

# Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes (Bio-Strom-Wärme)

Förderkennzeichen: 03KB114

**Ergebnis-Workshop (1. Teil Szenarien und Methodik)**

Dr. Matthias Koch, Dr. Klaus Hennenberg,

Dr. Markus Haller und Dr. Tilman Hesse

Leipzig, den 17.04.2018

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Agenda

- Vorstellung der Projektziele und des Projektaufbaus
- Rahmendaten und Szenariendefinition
- Methodik der Modellierung
  - Strommarktmodellierung mit „PowerFlex“
  - Gebäudemodellierung mit „BuildingSTar“
  - Kopplung der beiden Modelle
- Ergebnisse
  - Entwicklung des Gebäudebestands und der Wärmenachfrage
  - Allokation der Biomasse
  - Rolle der Biomasse im Wärme- und Stromsektor
  - Handlungsempfehlungen

# Fragestellung und Zielsetzung

## Fragestellung

- Ausgestaltung einer kostengünstigen und energieeffizienten Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmemarkt (unter Berücksichtigung der Nachfrage des Verkehrssektors)

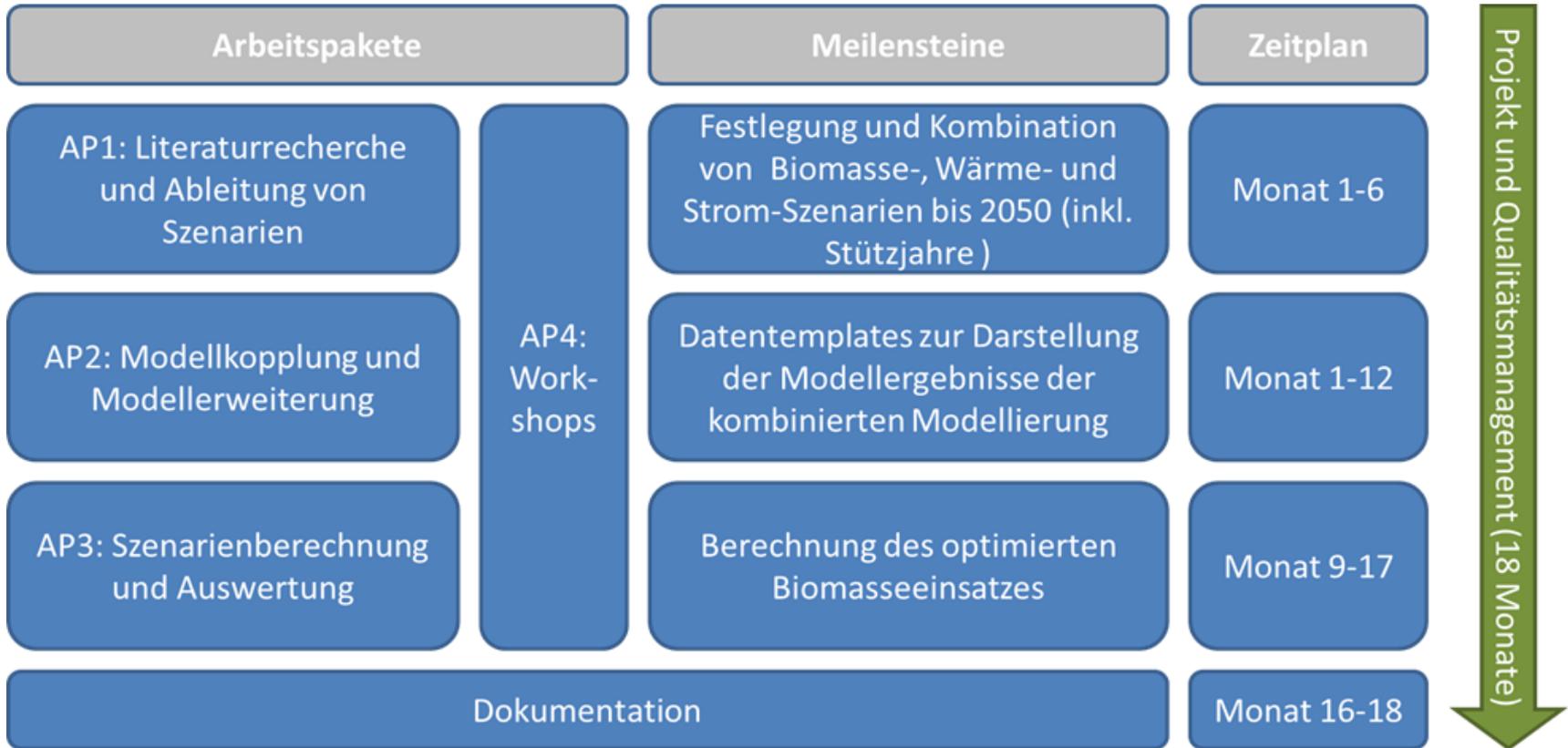
## Zielsetzung

- Modellgestützte Analyse der Rolle der energetischen Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmemarkt in Deutschland in einem Zeitraum von 2020 bis 2050
- Optimale Biomasseallokation in verschiedenen kombinierten Szenarien

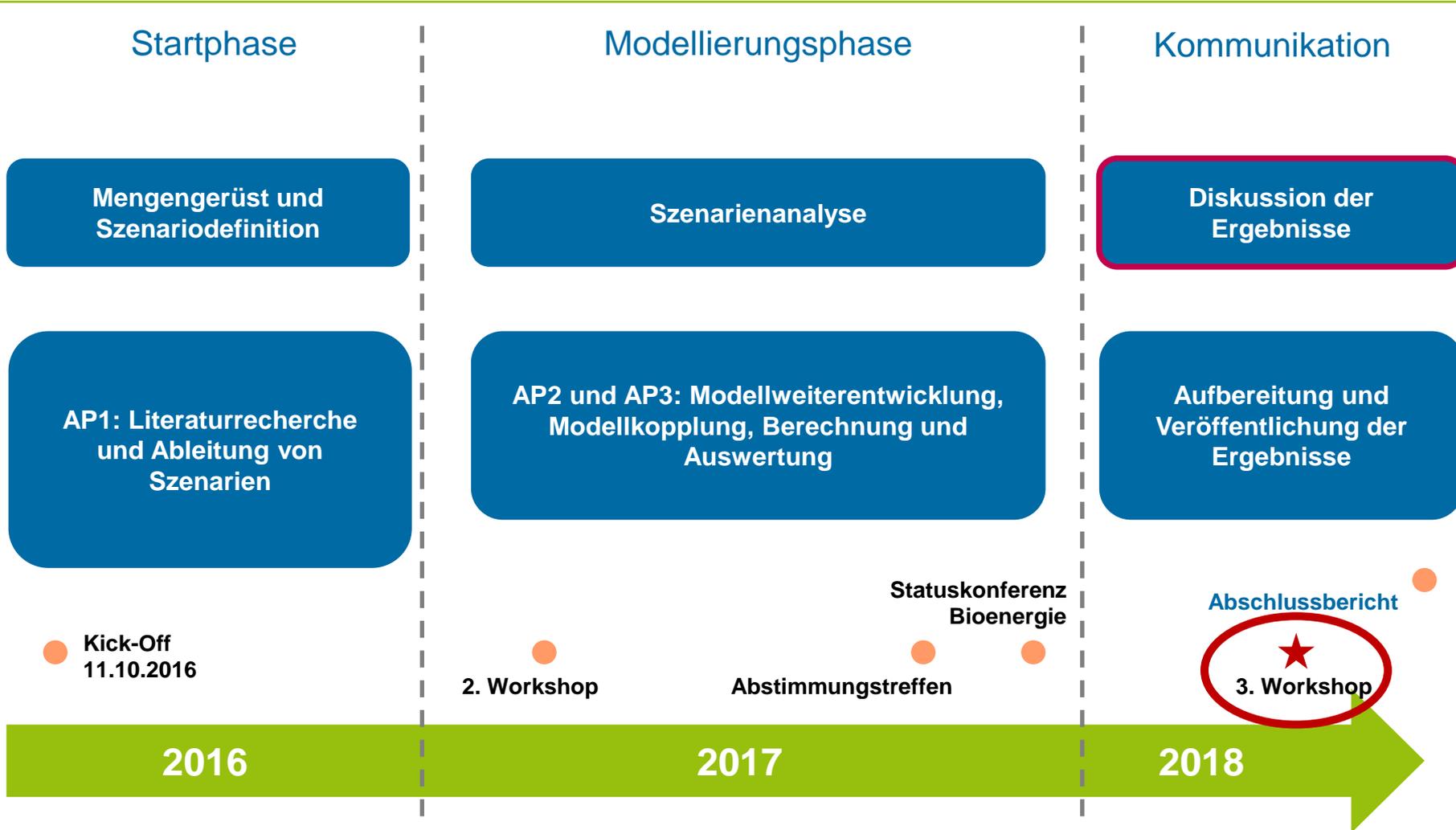
## Zentrale Forschungsfragen

- Wie sieht die optimale Biomasseallokation für einen kosteneffizienten Klimaschutz aus: Flexibilitätsoption im Stromsektor oder erneuerbarer Energieträger im Wärmesektor?
- Welche Wechselwirkungen ergeben sich zwischen dem Wärme- und dem Stromsektor und welche Funktion nimmt die Biomasse dabei ein?
- Wie sensitiv reagieren die Ergebnisse auf Parametervariationen (z.B. Biomasseangebot, Wärmenachfrage)?
- Was ist ökonomisch und ökologisch vorteilhafter: Klimaschutz durch Gebäudesanierung oder durch erneuerbare Wärme?

