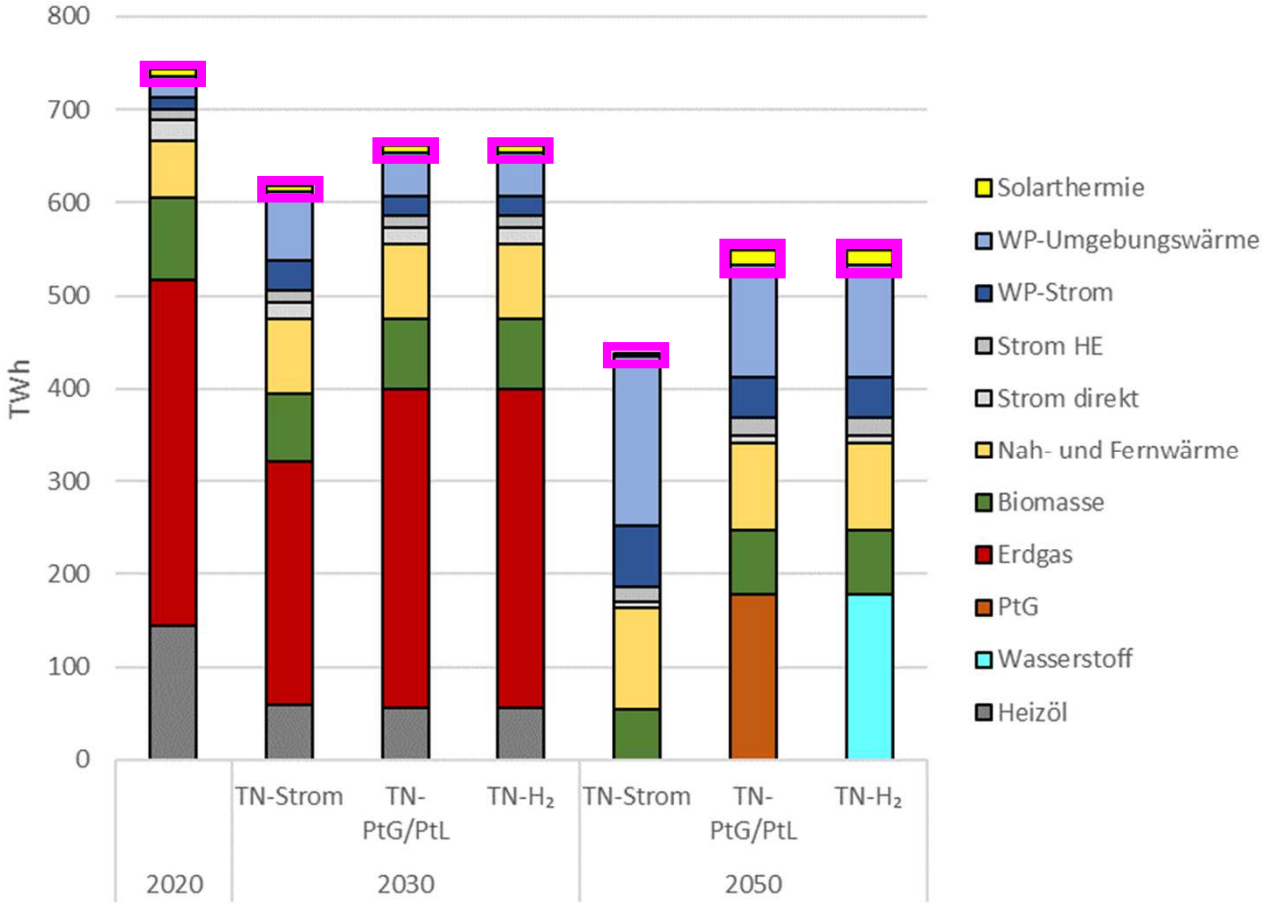
- Wärmepumpen wachsen in allen Szenarien stark an
- Sie werden bevorzugt in kleineren und effizienteren Gebäuden eingesetzt
- Luft-Wärmepumpen bleiben mit rund 80% dominant.



Endenergie
Szenarienvergleich - Solarthermie

- Solarthermie wird vor allem in Kombination mit PtG- und H_2-Heizungen eingesetzt. Hier substituieren sie teure Brennstoffe und amortisieren sich schneller.

- Solarthermie und Wärmepumpen kannibalisieren sich z.T. gegenseitig (Ausnahme: Eisspeicher, Regenerierung Erdsonden)



Schlussfolgerungen

Einordnung der Szenarien vor dem Hintergrund der neuen Klimaschutzziele nach dem Urteil des BVerfG

- Die Szenarien wurden vor dem Urteil des Bundesverfassungsgerichtes gerechnet.
- Die zentrale Zielvorgabe war Treibhausgasneutralität bis 2050.
- Lediglich das Szenario TN-Strom erreicht die aktuellen Ziele für die Jahre 2030 und 2040. Auch hier müsste in der letzten Dekade die Entwicklung weiter beschleunigt werden, um die aktuellen Ziele zu erreichen.
- In den Szenarien TN-H2-G und TN-PtG/PtL werden die aktuelle Ziele für 2030 und 2040 verfehlt. Eine Erreichung der Ziele wäre innerhalb der Logik der Szenarien durch schnellere Diffusion von Wasserstoff bzw. synthetischen Kohlenwasserstoffen möglich.
- Die prinzipiellen Erkenntnisse dieser Analyse sind nach unserer Ansicht auch nach der aktuellen Verschärfung der Klimaziele gültig.

