

Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes

Wissenschaftlicher Endbericht

Freiburg, Darmstadt,
28.11.2018

FKZ 03KB114, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autorinnen und Autoren

Dr. Matthias Koch
Dr. Klaus Hennenberg
Katja Hünecke
Dr. Markus Haller
Dr. Tilman Hesse

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Zusammenfassung	9
1. Einleitung und Zielsetzung	13
2. Literaturrecherche und Ableitung von Szenarien	14
2.1. Szenariendefinition	14
2.2. CO₂-Emissionsbudget	15
2.2.1. Sektorspezifisches CO ₂ -Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom und Fernwärme	16
2.2.2. Sektorspezifisches CO ₂ -Emissionsbudget für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser	16
2.2.3. Übergreifendes CO ₂ -Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom, Fernwärme, Raumwärme und Warmwasser	16
2.3. Verfügbares Biomasseangebot	17
2.3.1. Biomassepotenziale	17
2.3.2. Sektorspezifische Aufteilung des Biomassepotenzials	18
2.4. Wärmenachfrage im Gebäudesektor sowie für industriell genutzte Fernwärme	20
2.5. Stromnachfrage, Kraftwerkspark und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	22
2.5.1. Stromnachfrage	22
2.5.2. Konventioneller Kraftwerkspark	23
2.5.3. Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	24
2.6. Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse im Zeitraum 1990 bis 2016	24
2.7. Brennstoffkosten und techno-ökonomische Parametrierung der Technologien zur Biomasseumwandlung in Strom und Wärme	26
2.7.1. Brennstoffkosten für Biomasse und fossile Energieträger	26
2.7.2. Techno-ökonomische Parametrierung der Technologien zur Umwandlung von Biomasse in Strom und Wärme	29
3. Methodik	31
3.1. Strommarktmodellierung PowerFlex	31
3.1.1. Modellbeschreibung	31
3.1.2. Erweiterung	32
3.1.3. Modellspezifische Szenariengestaltung	33
3.2. Gebäudemodellierung Building-STAR	34

3.2.1.	Modellbeschreibung	34
3.2.1.1.	Übergreifende Modellstruktur	35
3.2.1.2.	Generieren des Gebäudebestands im Jahr 2009	36
3.2.1.3.	Fortschreiben des Gebäudebestands bis ins Jahr 2050	38
3.2.1.4.	Berechnen von Kenngrößen und Datenausgabe	39
3.2.2.	Modell-Erweiterung	40
3.2.2.1.	Erweiterung Heizungstechnologien	40
3.2.2.2.	Erweiterung zu Nichtwohngebäuden	40
3.2.2.3.	Modellkopplung von Building-STar und PowerFlex	40
3.2.2.4.	Erweiterung der Datenausgabe	40
3.2.3.	Modellspezifische Szenariengestaltung	41
3.3.	Design der Modellkopplung und Schnittstellen	47
3.3.1.	Design der Modellkopplung	48
3.3.2.	Definition der Schnittstelle und Verarbeitung der übergebenen Daten	50
3.3.2.1.	Datenübergabe von Building-STar an PowerFlex und Umgang mit den Daten	50
3.3.2.2.	Datenübergabe von PowerFlex an Building-STar und Umgang mit den Daten	51
3.3.3.	Beispielhafte Darstellung der Energieträgerverteilung vor und nach der Rückkopplung von Building-STar an PowerFlex	52
4.	Auswertung und Interpretation der Modellierungsergebnisse	54
4.1.	Aufteilung der Biomasse und des CO₂-Budgets auf den Strom- und Wärmesektor	54
4.1.1.	Aufteilung der verfügbaren Biomasse	54
4.1.1.1.	Nutzung fester Biomasse	54
4.1.1.2.	Nutzung von Biogas und Biomethan	55
4.1.1.3.	Sektorale Aufteilung der Biomasse-Nutzung	56
4.1.2.	Aufteilung des CO ₂ -Budgets	57
4.2.	Rolle der Biomasse im Wärmesektor	59
4.2.1.	Wärmemix gesamt	59
4.2.2.	Dezentrale Wärmeversorgung	62
4.2.3.	Fernwärme	64
4.2.4.	Nahwärme	65
4.2.5.	Einsatz der festen Biomasse in Abhängigkeit des energetischen Sanierungsniveaus der Gebäudehülle	67
4.3.	Rolle der Biomasse im Stromsektor	69
4.3.1.	Stromnachfrage und Erzeugungsmix	69
4.3.2.	Biomasse als Flexibilitätsoption	72
4.4.	Kopplung von Strom- und Wärmesektor	74

4.5.	Einordnung Ergebnisse zum Biomasseeinsatz im Vergleich zu anderen Studien	77
4.5.1.	Biomassenutzung für die dezentrale Wärmeerzeugung im Gebäudebereich	77
4.5.2.	Biomassenutzung zur Wärmeerzeugung für Nah- und Fernwärme	79
4.5.3.	Biomassenutzung zur Stromerzeugung	80
5.	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	81
6.	Literaturverzeichnis	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Zuordnung der Szenarien entlang der Dimensionen „Klimaschutzniveau“ und „Biomassepotenzial“	15
Abbildung 2-2:	Sektorale Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser von 2008 bis 2016	20
Abbildung 2-3:	Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in den Zielszenarien der Energieeffizienzstrategie Gebäude und dem Klimaschutzenszenario 95 % der Klimaschutzenszenarien 2050	21
Abbildung 2-4:	Wärmeerzeugung aus Biomasse in Deutschland zwischen 1990 und 2016	25
Abbildung 2-5:	Stromerzeugung aus Biomasse in Deutschland zwischen 1990 und 2016	26
Abbildung 2-6:	Brennstoffkosten für Energieträger zur Stromerzeugung frei Kraftwerk	28
Abbildung 2-7:	Brennstoffkosten für Energieträger zur dezentralen Wärmeerzeugung für private Endkunden	29
Abbildung 3-1:	Modellstruktur Building-STar	35
Abbildung 3-2:	Bevölkerungsentwicklung	42
Abbildung 3-3:	Sanierungsrate und Wohn-/Nutzflächen im Referenzszenario	45
Abbildung 3-4:	Sanierungsrate und Wohn-/Nutzflächen im Naturschutzszenario	46
Abbildung 3-5:	Endenergieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen (Summe Wohn- und Nicht-Wohngebäude) für die Referenzszenario, Referenzszenario_Wärmeeffizienz und Naturschutzszenario	47
Abbildung 3-6:	Design der Modellkopplung zwischen PowerFlex und Building-STar	49
Abbildung 3-7:	Energieträgerverteilung im Wohngebäudebestand vor und nach der Rückkopplung von PowerFlex und Building-STar	53
Abbildung 4-1:	Einsatz des Potenzials für feste und gasförmige Biomasse	55
Abbildung 4-2:	Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse	56
Abbildung 4-3:	CO ₂ -Emissionen in Strom- und Wärmesektor	57
Abbildung 4-4:	CO ₂ -Emissionen: Differenzen zum Referenzszenario	58
Abbildung 4-5:	CO ₂ -Preise	59
Abbildung 4-6:	Aufteilung der Wärmeversorgung in Fernwärme, Nahwärme und dezentrale Wärmeversorgung	60
Abbildung 4-7:	Erzeugungsmix Wärme (gesamt)	61
Abbildung 4-8:	Erzeugungsmix Wärme gesamt (Differenz zum Referenzszenario)	61
Abbildung 4-9:	Erzeugungsmix dezentrale Wärmeversorgung	63
Abbildung 4-10:	Erzeugungsmix dezentrale Wärmeversorgung (Differenz zum Referenzszenario)	63
Abbildung 4-11:	Erzeugungsmix Fernwärme	64
Abbildung 4-12:	Erzeugungsmix Fernwärme (Differenz zum Referenzszenario)	65
Abbildung 4-13:	Erzeugungsmix Nahwärme	66
Abbildung 4-14:	Erzeugungsmix Nahwärme (Differenz zum Referenzszenario)	66

Abbildung 4-15:	Anteil der festen Biomasse in Abhängigkeit vom Sanierungsniveau der Gebäudehülle	68
Abbildung 4-16:	Zusätzliche Stromnachfrage zur Wärmebereitstellung (Power-to-Heat)	69
Abbildung 4-17:	Erzeugungsmix Strom	71
Abbildung 4-18:	Erzeugungsmix Strom (Differenz zum Referenzszenario)	71
Abbildung 4-19:	Maximal abgerufene steuerbare Erzeugungsleistung	73
Abbildung 4-20:	Volllaststunden steuerbarer Kraftwerke	73
Abbildung 4-21:	Strom- und Wärmeerzeugung in stündlicher Auflösung (Aprilwoche, Referenzszenario 2020)	74
Abbildung 4-22:	Strom- und Wärmeerzeugung in stündlicher Auflösung (Aprilwoche, Referenzszenario 2050)	75
Abbildung 4-23:	Strom- und Wärmemix im Jahresgang (Referenzszenario 2020)	76
Abbildung 4-24:	Strom- und Wärmemix im Jahresgang (Referenzszenario 2050)	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Verfügbares CO ₂ -Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom, Fernwärme, Raumwärme und Warmwasser	17
Tabelle 2-2:	Biomasseeinsatz 2015 und erschließbare Biomassepotenziale 2020 bis 2050	18
Tabelle 2-3:	Verteilung des Biomassepotenzials auf die Sektoren Verkehr, stoffliche Nutzung und energetische Nutzung für die Strom- und Wärmeerzeugung	19
Tabelle 2-4:	Biomasseangebot für die Strom- und Wärmeerzeugung in der Szenarienanalyse	19
Tabelle 2-5:	Herleitung der für die Modellierung vorgegebene Stromnachfrage in der Szenarienanalyse	23
Tabelle 2-6:	Angebot fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung	24
Tabelle 2-7:	Techno-ökonomische Parameter für Umwandlungstechnologien von Biomasse in Strom und Wärme	30
Tabelle 3-1:	Anlagen- und Technologiepool für die Erzeugung von Nah- und Fernwärme	33
Tabelle 3-2:	Anlagen- und Technologiepool für die Erzeugung von dezentraler Wärme	34
Tabelle 3-3:	Szenarieneinstellungen in Building-STAR	43
Tabelle 3-4:	Schnittstellenrelevante Unterschiede zwischen der Modellstruktur von PowerFlex und Building-STAR sowie verfolgte Lösungsansätze	48
Tabelle 3-5:	Übergabeparameter aus Building-STAR an PowerFlex	50
Tabelle 3-6:	Übergabeparameter aus PowerFlex an Building-STAR: Ergebnisse der brennstoffspezifischen Einsatzentscheidung für die Wärmeerzeugung in Neuanlagen	51

Zusammenfassung

Aus energetischer Sicht ist Biomasse als erneuerbarer Rohstoff ein Alleskönner. Sie kann direkt als Brennstoff (z.B. Holz) oder als Rohstoff für Bioenergieträger (z.B. Biogas, Biodiesel, synthetische Kraftstoffe) in zahlreichen Anwendungen in den Sektoren Verkehr, Strom und Wärme genutzt werden. Zudem sind Biomasse und Biobrennstoffe einfach lagerbar und haben das Potenzial, Schwankungen der fluktuierenden Stromeinspeisung aus Wind- und Photovoltaikanlagen oder der schwankenden Wärmeerzeugung aus Solarthermie auszugleichen.

Allerdings zeigt die in dieser Studie durchgeführte Auswertung von Potenzialstudien, dass heimische Biomasse als Rohstoff für Bioenergie mit maximal 1.550 PJ im Jahr 2050 nur einen geringen Anteil an dem zukünftigen Gesamtenergiebedarf in Deutschland leisten kann. Bioenergie ist damit eine knappe erneuerbare Ressource, die möglichst kostengünstige und energieeffiziente den Energiesektoren eingesetzt werden sollte. Dabei kann Bioenergie insbesondere eine Rolle spielen als flexibel einsetzbarer Energieträger, aber auch als Lückenbüsser in Bereichen, in denen andere erneuerbare Energiequellen schwer einsetzbar sind. Um dies zu erreichen, ist eine Kopplung der Energiesektoren sinnvoll.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieses Projektes, die Rolle der energetischen Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmemarkt in Deutschland – unter Berücksichtigung der Nachfrage des Verkehrssektors – in einem Zeitraum von 2020 bis 2050 modellgestützt zu analysieren. Folgende zentralen Forschungsfragen in diesem Projekt sind:

- Sollte das verfügbare Bioenergieangebot eher für den Stromsektor (z.B. stromgeführte KWK als Flexibilitätsoption) oder besser im Wärmemarkt als erneuerbare Wärmequelle (wärmegeführte KWK oder nur Wärme) eingesetzt werden, um die Klimaschutzziele für den Strom- und Wärmesektor möglichst kosteneffizient einzuhalten?
- Wie sensitiv reagiert der Einsatz von Biomasse im Strom- und Wärmesektor auf Änderungen der Wärmenachfrage im Gebäudesektor, wie sie sich infolge unterschiedlicher energetischer Sanierungsintensitäten ergibt?
- Welche Wechselwirkungen ergeben sich zwischen dem Wärme- und dem Stromsektor und welche Funktion nimmt die Biomasse dabei ein?

Um Antworten zu diesen Fragen zu geben, wurden das Strommarktmodell PowerFlex und das Gebäudebestandsmodell Building-STar im Projekt erfolgreich miteinander gekoppelt, so dass ein ökonomisch optimierter Einsatz von Biomasse im Wechselspiel mit anderen erneuerbaren Energieträgern und den Anforderungen des Gebäudebestands berechnet werden konnte.

Die Grundlage der Analyse bilden vier Szenarien, die sich anhand der beiden Hauptrahmenparameter „Ambitionsniveau Klimaschutz“ und „verfügbares Biomasseangebot“ sowie hinsichtlich der Sensitivitäten Wärmeeffizienz im Gebäudesektor und beschleunigter Kohleausstieg im Stromsektor unterscheiden:

- **Referenzszenario** für die Jahre 2020, 2030 und 2050: Aufbauend auf den Klimaschuttszenarien KS80 mit einem mittleren Klimaschutzniveau und einem für die energetische Nutzung erschlossenen Biomassepotenzial.
- **Referenzszenario-Wärmeeffizienz** für die Jahre 2020, 2030 und 2050: Sensitivität „Wärmeeffizienz durch stärkere Gebäudesanierung“ für das Referenzszenario, so dass der Raumwärmebedarf abgesenkt wird.

- **Naturschutzszenario** für die Jahre 2020, 2030 und 2050: Aufbauend auf den Klimaschutzszenarien KS95 mit einem hohen Klimaschutzniveau und einem aus naturschutzgründen begrenzten Biomassepotenzial für die energetische Nutzung.
- **Naturschutzszenario-Kohleausstieg**: Sensitivität „beschleunigter Kohleausstieg“ für das Naturschutzszenario im Jahr 2020, so dass das in 2020 aus der Stromerzeugung kommende CO₂-Budgets abgesenkt wird.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass **feste Biomasse** im Referenzszenario zum weitaus größten Teil zur dezentralen Wärmeversorgung in Gebäuden eingesetzt wird. Ein Grund liegt in der z.T. noch schwachen Wärmedämmung der Gebäude. Hingegen wird im Naturschutzszenario die dort weniger verfügbare feste Biomasse bei gleichzeitig gut gedämmten Gebäuden und einem knappen CO₂-Budget fast ausschließlich zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme genutzt. Im Referenzszenario-Wärmeeffizienz wird im Jahr 2050 das feste Biomassepotenzial nur zu einem geringen Anteil ausgeschöpft, da der Biomassebedarf in den Gebäuden niedrig ist und gleichzeitig durch das höhere CO₂-Budget kostengünstige fossile Energieträger im System bleiben können.

Markant ist das Ergebnis, dass **Biogas und Biomethan** aufgrund hoher Preise nur in geringem Umfang eingesetzt werden. Lediglich im Naturschutzszenario in den Jahren 2030 und 2050 werden die verfügbaren Potenziale – getrieben durch das knappe CO₂-Budget – vollständig genutzt.

Im Vergleich zu Studien ohne Sektorkopplung zeigen die Ergebnisse dieser Studie für den Gebäudesektor nach der **durchgeführten Sektorkopplung** häufig einen höheren Biomasseeinsatz für die dezentrale Wärmeerzeugung im Gebäudebereich. Dies ist insbesondere im Jahr 2030 und unter der Annahme einer geringen Wärmeeffizienz der Fall, da feste Biomasse zu hohen Anteilen in schlecht gedämmten Häusern zum Einsatz kommt. Im Stromsektor liegt korrespondierend die eingesetzte Menge an Biomasse niedriger als in anderen Studien.

Im Hinblick auf die oben genannten Fragen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Schlussfolgerung 1: Erneuerbare Energien verdrängen im Zeitverlauf sowohl im Stromsektor als auch im Gebäudesektor fossile Energieträger, um die vorgegebenen CO₂-Minderungsziele zu erfüllen.

Schlussfolgerung 2: Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass sowohl Biogas als auch daraus aufbereitetes Biomethan erst bei sehr hohen THG-Minderungszielen und einem gleichzeitig geringem Angebot an fester Biomasse eingesetzt werden.

Schlussfolgerung 3: Der Einsatz von fester Biomasse stellt in der dezentralen Wärmeversorgung eine wichtige Übergangstechnologie dar, insbesondere für schlecht gedämmte bzw. nur unzureichend energetisch sanierbare Gebäude.