# Aufbau des Projekts

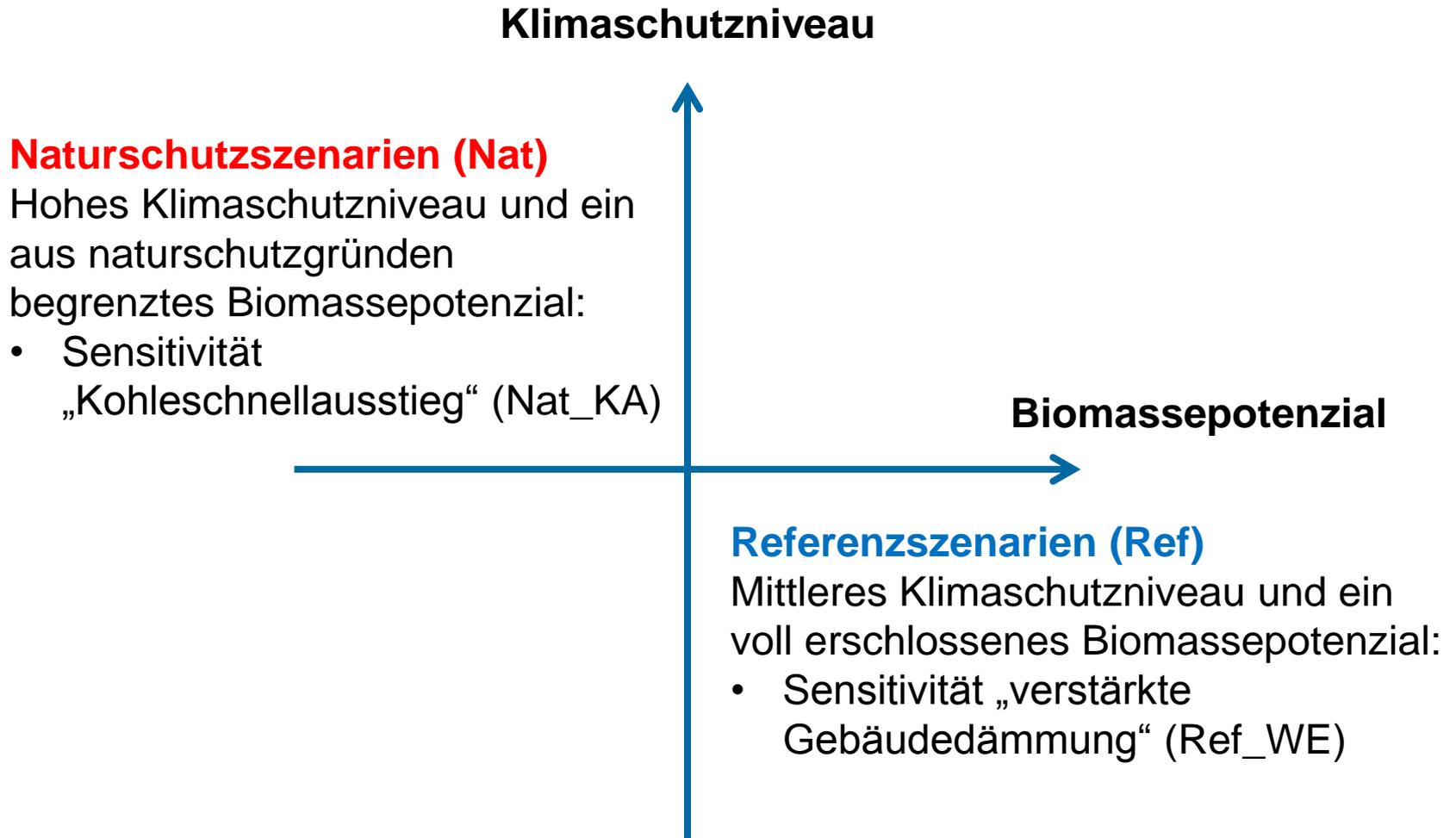


# Zeitplan

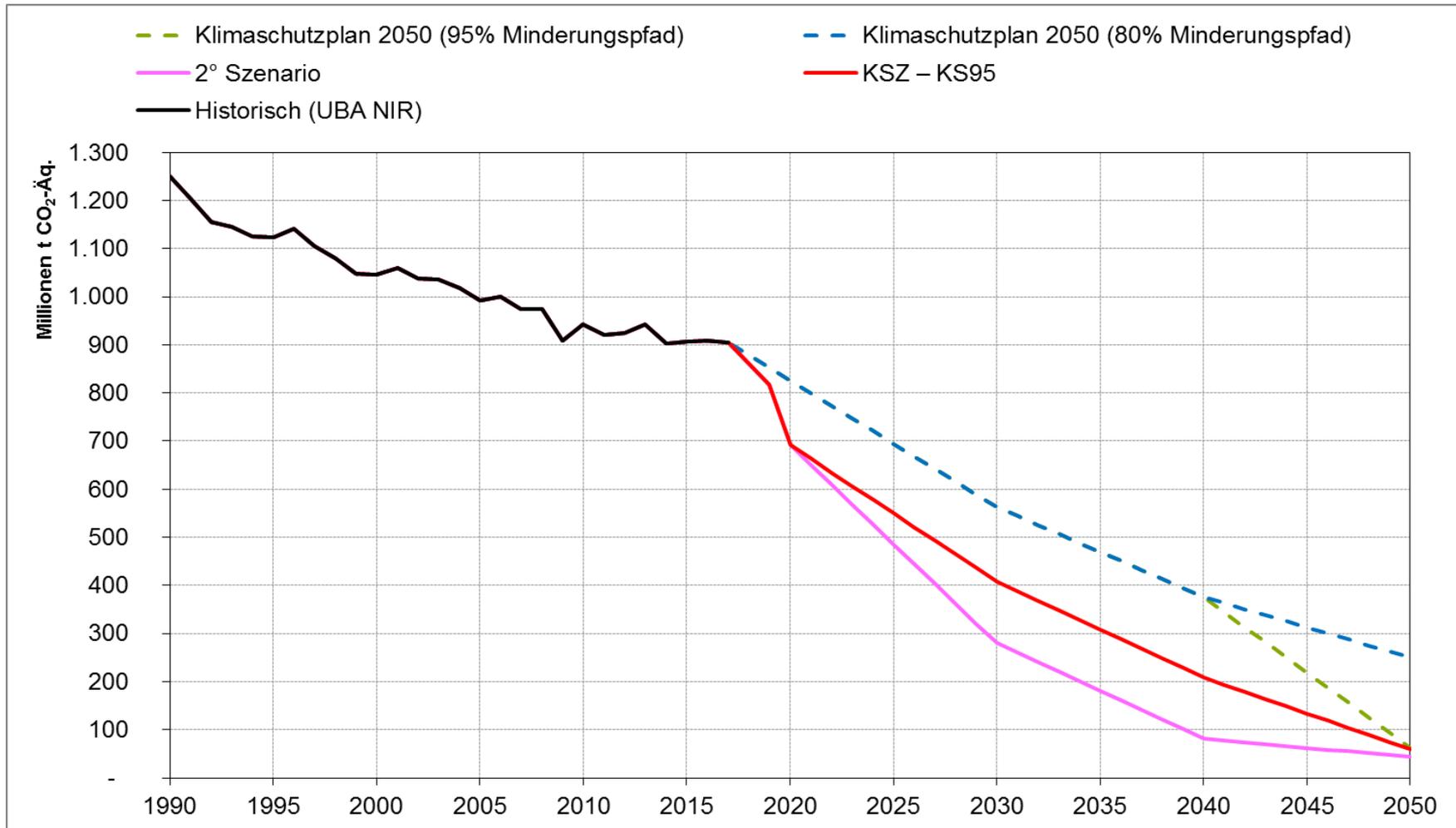


# AP1: Literaturrecherche und Ableitung von Szenarien

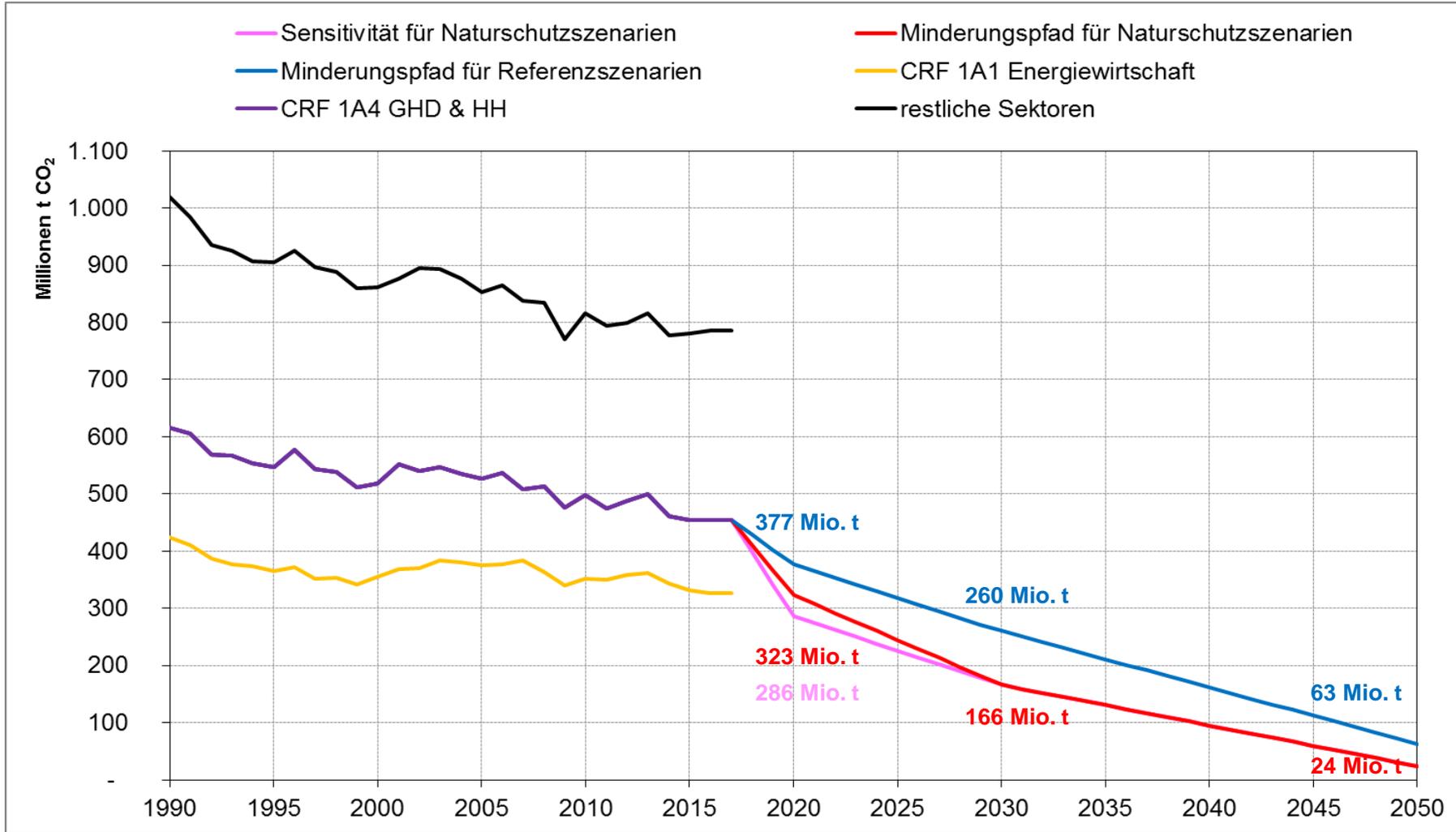
# Szenariengerüst basierend aus KS80 / KS95 für die Stützjahre 2020, 2030 und 2050



# Bestimmung des Klimaschutzniveaus



# Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Budgets für die Strom- und Wärmeerzeugung