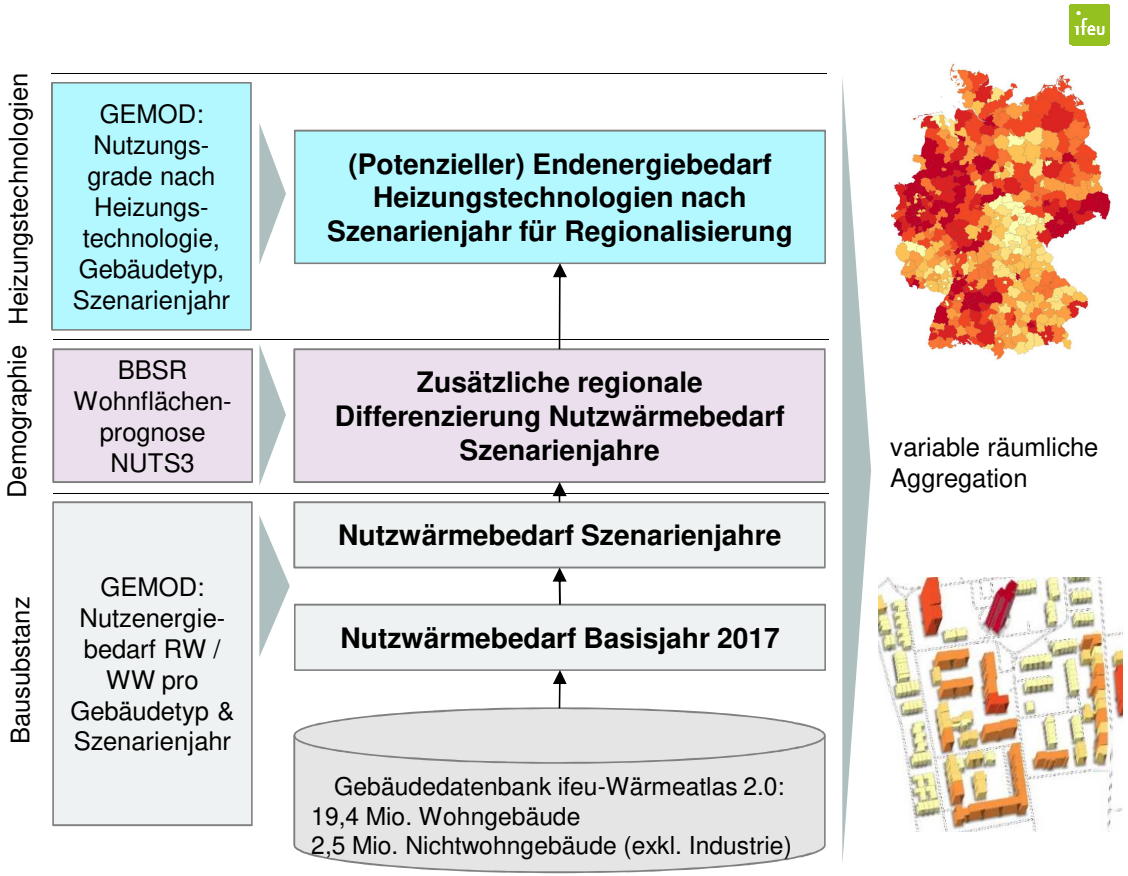
Schlussfolgerungen

- Ambitionen bei Effizienz und Erneuerbarer Wärme müssen in allen Szenarien weiter gesteigert werden ggü. aktuellem Stand (GEG 2.0, BEG)
- Lange Nutzungszyklen der Bauteile behindern bereits heute die Verbrauchsminderung → ab jetzt muss jede Sanierung zur Zielerreichung beitragen
- Wohnflächenzuwachs ist kontraproduktiv → Suffizienz entlastet linear
- Massiver Wärmenetz-Ausbau in allen Szenarien erforderlich → no-regret-Maßnahme
- Hohe Zuwächse von Wärmepumpen auch in TN-PtG/PtL und TN-H_2-G → no-regret-Maßnahme

Regionale Analysen

Regionalisierung des Gebäudewärmebedarfs

- Abgrenzung: Privathaushalte und GHD, Raumwärme und Brauchwarmwasser
- Räumliche Daten Gebäude: ifeu Wärmeatlas 2.0
  - 3D-Gebäudemodelle (Stand 09/2016)
  - Baualter
  - Klimazonen
  - energetische Gebäudetypologie gemäß GEMOD (19,4 Mio. Wohn- & 2,5 Mio. Nichtwohngebäude exkl. Industrie)
- Zusätzliche Berücksichtigung demographischer Entwicklung auf NUTS3 über BBSR-Wohnflächenbedarfsprognose



Hausumringe: © GeoBasis-DE I Geobasis Bayern 2017

Wärmenetzmodell

- **Erfassung des Wärmenetzbestandes 2017:**
  - 1721 Städte & Gemeinden mit Wärmenetzen
  - 66,8 TWh Endenergiebedarf Fernwärme Privathaushalte und GHD, RW & WW
  - 26.700 km Trassen & Hausanschlussleitungen

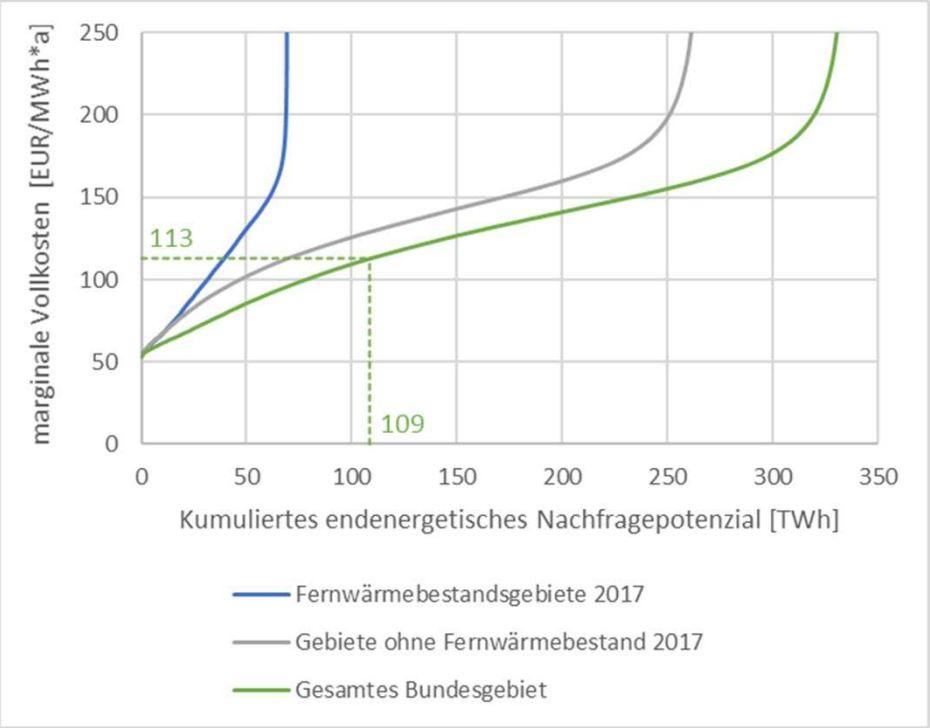
- **Bundesweites 500m x 500m Analyseraster:**
  - Endenergiebedarf Gebäudewärme pro Szenarienjahr
  - Maximaler Anschlussgrad pro Szenarienjahr
  - Berechnung Länge des Verteilnetzes aus Straßengeometrien in Abhängigkeit des Anschlussgrades
  - Berechnung betriebswirtschaftlicher Vollkosten der Wärmeversorgung frei Endkunden [EUR/MWh]

Kostenkomponenten:

1) Wärmegestehungskosten ← Enertile
2) CAPEX Verteilnetz ← Differenziert nach Gemeindetypen, 300-800 €/m
3) CAPEX Pumpen
4) CAPEX Steuerungssysteme
5) CAPEX Hausübergabetechnik
6) OPEX Verteilnetz
7) OPEX Pumpstrom
8) OPEX Pumpen
9) OPEX Steuerungssysteme
10) OPEX Hausübergabe
11) OPEX Organisation/Verwaltung
12) Marge Versorger

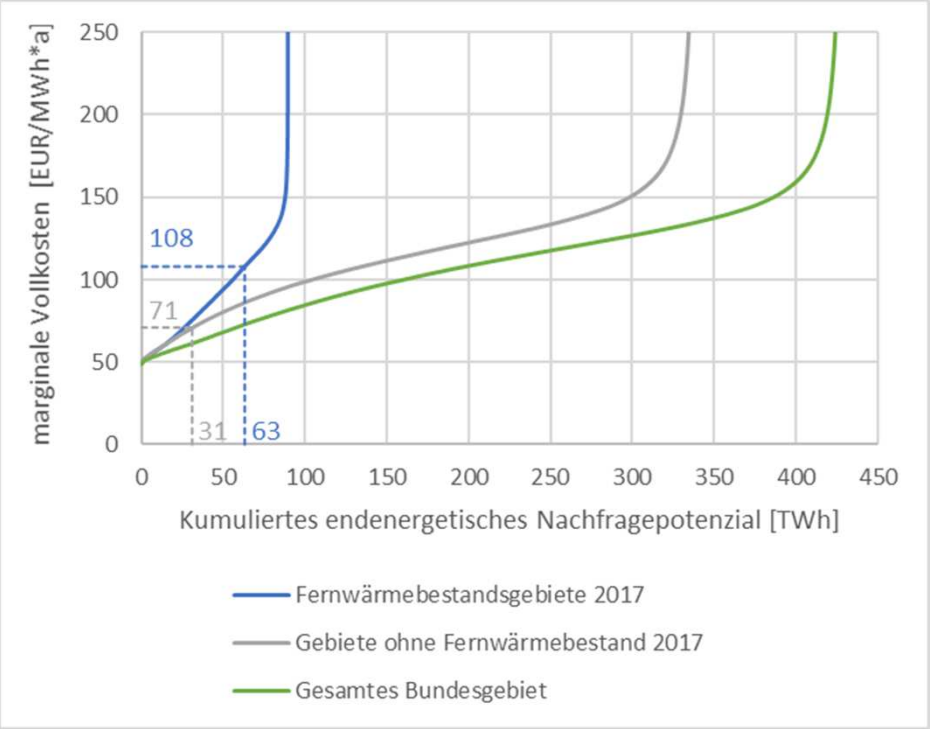
Fraunhofer ISI consentec ifeu TU berlin E&R Energy and Resources