Schlussfolgerung 4: In den Ergebnissen aus der Modellierung ist zudem zu sehen, dass die Kopplung des Wärme- und Stromsektors von 2020 bis 2050 zunimmt. Diese Kopplung erfolgt über erneuerbaren Strom und elektrische Wärmeerzeugung sowie mit Hilfe von flexiblen KWK-Kraftwerken. Biomasse spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Schlussfolgerung 5: Die energetische Sanierung und Dämmung der Gebäudehülle und den daraus folgenden Rückgang des Wärmebedarfs stellt die Grundlage für die CO₂-Minderung im Wärmesektor dar.

Schlussfolgerung 6: Der Stromsektor kompensiert die Restriktionen des Gebäudebestands und beteiligt sich überproportional an der gesamten sektorübergreifenden CO₂-Minderung.

Schlussfolgerung 7: Die Reduktion der Kohleverstromung und der Ausbau der Wind- und PV-Stromerzeugung stellen die beiden zentralen Komponenten für die CO₂-Minderung im Stromsektor dar.

Aufbauend auf die in diesem Projekt erfolgreich durchgeführte modelltechnische Kopplung des Strom- und Wärmesektors und den deutlichen Effekten, die bei einer getrennten Betrachtung dieser beiden Sektoren nicht zu Tage treten, ist als zukünftiger Forschungsbedarf eine Integration des Verkehrssektor in die ökonomische Optimierung anzustreben.

1. Einleitung und Zielsetzung

Die energetische Nutzung von Biomasse bildet einen wichtigen Baustein bei der Umsetzung der Energiewende in Deutschland für eine klima- und umweltverträgliche Energieversorgung. Die besondere Bedeutung der Biomasse resultiert zum einen daher, dass sie in allen relevanten Sektoren, insbesondere im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor, energetisch genutzt werden kann. Zum anderen ist sie über einen längeren Zeitraum hinweg speicherbar und mit anderen erneuerbaren Energieträgern kombinierbar, so dass sie beispielsweise Schwankungen der fluktuierenden Stromeinspeisung aus Wind- und Photovoltaikanlagen oder der schwankenden Wärmeerzeugung aus Solarthermie ausgleichen kann. Die Nachteile der Biomassenutzung als Energieträger bestehen darin, dass das verfügbare Angebot an heimischer Biomasse zur energetischen Nutzung begrenzt ist, der Anbau mit Umweltrisiken und sozialen Risiken verbunden sein kann (insbesondere bei Importen), die Energieträgerkosten vergleichsweise hoch sind und sie zudem über das verfügbare Flächenpotenzial mit der stofflichen Nutzung und dem Anbau von Nahrungsmitteln konkurriert.

Die Ausgestaltung einer kostengünstigen und energieeffizienten Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmemarkt, unter Berücksichtigung der Nachfrage des Verkehrssektors, stellt somit eine offene Forschungsfrage dar.

Ziel dieses Projektes ist es, die Rolle der energetischen Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmemarkt in Deutschland in einem Zeitraum von 2020 bis 2050 modellgestützt zu analysieren. Dabei werden verschiedene Annahmen sowohl bezüglich des zur Verfügung stehenden Angebots an Bioenergie, als auch hinsichtlich der Entwicklung von Heizungssystemen und des Wärmeschutzstandards im Gebäudebestand berücksichtigt.

Die zentralen Forschungsfragen in diesem Projekt sind:

- Sollte das verfügbare Bioenergieangebot eher für den Stromsektor (z.B. stromgeführte KWK als Flexibilitätsoption) oder besser im Wärmemarkt als erneuerbare Wärmequelle (wärmegeführte KWK oder nur Wärme) eingesetzt werden, um die Klimaschutzziele für den Strom- und Wärmesektor möglichst kosteneffizient einzuhalten?
- Wie sensitiv reagiert der Einsatz von Biomasse im Strom- und Wärmesektor auf Änderungen der Wärmenachfrage im Gebäudesektor, wie sie sich infolge unterschiedlicher energetischer Sanierungsintensitäten ergibt?
- Welche Wechselwirkungen ergeben sich zwischen dem Wärme- und dem Stromsektor und welche Funktion nimmt die Biomasse dabei ein?

In diesem Projekt werden die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen dem Stromsektor und dem Wärmesektor in den Fokus genommen, wobei die optimale Allokation des zur Verfügung stehenden Angebots an Bioenergie auf den Stromsektor sowie zur Deckung der Wärmenachfrage im Gebäudesektor quantifiziert wird. Den methodischen Kern der Untersuchung bildet eine quantitative, modellbasierte Szenarioanalyse auf Basis des bestehenden Strommarktmodells „PowerFlex“ des Öko-Instituts. Dieses Modell wird dahingehend erweitert, dass die Biomasseallokation Teil der optimalen Lösung sein wird. Zudem wird das hauseigene Gebäudemodell „Building-STar“ als zentrale Inputgröße für den Gebäudesektor eingesetzt, um Aspekte wie Anlagen zur Wärmebereitstellung, Wärmeschutzmaßnahmen, Neubau und Abriss modellgestützt zu adressieren. Dabei werden die beiden Modelle „PowerFlex“ und „Building-STar“ über eine Datenschnittstelle miteinander gekoppelt.

2. Literaturrecherche und Ableitung von Szenarien

2.1. Szenariendefinition

Für die Szenarienanalyse werden insgesamt zehn Szenarien definiert, welche sich anhand der folgenden Rahmenparameter unterscheiden:

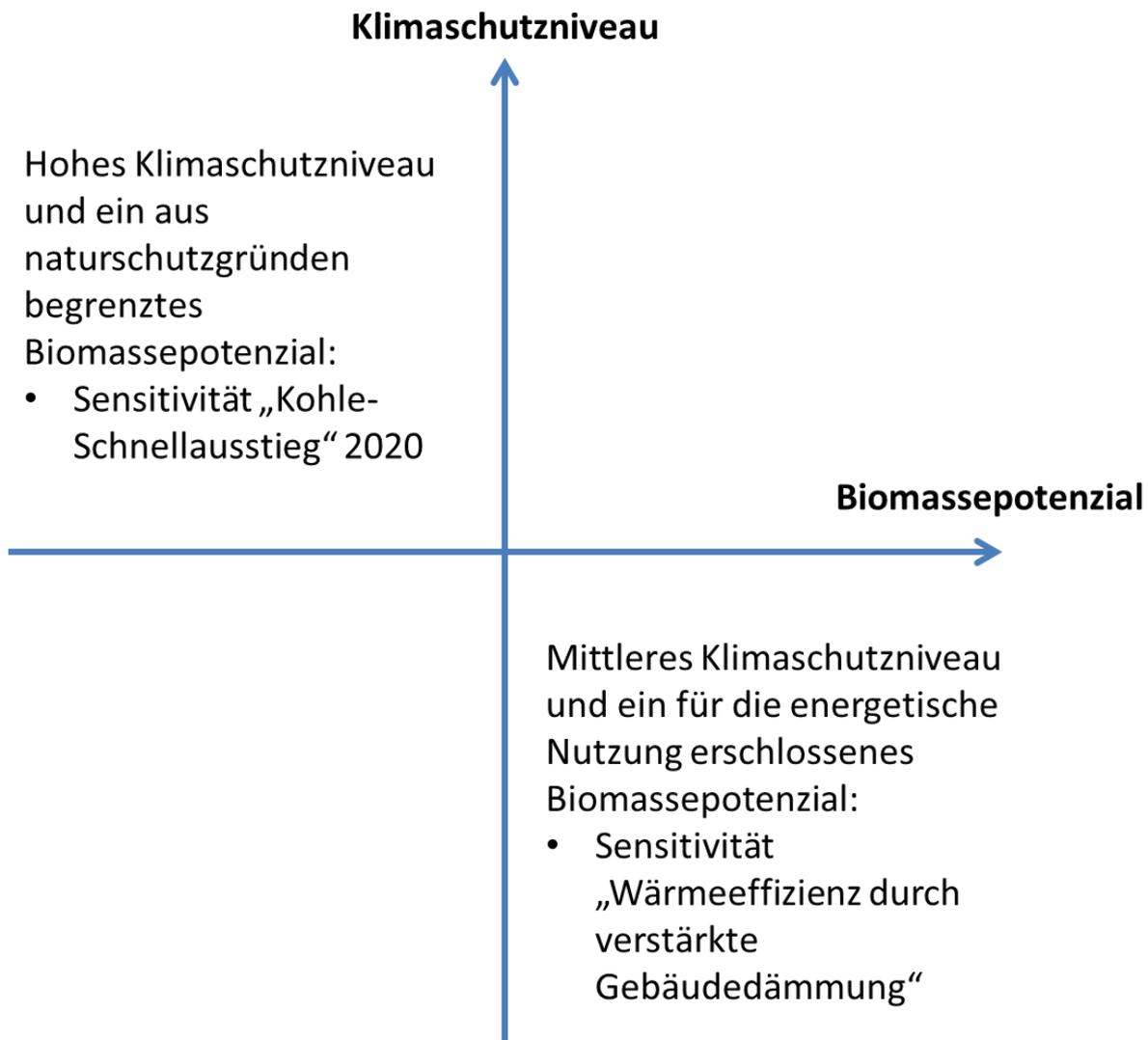
- a. verfügbares CO₂-Emissionsbudget
- b. verfügbares Biomasseangebot
- c. Wärmenachfrage im Gebäudesektor
- d. installierte Leistung der Kohlekraftwerke

Das verfügbare CO₂-Emissionsbudget quantifiziert dabei das unterstellte Klimaschutzniveau und gibt den grundsätzlichen Charakter der Szenarien vor (y-Achse in Abbildung 2-1). Es beschreibt die Geschwindigkeit des Transformationsprozesses auf dem Weg zu einer dekarbonisierten und auf erneuerbaren Energien beruhenden Lebens- und Wirtschaftsweise. Die Variation des verfügbaren Biomasseangebots spannt darin den Korridor der energetischen Biomassenutzung im Strom- und Wärmesektor auf (x-Achse in Abbildung 2-1). Die Parameter c. und d. bilden durch eine weitere Parametervariation jeweils eine Sensitivität der Szenarien ab (Sensitivität „Wärmeeffizienz durch stärkere Gebäudesanierung“ und Sensitivität „Kohle-Schnellausstieg“).

Die Szenarien und deren Sensitivitäten lassen sich folgendermaßen strukturieren:

- **Referenzszenario** für die Jahre 2020, 2030 und 2050 (Abkürzung „*Ref, 2020*“ etc.): Aufbauend auf den Klimaschutzszenarien KS80 mit einem mittleren Klimaschutzniveau und einem für die energetische Nutzung erschlossenen Biomassepotenzial.
- **Referenzszenario-Wärmeeffizienz** für die Jahre 2020, 2030 und 2050 (Abkürzung „*Ref_WE, 2020*“ etc.): Sensitivität „Wärmeeffizienz durch stärkere Gebäudesanierung“ für das Referenzszenario, so dass der Raumwärmebedarf abgesenkt wird.
- **Naturschutzszenario** für die Jahre 2020, 2030 und 2050 (Abkürzung „*Nat, 2020*“ etc.): Aufbauend auf den Klimaschutzszenarien KS95 mit einem hohen Klimaschutzniveau und einem aus naturschutzgründen begrenzten Biomassepotenzial für die energetische Nutzung.
- **Naturschutzszenario-Kohleausstieg** (Abkürzung „*Nat_KA, 2020*“): Sensitivität „beschleunigter Kohleausstieg“ für das Naturschutzszenario im Jahr 2020, so dass das in 2020 aus der Stromerzeugung kommende CO₂-Budgets abgesenkt wird.

Abbildung 2-1: Zuordnung der Szenarien entlang der Dimensionen „Klimaschutzniveau“ und „Biomassepotenzial“



Quelle: Öko-Institut e.V.

2.2. CO₂-Emissionsbudget

Das für den Strom- und Wärmesektor in der Modellierung zur Verfügung stehende CO₂-Emissionsbudget setzt sich zum einen aus dem sektorspezifischen CO₂-Emissionsbudget für die Stromerzeugung und die Erzeugung von Fernwärme und zum anderen aus dem sektorspezifischen CO₂-Emissionsbudget für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden zusammen.

Innerhalb dieses übergreifenden CO₂-Emissionsbudgets, welche als Obergrenze für die sektoreübergreifende Modellierung vorgegeben wird, kommt es dann modellendogen zu einer modifizierten sektorspezifischen Aufteilung.

2.2.1. Sektorspezifisches CO₂-Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom und Fernwärme

Der Kraftwerkspark setzt sich im deutschen Emissionsinventar aus Kraftwerken der öffentlichen Versorgung (Sektor „Energiewirtschaft“) und Industriekraftwerken (Sektor „Industrie“) zusammen. Diese Kraftwerke produzieren einerseits Strom für die Einspeisung in die öffentlichen Stromnetze sowie andererseits - im Fall von Industriekraftwerken - auch für den Eigenverbrauch vor Ort. Darüber hinaus koppeln Kraftwerke, die mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) betrieben werden, auch zusätzlich zur Stromerzeugung Wärme aus und speisen diese in Wärmenetze ein. Neben KWK-Kraftwerken erzeugen in kleinerem Umfang auch Heizwerke und Spitzenlastkessel Wärme und speisen sie in Wärmenetze ein.

Das sektorspezifische CO₂-Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom und Fernwärme wurde aus den Klimaschutzenszenarien KS80 und KS95 übernommen (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015, S. 275, S. 280 und S. 286f). Die dort ausgewiesenen Emissionen in CO₂-Äquivalenten wurden jedoch noch um den Anteil an CH₄- und N₂O-Emissionen bereinigt, so dass die Angaben als CO₂-Emissionen vorliegen. Der Anteil an CH₄- und N₂O-Emissionen beläuft sich auf 1,5 % bis 2,0 % an den ausgewiesenen Emissionen in CO₂-Äquivalenten.

Für die Sensitivität „Kohle-Schnellausstieg“ im Naturschutzszenario 2020, wurde auf die WWF Studie „Zukunft Stromsystem – Kohleausstieg 2035“ zurückgegriffen (Matthes et al. 2017). Das daraus resultierende sektorspezifische CO₂-Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom und Fernwärme zeigt Tabelle 2-1 in den Spalten „Kraftwerkspark“ und „Heizwerke und Kessel“.

2.2.2. Sektorspezifisches CO₂-Emissionsbudget für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser

Der Gebäudesektor setzt sich aus Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden zusammen. In den jeweiligen Gebäuden besteht eine Nachfrage nach Strom und Wärme, wobei sich die Wärmenachfrage aus Raumwärme und Warmwasser sowie Prozesswärme zusammensetzt.

Im Rahmen dieses Projekts wird auf die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser fokussiert. Die Erzeugung von Prozesswärme und die damit korrespondierenden CO₂-Emissionen, wie zum Beispiel in Wohngebäuden aus Gasherden zum Kochen oder in Nicht-Wohngebäuden aus gasbetriebenen Backöfen in Bäckereien, werden in der Bilanzierung des sektoralen CO₂-Emissionsbudgets für den Gebäudesektor nicht berücksichtigt.

Um das sektorspezifische CO₂-Emissionsbudget für den Gebäudesektor abzuleiten, wurde der in den Klimaschutzenszenarien KS80 und KS95 ausgewiesene Endenergiebedarf für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015, S. 122f und S. 125f) mit den Emissionsfaktoren aus dem nationalen Inventarbericht (Umweltbundesamt (UBA) 2017, S. 808ff) multipliziert (vgl. auch Abschnitt 2.4). Das daraus resultierende sektorspezifische CO₂-Emissionsbudget ist in Tabelle 2-1 in der Spalte „Gebäude“ dargestellt.

2.2.3. Übergreifendes CO₂-Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom, Fernwärme, Raumwärme und Warmwasser

Das für die Frage der optimalen Biomasseallokation in der Szenarienanalyse zur Verfügung stehende CO₂-Emissionsbudget zeigt Tabelle 2-1 (Spalte „Gesamt“). Über alle Szenarien wird ein verfügbarer CO₂-Emissionsbereich von 377 Millionen Tonnen (Referenzszenario im Jahr 2020) bis 24 Millionen Tonnen (Naturschutzszenario im Jahr 2050) berücksichtigt.