# Biomassepotenzial in Deutschland

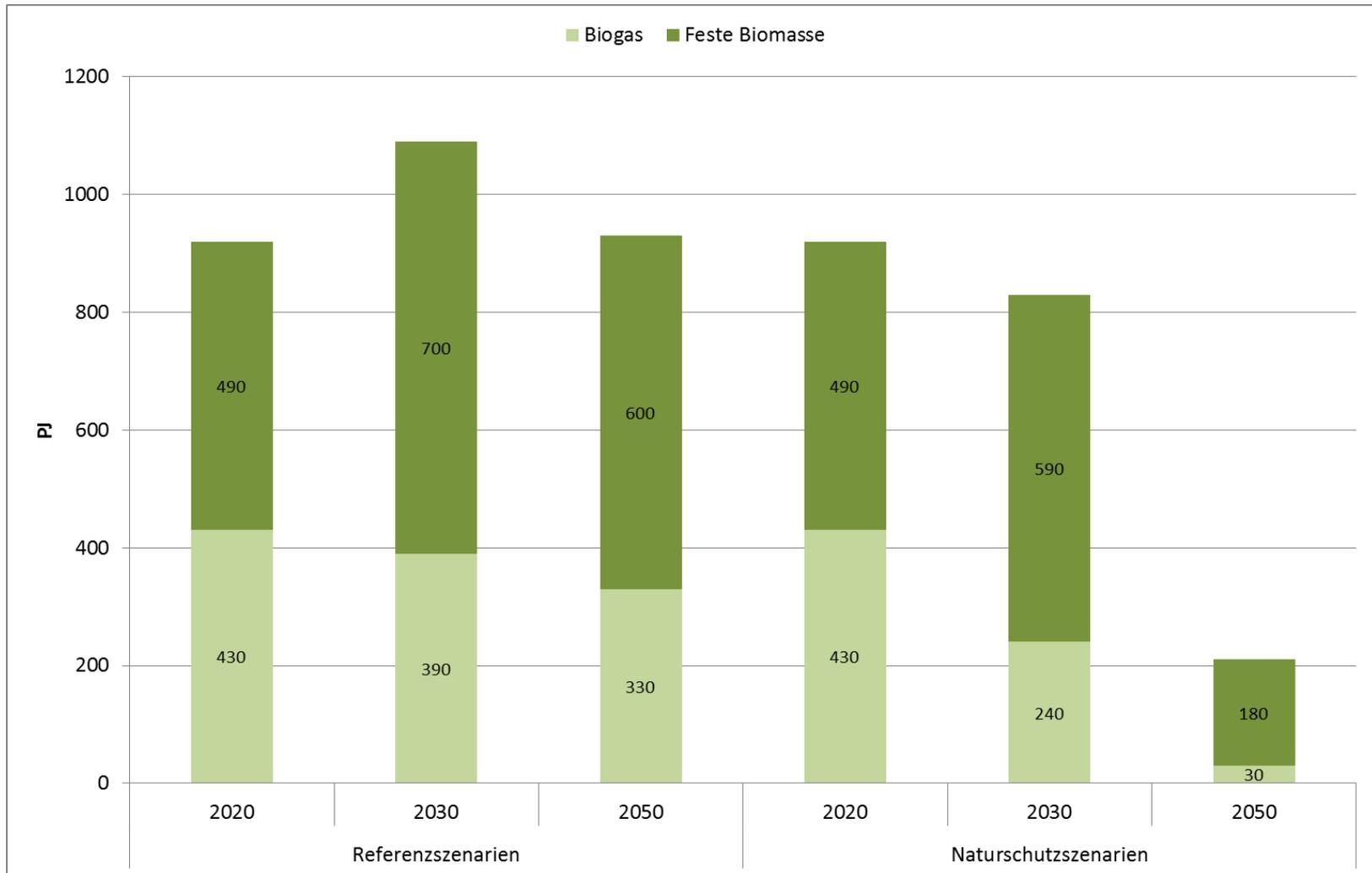
- Zunehmender Flächenertrag bei Anbaubiomasse
- Zunehmender Erschließungsgrad für Reststoffe

|  | 2015          | 2020          | 2030                        | 2050                      |
|--|---------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|
| <b>Anbaubiomasse</b>   | <b>384 PJ</b> | <b>408 PJ</b> | <b>180 PJ, 360 PJ</b>       | <b>0 PJ, 400 PJ</b>       |
| Anbaufläche<br>( <b>Naturschutzszenarien</b> ,<br><b>Referenzszenarien</b> ) | 2,4 Mio. ha   | 2,4 Mio. ha   | 1,0 Mio. ha,<br>2,0 Mio. ha | 0 Mio. ha,<br>2,0 Mio. ha |
| Flächenertrag  | 160 GJ/ha     | 170 GJ/ha     | 180 GJ/ha                   | 200 GJ/ha                 |
| <b>Reststoffe</b>  | <b>713 PJ</b> | <b>800 PJ</b> | <b>1.135 PJ</b>             | <b>1.135 PJ</b>           |
| Feste Biomasse   | 504 PJ        | 570 PJ        | 880 PJ                      | 880 PJ                    |
| Gasförmige Biomasse  | 80 PJ         | 100 PJ        | 155 PJ                      | 155 PJ                    |
| Biogener Anteil im<br>Abfall   | 129 PJ        | 130 PJ        | 100 PJ                      | 100 PJ                    |

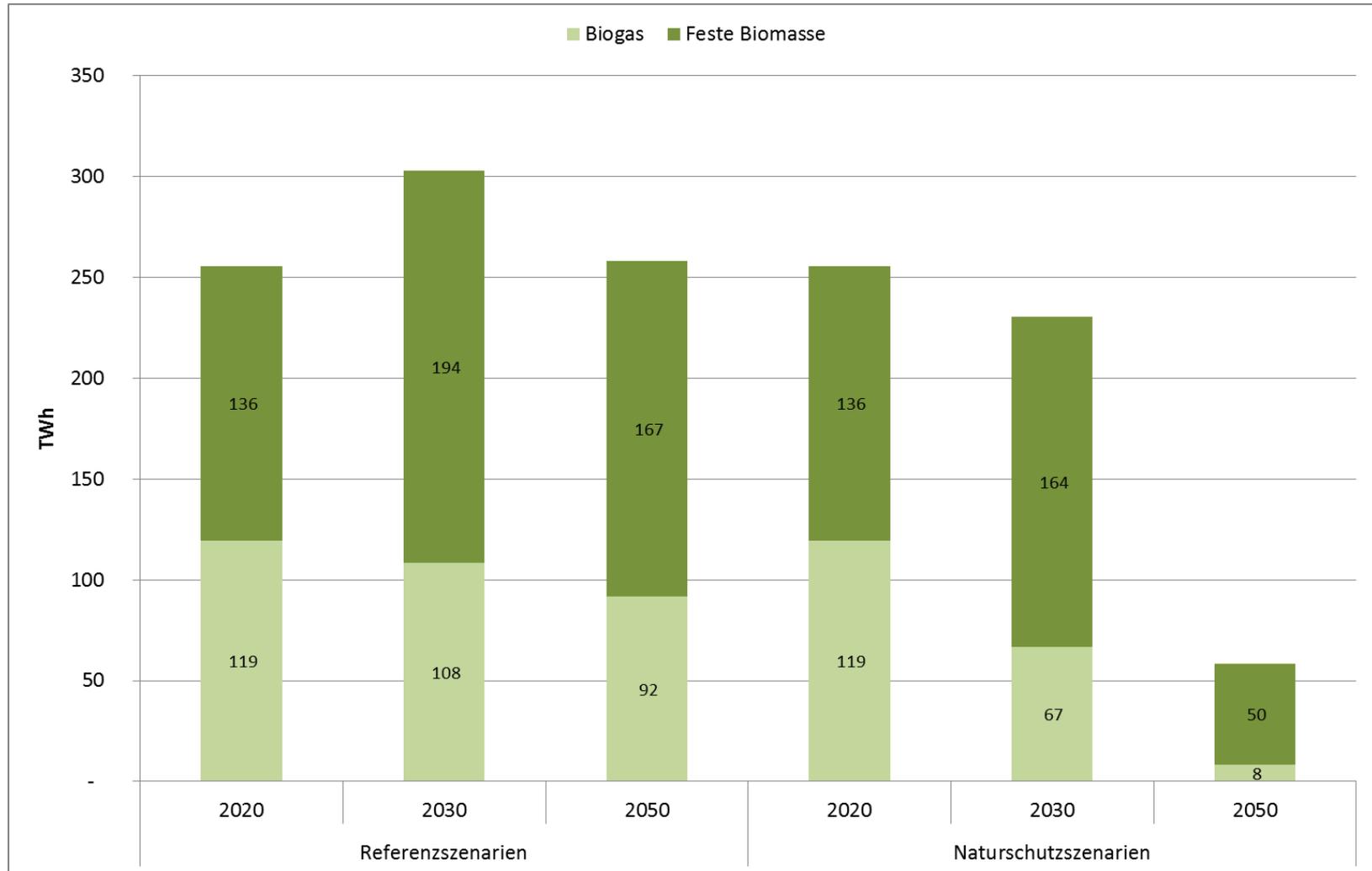
# Verteilung des Biomassepotenzial auf die Sektoren in den Szenarien

|                             | 2020 | 2030 | 2050 |
|-----------------------------|------|------|------|
| <b>Referenzszenarien</b>    |      |      |      |
| Verkehr                     | 15%  | 20%  | 30%  |
| Stoffliche Nutzung          | 0%   | 2%   | 5%   |
| Strom- und Wärmeezeugung    | 85%  | 78%  | 65%  |
| <b>Naturschutzszenarien</b> |      |      |      |
| Verkehr                     | 15%  | 30%  | 70%  |
| Stoffliche Nutzung          | 0%   | 4%   | 10%  |
| Strom- und Wärmeezeugung    | 85%  | 66%  | 20%  |