Regionalisierung des Fernwärmebedarfs im Szenario TN-Strom



- 2050 keine Konkurrenz mehr zum Gasnetz, deutliche Reduktion des Gesamtwärmebedarfs
- Fernwärme wird zentrale Technologie zur Wärmeversorgung verdichteter Gebäudebestände
- Auswertung der Vollkosten frei Endabnehmer im Zieljahr 2050: Auswahl der Zellen mit den günstigsten Vollkosten, ohne gesonderte Berücksichtigung bereits heute vorhandener Wärmenetze, 109 TWh = max. 113€/MWh (grüne Kurve)
- Absatzpotenzial in Gebieten mit bestehenden Netzen ist deutlich niedriger als die simulierten Endenergiebedarfe an Fernwärme in GEMOD (blaue Kurve)

Regionalisierung des Fernwärmebedarfs in den Szenarien TN-PtG/PtL und TN-H_2-G



SZENARIO TN-H_2-G nahezu identisch

- 2050 weiterhin Konkurrenz zum Gasnetz, geringere Reduktion des Gesamtwärmebedarfs, Fernwärme wird deutlich ausgebaut
- Auswertung der Vollkosten frei Endabnehmer im Zieljahr 2050: Priorität auf Ausbau bestehender Netze bis zu exogen vorgegebener „Wirtschaftlichkeitsgrenze“

a) Auswahl aller Zellen mit bestehenden Wärmenetzen bis zu Vollkosten von 108 €/MWh = 63 TWh Endenergie FW (blaue Kurve)

b) Auswahl zusätzlicher Zellen ohne bestehende Wärmenetze mit den günstigsten Vollkosten = 31 TWh Endenergie FW (graue Kurve)

Regionalisierung der netzgebundenen Wärmeversorgung

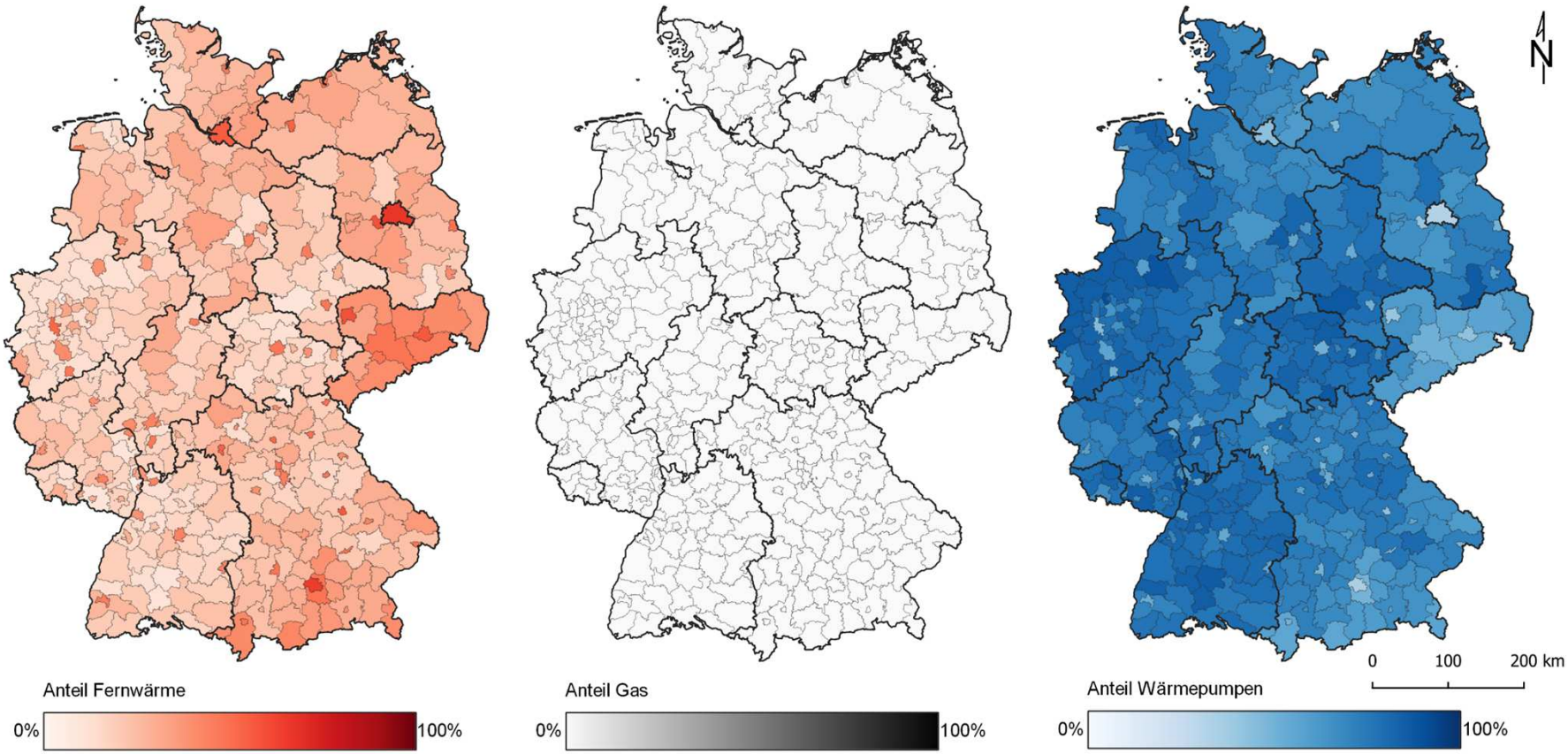
- Nutzwärmeverbrauch aller Gebäude
- Zuweisung auf Ebene der Kreise und kreisfreien Städte (NUTS3)