Tabelle 2-1: Verfügbares CO₂-Emissionsbudget für die Erzeugung von Strom, Fernwärme, Raumwärme und Warmwasser

Referenzszenario	Kraftwerke	Heizwerke und Kessel	Gebäude	Gesamt
2020	257 Mio. t	10 Mio. t	110 Mio. t	377 Mio. t
2030	182 Mio. t	8 Mio. t	70 Mio. t	260 Mio. t
2050	42 Mio. t	2 Mio. t	19 Mio. t	63 Mio. t
Naturschutzszenario				
2020	212 Mio. t	13 Mio. t	98 Mio. t	323 Mio. t
2020 (Sensitivität „Kohle-Schnellausstieg“)	175 Mio. t	13 Mio. t	98 Mio. t	286 Mio. t
2030	110 Mio. t	11 Mio. t	45 Mio. t	166 Mio. t
2050	13 Mio. t	6 Mio. t	5 Mio. t	24 Mio. t

Quelle: Kraftwerkspark eigene Berechnung basierend auf (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015, S. 275 und S. 280) und (Matthes et al. 2017, Abbildung 6-3, S. 65); Heizwerke und Kessel eigene Berechnung basierend auf (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015, Tabelle 5-108 und 5-109, S. 286f); Gebäudesektor eigene Berechnung basierend auf (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015, S. 122f und S. 125f) und (Umweltbundesamt (UBA) 2017, S. 808ff)

2.3. Verfügbares Biomasseangebot

2.3.1. Biomassepotenziale

Die Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmesektor setzen sich zum einen aus biogenen Reststoffen und zum anderen aus Anbaubiomasse zusammen. Aktuell wurden im Jahr 2015 etwa 1.100 PJ Biomasse als Primärenergieträger in Deutschland eingesetzt (AG Energiebilanzen e.V. (AGEB) 2017). Gemäß der Satellitenbilanz Erneuerbare Energien¹ entfallen knapp die Hälfte davon auf feste Biomasse (505 PJ), etwa ein Drittel auf gasförmige Biomasse (325 PJ) und jeweils rund 10 % auf Biokraftstoffe und den biogenen Anteil im Abfall (139 PJ bzw. 129 PJ).

Der Anteil des Biomasseeinsatzes aus Reststoffen und Abfällen liegt dabei für das Bezugsjahr 2014 bei 55 % (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2015). Basierend auf der Potenzialstudie zu biogenen Reststoffen von Brosowski et al. 2015 erhöht sich das Reststoffpotenzial auf 830 PJ im Jahr 2020 und 1.165 PJ ab dem Jahr 2030 (vgl. Tabelle 2-2).

Für das Jahr 2020 wurde dabei ein Erschließungsgrad des bislang ungenutzten Reststoffpotenzials von 25 % und ab dem Jahr 2030 von 100 % unterstellt. Der Hauptzuwachs geht dabei auf das bislang ungenutzte Reststoffpotenzial von Waldrestholz, nicht stofflich genutztes Stammholz, Landschaftspflegematerial und Stroh zurück (Brosowski et al. 2015, S. 13). Zudem verdoppelt sich das erschlossene Reststoffpotenzial für gasförmige Biomasse, v.a. aus Gülle und Siedlungsabfällen, ab 2030 im Vergleich zu 2015 (Brosowski et al. 2015, S. 13). Aufgrund der Zunahme des Bio-

¹ <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2015.html>

gaspotenzials aus getrennt erfassten Bioabfällen geht auch Biomassepotenzial für den biogenen Anteil im Abfall zurück.

Im Rahmen dieser Studie wird das Biomassepotenzial aus landwirtschaftlicher Anbaubiomasse über die verfügbare Anbaufläche und den spezifischen Flächenertrag abgeschätzt. Während für die Anbaufläche aufgrund des Flächendrucks ein leichter Rückgang des Flächenpotenzials auf zwei Millionen Hektar unterstellt wird, wird beim spezifischen Flächenertrag von einem moderaten Anstieg ausgegangen. Dieser resultiert aus einem Wechsel der angebauten Pflanzenarten hin zu ertragsstärkeren Pflanzen, wie z.B. Mais oder Pappeln aus Kurzumtrieb-Plantagen (KUP). In Summe bleibt das Potenzial aus landwirtschaftlicher Anbaubiomasse mit rund 400 PJ bis zum Jahr 2050 annähernd konstant (Tabelle 2-2).

Die in Tabelle 2-2 dargestellten Annahmen zu Biomassepotenzialen wurden mit dem Projekt „Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen (Bioplan W)“ abgestimmt. Das Projekt „Bioplan W“ wird vom DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH) als Fördernehmer durchgeführt und, wie auch dieses Projekt, über die Fördermaßnahme „Energetische Biomassenutzung“ gefördert.

Tabelle 2-2: Biomasseinsatz 2015 und erschließbare Biomassepotenziale 2020 bis 2050

	2015	2020	2030	2050
Reststoffe und Abfälle				
<i>Feste Biomasse²</i>	504 PJ	570 PJ	880 PJ	880 PJ
<i>Gasförmige Biomasse</i>	80 PJ	100 PJ	155 PJ	155 PJ
<i>Biogener Anteil im Abfall</i>	129 PJ	130 PJ	100 PJ	100 PJ
<i>Summe Reststoffe und Abfälle</i>	713 PJ	800 PJ	1.135 PJ	1.135 PJ
Anbaubiomasse				
<i>Anbaufläche Ackerland</i>	2,4 Mio. ha	2,4 Mio. ha	2,0 Mio. ha	2,0 Mio. ha
<i>Flächenertrag Ackerland</i>	160 GJ/ha	170 GJ/ha	180 GJ/ha	200 GJ/ha
<i>Summe Anbaubiomasse Ackerland</i>	384 PJ	408 PJ	360 PJ	400 PJ
Biomasse gesamt (gerundet)	1.100 PJ	1.200 PJ	1.500 PJ	1.550 PJ

Quelle: Abstimmung mit dem DBFZ, basierend auf (Brosowski et al. 2015) und weiteren Potenzialstudien

2.3.2. Sektorspezifische Aufteilung des Biomassepotenzials

Das ermittelte Biomassepotenzial wird im Rahmen der Szenariendefinition differenziert. So wird in den Naturschutzszenarien das verfügbare Flächenpotenzial für landwirtschaftliche Anbaubiomasse auf eine Million Hektar im Jahr 2030 reduziert und für das Jahr 2050 komplett auf Null gesetzt.

Das verbleibende Biomassepotenzial wird gemäß den in Tabelle 2-3 dargestellten Faktoren auf die Sektoren Verkehr, stoffliche Nutzung und energetische Nutzung für die Strom- und Wärmeerzeugung aufgeteilt. Im Szenariojahr 2020 sind die sektorspezifischen Verteilungsfaktoren im Refe-

² Umfasst Waldrestholz und nicht stofflich genutztes Stammholz.

renzszenario und im Naturschutzszenario noch identisch und sie entsprechen in etwa der heutigen Aufteilung.

Im Referenzszenario wird angenommen, dass der Biomasseanteil für den Verkehrssektor kontinuierlich von 15 % in 2020 auf 30 % in 2050 zunimmt. Zudem steigt die stoffliche Nutzung an und erreicht einen Anteil von 5 % in 2050. Der Biomasseanteil für die Strom- und Wärmeerzeugung nimmt entsprechend von 85 % in 2020 auf 65 % in 2050 ab.

Im Naturschutzszenario wird unterstellt, dass der Biomasseanteil für den Verkehrssektor deutlich auf 70 % im Jahr 2050 ansteigt. Auch der Anteil für die stoffliche Nutzung fällt doppelt so hoch aus wie im Referenzszenario. Für die Strom- und Wärmeerzeugung verbleibt bei diesen Annahmen im Jahr 2050 nur noch ein Biomasseanteil von 20 %.

Tabelle 2-3: Verteilung des Biomassepotenzials auf die Sektoren Verkehr, stoffliche Nutzung und energetische Nutzung für die Strom- und Wärmeerzeugung

	2020	2030	2050
Referenzszenarien			
Verkehr	15 %	20 %	30 %
Stoffliche Nutzung	0 %	2 %	5 %
Strom- und Wärmeerzeugung	85 %	78 %	65 %
Naturschutzszenarien			
Verkehr	15 %	30 %	70 %
Stoffliche Nutzung	0 %	4 %	10 %
Strom- und Wärmeerzeugung	85 %	66 %	20 %

Quelle: Öko-Institut e.V.

Tabelle 2-4: Biomasseangebot für die Strom- und Wärmeerzeugung in der Szenarienanalyse

Referenzszenario	2020	2030	2050
Feste Biomasse	490 PJ	700 PJ	600 PJ
Gasförmige Biomasse	430 PJ	390 PJ	330 PJ
gesamt	920 PJ	1.090 PJ	930 PJ
Naturschutzszenario			
Feste Biomasse	490 PJ	590 PJ	180 PJ
Gasförmige Biomasse	430 PJ	240 PJ	30 PJ
gesamt	920 PJ	830 PJ	210 PJ

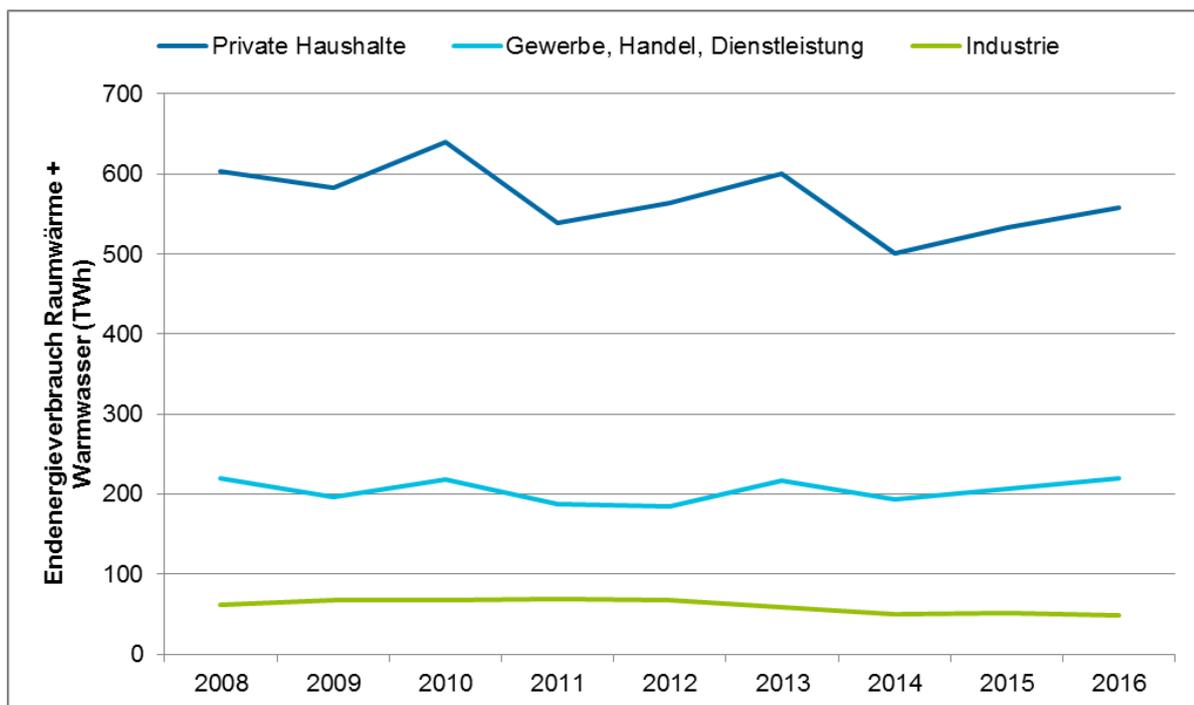
Quelle: Öko-Institut e.V.

Im Ergebnis ergibt sich das in Tabelle 2-4 dargestellte frei allozierbare Biomasseangebot für die Strom- und Wärmeerzeugung. Die Spannweite reicht von 210 PJ im Naturschutzszenario im Jahr 2050 (keine Anbaubiomasse mehr und nur noch 20 % des Biomassepotenzials sind für die Strom- und Wärmeerzeugung nutzbar) bis 1.090 PJ im Referenzszenario im Jahr 2030 (Biomassepotenzial ist vollständig erschlossen und 78 % des Biomassepotenzials ist für die Strom- und Wärmeerzeugung nutzbar).

2.4. Wärmenachfrage im Gebäudesektor sowie für industriell genutzte Fernwärme

Abbildung 2-2 stellt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohn- und Nichtwohngebäuden für die Verbrauchssektoren Private Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie für die Jahre 2008 bis 2016 dar. Die Zahlen basieren auf den nicht-klimabereinigten Daten aus BMWI (2018). Insgesamt ist der Endenergieverbrauch nur leicht rückläufig – bei den Privathaushalten und der Industrie etwas mehr als beim GHD-Sektor.

Abbildung 2-2: Sektorale Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser von 2008 bis 2016



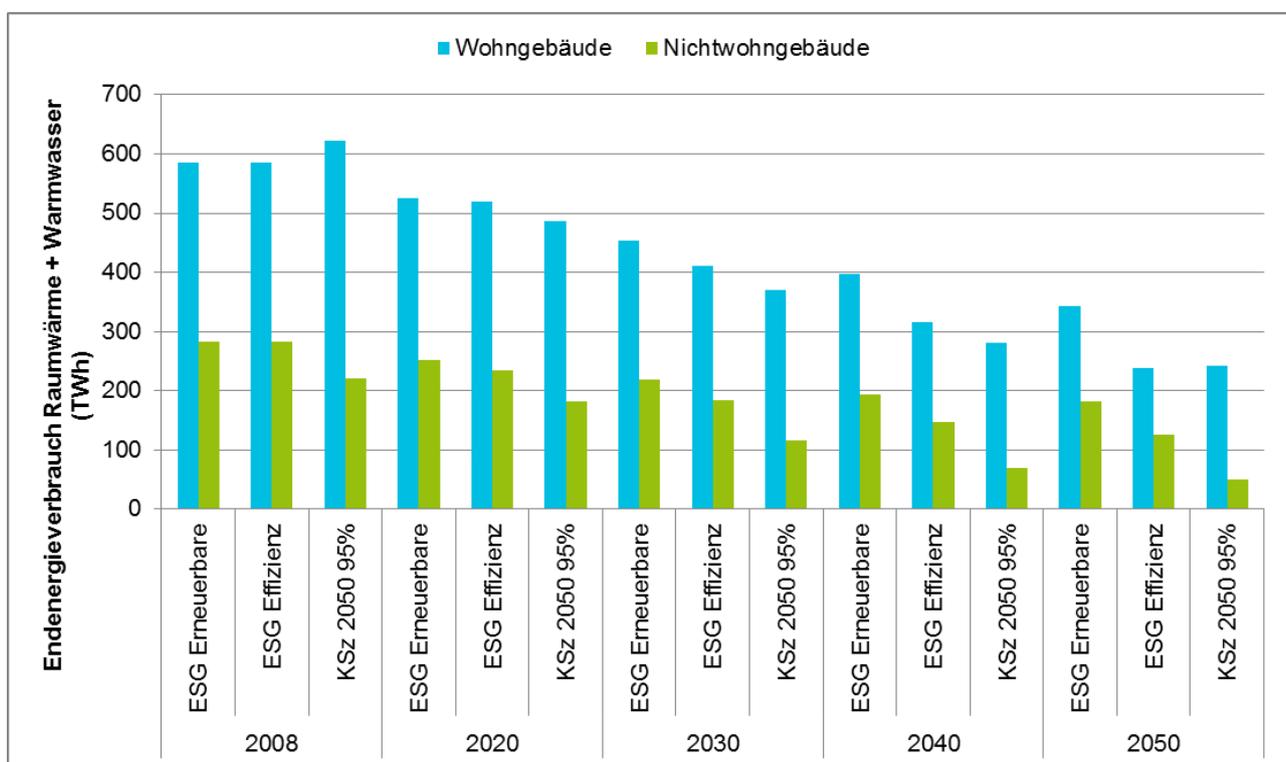
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BMWI (2018)

Für die Kalibrierung des Gebäudemodells „Building-STar“ wurden verschiedene existierende Szenarien verwendet, die sowohl die Wohngebäude als auch die Nicht-Wohngebäude erfassen. Dabei wurde für das Referenzszenario in dieser Studie das Szenario der erneuerbaren Energien Szenario der Energieeffizienzstrategie Gebäude (Thamling et al. 2015) verwendet (abgekürzt „ESG Erneuerbare“). Für das in dieser Studie definierte Referenzszenario mit verstärkter Gebäudesanierung („Ref_WE, 2020 / 2030 / 2050“) wurde sich hingegen an einer Mischung aus dem Effizienz-szenario der Energieeffizienzstrategie Gebäude (Thamling et al. 2015) und dem Klimaschutzszenario

nario 95% aus den Klimaschutzszenarien 2050 (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015) orientiert (abgekürzt jeweils „ESG Effizienz“ und „KSz 2050 95 %“).

Abbildung 2-3 zeigt den Verlauf des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser für Wohn- und Nichtwohngebäude bis 2050. Bei den Nicht-Wohngebäuden liegen die Werte des Klimaschutzszenarios KS95 durchweg niedriger, da hier Gebäude aus dem Sektor Industrie nicht eingeschlossen ist. Auf die Kalibrierung der Szenarien in Building-STAR wird in Kapitel 3.2.3 näher eingegangen.

Abbildung 2-3: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in den Zielszenarien der Energieeffizienzstrategie Gebäude und dem Klimaschutzszenario 95 % der Klimaschutzszenarien 2050



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Thamling et al. (2015) und Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI (2015); ESG: Energieeffizienzstrategie Gebäude; KSz 2050: Klimaschutzszenarien 2050; KSz 2050 ohne Industriegebäude

Die Zielszenarien der Energieeffizienzstrategie Gebäude orientieren sich an den Vorgaben der Bundesregierung aus dem Energiekonzept (Bundesregierung 2010) und dem darin erklärten Ziel einer Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs in Gebäuden von 80 % bis 2050 bezogen auf das Ausgangsjahr 2008. Die beiden Zielszenarien spannen für die Zielerreichung einen Korridor auf, der sich zwischen den beiden Extremen „viel Energieeffizienz“ und „viele erneuerbare Energien“ bewegt. In beiden Zielszenarien werden allerdings sowohl die Energieeffizienz als auch der Ausbau der erneuerbaren Energien zur Wärmeversorgung stark vorangetrieben, eben nur in unterschiedlich starken Ausprägungen (vgl. Thamling et al. (2015)). Die Klimaschutzszenarien 2050 orientieren sich an einer Reduktion der Treibhausgase um 95 % bis 2050 bezogen auf das Basisjahr 1990. In diesem Szenario werden sowohl die Energieeffizienz als auch

der Anteil der erneuerbaren Energien maximal gestärkt bzw. ausgebaut, da eine 95 % Reduktion der Treibhausgase auf andere Art und Weise gar nicht möglich wäre.