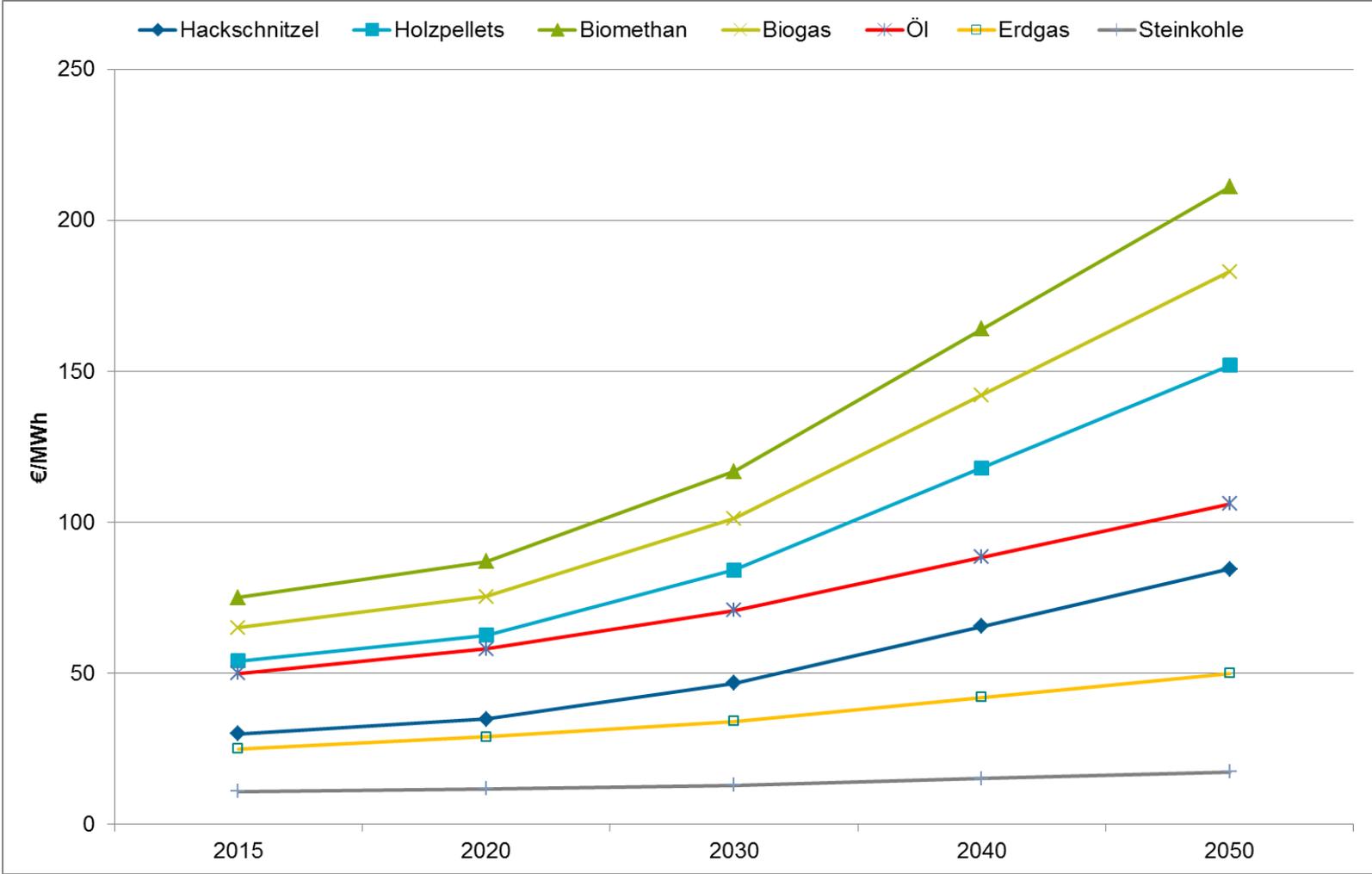
# Für die Strom- und Wärmerzeugung frei allozierbares Biomassepotenzial in den Szenarien



# Für die Strom- und Wärmerzeugung frei allozierbares Biomassepotenzial in den Szenarien



# Entwicklung der Brennstoffpreise



# Parameter der Biomasse-Umwandlungstechnologien für die Strom- und Wärmeerzeugung (Wärmenetze)

|                      | 2020                     | 2030                     | 2050                    |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Holz</b>          | <b>HKW</b>               | <b>HKW</b>               | <b>IGCC / BZ</b>        |
| Elektr. Wirkungsgrad | 27%                      | 28%                      | 40%                     |
| Therm. Wirkungsgrad  | 50%                      | 45%                      | 27%                     |
| Variable Kosten      | 4,4 €/MWh <sub>el</sub>  | 6,4 €/MWh <sub>el</sub>  | 1,9 €/MWh <sub>el</sub> |
| <b>Biogas</b>        | <b>BHKW</b>              | <b>BHKW</b>              | <b>BZ</b>               |
| Elektr. Wirkungsgrad | 38%                      | 38%                      | 57%                     |
| Therm. Wirkungsgrad  | 46%                      | 42%                      | 23%                     |
| Variable Kosten      | 11,4 €/MWh <sub>el</sub> | 13,2 €/MWh <sub>el</sub> | 5,9 €/MWh <sub>el</sub> |

## Weitere übergeordnete Rahmendaten

- Korrelation zwischen Bevölkerung und Energienachfrage
  - Stromnachfrage: Haushalte, GHD und Verkehr (aber nicht Industrie)
  - Wärmenachfrage: Anzahl Haushalte (Raumwärme) und Warmwasser
  
- Anstieg der Bevölkerung um rund 5% bis 6% im Zeitraum 2020 bis 2050 im Vergleich zu den Annahmen in den Klimaschutzszenarien KS80 / KS95 (2. Runde)
  - Etwa 3% bis 4% höhere Stromnachfrage (12 TWh bis 20 TWh)

# AP2: Modellkopplung und Modell- erweiterung

Strommarktmodellierung mit PowerFlex und  
Gebäudesimulation mit Building STar

# Strommarktmodell PowerFlex

# Strommarktmodell PowerFlex

- Einsatzmodell für thermische Kraftwerke, fluktuierende erneuerbare Energien, Speicher und Flexibilitätsoptionen
- Lineares Optimierungsproblem in stündlicher Auflösung
- Zielfunktion: Minimierung der variablen Gesamtkosten
  - Grenzkosten der thermischen Kraftwerke
  - Variable Speicherkosten
- Restriktionen:
  - Energiewirtschaftliche und technische Nebenbedingungen

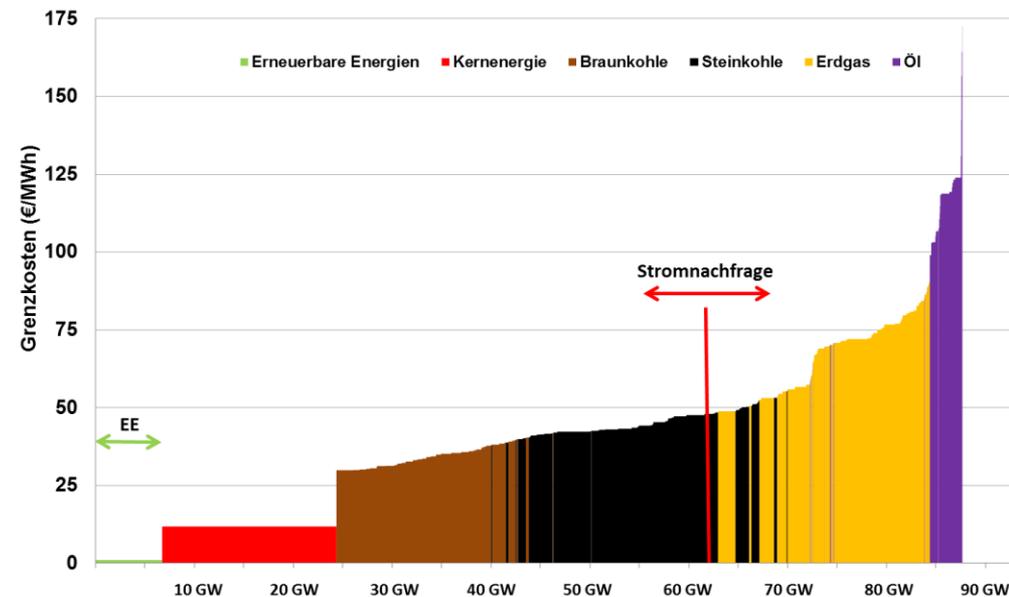


Abb. 1: Exemplarische Darstellung der Merit Order des deutschen Kraftwerksparks (Quelle: Öko-Institut e.V.)

# Modellerweiterung bei PowerFlex

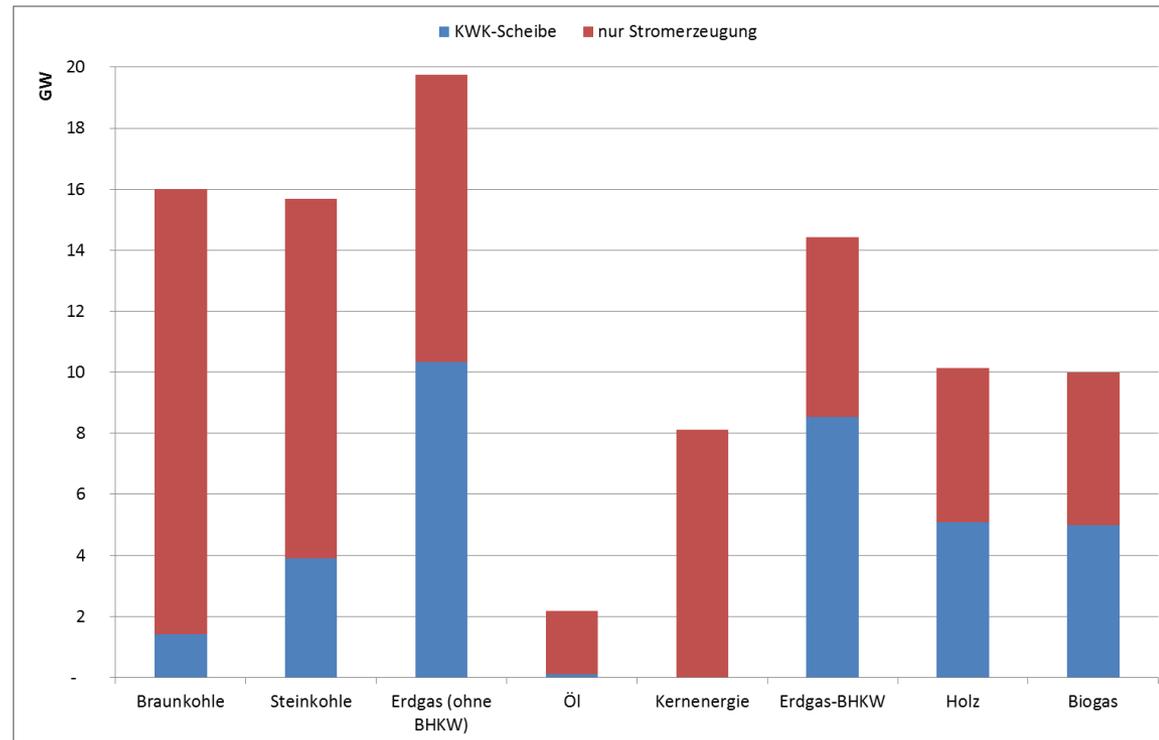
- Sektorübergreifende Restriktionen
  - Einhaltung des verfügbaren Angebots an Biomasse zur energetischen Nutzung im Strom- und Wärmesektor („Biomasse-Cap“)
  - Einhaltung des vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Budgets für den Strom- und Wärmesektor („CO<sub>2</sub>-Cap“)
- Berechnung der optimalen Biomasseallokation zwischen dem Strom- und Wärmesektor
  - Bilanzraum für Heizungssysteme in Gebäuden, die zum Austausch anstehen (dezentrale Wärmeerzeugung)
  - Bilanzraum für Nahwärmenetze
- Schnittstelle zur Kopplung mit dem Gebäudemodell „Buildung STar“
  - Wärmebedarf der auszutauschenden Heizungs-Technologien
  - Input-Parameter für Bestands-Technologien

# Modellvereinfachungen bei PowerFlex

- Sehr vereinfachte Berücksichtigung des europäischen Strommarkts mit Hilfe einer jährlichen Import-Export Bilanz
  - Vorteile:
    - deutlich kürzere Rechenzeiten schaffen Freiraum für Kopplung mit dem Gebäudemodell „Building STar“
    - keine Möglichkeit für Carbon Leakage Effekte durch CO<sub>2</sub>-Cap in Deutschland
  - Nachteile:
    - ausgleichende Effekte durch den europäischen Kraftwerkspark in stündlicher Auflösung werden ausgeblendet (v.a. Strompreise und EE-Überschüsse)
- Keine Netzrestriktionen in Deutschland
  - Kombination von ganzjährigen Nebenbedingungen und Netzrestriktionen ist modelltechnisch zu komplex
  - Keine Netzdaten für 2050 verfügbar

# Vorgegebener Kraftwerkspark in allen Szenarien

- Ausgangspunkt ist der Kraftwerkspark des Jahres 2020 aus dem Klimaschutzszenario KS80.
- Für die Jahre 2030 und 2050 gibt es keine Kernkraftwerke mehr.
- Die installierte Leistung von Biomasse-HKW und Biogas-BHKW ist so groß gewählt, dass das komplette Biomasseangebot zur Stromerzeugung verwendet werden könnte.