- Verteilung der Wärmenetze prioritär nach Wärmedichte

- Verteilung der Gasnetze (CH_4, H_2) nach Wärmedichte nachgeordnet

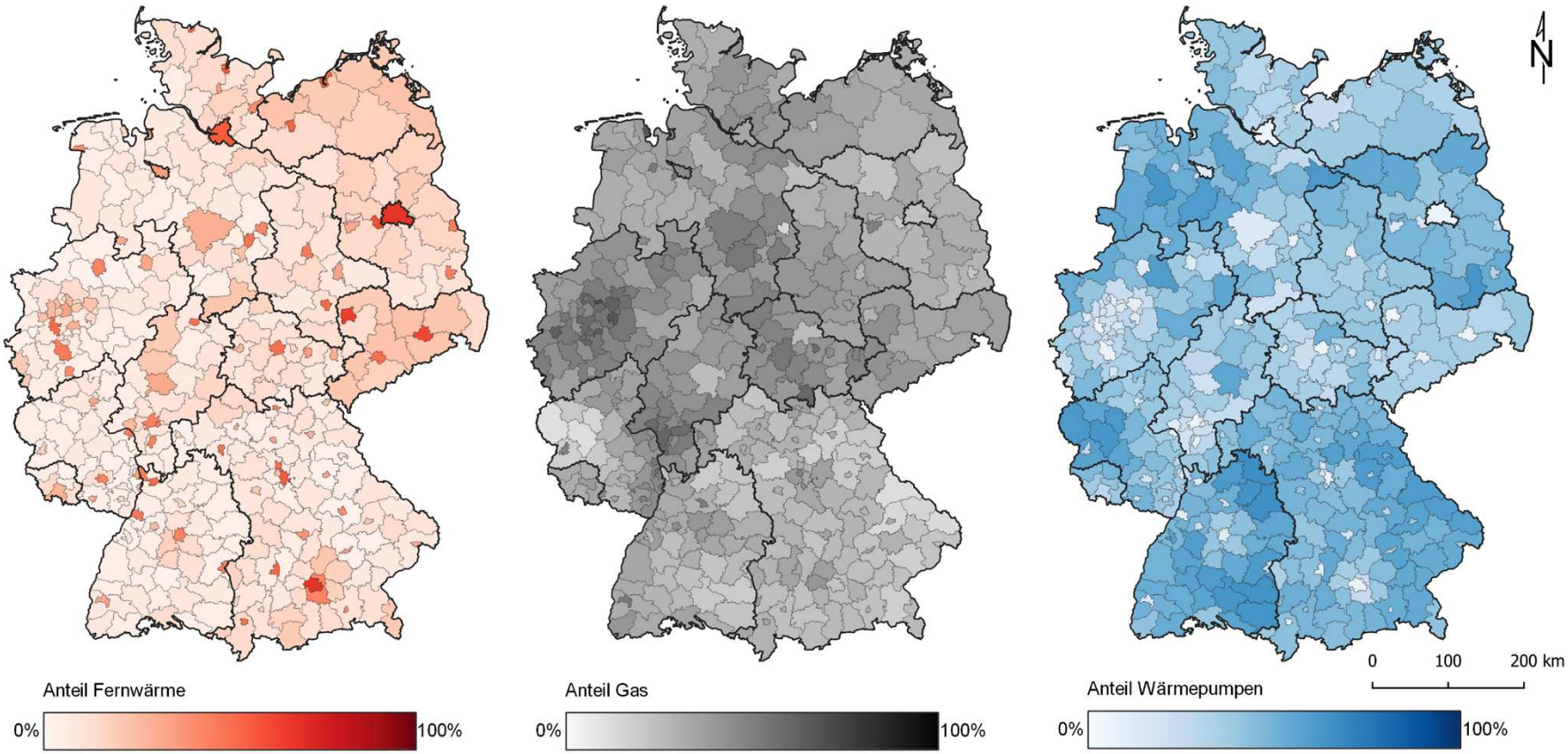
- Proportionale Verteilung der Wärmepumpen auf verbleibende Nutzwärme

Ergebnisse der Regionalisierung
Szenario TN-Strom im Jahr 2050



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

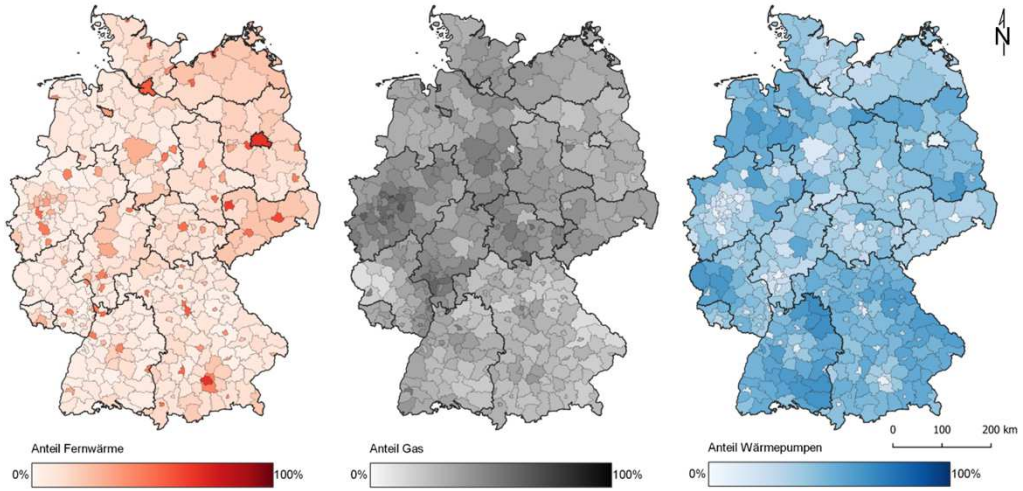
Ergebnisse der Regionalisierung
Szenario TN-PtG/PtL im Jahr 2050



Ergebnisse der Regionalisierung Szenario TN-H_2-G im Jahr 2050

- Bei statischer Betrachtung gleiche Verteilung wie in TN-PtG/PtL

- Zusätzliche dynamische Einflüsse können Ergebnis überlagern:
  - Aufbau des Wasserstoff-Backbones
  - Industrielle Wasserstoff-Zentren
  - Einflüsse durch Umstellung der Gasnetze
  - Einflüsse durch Umrüstung der Wärmeerzeuger



GEWERBE, HANDEL & DIENSTLEISTUNGEN
PRIVATHAUSHALTE

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

Szenarienvergleich – Geräte GHD und HH

	TN-Strom	TN PtG/PtL	TN-H_2
Storyline	Starke Durchdringung der Effizienz	Kein dezidiertes PtG Szenario	Kein dezidiertes Wasserstoff-Szenario
	• Weitere Technologieverbesserungen (basierend auf historischem Trend) • Effizienzpotentiale weitestgehend ausgeschöpft		
	Keine Berücksichtigung Suffizienz		
Ziel	Maßstab für THG neutrale Szenarien Alle Anwendungen, für die es möglich ist, werden auf Strom umgestellt		

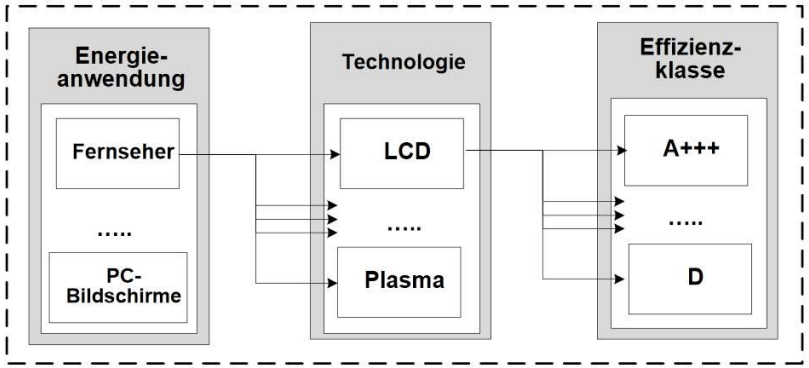
Haushalte

Methodik

FORECAST Residential Appliances

Bottom-Up Gerätebestandsmodell

- Prominente Treiber:
  - Bevölkerungsentwicklung
  - Haushaltsgrößen / Anzahl Haushalte
  - Technologiepreise
  - Strompreisentwicklung