Ein Teil der Wärmenachfrage im Gebäudesektor wird durch Wärmenetze gedeckt. Deren Anteil liegt zwischen 8 % und 12 %. Neben der Wärmenachfrage im Gebäudesektor wird in der Szenarioanalyse auch noch die industriell genutzte Fernwärme berücksichtigt, da die diesbezügliche Wärmeerzeugung in KWK-Kraftwerken stattfindet und damit innerhalb der gesetzten Systemgrenzen aus Stromsystem und Gebäudesektor liegt (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015, Tabelle 5-31 und 5-34 (S. 163 und S. 168)).

2.5. Stromnachfrage, Kraftwerkspark und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

2.5.1. Stromnachfrage

Die Grundlage für die Herleitung der zu deckenden Stromnachfrage sind die Ergebnisse der Klimaschutzszenarien 2050 (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015 Tabelle 5-128 (S. 319) bzw. Tabelle 5-129 (S. 321)). Die Entwicklung der Stromnachfrage bis 2050 beinhaltet dabei zwei gegenläufige Effekte: einerseits nimmt der Stromverbrauch von klassischen Stromanwendungen aufgrund von Effizienzmaßnahmen ab, andererseits steigt der Stromverbrauch durch die Zunahme der Elektrifizierung in anderen Sektoren an, insbesondere durch Elektromobilität, Wärmepumpen und Power-to-Gas/Liquid. Während im Zeitraum 2020 bis 2030 der Einflussfaktor Effizienzmaßnahmen dominiert, werden im Zeitraum 2030 bis 2050 die neuen Stromverbraucher zum dominierenden Einflussfaktor.

Die in den Klimaschutzszenarien 2050 ausgewiesene Stromnachfrage für Haushalte und den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) wird zudem an die mittlerweile aktualisierte Bevölkerungsprognose angepasst und steigt dadurch um rund 4 % bis 6 % an. Zudem wird die Import-Export Bilanz in stündlicher Auflösung in die zu deckende Stromnachfrage integriert. Dadurch wird der Stromaustausch mit den Nachbarländern in der Modellierung exogen vorgegeben (Tabelle 2-5).

Der Stromverbrauch für Wärmepumpen in Gebäuden bei Haushalten und im Sektor GHD sowie für großtechnische Power-to-Heat Anlagen in Wärmenetzen ist hingegen ein Modellergebnis und wird deshalb in der für die Modellierung vorgegebenen Stromnachfrage zunächst nicht berücksichtigt. Erst über die Einsatzentscheidung zur Deckung der Wärmenachfrage wird dieser Stromverbrauch modellendogen bestimmt und dem bereits vorgegeben Stromverbrauch hinzuaddiert (vgl. Abbildung 4-16). Gleiches gilt für die ausgewiesenen Verluste von Pumpspeicherkraftwerken, die ebenfalls modellendogen bestimmt werden und daher nicht Teil der vorgegebenen Stromnachfrage sind. Der Eigenverbrauch der Kraftwerke wird zudem implizit über die Kraftwerkseigenschaft „elektrischer Nettowirkungsgrad“ abgebildet, so dass die diesbezügliche Verlustposition entfällt.

Tabelle 2-5: Herleitung der für die Modellierung vorgegebene Stromnachfrage in der Szenarienanalyse

Referenzszenario	2020	2030	2050
In den Klimaschutzszenarien ausgewiesene Stromnachfrage	518 TWh	492 TWh	532 TWh
Anpassung an aktualisierte Bevölkerungsprognose	16 TWh	16 TWh	12 TWh
Export-Import-Saldo (Import positiv)	-36 TWh	0 TWh	63 TWh
Vorgegebene Stromnachfrage	570 TWh	508 TWh	481 TWh
Naturschutzszenario			
In den Klimaschutzszenarien ausgewiesene Stromnachfrage	486 TWh	451 TWh	659 TWh
Anpassung an aktualisierte Bevölkerungsprognose	14 TWh	14 TWh	14 TWh
Export-Import-Saldo (Import positiv)	0 TWh	22 TWh	9 TWh
Vorgegebene Stromnachfrage	501 TWh	443 TWh	664 TWh

Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung, basierend auf (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015 Tabelle 5-128 (S. 319) bzw. Tabelle 5-129 (S. 321))

2.5.2. Konventioneller Kraftwerkspark

Der konventionelle Kraftwerkspark basiert auf dem Szenariojahr 2020 im Klimaschutzszenario KS80. Die installierte Leistung des konventionellen Kraftwerksparks beläuft sich auf insgesamt 79 GW, davon:

- 8 GW Kernkraftwerke
- 16 GW Braunkohle
- 16 GW Steinkohle
- 24 GW Erdgas
- 6 GW Sonstige Brennstoffe
- 9 GW Pumpspeicherkraftwerke

Für das Szenariojahr 2020 wird dieser konventionelle Kraftwerkspark vorgegeben, in den Szenariojahren 2030 und 2050 wird darüber hinaus Ausstieg aus der Kernenergie berücksichtigt, so dass keine Kernkraftwerke mehr verfügbar sind. Ähnliche Vorgaben für den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe in der Stromerzeugung werden nicht gemacht. Die maximal genutzte Leistung von Kohle- und auch Erdgaskraftwerken ist somit ein Modellergebnis (vgl. Kapitel 4.3).

Für den Fall, dass in einzelnen Stunden ein Erzeugungsdefizit verbleibt, welches weder mit dem in Deutschland verfügbaren Kraftwerkspark noch durch Importe gedeckt wird, stehen emissionsfreie

und teure, d.h. am Ende der Merit Order stehende Backup Kraftwerke zur Verfügung. Diese virtuellen Kraftwerke gewährleisten einen vollständigen Modelldurchlauf und sind ein Indikator dafür, dass entweder weitere Kraftwerksleistungen oder zusätzliche Speicherkapazitäten installiert werden müssen.

2.5.3. Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

Das Angebot fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung setzt sich aus den Energieträgern Laufwasser, PV, Wind onshore und Wind offshore zusammen (Tabelle 2-6). Die tatsächliche Nutzung dieses EE-Angebots bzw. die ggf. im Rahmen der stündlichen Einsatzoptimierung auftretende EE-Abregelung ist ein Modellergebnis (vgl. Kapitel 4.4).

Die Stromerzeugung aus Biomasse wird ebenfalls modellendogen bestimmt. Im Maximum kann das komplette verfügbare Biomassepotenzial für die Stromerzeugung genutzt werden. Entgegen gesetzt dazu, kann im Minimum überhaupt keine Biomasse für die Stromerzeugung verwendet werden (vgl. Abschnitt 4.3).

Tabelle 2-6: Angebot fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung

Referenzszenario	2020	2030	2050
Laufwasser	22 TWh	23 TWh	25 TWh
PV	45 TWh	65 TWh	115 TWh
Wind onshore	100 TWh	140 TWh	221 TWh
Wind offshore	26 TWh	60 TWh	128 TWh
gesamt	193 TWh	288 TWh	489 TWh
Naturschutzszenario			
Laufwasser	22 TWh	23 TWh	25 TWh
PV	45 TWh	66 TWh	123 TWh
Wind onshore	100 TWh	155 TWh	390 TWh
Wind offshore	26 TWh	60 TWh	180 TWh
gesamt	193 TWh	304 TWh	718 TWh

Quelle: (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015 Tabelle 5-94 (S. 272) bzw. Tabelle 5-99 (S. 277))

2.6. Wärme- und Stromerzeugung aus Biomasse im Zeitraum 1990 bis 2016

Im Zeitraum zwischen 1990 und 2016 ist sowohl die Wärme- als auch die Stromerzeugung aus Biomasse kontinuierlich angestiegen. Im Jahr 2016 lag die Bruttowärmeerzeugung bei rund 125 TWh sowie die Bruttostromerzeugung bei rund 45 TWh (Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5).

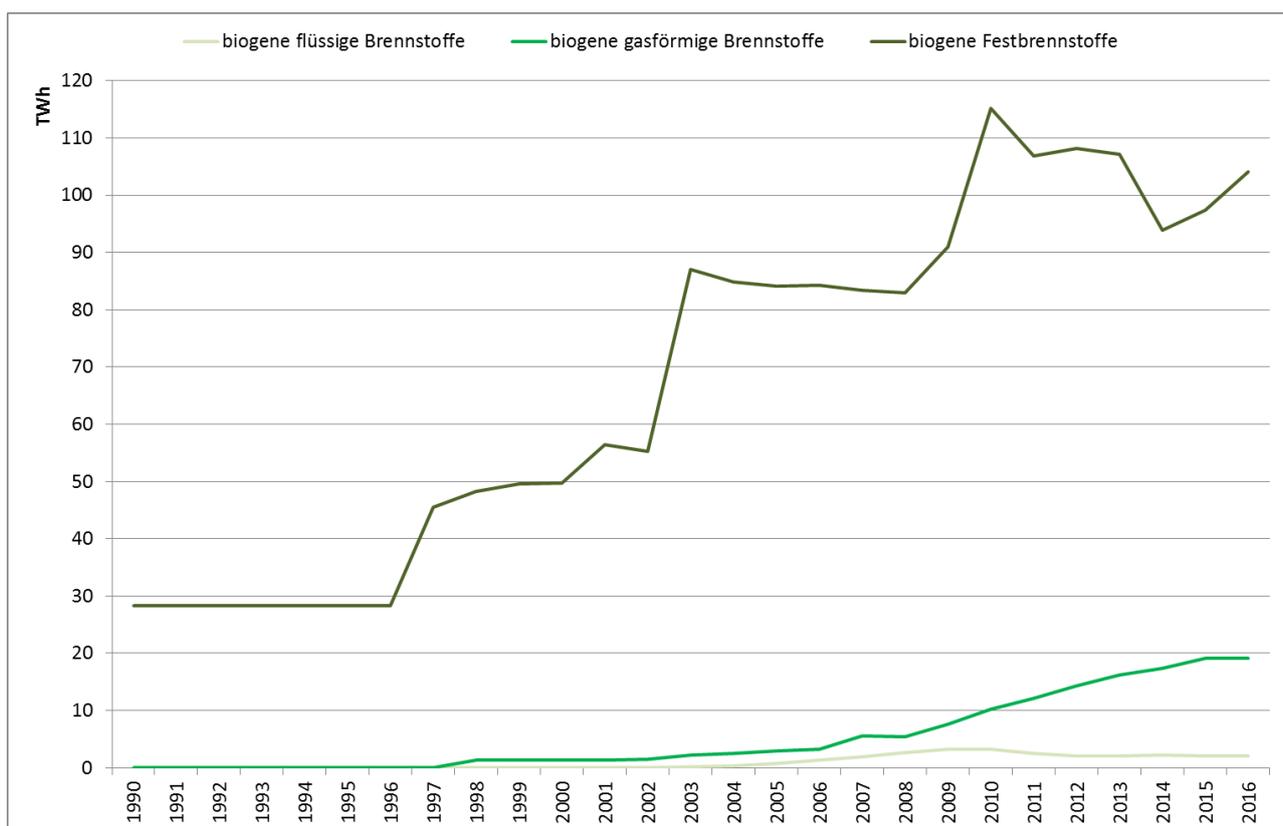
Während die Wärmeerzeugung aus Biomasse zum überwiegenden Teil auf dem Einsatz von fester Biomasse basiert (ca. 85 %), wird die Stromerzeugung aus Biomasse von Biogas dominiert (ca. 75 %). Haupttreiber für die Stromerzeugung aus Biomasse sind die Förderbedingungen des Er-

neuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) und teilweise auch des Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes (KWKG). So ist zum Beispiel nach dem Inkrafttreten des EEG im März 2000 die Stromerzeugung aus fester Biomasse insbesondere zwischen 2002 und 2006 deutlich angestiegen. Das EEG enthielt neben kostendeckender Vergütungssätze auch eine Anhebung der Leistungsgrenze für geförderte Anlagen von 5 MW auf 20 MW, so dass in diesem Zeitraum zahlreiche mit fester Biomasse (z.B. Holzhackschnitzel) betriebene Heizkraftwerke in dieser Größenkategorie entstanden sind. Die Stromerzeugung aus Heizkraftwerken mit fester Biomasse hat sich seitdem auf einem Niveau von rund 10 TWh eingependelt (Abbildung 2-5).

Nach der Novellierung des EEG im Juli 2004 setzte der Boom bei den Biogasanlagen ein und die Stromerzeugung aus Biogas verzehnfachte sich von rund 3,5 TWh in 2004 auf knapp 35 TWh in 2016. Die Stromerzeugung aus Pflanzenölen spielt nach einer kurzen Förderperiode zwischen 2006 und 2010 mittlerweile nur noch eine untergeordnete Rolle.

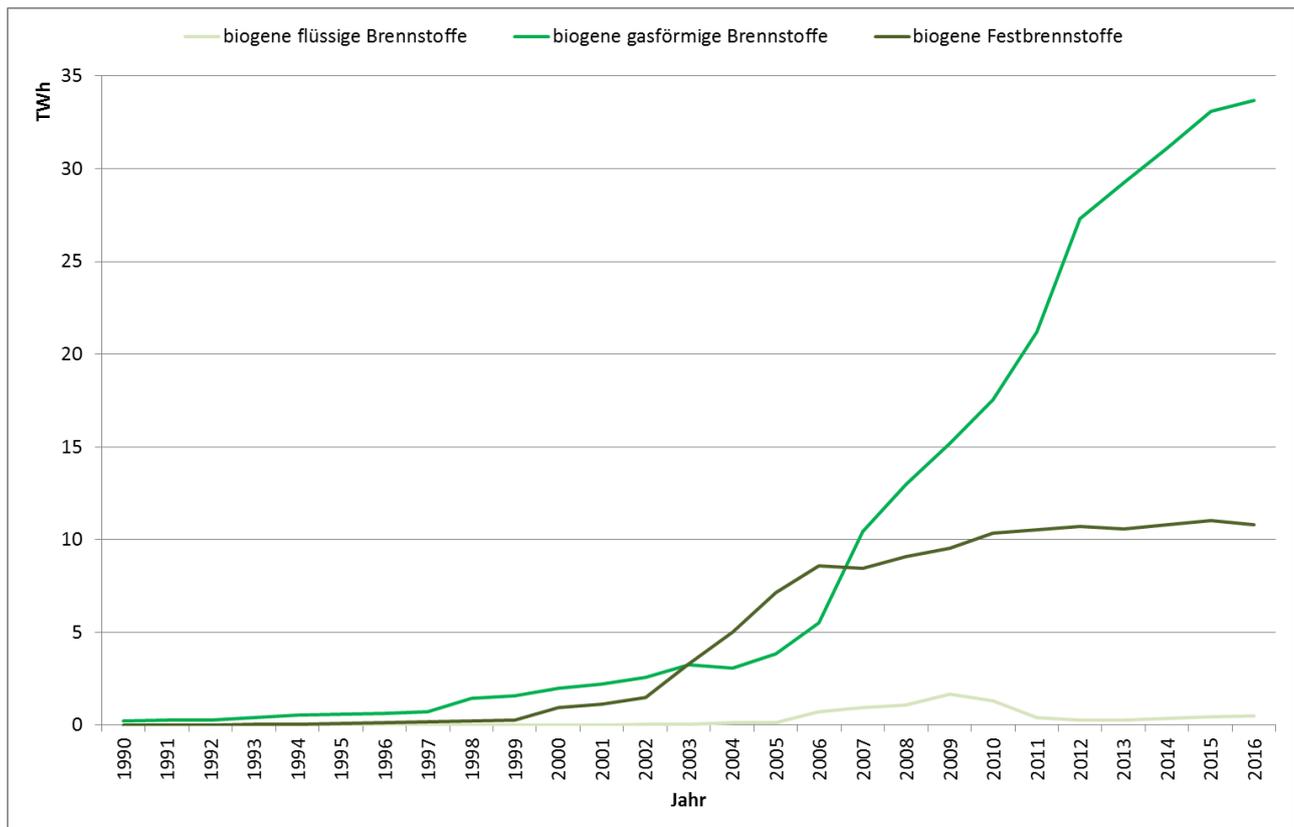
Für den Zeitraum ab 2017 gelten für die Stromerzeugung aus Biomasse im EEG zudem Flexibilitätsanforderungen in Kombination mit einer Beschränkung des Ausbaukorridors in Höhe von jährlich 150 MW (2017 – 2019) bzw. 200 MW (2020 – 2022) brutto. Für diesen Zeitraum ist deshalb mit einer stagnierenden, jedoch auch flexibleren Stromerzeugung aus Biomasse zu rechnen.