# Bewertung des Kraftwerksparkesinsatzes

- Brennstoffmix der Stromerzeugung
  - Unter Einhaltung des „CO<sub>2</sub>-Caps“
- Maximal eingesetzte Leistung
- Brennstoffspezifische Volllaststunden
  - Ex-post Betrachtung der Wirtschaftlichkeit
- Kapazitätslücke (Einsatz eines virtuellen Backup-Kraftwerks)
  - Es fehlt CO<sub>2</sub>-freie Stromerzeugung: Importe oder EE-Zubau

→ Abschätzung zur Stilllegung des fossilen Kraftwerksparks und zum weiteren Zubau von Wind- und PV-Anlagen

# Wichtige Ergebnisindikatoren und Abbildungen

- Brennstoffmix der Stromerzeugung sowie der Nah- und Fernwärmeerzeugung
  - Jährliche Aggregation und im Szenarienvergleich
  - Stündliche Auflösung je Szenario
- Brennstoffmix der dezentralen Wärmeerzeugung
  - Für auszutauschende Heizungsanlagen
  - Zuzüglich Heizungsanlagen im Bestand
- Einsatz und Allokation des verfügbaren Biomassepotenzials
- Maximale Leistung des steuerbaren Kraftwerksparks und der resultierenden Volllaststunden
- CO<sub>2</sub>-Emissionen

# Gebäudemodell Building STar

# Building STar – Struktur

## Start (t)

- Bestand Wohngebäude
  - Gebäudehülle
  - Energiebereitstellung
  - Spezifische Wohnfläche
- Bestand Nicht-Wohngebäude
  - Gebäudehülle
  - Energiebereitstellung

## Veränderung (t -> t + 1)

- Sanierungsrate
  - Gebäudehülle
  - Energiebereitstellung
- Neubaurate
- Abrissrate
- Wohnflächenbedarf bei WG

## Ergebnisse (t + 1)

- Wohngebäudebestand
  - Gebäudekenngößen (Anzahl, Leerstand, Wohnfläche, Sanierungsstand...)
  - Heizwärmebedarf
  - Endenergie-/Primärenergieverbrauch nach Energieträgern
  - CO<sub>2</sub>-Ausstoß
  - (Kosten)

Start

Veränderung

Ergebnisse

# Building STar – Details

- Modul Wohngebäude (WG): 6 Gebäudetypen (Anlehnung an TABULA)
- Modul Nicht-Wohngebäude (NWG): 6 Gebäudetypen (KliNeG)

| Wohngebäudetypen                    | Nicht-Wohngebäudetypen                       |
|-------------------------------------|--|
| Einfamilienhäuser (EFH)             | Wohngebäude mit Mischnutzung (WM)            |
| Zweifamilienhäuser (ZFH)            | Bildung, Büro und Verwaltung (BBV)           |
| Reihenhäuser mit einer Wohn. (RH-1) | Gewerbe, Industrie (GI)                      |
| Reihenhäuser mit zwei Wohn. (RH-2)  | Handel-/ Dienstleistung, Praxisgebäude (HDP) |
| Mehrfamilienhäuser (MFH)            | Beherbergung, Gastronomie, Kliniken (BGK)    |
| Große Mehrfamilienhäuser (GMH)      | Sonstige (Sport, Kultur) (SK)                |

# Building STar – Details

- Parametrisierung zu 2009
- 16 Baualtersklassen (BAK; 10 historisch bis 2009 + 6 weitere bis 2050)
- Abbildung von Kohorten à 50 Häuser (200 oder 1.000)  
→ aktuelle Läufe mit 1.000
- Wichtige Parameter:
  - Hüllfläche (DA, OG, AW, FB, FE/HT) und U-Werte je BAK
  - Historische Dämmung & Dämmrestriktionen
  - 5 Dämmintensitäten (Mindeststandard, E70, E55, E40, zukünftige Dämmstoffe)
  - >80 Kombinationen von Heizanlagen (z.B. Gas zentral RW/WW+ Solar WW)
  - Technologieoptionen (z.B. Pelletkessel, Scheitholzkessel, Hackschnitzelkessel, Holzvergaser)

# Building STar – Fortschreibungslogik

- „Fixe“ Änderungen, z.B.
  - spez. Wohnflächenbedarf
  - Abrissrate, Neubaurate
  - Anteil Dämmintensität bei Neubau/Sanierung
  - Länge von Reinvestitions-Zyklen
- Angabe von Entscheidungswahrscheinlichkeiten, z.B.
  - Entscheidung für Dämmen
  - Freigabe von Dämmrestriktionen
  - Auswahl Heizenergie-Anlagenkombi
  - Änderung des Energieträgers bei Sanierung
- Hintergrundparameter je Szenario, z.B.
  - Emissionsfaktoren, Bevölkerung, Klima

**Sanierungsrate ist ein  
Modellergebnis!**

# Szenarien-Einstellungen

## Was unterscheidet Naturschutz von Referenz?

- Reduzierung des spezifischen Wohnflächenbedarfs um
  - 2020: 3%, 2030: 6%, 2040: 10%, 2050: 14%
- Stärkerer Anstieg der Abrissrate und Reduzierung der Neubaurate ab 2030
- Erhöhung Auswahlwahrscheinlichkeit für der höhere Dämmintensitäten
- Erhöhung der Entscheidungswahrscheinlichkeit für Dämmen

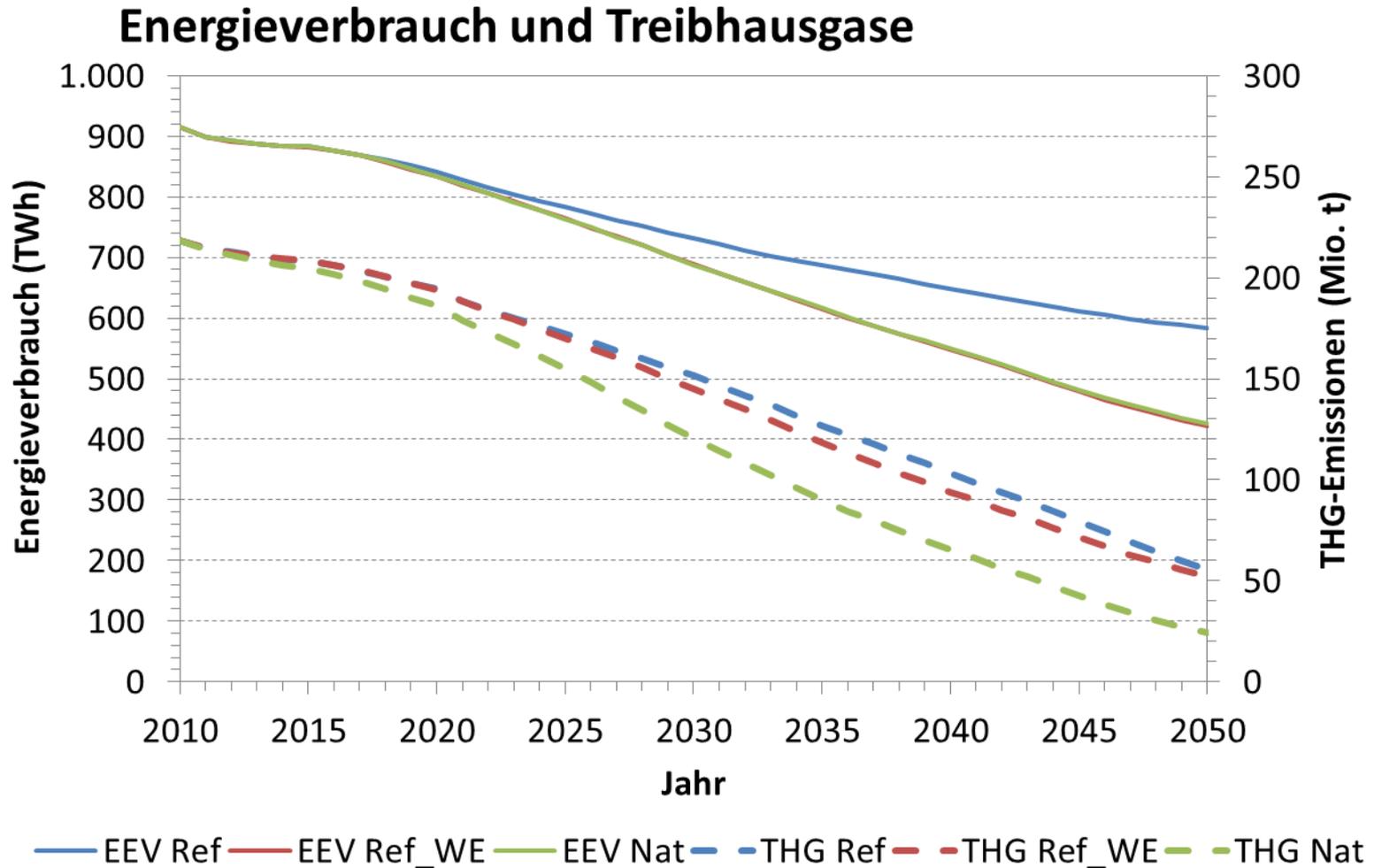
|          | Referenz |       |       | Naturschutz |       |       |
|----------|----------|-------|-------|-------------|-------|-------|
|          | 2020     | 2030  | 2050  | 2020        | 2030  | 2050  |
| Voll     | 0,050    | 0,075 | 0,075 | 0,300       | 0,700 | 0,900 |
| AW+FE/HT | 0,050    | 0,075 | 0,075 | 0,300       | 0,700 | 0,900 |
| AW       | 0,150    | 0,200 | 0,200 | 0,400       | 0,700 | 0,900 |
| FE/HT    | 0,200    | 0,200 | 0,200 | 0,400       | 0,700 | 0,900 |
| DA       | 0,300    | 0,350 | 0,350 | 0,500       | 0,750 | 0,900 |
| OG       | 0,200    | 0,225 | 0,250 | 0,500       | 0,750 | 0,900 |
| FB       | 0,200    | 0,225 | 0,250 | 0,500       | 0,750 | 0,900 |