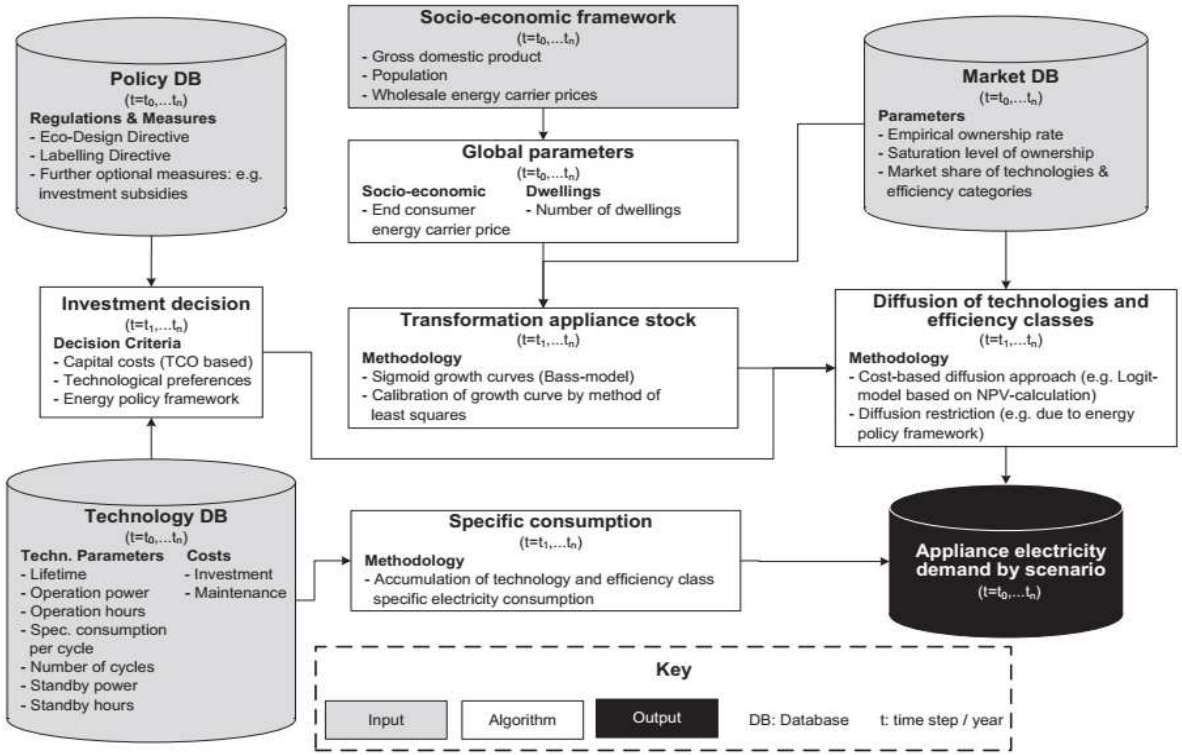
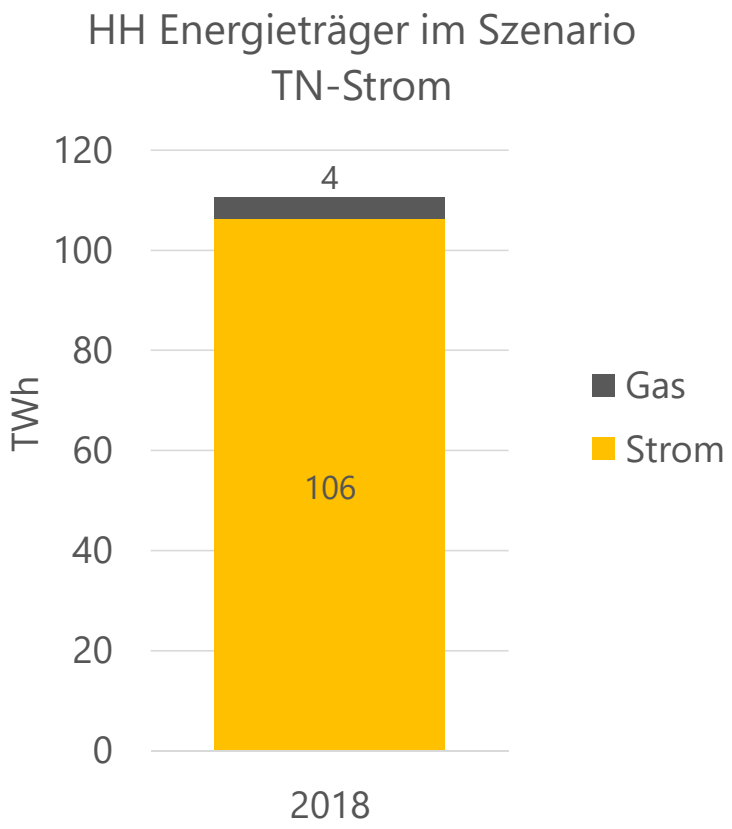


Figure 1. Structural framework of electricity demand calculation of appliances, lighting and air-conditioners in FORECAST-Residential.

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

Ausgangslage: In 2018 wurden 4 TWh (4%) des Endenergiebedarfs durch Gas gedeckt

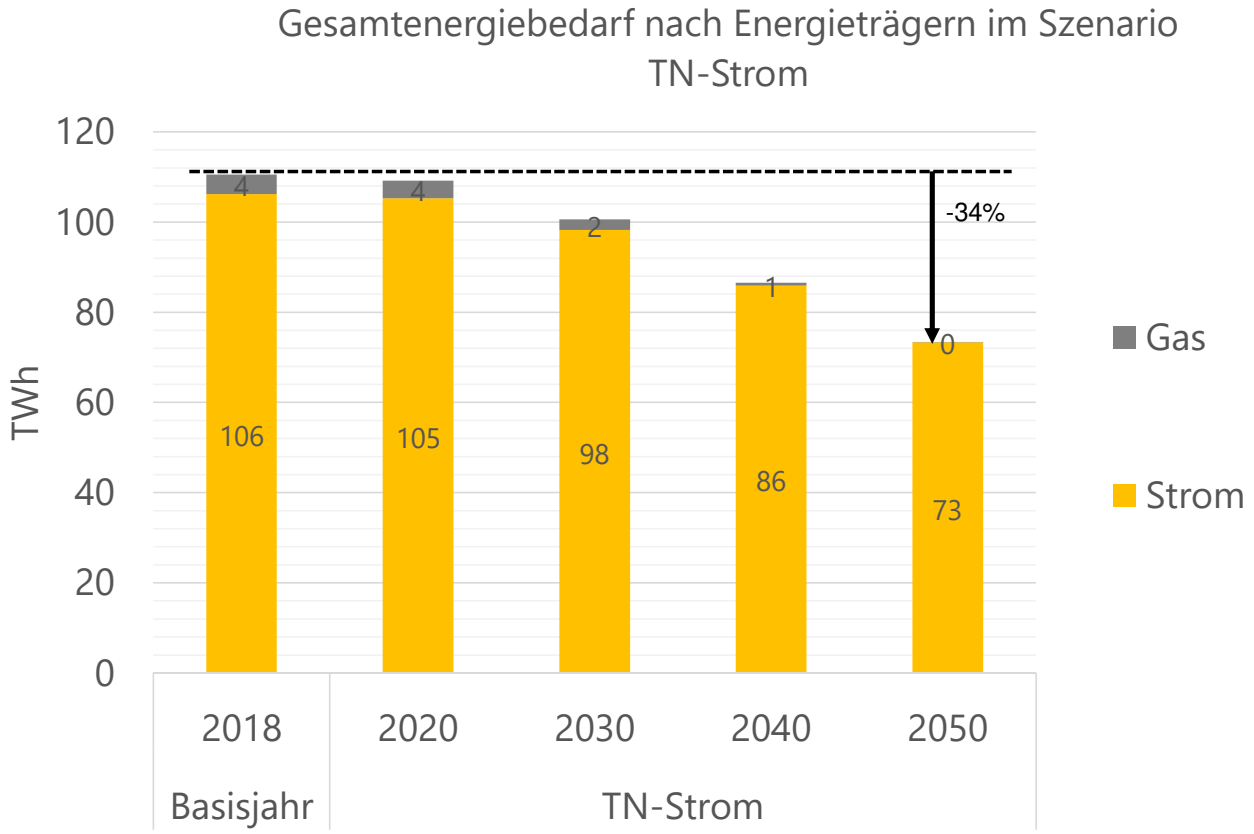


Welche Nicht-Stromanwendungen gibt es derzeit noch in privaten Haushalten?