Abbildung 2-4: Wärmeezeugung aus Biomasse in Deutschland zwischen 1990 und 2016



Quelle: Öko-Institut e.V., Daten basierend auf (Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik 2018)

Abbildung 2-5: Stromerzeugung aus Biomasse in Deutschland zwischen 1990 und 2016



Quelle: Öko-Institut e.V., Daten basierend auf (Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik 2018)

2.7. Brennstoffkosten und techno-ökonomische Parametrierung der Technologien zur Biomasseumwandlung in Strom und Wärme

2.7.1. Brennstoffkosten für Biomasse und fossile Energieträger

Für die Ableitung der Brennstoffkosten für gasförmige und holzartige Biomasse wurde eine Literaturschau vorgenommen und mit dem DBFZ abgestimmt.

Für gasförmige Biomasse werden zwei Energieträger unterschieden: Biogas (Gemisch aus CH₄ und CO₂) als Energieträger zur Verstromung in einem BHKW sowie Biomethan (aufbereitetes Biogas nach CO₂-Abtrennung) als Energieträger zur dezentralen Wärmeerzeugung in einer Gasheizung.

Die durchschnittlichen Verkaufspreise für Biogas im Jahr 2013 beliefen sich auf 52 €/MWh für Anlagen auf Basis von Abfall- und Reststoffen, 68 €/MWh für Anlagen auf Basis von Gülle und Mist sowie 72 €/MWh für Anlagen auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen (Bolzau 2014, S. 7). Als Faustzahlen für die Herstellung von Biomethan nennt die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe 70 – 90 €/MWh für kleine Anlagen mit einer Leistung von 400 Nm³/h bzw. 60 – 80 €/MWh für größere Anlagen mit einer Leistung von 700 Nm³/h (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2017, S. 47). Basierend auf diesen beiden Literaturquellen werden für das

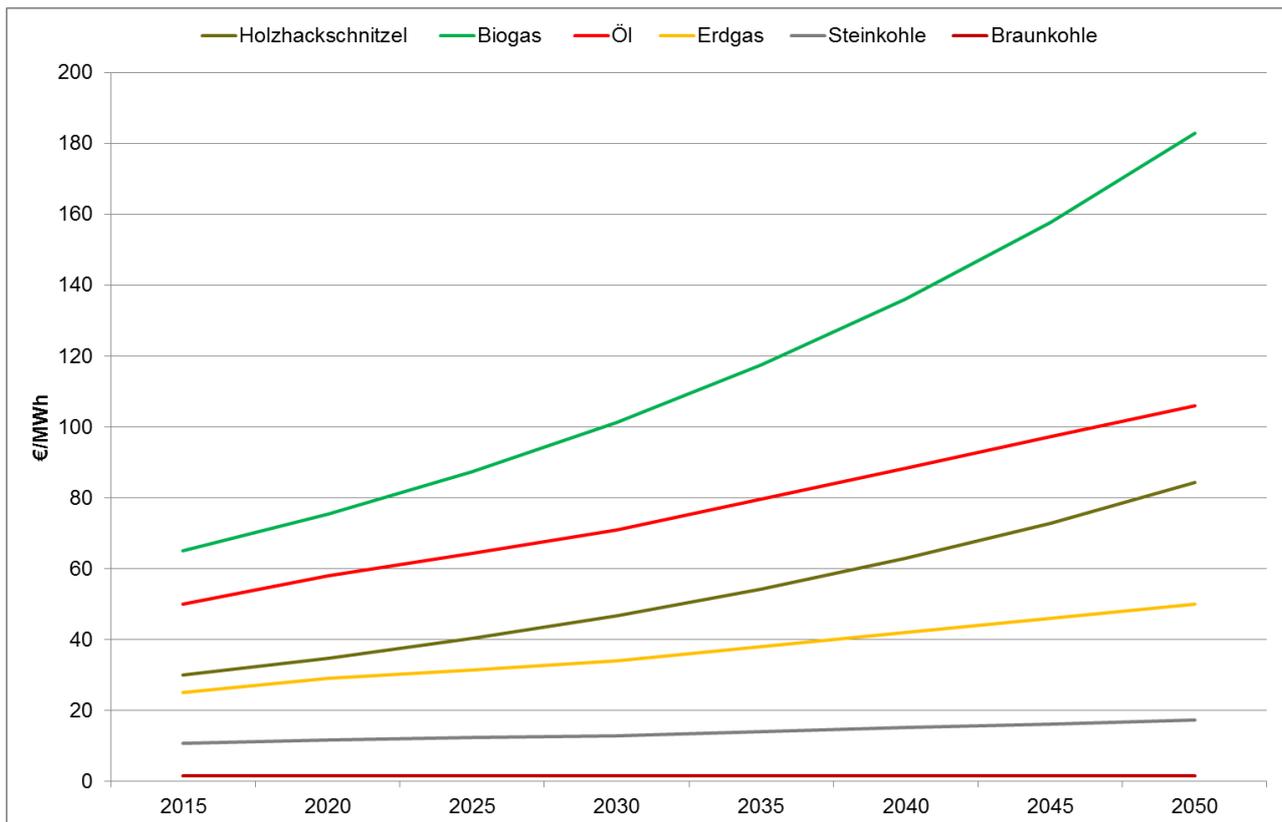
Jahr 2015 für Biogas Brennstoffkosten in Höhe von 65 €/MWh und für Biomethan in Höhe von 75 €/MWh unterstellt. Als Teuerungsrate für gasförmige Biomasse werden 3 %/a unterstellt.

Auch für holzartige Biomasse werden zwei Energieträger unterschieden: Holzhackschnitzel als Energieträger für die Strom- und Wärmeerzeugung in einem Heizkraftwerk sowie Holzpellets als Energieträger zur dezentralen Wärmeerzeugung in einer Pelletheizung.

Die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe weist in der Energiepreisentwicklung für das Jahr 2015 Brennstoffkosten für Holzpellets in Höhe von 243 €/t und für Hackschnitzel in Höhe von 93 €/t aus (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2017, S. 16). Für die Umrechnung von €/t in €/MWh wird für Holzpellets ein Wassergehalt von 10 % und für Hackschnitzel von 35 % unterstellt. Dies entspricht einem Energiegehalt von 4,5 MWh/t für Holzpellets bzw. 3,0 MWh/t für Hackschnitzel (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2017, S. 19). Entsprechend ergeben sich für das Jahr 2015 Brennstoffkosten für Holzpellets in Höhe von 50 €/MWh und für Hackschnitzel in Höhe von 30 €/MWh. Als Teuerungsrate für holzartige Biomasse werden 3%/a unterstellt, so dass sich im Jahr 2050 Brennstoffkosten für Holzpellets in Höhe von 141 €/MWh und für Hackschnitzel in Höhe von 84 €/MWh ergeben.

In Abbildung 2-6 ist die für die Szenarienanalyse unterstellte Entwicklung der Brennstoffkosten für Energieträger zur Stromerzeugung sowohl für Holzhackschnitzel und Biogas als auch im Vergleich zu den fossilen Energieträgern Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Öl dargestellt. Die Brennstoffkosten für fossile Energieträger frei Kraftwerk wurden in Anlehnung an die Preisprojektionen frei Grenze in den Klimaschutzenszenarien getroffen. Es fällt auf, dass die Brennstoffkosten für Biogas um den Faktor 2,6 bis 3,7 über jenen für Erdgas liegen, während der Preis-Spread zwischen Holzhackschnitzeln und Erdgas nur zwischen 1,2 und 1,7 liegt. Zudem fällt die unterstellte Teuerungsrate für fossile Energieträger etwas geringer aus als für Biomasse.

Abbildung 2-6: Brennstoffkosten für Energieträger zur Stromerzeugung frei Kraftwerk

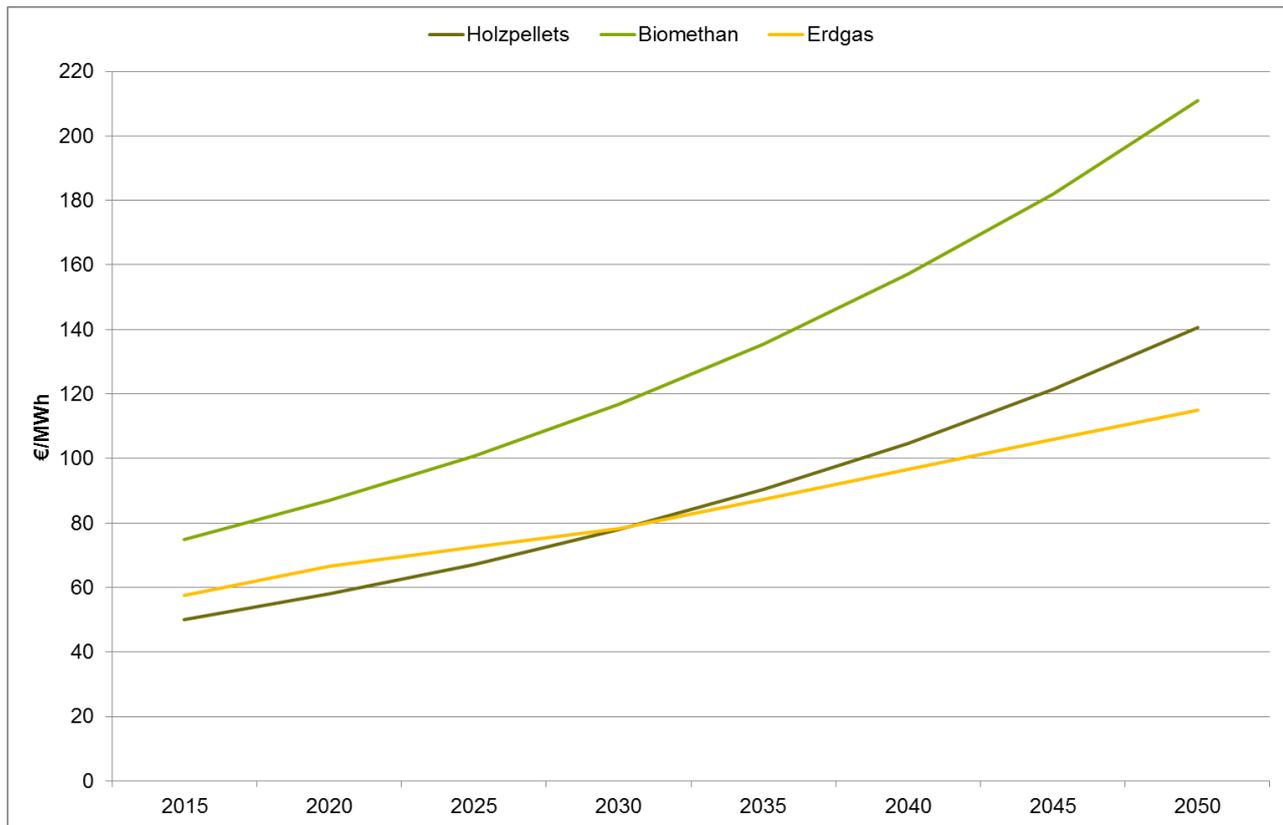


Quelle: Öko-Institut e.V.

Für die dezentrale Wärmeerzeugung wurde zudem in Anlehnung an die Daten zur Energiepreisentwicklung des Statistischen Bundesamtes für Erdgas ein Endkundenpreis unterstellt, der um den Faktor 2,3 über dem Erdgaspreis frei Kraftwerk liegt (Statistische Bundesamt (Destatis) 2018). Mit diesem Endkundenpreisniveau sind Holzpellets dann konkurrenzfähig zu Erdgas, während die Brennstoffkosten für Biomethan um den Faktor 1,3 bis 1,8 über den Brennstoffkosten für Erdgas liegen (Abbildung 2-7).

Welche Grenzkosten sich in der Modellierung für die Erzeugung von Strom und Wärme ergeben, hängt neben den vorgegebenen Parametern Brennstoffkosten, elektrischer und thermischer Wirkungsgrad sowie dem Emissionsfaktor für CO₂ insbesondere auch von dem sich modellendogen ergebenden CO₂-Preis ab (vgl. Abschnitt 4.1.2 sowie Abbildung 4-5).

Abbildung 2-7: Brennstoffkosten für Energieträger zur dezentralen Wärmeerzeugung für private Endkunden



Quelle: Öko-Institut e.V.

2.7.2. Techno-ökonomische Parametrierung der Technologien zur Umwandlung von Biomasse in Strom und Wärme

Als Technologien für die Umwandlung von Biomasse in Strom und Wärme werden für den Energieträger „Biogas“ in den Jahren 2020 und 2030 Blockheizkraftwerke (BHKW) berücksichtigt und im Jahr 2050 ist ein Technologiesprung hin zur Brennstoffzelle erfolgt. Für den Energieträger „Holz“ werden in den Jahren 2020 und 2030 konventionelle Holzheizkraftwerke (HKW) unterstellt, während für das Jahr 2050 eine Kombination aus Holzvergasung und Brennstoffzelle angenommen wird.

Durch den Technologiewechsel im Jahr 2050 nimmt der elektrische Wirkungsgrad der Anlagen deutlich zu, der thermische Wirkungsgrad hingegen ab. Der Gesamtwirkungsgrad von BHKW und BZ liegt im Bereich zwischen 80 % und 84 %, bei HKW und Holzvergasung / Brennstoffzelle ist es mit 67 % bis 77 % etwas weniger. Die variablen Kosten beinhalten in erster Linie erzeugungsabhängige Kosten für die Abgasnachbehandlung, wie z.B. den Katalysator oder die Filteranlage. Die in Abstimmung mit dem DBFZ festgelegten techno-ökonomischen Parameter zeigt Tabelle 2-7.

Tabelle 2-7: Techno-ökonomische Parameter für Umwandlungstechnologien von Biomasse in Strom und Wärme

Biogas	2020	2030	2050
Technologie	BHKW	BHKW	Brennstoffzelle
Elektrischer Wirkungsgrad	38 %	38 %	57 %
Thermischer Wirkungsgrad	46 %	42 %	23 %
Variable Kosten	11,4 €/MWh _{el}	13,2 €/MWh _{el}	5,9 €/MWh _{el}
<hr/>			
Holz	2020	2030	2050
Technologie	Heizkraftwerk	Heizkraftwerk	Holzvergasung und Brennstoffzelle
Elektrischer Wirkungsgrad	27 %	28 %	40 %
Thermischer Wirkungsgrad	50 %	45 %	27 %
Variable Kosten	4,4 €/MWh _{el}	6,4 €/MWh _{el}	1,9 €/MWh _{el}

Quelle: Absprache Öko-Institut e.V. und DBFZ

3. Methodik

3.1. Strommarktmodellierung PowerFlex

3.1.1. Modellbeschreibung

Das Strommarktmodell PowerFlex-Grid-EU ist ein Fundamentalmodell für den europäischen Strommarkt, welches Kraftwerke, Speicher und Flexibilitätsoptionen kostenminimal einsetzt, um die Stromnachfrage und den Bedarf an Regelleistung zu decken.

Das Einsatzmodell ist als lineares Optimierungsproblem formuliert und in der Software GAMS implementiert. Es wird mit Hilfe des CPLEX Algorithmus (Simplex Algorithmus) gelöst. Die Minimierung der Summe aller variablen Kosten stellt die Zielfunktion des Optimierungsproblems dar. Der zulässige Betrieb von Kraftwerken, Speichern und Flexibilitätsoptionen wird über Nebenbedingungen definiert.

Die zeitliche Auflösung des Optimierungsproblems beträgt eine Stunde. Der Betrachtungszeitraum liegt bei einem Kalenderjahr (d. h. 8.760 Zeitschritte). Innerhalb dieses Betrachtungszeitraums werden sequenziell Lösungen für jeweils einen Optimierungszeitraum berechnet. Dieser Optimierungszeitraum rolliert mit einer entsprechenden Schrittweite durch das Kalenderjahr. Die Länge eines Optimierungszeitraums ist frei einstellbar und reicht von 24 h bis 8.760 h. Im Wesentlichen hängt die eingestellte Länge eines Optimierungszeitraums von der Problemkomplexität sowie der gewünschten zeitlichen Vorausschau ab.

Die einzelnen Kraftwerke in Deutschland werden im Modell detailliert mit Hilfe technischer und ökonomischer Parameter abgebildet. Thermische Kraftwerke werden nach Möglichkeit blockscharf erfasst und sowohl punktscharf einem Umspannwerk als auch regional einem Bundesland zugeordnet. Kleinere thermische Stromerzeugungsanlagen, wie z.B. Blockheizkraftwerke, werden in technologie- und bundeslandscharfe Gruppen zusammengefasst und mit Hilfe von typspezifischen Parametern charakterisiert. Biomassekraftwerke, die Biogas, Holz oder Pflanzenöl einsetzen, sind Teil des thermischen Kraftwerksparks. Ihr Einsatz ist unter Berücksichtigung von technologiespezifischen Restriktionen ebenfalls flexibel und Teil der Optimierung. KWK-Kraftwerke müssen zudem die Nachfrage nach Fernwärme decken.

Für die dargebotsabhängigen erneuerbaren Energien Laufwasser, Offshore Wind, Onshore Wind und Photovoltaik wird das maximal zur Verfügung stehende Stromangebot aus skalierten generischen oder historischen stündlich aufgelösten Einspeiseprofilen vorgegeben. Die tatsächlich eingespeiste Menge an Wasser-, Wind- und Photovoltaikstrom wird modellendogen bestimmt und Teil der Lösung. Dargebotsabhängiger erneuerbarer Strom kann somit auch abgeregelt werden, z. B. bei negativer Residuallast und unzureichender Speicherkapazität.