# Szenarien-Einstellungen

## Was unterscheidet Naturschutz von Referenz?

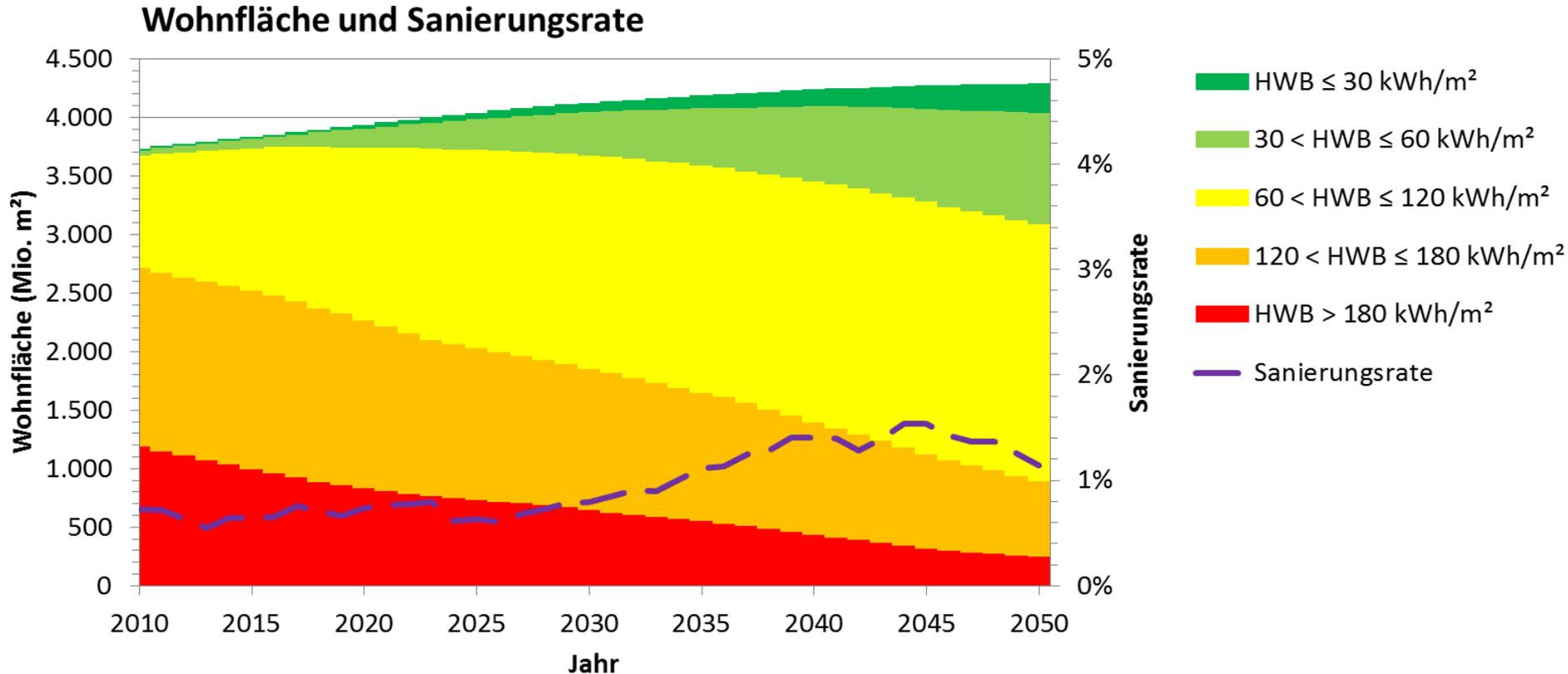
- Reduzierung des spezifischen Wohnflächenbedarfs um
  - 2020: 3%, 2030: 6%, 2040: 10%, 2050: 14%
- Stärkerer Anstieg der Abrissrate und Reduzierung der Neubaurate ab 2030
- Erhöhung Auswahlwahrscheinlichkeit für der höhere Dämmintensitäten
- Erhöhung der Entscheidungswahrscheinlichkeit für Dämmen
- Verstärkte Freigabe von Dämmrestriktionen (Ästhetik, Überdämmung)
- Reduzierung der Auswahlwahrscheinlichkeit für fossile Energieträger
- Erhöhung der Entscheidungswahrscheinlichkeit für einen Energieträgerwechsel bei Sanierung weg von fossilen Energieträgern