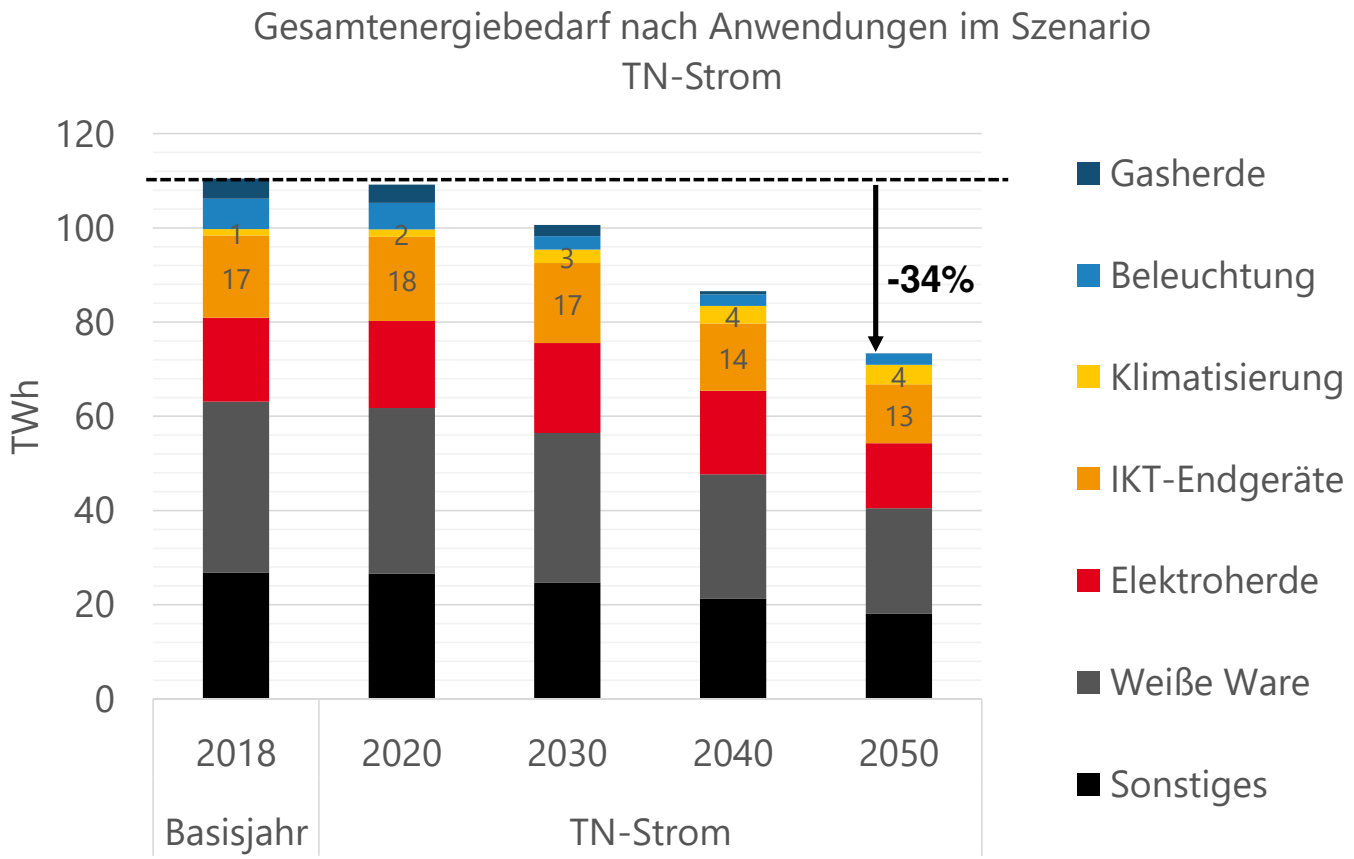
- Zum überwiegenden Anteil Anwendungen, die dem Gebäudesektor zugerechnet werden:
  - Raumwärme
  - Warmwasser
- Verbleibend:
  - Gasherde

Ergebnisse

Gesamtenergiebedarf sinkt im TN-Strom Szenario zwischen 2018 und 2050 um 34%

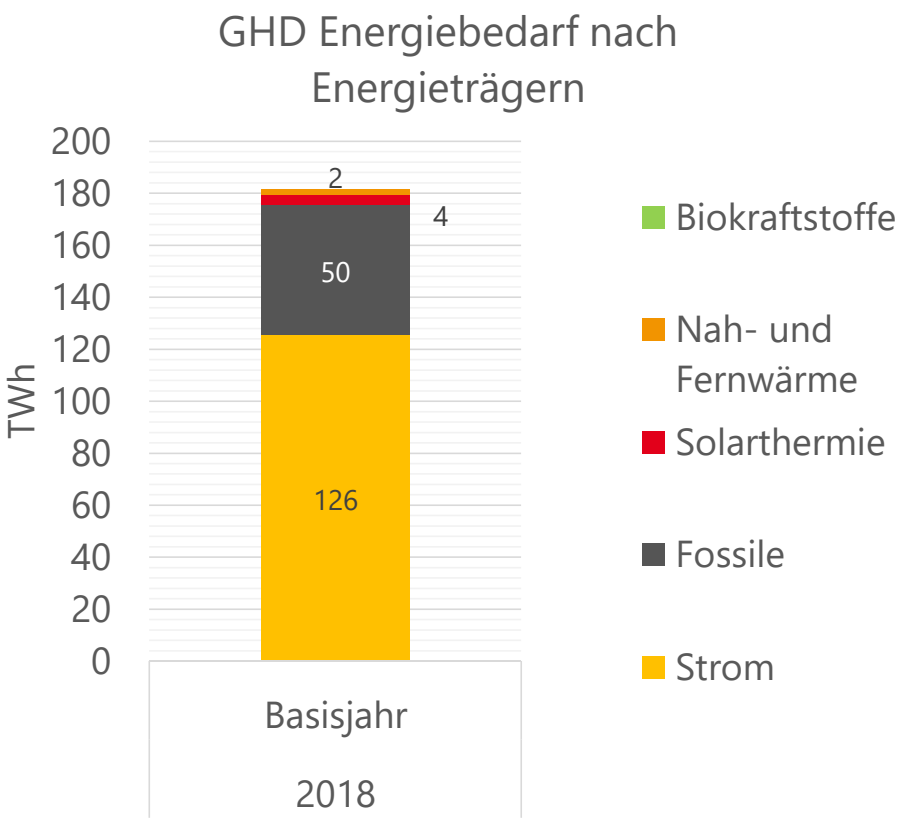


(Zwischenzeitlich) leicht steigende Bedarfe im Bereich IKT und für Klimatisierung