Für must-run-Kraftwerke, wie z. B. Gichtgas- oder Müllverbrennungsanlagen, wird eine ganzjährig gleichverteilte Stromeinspeisung unterstellt, die im Gegensatz zu EE-Anlagen nicht abgeregelt werden kann (Koch et al. 2015).

Folgende Flexibilitätsoptionen stehen im PowerFlex-Modell als auswählbare Module zur Verfügung:

- Flexibilisierung von Biogas- und Klärgasanlagen mit Hilfe eines Gasspeichers und einer erhöhten BHKW-Leistung

- Flexibilisierung von KWK-Kraftwerken mit Hilfe eines Wärmespeichers sowie zusätzlichen Wärmequellen (erdgasbetriebener Heizkessel, elektrischer Heizstab, Solarthermie)
- Pumpspeicherkraftwerke
- Lastmanagement in den Sektoren Haushalte (aggregiert über verschiedene Gerätetypen), Gewerbe, Handel und Dienstleistung (aggregiert über Untersektoren), Industrie (Papier-, Zement- und Chlorindustrie), Wärmepumpe und Elektromobilität (smart charging)
- PV-Batteriespeicher zur Eigenverbrauchsoptimierung
- Power-to-Gas
- Power-to-Heat

Wirkungszusammenhänge zwischen fluktuierenden erneuerbaren Energien und Flexibilitätsoptionen wurden im Rahmen eines Modell- und Methodenvergleichs für verschiedene Strommarktmodelle untersucht und die Modellergebnisse validiert (Lechtenböhrer et al. 2018).

Das Übertragungsnetz kann für Deutschland entweder mithilfe des DC-Ansatzes für rund 500 Netzknoten oder mithilfe des Transportmodell-Ansatzes für verschiedene Zonen abgebildet werden (Koch et al. 2017a). Der Stromaustausch zwischen Deutschland und seinen Nachbarländern wird in PowerFlex durch die Abbildung aller ENTSO-E Länder modelliert. Jedes Land wird als ein Netzknoten repräsentiert, welche über Kuppelstellen miteinander verbunden sind.

3.1.2. Erweiterung

In dem Projekt „Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration“ wurde bereits der Wärmesektor in das Strommarktmodell PowerFlex integriert (Koch et al. 2017b). Neben der Erzeugung von Fernwärme in KWK-Kraftwerken sowie der elektrischen Wärmeherzeugung sind auch Wärmeherzeugungsanlagen Teil der Einsatzoptimierung, die nicht mit dem Stromsektor interagieren.

Auf diesen Vorarbeiten baut die Modellerweiterung in diesem Projekt auf, welche sich aus den folgenden drei Kernkomponenten zusammensetzt:

- **Berechnung der optimalen Biomasseallokation:** Hierzu werden zusätzliche Nebenbedingungen implementiert, so dass ein gemeinsames brennstoffseitiges Angebot an Biomasse zur energetischen Nutzung im Strom- und Wärmesektor eingehalten werden muss. Die Biomasseallokation ist dadurch Teil der optimalen Lösung.
- **Sektorübergreifendes CO₂-Budget:** Dem Strom- und Wärmesektor wird über zusätzliche Nebenbedingungen ein sektorübergreifendes CO₂-Budget zugewiesen, welches den Einsatz von fossil betriebenen Kraftwerken und Heizungssystemen in der Jahressumme einschränkt. Daraus ergibt sich modellendogen ein CO₂-Preis, der die Einsatzreihenfolge (Merit Order) der Kraftwerke und Wärmeherzeugungstechnologien beeinflusst.
- **Schnittstelle zum Gebäudemodell Building STar** zur Übergabe von Inputparametern und Modellergebnissen sowie Schaffung einer Modellumgebung für einen automatisierten gekoppelten Modelldurchlauf

3.1.3. Modellspezifische Szenarienausgestaltung

Als Umwandlungstechnologien für feste Biomasse stehen einerseits Holzheizkraftwerke für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme aus Holzhackschnitzeln sowie andererseits Holzpellettheizungen zur reinen Wärmeerzeugung in Gebäuden zur Verfügung. Gasförmige Biomasse kann zum einen als Biogas in BHKW für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme verwendet werden und zum anderen weiter zu Biomethan aufbereitet und dann in Gasheizungen zur dezentralen Wärmeerzeugung in Gebäuden eingesetzt werden. Die Nutzung von Holzhackschnitzeln und Holzpellets werden durch ein gemeinsam verfügbares Potenzial an fester Biomasse begrenzt, gleiches gilt für Biogas und Biomethan und das gemeinsam verfügbare Potenzial an gasförmiger Biomasse (vgl. Kapitel 2.3).

Die in den Holzheizkraftwerken erzeugte Wärme kann in Nah- oder Fernwärmenetze eingespeist werden und konkurriert dort mit der Wärmeerzeugung aus einem Erdgaskessel oder einem Elektrokessel sowie anderen KWK-Kraftwerken. Die in Biogas BHKW erzeugte Wärme kann hingegen nur in Nahwärmenetze eingespeist werden (Tabelle 3-1). Für einen stromgeführten Betrieb der Holzheizkraftwerke und Biogas BHKW stehen darüber hinaus Wärmespeicher zur Verfügung, die die KWK-Anlagen flexibilisieren. Überschüssige Wärme kann zudem vollständig an die Umgebung abgeführt werden, so dass die KWK-Kraftwerke auch nur Strom erzeugen können.

Tabelle 3-1: Anlagen- und Technologiepool für die Erzeugung von Nah- und Fernwärme

Einzelanlagen und Technologieaggregate	Nahwärme	Fernwärme
Erdgaskessel	X	X
Elektrokessel	X	X
Holzheizkraftwerke	X	X
Biogas-BHKW	X	-
Erdgas-BHKW	X	-
Erdgas-, Steinkohle- und Braunkohle Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung	-	X

Quelle: Öko-Institut e.V.

Die in den Pellettheizungen erzeugte Wärme konkurriert mit der Wärmeerzeugung aus anderen Heizungstechnologien, wie insbesondere Wärmepumpen, Solarthermie oder klassischen Erdgas- und Ölheizungen. Als CO₂-freien, aber deutlich teureren Brennstoff können Gasheizungen auch aufbereitetes Biomethan verwenden (Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2: Anlagen- und Technologiepool für die Erzeugung von dezentraler Wärme

Einzelanlagen und Technologieaggregate	Dezentrale Wärme
Ölheizung	X
Gasheizung mit Erdgas	X
Gasheizung mit Biomethan	X
Pelletheizung	X
Solarthermie	X
Wärmepumpe	X
Heizstab	X

Quelle: Öko-Institut e.V.

Die verschiedenen Umwandlungstechnologien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer spezifischen Grenzkosten, die von den Brennstoffkosten, Wirkungsgraden und dem modellendogen resultierenden CO₂-Preis bestimmt werden. Förderregime, wie zum Beispiel das EEG, werden in der Modellierung nicht berücksichtigt.

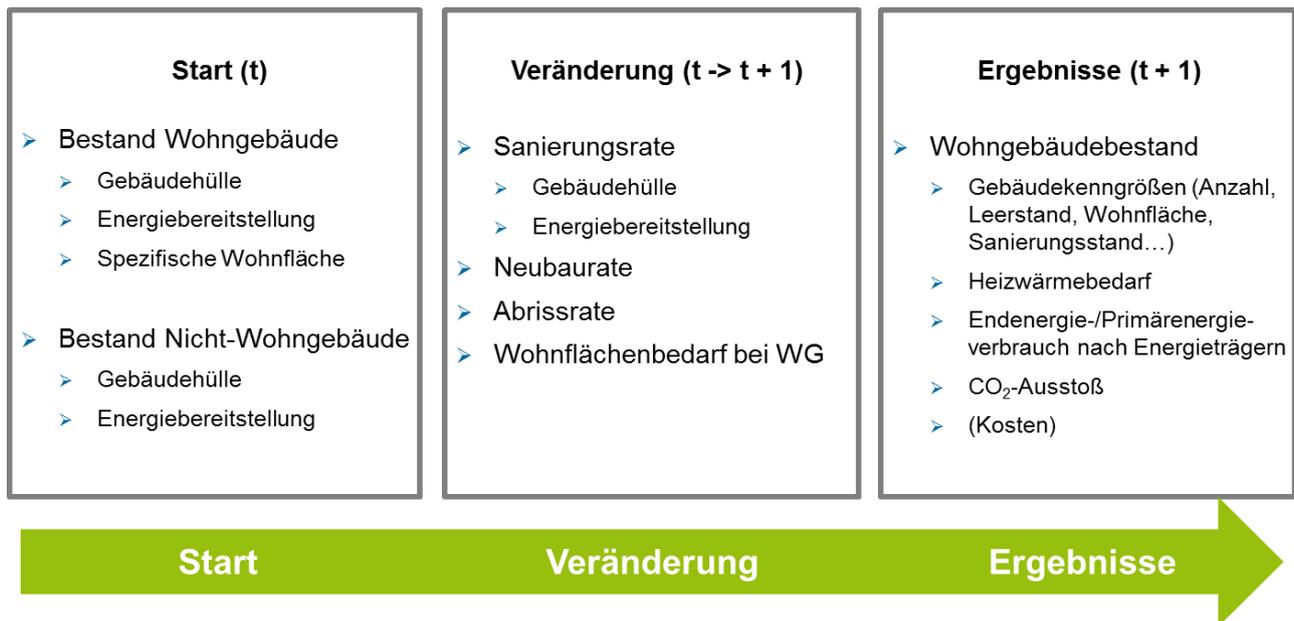
Die verfügbare Leistung der verschiedenen Umwandlungstechnologien für feste und gasförmige Biomasse ist zudem nicht beschränkt, so dass sich das vorhandene Biomassepotenzial in allen Kombinationsmöglichkeiten aufteilen kann. Investitionsabhängige Kosten werden in der Modellierung nicht berücksichtigt.

3.2. Gebäudemodellierung Building-STAR

3.2.1. Modellbeschreibung

Das Gebäudemodell „Building Stock Transformation Model“ (Building-STAR, B-STAR) bildet den Gebäudebestand in Deutschland hochaufgelöst in Kohorten von 50 Häusern ab. Dabei wird der Gebäudebestand für Wohn- und Nicht-Wohngebäuden in zwei Sub-Modellen berechnet, um Spezifika besser abbilden zu können. Im Grundzug basiert Building-STAR auf drei Schritten (vgl. Abbildung 3-1):

1. Generieren des Gebäudebestands im Jahr 2009 (Gebäudehülle und Heizanlagen)
2. Fortschreiben des Gebäudebestands bis ins Jahr 2050 (Sanierung von Gebäudehülle und Heizanlagen, Neubau, Abriss)
3. Berechnen von Kenngrößen (Heizwärmebedarf, THG-Emissionen, Primär- und Endenergieverbrauch, etc.)

Abbildung 3-1: Modellstruktur Building-STar


Quelle: Öko-Institut e.V.

3.2.1.1. Übergreifende Modellstruktur

Für Wohngebäude (WG) werden in Building-STar in Anlehnung an die „Deutsche Gebäudetypologie“ (TABULA, IWU (2011)) und Mikrozensus-Erhebung (Statistisches Bundesamt (DESTATIS) 2012) sechs Gebäudetypen verwendet: Einfamilienhäuser, Zweifamilienhäuser, Reihenhäuser mit einer Wohnung, Reihenhäuser mit zwei Wohnungen, Mehrfamilienhäuser und große Mehrfamilienhäuser. Die Baualtersklassen entsprechen bis zum Jahr 2009 denen aus TABULA und sie werden von 2010 bis 2050 um weitere sechs Baualtersklassen ergänzt (2010-2012, 2013-2016, 2017-2020, 2021-2030, 2031-2040, 2041-2050).

Für Nicht-Wohngebäude (NWG) wird die Typologie aus dem Projekt KliNeG (Klimaneutraler Gebäudebestand 2050, Bürger et al. (2017)) verwendet, die nach den folgenden sechs Gebäudetypen unterscheidet: Wohngebäude mit Mischnutzung (WM), Bildung, Büro und Verwaltung (BBV), Gewerbe und Industrie (GI), Handel, Dienstleistung und Praxisgebäude (HDP), Beherbergung, Gastronomie und Kliniken (BGK) und Sonstige (Sport, Kultur; SK). Für NWG werden die gleichen Baualtersklassen wie für WG verwendet. Wohngebäude mit Mischnutzung (WM) sind in TABULA nicht abgebildet. In Building-STar werden anteilig zu der Wohnfläche ganze Gebäude mit Wohnungen belegt und in das Sub-Modell für Wohngebäude überführt. Die übrigen WM-Gebäude mit einer gewerblichen Nutzung verbleiben im Sub-Modell für Nicht-Wohngebäude. Diese Trennung war nötig, um alle Wohnungen zur Berechnung der Belegung der Wohnungen in Abhängigkeit der Bevölkerung zu modellieren.

Die Dämmintensität der Gebäude (WG und NWG) bei Neubau und Sanierung kann fünf unterschiedliche Zustände annehmen. Ab dem Jahr 2010 lehnen sie sich an die EnEV 2009 an: (1) Mindeststandard, (2) E70 (gesetzlicher Neubaustandard ab 2016), (3) E55, (4) E40 (Passiv-Haus), (5) zukünftiger, noch ambitionierterer Standard (noch nicht auf dem Markt). Für den historischen Gebäudebestand wird über übliche U-Werte in jeder Baualtersklasse der Mindeststandard gesetzt. Ab 1984 werden für die Baualtersklassen in Anlehnung an die jeweils gelten Wärmeschutzverord-

nungen in bis zu drei Dämmintensitäten unterschieden. Für NWG fließen auch Werte aus dem Projekt KliNeG (Bürger et al. 2017) ein.

Building-STar wurde in Excel implementiert. Die Dateneingabe und -ausgabe erfolgt über Excel-Tabellen (z.B. Parameter für das Jahr 2009, Parameter für die Fortschreibung, Steuerungsgrößen für die Fortschreibung, zusammenfassende Ergebnisse zu Gebäudeparametern) und in Form von Excel-Grafiken. Die Modellberechnung findet in VBA statt. Im Grundzug stellt jede Kohorte einen „Agenten“ dar, der sich in Abhängigkeit der Gebäudeeigenschaften und den Einstellungen der Steuerungsgrößen (siehe „Steuerungsmodul“) über die Zeit weiterentwickelt.

Die Berechnung von Szenarien wird über ein „Steuerungsmodul“ ermöglicht, in dem Parameter, die den Zustand des Gebäudebestands bei der Fortschreibung beeinflussen, angesteuert werden können (z.B. Neubaurate, Abrissrate, spezifischer Wohnflächenbedarf, Sanierungsrate, Sanierungstiefe, Austauschrate von Heizanlagen, etc.). Zudem können Hintergrundszenerien zur Bevölkerungsentwicklung, zu Emissionsfaktoren, Primärenergiefaktoren und Klimaentwicklungen ausgewählt werden.

3.2.1.2. Generieren des Gebäudebestands im Jahr 2009

Für jeden Gebäudetyp in jeder Baualtersklasse wird die entsprechende Anzahl an Kohorten angelegt. Im nächsten Schritt werden die Parameter zur Spezifizierung des Gebäudes zugewiesen. Dabei sind beispielhaft folgende Parameter-Gruppen zu nennen (wenn nicht angezeigt für WG und NWG identisch):

- Globale Parameter (z.B. Gebäudetyp, Baujahr, Abrissjahr, Abrissverbot, Wohnungen je Haus (bei NWG = 1), Anteil leerstehender Wohnungen (nur WG), Gebäudehüllfläche nach Bauteil, Raumhöhe, Gebäudenutzfläche, Personen je Haus (nur WG)). Für WG wird die Gebäudehüllfläche nach Bauteilen in einem Geometrie-Modul für jeden Gebäudetyp in Abhängigkeit von der Wohnfläche ermittelt. Bei NWG werden diese Angaben aus dem Projekt KliNeG (Bürger et al. 2017) übernommen.
- Parameter zur Gebäudehülle werden nach den Hüllflächentypen Dach (steil, flach, unbeheizt), Außenwand (gegen Luft, Erde oder Keller), Fenster (Ausrichtung nach Nord, West, Süd oder Ost), Fußboden (gegen Keller oder Erde) und Haustür differenziert. Zu den Hüllflächen werden Parameter zum Baujahr, zum Jahr der letzten Renovierung, zum Jahr der letzten energetischen Sanierung, zum U-Wert (differenziert nach Sanierungsstand), zu Dämmrestriktionen (Denkmalschutz, Ästhetik, Überdämmung, Bauphysik), zur Innen- oder Außendämmung bzw. reduzierten Dämmung und zur Dämmintensität festgehalten.
- Parameter zur Heizanlage: Folgende Energieträger, Heizanlagen und Technologien werden in Building-STar berücksichtigt. Für alle Technologien sind je Baualtersklasse Nutzungsgrade und Arbeitszahlen (Wärmepumpen) hinterlegt.
 - Fernwärme,
 - Gas (*zentrale Heizanlage*: Gaskessel alt, Gaskessel NT, Gaskessel BW, BHKW Gebäude; *dezentrale Heizanlage*: Gastherme Etage alt, Gas-Kombitherme Etage alt, Gastherme Etage NT, Gas-Kombitherme Etage NT, Gastherme Etage BW, Gas-Kombitherme Etage BW),
 - Öl (*zentrale Heizanlage*: Heizölkessel alt, Heizölkessel NT und Heizölkessel BW; *dezentrale Heizanlage*: Öl-Ofen),
 - Holz (*zentrale Heizanlage*: Pelletkessel, Scheitholzessel, Hackschnitzelkessel und Holzvergaser; *dezentrale Heizanlage*: Pelletofen, Scheitholzofen),

- Strom (*zentrale Heizanlage*: Elektr. Zentralheizung, Tauchsieder (zentral), elektr. Heizregister (Lüftung)); *dezentrale Heizanlage*: (a) Raumwärme (Nachtspeicherofen, elektr. Fußbodenheizung) und (b) Warmwasser (Elektroboiler und Elektr. Durchlauferhitzer)),
- Stein-/Braunkohle (*zentrale Heizanlage*: Kohlekessel alt; *dezentrale Heizanlage*: Kohleofen)
- Solar (*zentrale Heizanlage*: Solarthermie)
- Umweltwärme (*zentrale Heizanlage*: Elektro-WP Luft, Elektro-WP Sole, Elektro-WP Wasser, Gas-WP Luft, Gas-WP Sole und Gas-WP Wasser)
- Nahwärme (*zentrale Heizanlage*, mögliche Energieträger sind Gas, Öl, Holz, Biogas, Solar, Umweltwärme (Strom, Gas oder Geothermie), PowerToGas oder HydrogenToGas).