# Endenergieverbrauch und THG je Szenario



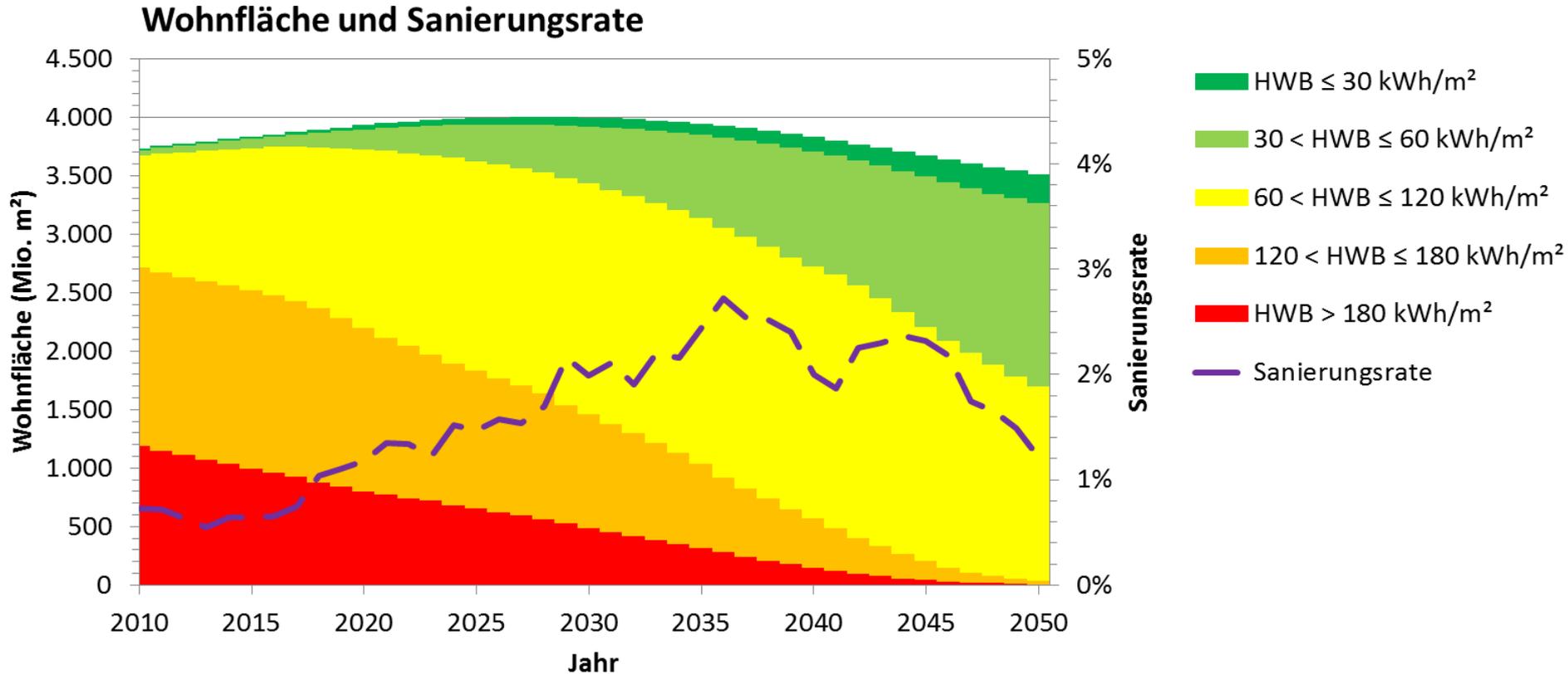
# Wohnfläche und Sanierungsrate

## Referenz WG



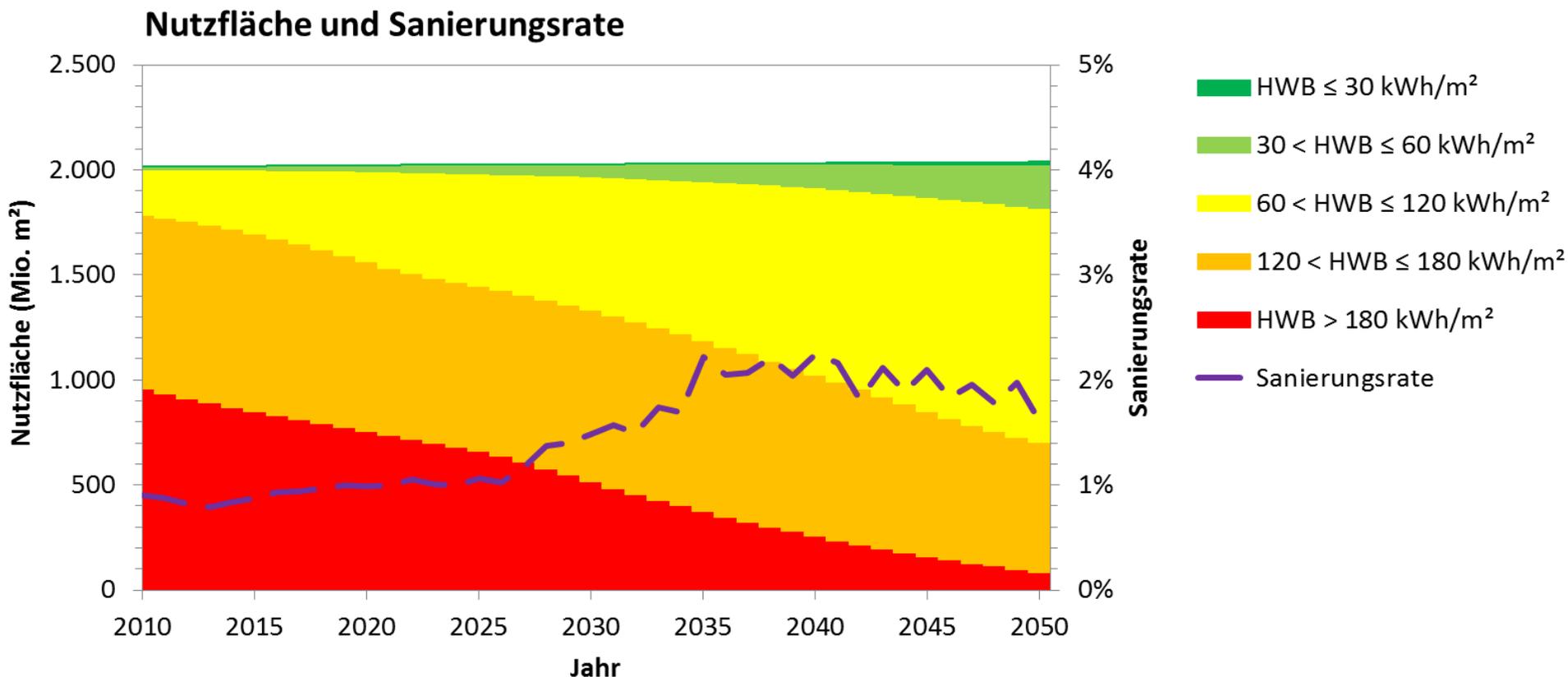
# Wohnfläche und Sanierungsrate

## Naturschutz WG

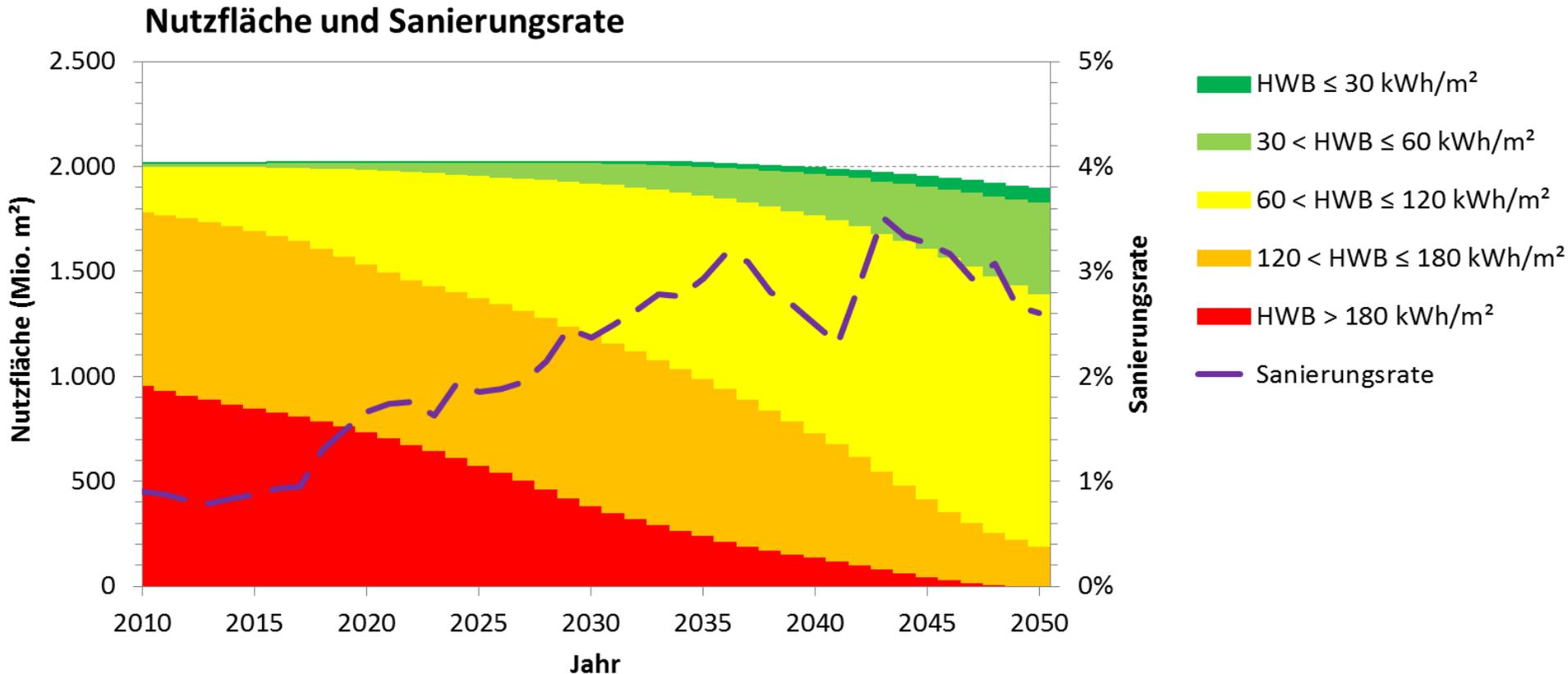


# Wohnfläche und Sanierungsrate

## Referenz NWG



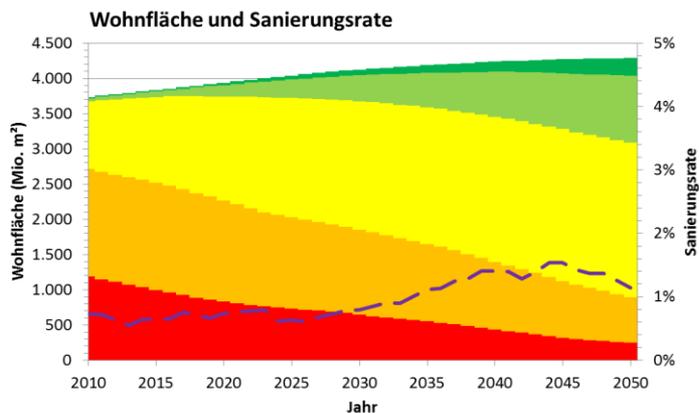
# Wohnfläche und Sanierungsrate Naturschutz NWG



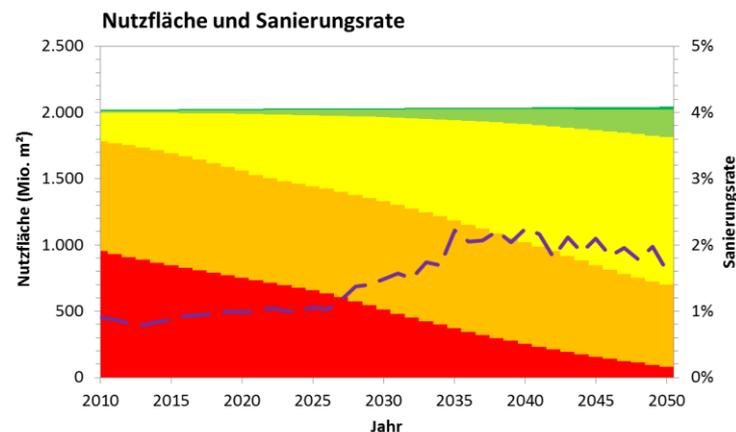
# Wohnfläche und Sanierungsrate

## Zusammenfassung

### WG

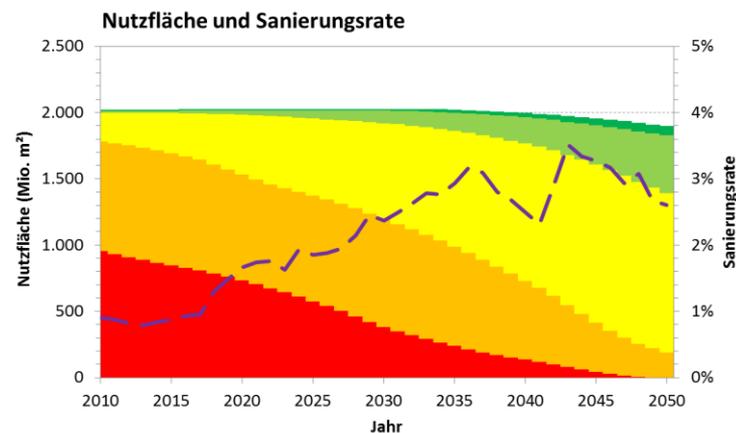
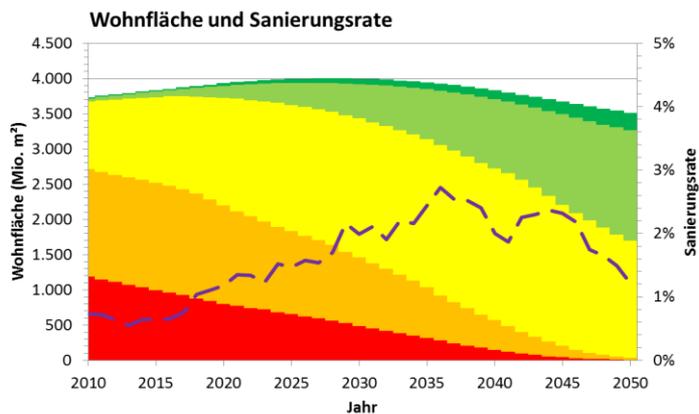