Gewerbe, Handel & Dienstleistungen

Ausgangslage: In 2018 wurden 50 TWh (28%) durch fossile Energieträger gedeckt

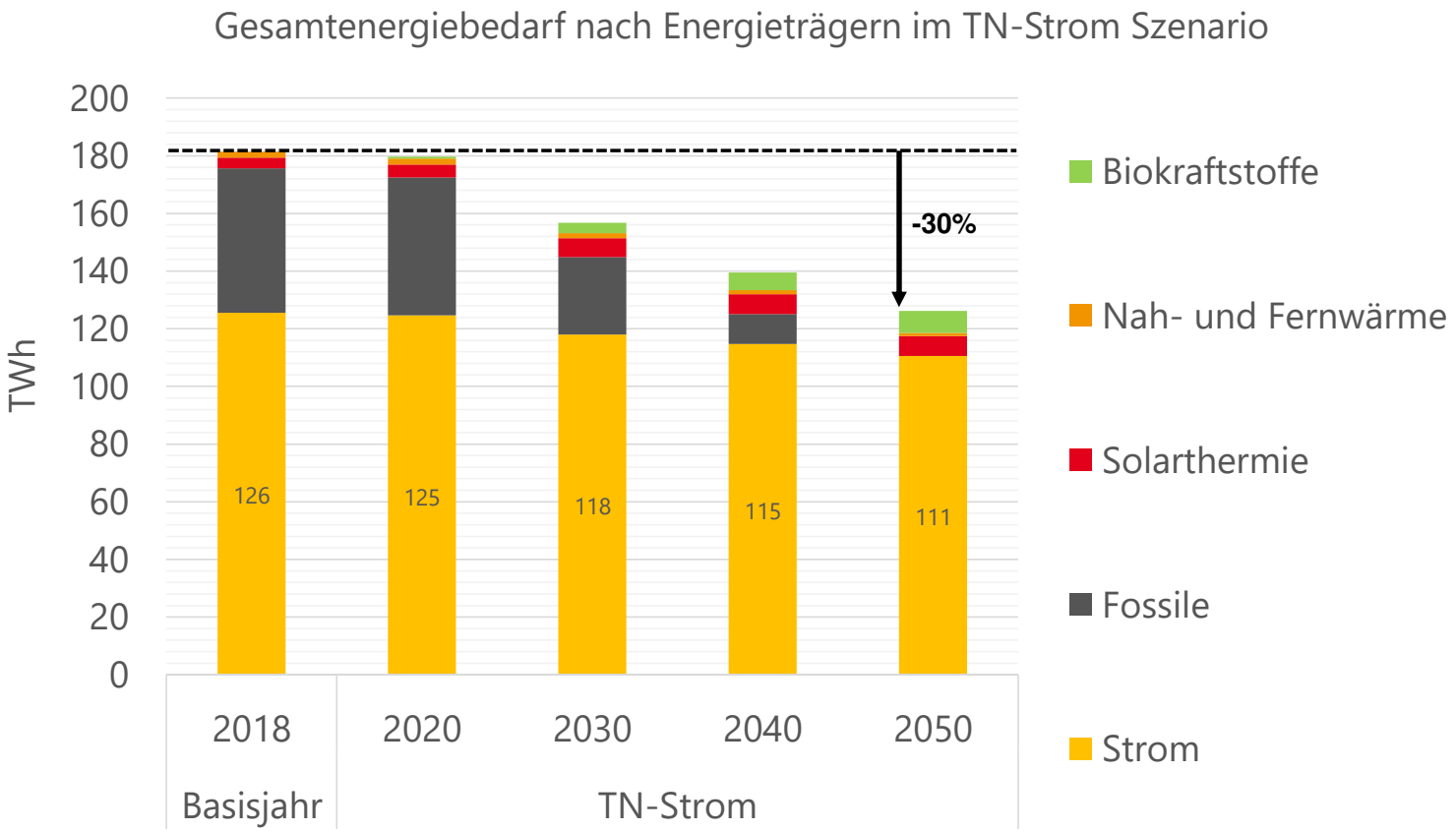


Welche Nicht-Stromanwendungen gibt es derzeit noch im GHD-Sektor?

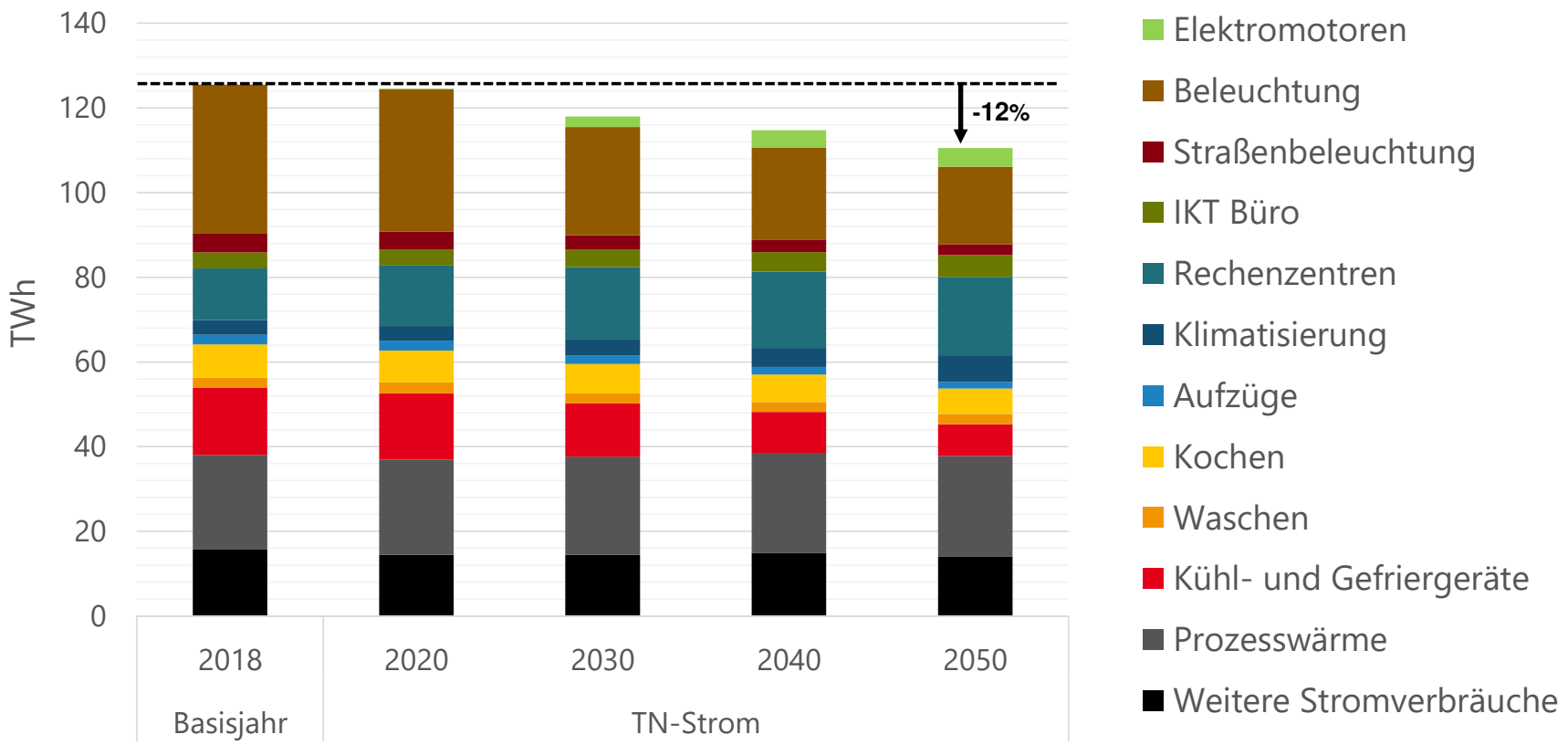
- Prozesswärme, im Wesentlichen:
  - Beherbergung, Gaststätten, Heime
  - Krankenhäuser, Schulen, Bäder
  - Herstellungsbetriebe
  - Landwirtschaft & Gartenbau
- Mechanische Energie, im Wesentlichen:
  - Landwirtschaft
  - Baugewerbe