Diese Heizanlagen können den Gebäuden in Form von 85 Heizanlagen-Kombinationen (z.B. Gas (zentral) + Holz (dezentral) + Solar (Warmwasser)) zugewiesen werden. In der Berechnung im Modell wird dabei zwischen Raumwärme (WG und NWG) und Warmwasser (WG) bzw. Trinkwarmwasser (NWG) unterschieden. Im Fall einer Wasser-basierten Zentralheizung kann zudem ein Stromaggregat („Tauchsieder“) zugeschaltet werden. Je nach Baualter wird eine der oben angeführten Technologien anhand gewichteter Wahrscheinlichkeiten als Heizanlage ausgewählt (z.B. bei einer zentralen Heizanlage: Pelletkessel, Scheitholzkessel, Hackschnitzelkessel oder Holzvergaser). Die Modellstruktur ist flexibel und es können bei Bedarf weitere Heiztechnologien aufgenommen werden. Entsprechend der Heizanlagenkombination können einem Gebäude bis zu vier Energieträger zugewiesen werden. Dabei wird angenommen, dass bei Raumwärme und Warmwasser ein weiterer Energieträger 20 % des Verbrauchs abdeckt (Ausnahme: 10 % Solar bzw. Heizstab). Dies bedeutet z.B. bei der Raumwärme 70 % Gas, 20 % Holz und 10 % Solar und bei Warmwasser 80 % Solar und 20 % Gas.

- Die Berechnung des Heizwärmebedarfs für WG und NWG erfolgt auf Basis der Gebäudeeigenschaften nach der Methodik in DIN 4108 und DIN 4701. Bei Leerstand wird ein stark reduzierter Heizwärmebedarf von 10 % (Frostschutz) und kein Warmwasserverbrauch angenommen. Der Heizwärmeverbrauch wird aus dem Heizwärmebedarf nach einem empirisch ermittelten Zusammenhang berechnet (IWU 2015) und anteilig auf die eingesetzten Energieträger aufgeteilt. Anhand der Nutzungsgrade der eingebauten Technologien wird der Endenergieverbrauch je Energieträger, sowie der Primärenergieverbrauch (mittels Primärenergiefaktoren³) und die direkten Treibhausgasemissionen (mittels Emissionsfaktoren) berechnet (Jührich 2016, Strom und Fernwärme berechnet in PowerFlex).
- Kosten: Jedem Bauteil und jeder Heizanlagenkombination werden zum Zeitpunkt des Baus bzw. der Sanierung Kosten zugewiesen sowie Kosten pro Jahr inklusive Zinsen innerhalb des Bauteilspezifischen Reinvestitionszyklus berechnet. Das Basisjahr ist 2015. Kosten in anderen Jahren werden über den Baukostenindex (historisch) bzw. Annahmen zu Kostensteigerungen (Zukunft) auf das Basisjahr bezogen. Die Kosten basieren auf Hinz (2015) und eigenen Recherchen. Im Rahmen des vorliegenden Projekts finden die Kosten-Module in Building-STAR keine Anwendung, da die Kostenbetrachtungen in PowerFlex verfolgen.

Die Eingangsdaten zu den Wohngebäuden zum Gebäudebestand basieren vor allem auf Informationen aus TABULA (IWU 2011), der „Datenbasis Gebäudebestand“ (IWU et al. 2010), Mikrozensus-Erhebung (Statistisches Bundesamt (DESTATIS) 2012) sowie eigenen Berechnungen.

Die Datenlage für Nicht-Wohngebäude stellt sich deutlich schlechter dar als die für Wohngebäude. Die genutzten Eingangsdaten stammen zu einem Großteil aus dem Projekt Klimaneutraler Gebäu-

³ DIN 18559

debestand 2050 (Bürger et al. 2017) sowie BMWI (2018). Fehlende Daten wurden – wenn inhaltlich begründbar – anhand von Informationen zu Wohngebäuden oder als Expertenschätzung ergänzt.

3.2.1.3. Fortschreiben des Gebäudebestands bis ins Jahr 2050

Die Fortschreibung des Gebäudebestands erfolgt in Jahresschritten. Es werden folgende Schritte für jede Gebäude-Kohorte durchgeführt:

- Sanierung und/oder Renovierung der Gebäudehülle (vollständig oder einzelne Bauteile) in Abhängigkeit vom Sanierungszustand, der Dämmrestriktionen und des Reinvestitionszyklus (z.B. Standard-Sanierung eines Neubau-Daches frühestens nach 40 Jahren). Die Reinvestitionszyklen der Bauteile unterscheiden sich für energetisch sanierte bzw. nur renovierte Bauteile und sie können im Zeitverlauf der Szenarien verändert werden. Es wird eine Entscheidungswahrscheinlichkeit im Zeitverlauf eingestellt, nach der ein Hausbesitzer die Gebäudehülle saniert, wenn das Ende des Reinvestitionszyklus erreicht ist. Sobald das Ende des Reinvestitionszyklus für die Renovierung erreicht ist, aber keine Sanierung stattfand, wird die Gebäudehülle nur renoviert. Bei Dämmrestriktionen (Denkmalschutz, Ästhetik, etc.) ist nur eine Innendämmung erlaubt. Diese Regel kann bei Bedarf abgeschaltet werden.
- Heizanlagen können in Abhängigkeit vom Reinvestitionszyklus und des Heizwärmebedarfs bzw. Sanierungszustands erneuert oder ausgetauscht werden. In Szenarien kann die Wahrscheinlichkeit, ob nach Ende des Reinvestitionszyklus eine Erneuerung oder ein Austausch der Heizanlage erfolgt, differenziert nach Energieträgern angesteuert werden. Eine „Erneuerung der Heizanlage“ bedeutet, dass die gleiche Heizanlagenkombination, aber mit am Stand der Technik des Baujahrs, Gebäuden zugewiesen wird. Bei einem „Austausch der Heizanlage“ wird eine „zukunftsweisendere“ Heizanlagenkombination anstelle der alten eingebaut (z.B. kann nach dem Austausch einer Gas basierten Heizanlage keine Gas, Heizöl, Strom oder Stein-/Braunkohle basierte Heizanlage ausgewählt werden)⁴. Ebenfalls Wahrscheinlichkeiten für eine Installation von Solaranlagen, dem Einsatz von Holz als Nebenenergie und dem Zuschalten eines Heizstabs werden über Wahrscheinlichkeiten angesteuert.
- Der Warmwasserverbrauch bei WG errechnet sich anhand der Anzahl an Bewohnern je Gebäude unter Annahme eines täglichen Bedarfs von 45 l/Person/Tag. Bei NGW basieren Berechnungen zu Trinkwarmwasserverbrauch, Kühlung, Beleuchtung und Belüftung auf Daten aus dem Projekt KliNeG (Bürger et al. 2017).
- Der Abriss von Gebäuden erfolgt zu Beginn eines Jahres nach einer globalen Abrissrate sowie in Abhängigkeit vom Leerstand, Baualter, Denkmalschutz und Heizwärmebedarf des Gebäudes. Die Abrissrate kann für die Szenarien im Zeitverlauf angepasst werden.
- Der Neubau von Gebäuden findet in Abhängigkeit von einer globalen Neubaurate statt. Dabei können bestimmte Gebäudetypen bevorzugt neu gebaut werden (z.B. Ein- und Zweifamilienhäuser mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als Mehrfamilienhäuser).
- Der Leerstand ergibt sich in Abhängigkeit von der Bevölkerungsentwicklung, dem spezifischen Wohnflächenbedarf (einstellbar über die Zeitachse), Neubau und Abriss. Die leerstehenden Wohnungen werden in Abhängigkeit von Gebäudetyp, Baualter und Heizwärmebedarf auf die Gebäude verteilt.

⁴ Ranking Liste für den Austausch: Heizöl/Strom/Kohle schlechter als Gas/Holz(dezentral) schlechter als Holz/Solar/Biogas/Umweltwärme/PowerToGas schlechter als Fernwärme.

- Als Rahmendaten werden Annahmen zu Emissions- und Primärenergiefaktoren (s.o.), zur Klimaentwicklung (Gradtagzahl Potsdam, langjähriges Mittel)⁵ und zur Bevölkerungsentwicklung (siehe Abbildung 3-2) hinterlegt.

3.2.1.4. Berechnen von Kenngrößen und Datenausgabe

Als Ergebnis der Fortschreibung liegen umfangreiche Daten zu jeder Gebäude-Kohorte vor. Dazu zählen Anteile der Gebäudehülle sowie ihr Dämmzustand und Jahr einer Sanierung/Renovierung, Energieverbräuche (Heizwärmebedarf, Heizwärmeverbrauch, Endenergieverbrauch) und Emissionen je eingesetztem Energieträger, Wohn-/Nutzfläche, Anzahl der Bewohner etc. Aus diesen umfangreichen Daten werden im Rahmen dieser Studie folgende Kenngrößen ausgelesen bzw. berechnet:

- Energie- und Emissions-bezogene Kenngrößen werden als Summenwert über alle Gebäudekohorten dargestellt. Dabei wird differenziert nach Raumwärme und Warmwasser bei WG bzw. Raumwärme, Trinkwarmwasser, Kühlung, Beleuchtung und Belüftung bei NWG:
 - Nutzenergieverbrauch
 - Endenergieverbrauch
 - Primärenergieverbrauch
 - THG-Emissionen
- Kenngrößen der Ergebnisse zum Gebäudebestand und der Bevölkerungsentwicklung werden als Summe über die Gebäude-Kohorten ausgegeben:
 - Anzahl an Gebäuden
 - Anzahl der Wohnungen (WG) bzw. Gebäude (NWG)
 - Anzahl neuer Wohnungen (WG) bzw. Gebäude (NWG)
 - Anzahl abgerissener Wohnungen (WG) bzw. Gebäude (NWG)
 - Anzahl der leerstehenden Wohnungen (nur WG)
 - Anzahl der Personen (nur WG)
- Sanierungsrate: Je Gebäude-Kohorte werden die sanierten Hüllflächentypen abgefragt. Auf Basis der Summenwerte wird die Sanierungsrate nach der Methodik von IWU et al. (2010) berechnet. Die Sanierungsrate ist keine Eingangsgröße in Building-STar, sondern ein Modellergebnis, das sich aus den Szenarieneinstellungen berechnet.
- Wohn-/Nutzfläche nach Dämmintensität: Es wird die Wohn-/Nutzfläche der Gebäude-Kohorten für fünf Dämmintensitätsklassen (in kWh/(m²a)) aufsummiert (Klassen (kWh/(m²a)): HWB>180, 120 < HWB ≤ 180, 60 < HWB ≤ 120, 30 < HWB ≤ 60, HWB ≤ 30). Diese Ausgabe wird zudem differenziert nach genutzter und leerstehender Wohnfläche.
- Energieträger: Es wird die Summe des Endenergieverbrauchs je Energieträger über alle Gebäude-Kohorten ausgegeben.

Eine differenziertere Analyse der Ergebnisse z.B. nach Gebäudetypen oder Baualterklassen ist anhand der Modellergebnisse möglich. Dies erfolgte im Rahmen dieser Studie jedoch nicht, da dies nicht im Fokus der Fragestellungen lag.

⁵ Gradtagzahlen für Potsdam (langjähriges Mittel): Bestandsgebäude (Heizgrenze 15°C): 3.780 Kd/a; Neubau oder sanierter Bestand (Heizgrenze 12°C): 3.469 Kd/a; Passivhaus (Heizgrenze 10°C): 3.210 Kd/a

3.2.2. Modell-Erweiterung

3.2.2.1. Erweiterung Heizungstechnologien

Im Rahmen des Projekts liegt der Forschungsfokus auf dem optimierten Einsatz von Biomasse. Daher wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) die in Building-STAR implementierten Biobrennstoffe und Heizungstechnologien kritisch überprüft. Als Ergänzung aus diesem Prozess wurde die Heizungstechnologie „Holzvergaser“ in Building-STAR aufgenommen.

Zudem wurden mit dem DBFZ die Nutzungsgrade und Arbeitszahlen der eingesetzten Heizungstechnologien abgestimmt. Dabei lag ein Fokus auf Heizungstechnologien, die mit Biomasse beschickt werden.

3.2.2.2. Erweiterung zu Nichtwohngebäuden

Eine zentrale Weiterentwicklung von Building-STAR im Rahmen dieses Projekts war die Abbildung des Nicht-Wohngebäudebestands. Hierzu wurden in Building-STAR zwei Sub-Modelle angelegt, eins für WG und eins NWG. Da im NWG-Sub-Modell die gleiche Anzahl an Gebäude- und Altersklassen verwendet werden, konnte die Grundstruktur vom WG-Sub-Modell 1:1 übernommen werden. Folgende Arbeitsschritte waren nötig:

- Für den NWG-Gebäudetyp „Wohngebäude mit Mischnutzung“ (WM) fand eine Trennung in Wohnungen und gewerbliche Nutzung statt (siehe Details in Abschnitt 3.2.1.1). Gebäudekohorten mit Wohnungen wurden dem WG-Sub-Modell zugeordnet.
- Eingangsdaten in beiden Sub-Modellen wurden kritisch im Hinblick auf diese Differenzierung geprüft und bei Bedarf angepasst.
- Literaturdaten zu NWG wurden recherchiert und für die Generierung des NWG-Bestands in das NWG-Sub-Modell eingepflegt (Basis: Bürger et al. (2017), Koch et al. (2017b)).
- Kritische Prüfung der Berechnung der Energieverbrauchsparameter für NWG und Ergänzung der Berechnung von Energieverbräuche für Belüftung, Beleuchtung und Kühlung (Basis: Bürger et al. (2017), BMWI (2018)).
- Bei fehlenden Daten wurde geprüft, ob Daten von WG auf NWG übertragbar sind und bei Eignung wurden sie in das NWG-Sub-Modell integriert. Zudem wurden fehlende Daten durch Expertenschätzungen ergänzt.

3.2.2.3. Modellkopplung von Building-STAR und PowerFlex

Um die Fragestellungen des Projekts beantworten zu können, war es nötig, die beiden Modelle Building-STAR und PowerFlex miteinander zu koppeln. Hierzu wurden Schnittstellen und nötige Modellmodifikationen identifiziert und in Building-STAR implementiert. Details hierzu finden sich in Abschnitt 3.3.

3.2.2.4. Erweiterung der Datenausgabe

In dem ebenfalls in der Fördermaßnahme „Energetische Biomassenutzung“ geförderten Projekt „Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen (Bioplan W)“ wird vom DBFZ der Nutzenergieverbrauch des Gebäudebestandes in Deutschland in die dortige Modellierung einbezogen. Als Eingangsgrößen für die Modellierung im Projekt „Bioplan W“ wurden die Szenarienergebnisse aus Building-STAR, welche im Rahmen dieser Studie berechnet wurden,

aufbereitet und an das DBFZ übergeben. Die summierten Übergabeparameter, differenziert nach Gebäudetypen, Heizwärmebedarfsgruppen und Altersklassen sind:

- Anzahl der Gebäude
- Nutzfläche
- Heizwärmeverbrauch (differenziert nach dezentraler Wärme, Fernwärme und Nahwärme)
- Warmwasser-/Trinkwarmwasserverbrauch (differenziert nach dezentraler Wärme, Fernwärme und Nahwärme)
- Kühlung (differenziert nach dezentraler Wärme, Fernwärme und Nahwärme)

Dies unterstreicht, dass die Modellergebnisse aus Building-STAR eine differenzierte Analyse erlauben und in andere Modellierungsarbeiten einfließen können.