### NWG



### Ref

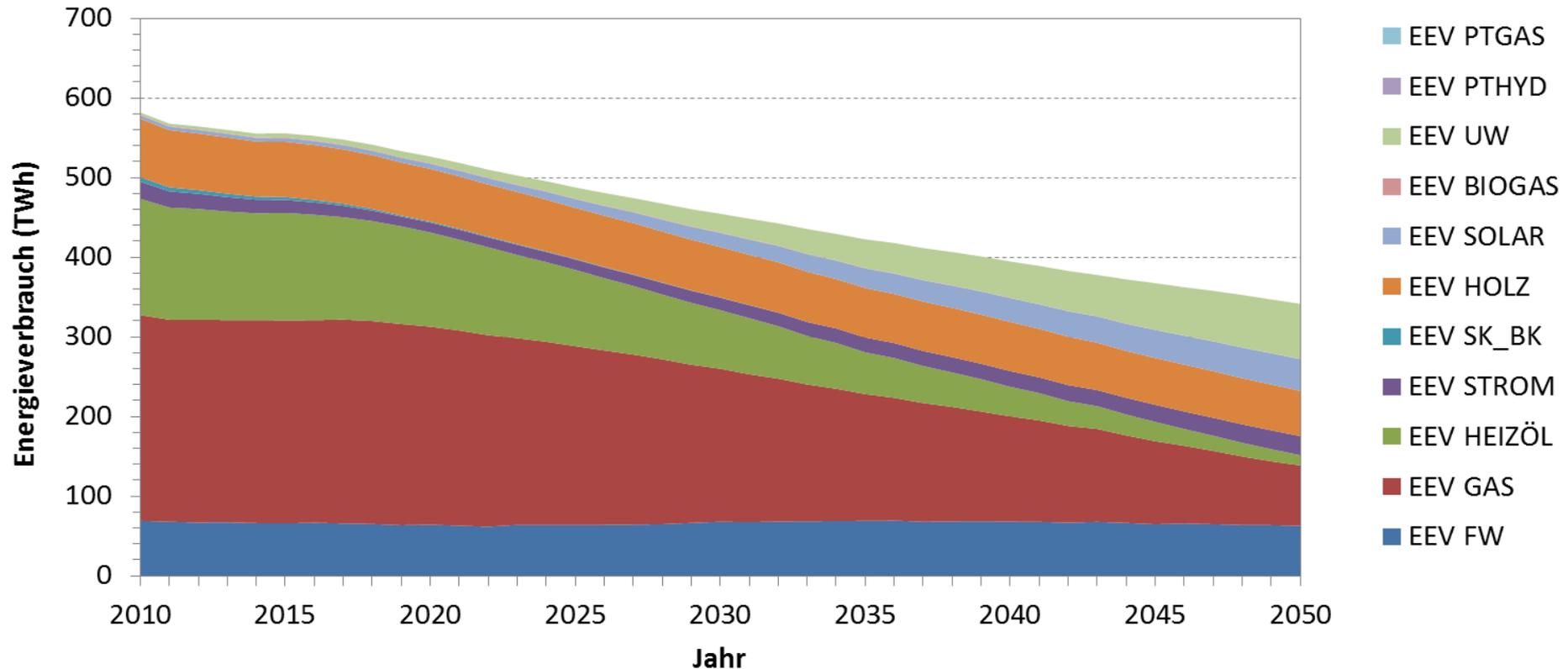
### Nat



# Wohnfläche und Sanierungsrate

## Referenz WG – vor Rückkopplung mit PowerFlex

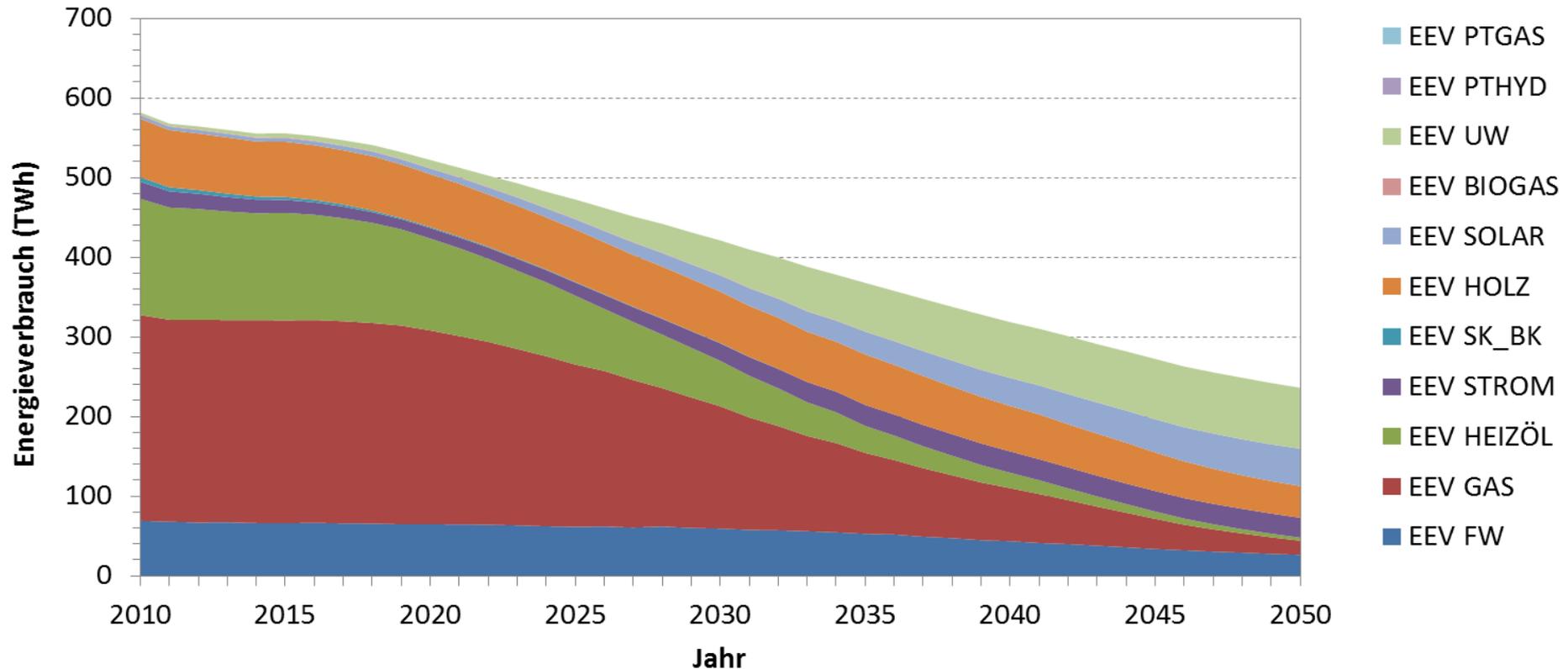
### Energieträger



# Wohnfläche und Sanierungsrate

## Naturschutz WG – vor Rückkopplung mit PowerFlex

### Energieträger



# Schnittstelle zwischen dem Gebäudemodell Building STar und dem Strommarktmodell PowerFlex

# Herausforderungen der Modellkopplung

|                       | PowerFlex                     | Building Star                 |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Zeitliche Auflösung   | 1 h                           | jährlich                      |
| Zeitspanne            | 1 Jahr, drei Zeitscheiben     | 2009-2050                     |
| Energieträger         | Fast gleich, leicht anpassbar |                               |
| Auflösung Heizanlagen | Grobe Gruppen                 | Sehr differenziert je Kohorte |

**Übertragung der Jahreswerte aus BS in hoch aufgelöste Lastkurven in PF**

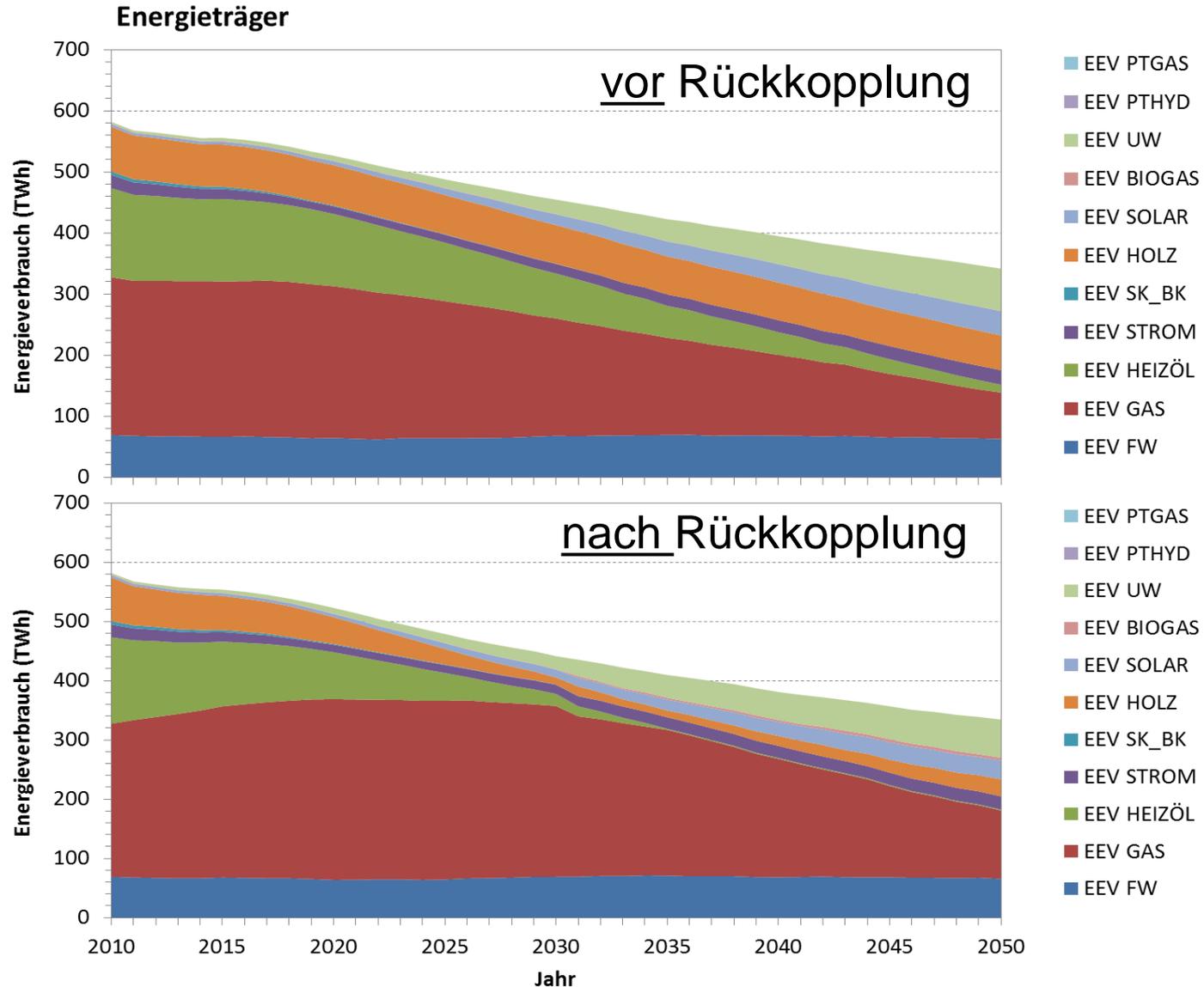
**„Einsammeln“ der neuen Heizanlagen zwischen den Zeitscheiben, Übergabe an PF**

**Optimierter Energieträgermix aus PF  
→ Anpassung der Heizanlagenkombinationen in BS, bis Übereinstimmung**

# Iteratives Vorgehen zur Modellkopplung für ein Stützjahr

- Building STar: Wie entwickelt sich die Wärmenachfrage und welche Heizungstechnologien stehen zum Austausch an?
  - Bestandsanlagen
    - Biomasseverbrauch
    - CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Heizungstechnologien für Austausch
    - Wärmenachfrage
    - Leistungsgrenze für WP und Solarthermie
- PowerFlex: Brennstoff- und Technologie-Mix zur Deckung der dezentralen Wärmenachfrage (Heizungen) und der Nachfrage nach Nah- und Fernwärme unter Einhaltung des „Biomasse-Caps“ und des „CO<sub>2</sub>-Caps“
  - Heizungstechnologien für Austausch
    - Brennstoff- und Technologiemitmix zur dezentralen Wärmebereitstellung
- Building STar: Gebäudespezifischer Austausch der Heizungen unter Berücksichtigung des vorgegebenen Technologie-Mix

# Exemplarische Ergebnisse zur Modellrückkopplung in BuildingSTar: Ref WG VOR/NACH Rückkopplung



## Ihre Ansprechpartner



**Dr. Matthias Koch**  
Senior Researcher

**Öko-Institut e.V.**  
Energie & Klimaschutz  
Geschäftsstelle Freiburg  
Postfach 17 71  
79017 Freiburg

Telefon: +49 761 45295-218  
E-Mail: [m.koch@oeko.de](mailto:m.koch@oeko.de)



**Dr. Markus Haller**  
Senior Researcher

**Öko-Institut e.V.**  
Energie & Klimaschutz  
Geschäftsstelle Freiburg  
Postfach 17 71  
79017 Freiburg

Telefon: +49 761 45295-293  
E-Mail: [m.haller@oeko.de](mailto:m.haller@oeko.de)

## Ihre Ansprechpartner



**Dr. Klaus Hennenberg**  
Senior Researcher

**Öko-Institut e.V.**  
Energie & Klimaschutz  
Büro Darmstadt  
Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt

Telefon: +49 6151 8191-177  
E-Mail: [k.hennenberg@oeko.de](mailto:k.hennenberg@oeko.de)



**Dr. Tilman Hesse**  
Senior Researcher

**Öko-Institut e.V.**  
Energie & Klimaschutz  
Geschäftsstelle Freiburg  
Postfach 17 71  
79017 Freiburg

Telefon: +49 761 45295-287  
E-Mail: [t.hesse@oeko.de](mailto:t.hesse@oeko.de)