Ergebnisse

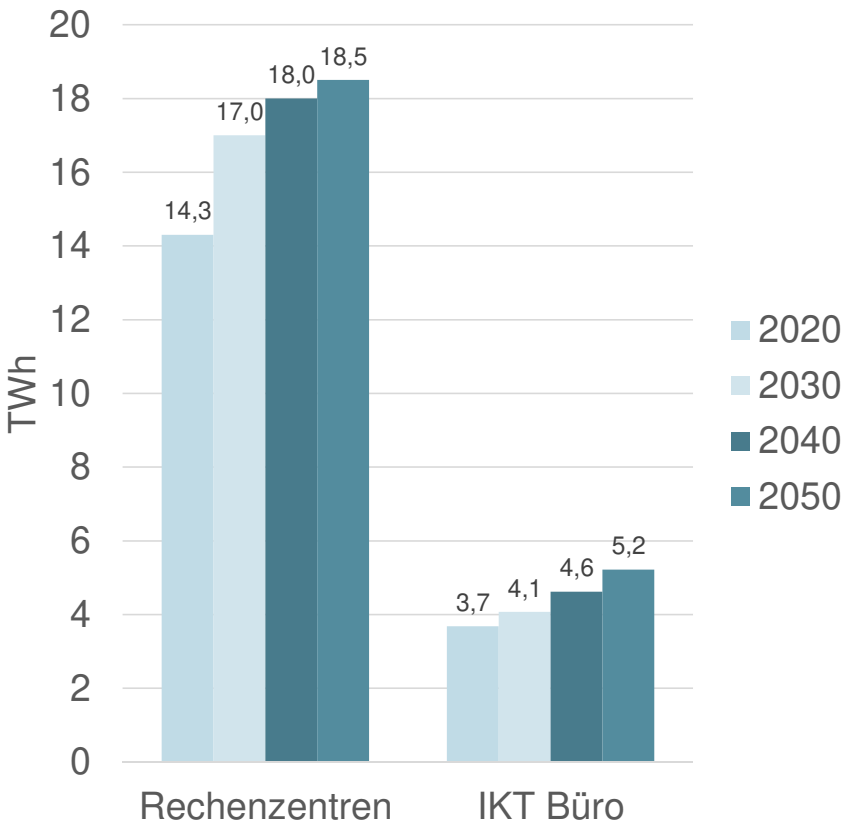
Im TN-Strom Szenario sinkt der Gesamtenergiebedarf zwischen 2018 und 2050 um 30%

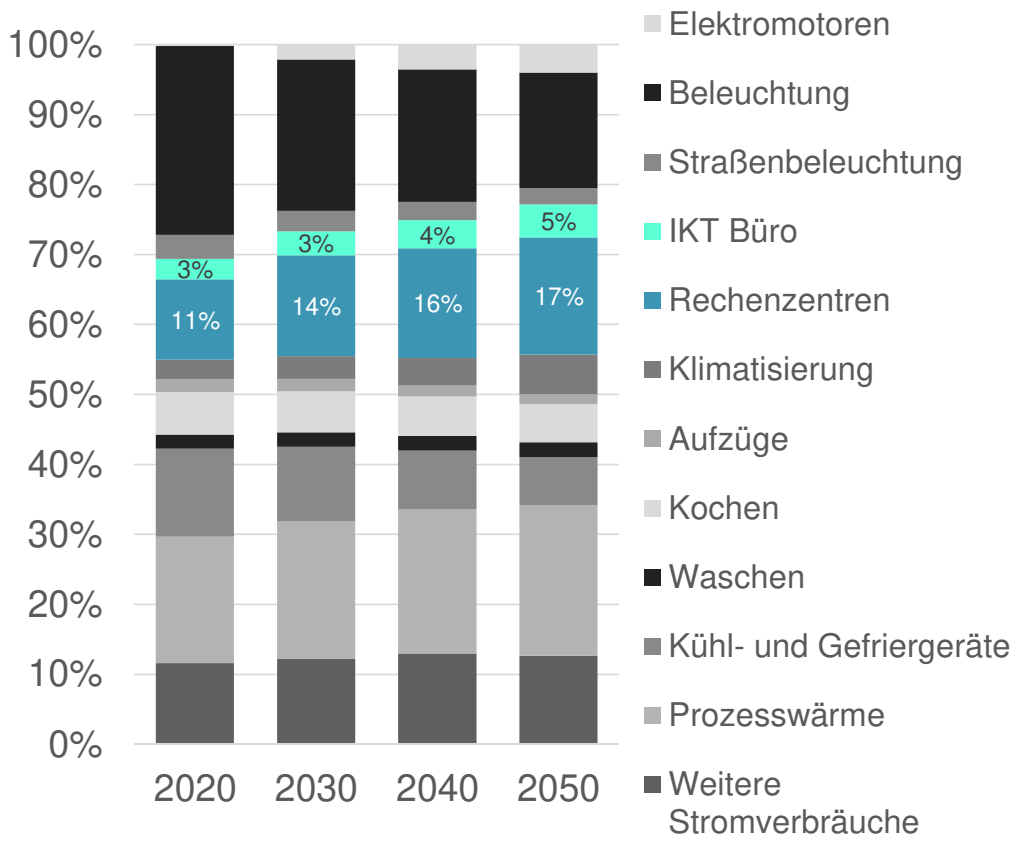


Im TN-Strom Szenario sinkt der Strombedarf zwischen 2018 und 2050 um 12%



Steigender Bedarf in Rechenzentren und für IKT





Schlussfolgerungen

Schlussfolgerungen

- Eine weitgehende Elektrifizierung des GHD Sektors geht mit einem Rückgang des Strombedarfs (um 12% im Vergleich zum Basisjahr 2018) einher
- Im TN-Strom Szenario reduziert sich der Strombedarf der HH um 33% im Vergleich zum Basisjahr 2018
- Die Entwicklung des Energiebedarfs von neueren Verbräuchen (insb. Rechenzentren im GHD-Sektor sowie IKT-Endgeräte und Klimageräte in HH) ist teilweise sehr unsicher
- Erhebliche Anstrengungen bei der gesteigerten Effizienz der Geräte in beiden Sektoren erforderlich, da die Anzahl insb. im Bereich IKT und in der Klimatisierung zunimmt, während die Anzahl der anderen Geräte stagniert
- Reduktion des Gesamtenergiebedarfs in beiden Sektoren durch Elektrifizierung möglich, aber deutliche pol. Anstrengungen erforderlich

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

heike.brugger@isi.fraunhofer.de
peter.mellwig@ifeu.de