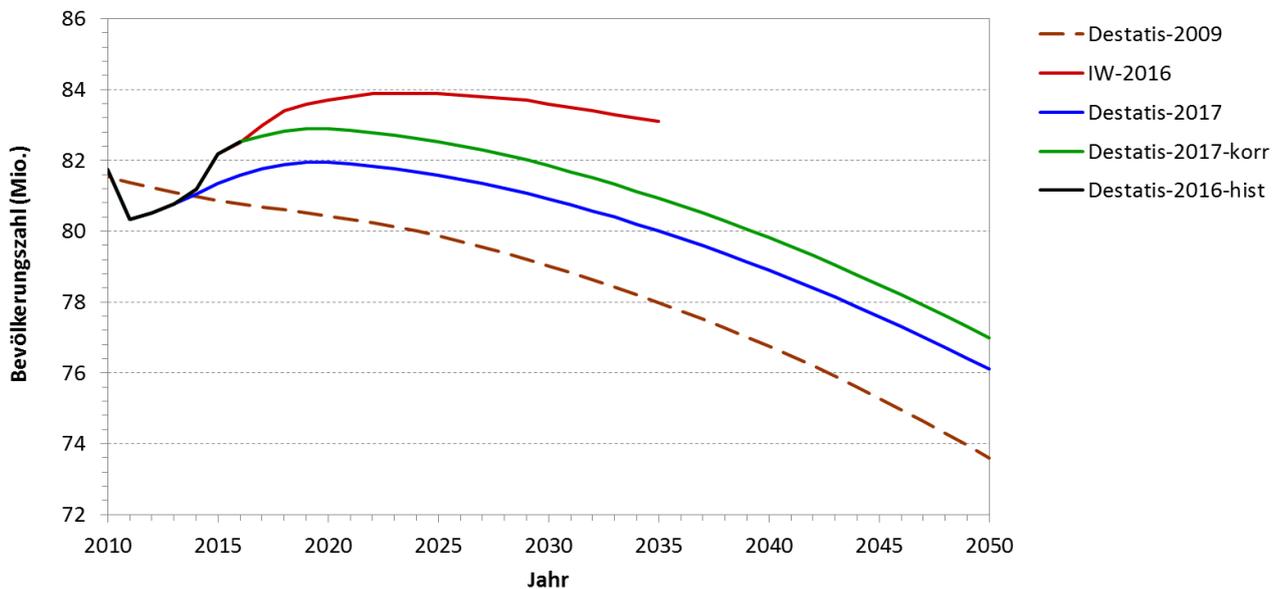
3.2.3. Modellspezifische Szenarienausgestaltung

In diesem Unterkapitel wird auf die Spezifika bei der Szenarienausgestaltung in Building-STAR und insbesondere auf Unterschiede zwischen Wohn- und Nicht-Wohngebäuden eingegangen.

Im Wohngebäudemodell hängen die Modellergebnisse direkt von der Bevölkerungsentwicklung ab. Bis einschließlich 2016 liegen historische Daten zur Bevölkerungsentwicklung vor (Abbildung 3-2). Die Prognose „Destatis-2017“ (siehe Abbildung 3-2) zeigt einen moderaten Anstieg der Bevölkerung in Deutschland auf 82 Mio. Menschen bis zum Jahr 2020 gefolgt von einer kontinuierlichen Abnahme der Bevölkerung bis zum Jahr 2050 auf einen Wert von gut 76 Mio. Menschen. Diese Prognose berücksichtigt aber noch nicht die Migration im Jahr 2015/2016. Unter Berücksichtigung dieser Migration errechnet Deschermeier (2016) einen deutlich höheren Anstieg der Bevölkerung auf knapp 84 Mio. Menschen in 2025 und eine geringere Abnahme bis 2035 (gut 83 Mio. Menschen; siehe „IW-2016“ in Abbildung 3-2). Einen Mittelweg stellt „Destatis-2017-korr“ (siehe Abbildung 3-2) als korrigierte Fortschreibung der Bevölkerungsprognose „Destatis-2017“ dar. Dabei wurden für diese Studie die Werte aus „Destatis-2017“ mit neuen Daten für die Jahre 2015 und 2016⁶ aktualisiert. Auf Basis der Bevölkerungszahlen das Jahr 2016 wurde ein Korrekturfaktor von 1,012 errechnet (historische Bevölkerungszahl 2016 (Destatis-2016-hist) / fortgeschriebenen Bevölkerungszahl 2016 (Destatis-2017)). Mit diesem Korrekturfaktor wurden die fortgeschriebenen Bevölkerungszahlen aus Destatis-2017 hinzu Destatis-2017-korr erhöht (siehe Abbildung 3-2). Zudem wird in Abbildung 3-2 mit Destatis-2009 eine ältere Bevölkerungsfortschreibung aufgetragen, die eine deutlich geringere Bevölkerungszahl zeigt.

Da die unten für die Kalibrierung angeführten Studien ältere Bevölkerungszahlen nutzen, wurden im Zuge der Kalibrierung ebenfalls ältere Daten (Statistisches Bundesamt (DESTATIS) 2009) eingesetzt. Für die Modellierungsarbeiten im Projekt wurden aber neuere Daten verwendet. Dabei wird die korrigierte Fortschreibung aus Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2017) genutzt, die einen ausgewogenen Kompromiss darstellt (vgl. Abbildung 3-2). Zwischen den einzelnen hier betrachteten Szenarien wurden keine Unterschiede in den Bevölkerungszahlen angenommen.

Abbildung 3-2: Bevölkerungsentwicklung



Quelle: Darstellung durch Öko-Institut e.V.; Destatis-2016-hist = historische Daten bis zum Jahr 2016⁶; Destatis-2009: Variante mittlere Bevölkerung – Obergrenze (annähernd konstante Geburtenhäufigkeit, Basisannahme zur Lebenserwartung, Wanderungssaldo von 200.000 Personen/Jahr) nach Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2009); Destatis-2017 = Variante V2 (Geburtenrate von 1,4 Kinder je Frau, Lebenserwartung bei Geburt 2060 für Jungen 84,8/Mädchen 88,8 Jahre, langfristiger Wanderungssaldo 200 000 Menschen) nach Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2017); Destatis-2017-korr: Erhöhung der Prognose aus Destatis-2017 um den Faktor 1,014 (siehe Text); IW-2016 = Variante „IW-Prognose“ (Deschermeier (2016)).

Die Ausgestaltung der Szenarien Referenz und Naturschutz erfolgte in Building-STAR in derart, dass Ergebnisse bestehender Szenarien herangezogen und die Einstellungen in Building-STAR so gesetzt wurden, dass ausgewählte Kenngrößen (Endenergieverbrauch, THG-Emissionen) – je für WG und NWG – im Zeitverlauf vergleichbar getroffen wurden. Im Hinblick auf den Gebäudebestand eignen sich vor allem die Szenarien der Studien „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ (Thamling et al. 2015) als Bezugsszenarien. Zudem wurden Ergebnisse aus dem „Klimaschutzszenario 2050 (2. Modellierungsrunde)“ (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015) als Orientierung berücksichtigt.

⁶ Siehe historische Bevölkerungsentwicklung unter: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/_/rbev01.html

Tabelle 3-3: Szenarieneinstellungen in Building-STar

	Referenzszenario		Naturschutzszenario	
	WG	NWG	WG	NWG
Bezugsszenarien	Zielszenario Effizienz (Thamling et al. 2015)		KS95 (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015)	
Abriss	Anstieg von 0,07 %/Jahr in 2010 auf 0,8 %/Jahr in 2050	0,7 %/Jahr (konstant)	Anstieg von 0,07 %/Jahr in 2010 auf 0,8 %/Jahr in 2050	0,7 %/Jahr bis 2035, Anstieg auf 1,3 % in 2050
Neubau	Abnahme von 0,6 %/Jahr in 2010 auf 0,4 %/Jahr in 2050	0,7 %/Jahr (konstant)	0,6 %/Jahr (konstant)	0,7 %/Jahr (konstant)
Spezif. Wohnflächenbedarf pro Kopf	Konstant	--	Konstant	--
Einbauwahrscheinlichkeit von Heizanlagen in Neubauten	Deutlicher Rückgang für fossile Energieträger; leichter Rückgang für Nah- und Fernwärme; konstant für Holz; deutlicher Anstieg für Wärmepumpen und (bei WG) Solarthermie		Ab 2035 = 0 für fossile Energieträger; deutlicher Rückgang für Nah- und Fernwärme; konstant für Holz; sehr deutlicher Anstieg für Wärmepumpen und (bei WG) Solarthermie	
Sanierung der Gebäudehülle	Leichter Anstieg der Entscheidungswahrscheinlichkeit für energetische Sanierung; Leichte (WG) bis mittlere (NWG) Verkürzung der Reinvest-Zyklen bei Sanierung nach Renovierung; Aufgabe der Dämmrestriktion bei Ästhetik ab 2030 hin zu 30 % in 2050		Sehr starker Anstieg der Entscheidungswahrscheinlichkeit für energetische Sanierung; mittlere Verkürzung der Reinvest-Zyklen bei Sanierung nach Renovierung und bei Sanierung nach Sanierung; Aufgabe der Dämmrestriktion ab 2030 bei Ästhetik hin zu 90% und Überdämmung hin zu 75 % in 2050	
Sanierung von Heizanlagen	Hohe bis mittlere Austauschwahrscheinlichkeit fossiler Energieträger; hohe Zubaurate von Wärmepumpen und Solarthermie; Holz konstant; Fernwärme konstant bis leichte Abnahme		Hohe bis sehr hohe Austauschwahrscheinlichkeit fossiler Energieträger; sehr hohe Zubaurate von Wärmepumpen und hohe von Solarthermie; Holz konstant bis leichte Zunahme; Fernwärme konstant bis leichte Abnahme	
Bevölkerung	Destatis-2017-korr (Abbildung 3-2)	--	Destatis-2017-korr (Abbildung 3-2)	--
Klima	Fortschreibung des langjährigen Mittels zu Gradtagzahlen in Potsdam			
Endenergieverbrauch	2010: 584 TWh 2050: 344 TWh	2010: 332 TWh 2050: 220 TWh	2010: 584 TWh 2050: 273 TWh	2010: 332 TWh 2050: 175 TWh

Quelle: Öko-Institut e.V.

Generell ist anzumerken, dass die Einstellungen in Building-STar zur Fortschreibung der Gebäudehülle während der Rückkoppelung mit PowerFlex nicht verändert werden. Hingegen überprägen die PowerFlex-Ergebnisse zum Energieträger-Mix sehr stark die zuvor getroffenen Einstellungen in Building-STar. Die folgenden Spezifizierungen wurden für die Szenarien vorgenommen:

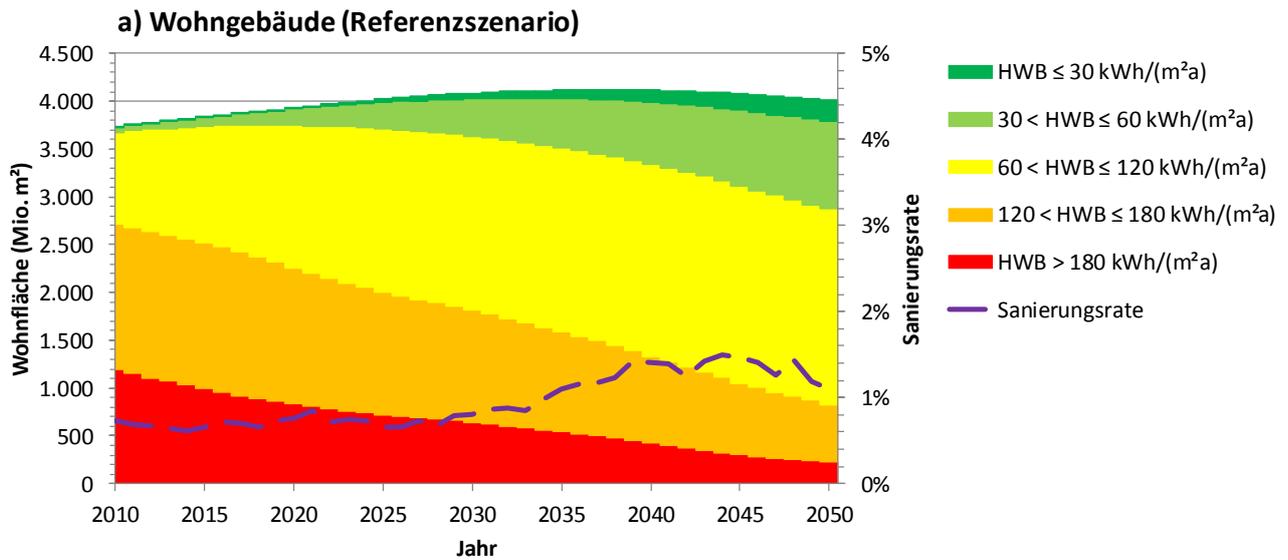
Referenzszenario: Für das Referenzszenario (Ref) stammen die Kenngrößen aus dem Zielszenario Effizienz (Thamling et al. 2015). Mit den in Tabelle 3-3 beschriebenen Modelleinstellungen wird eine energetische Sanierungsrate der Gebäudehülle von 0,6 % bis 1,5 % für Wohngebäude (Abbildung 3-3 a) und von 0,6 % bis 2,6 % für Nicht-Wohngebäude (Abbildung 3-3 b) erreicht, wobei die höheren Sanierungsraten nach 2030 auftreten. Die energetische Sanierung führt zu einem moderaten Anstieg besser gedämmter Gebäude (vgl. Abbildung 3-3 a und b). Der Endenergieverbrauch des Gebäudebestands liegt im Jahr 2050 bei 344 TWh (WG) und 220 TWh (NWG; vgl. Tabelle 3-3 und Abbildung 3-5).

Referenzszenario_Wärmeffizienz: Im Referenzszenario_WE (Ref_WE) werden die Einstellungen zu den Heizanlagen aus dem Referenzszenario beibehalten. Die Einstellungen zur Gebäudehülle (inklusive Neubau und Abriss) werden hingegen aus dem Naturschutzszenario herangezogen (s.u.). Eine nachgeschaltete Kalibrierung nach dem Endenergieverbrauch bzw. den THG-Emissionen erfolgt für dieses Szenario nicht. Die Verbesserung der Wärmedämmung im Bestand entspricht der des Naturschutzszenario (Abbildung 3-4 a und b) und der Endenergieverbrauch mit 270 TWh (WG) und 185 TWh (NWG) etwa den Ergebnissen im Naturschutzszenario (vgl. Abbildung 3-5).

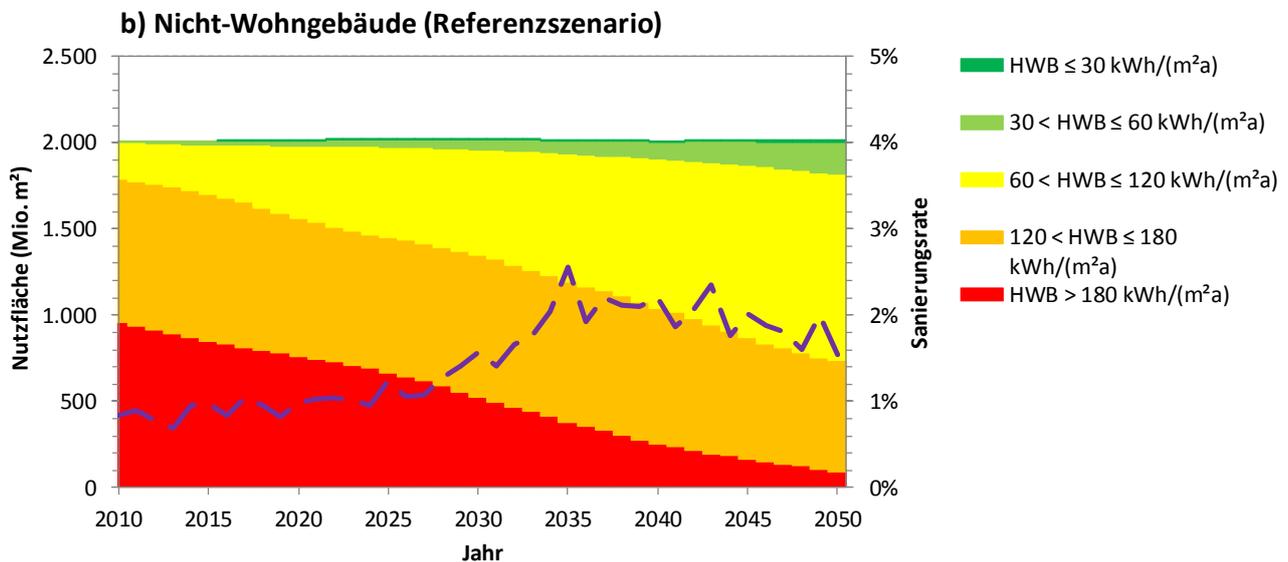
Naturschutzszenario: Das Naturschutzszenario (Nat) lehnt sich an die Kenngrößen aus dem Klimaschutzszenario 95 aus Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI (2015) an. Die vorgenommenen Modelleinstellungen (Tabelle 3-3) führen zu einer Sanierungsrate von 0,6 % bis 2,6 % (WG) und von 0,8 % bis 3,5 % (NWG; Abbildung 3-4 a und b). Wiederum treten die hohen energetischen Sanierungsraten ab 2030 auf. Bei den Wohngebäuden sinkt die Sanierungsrate trotz der Einstellung hoher Entscheidungswahrscheinlichkeiten für eine energetische Sanierung nach 2045 deutlich ab (Abbildung 3-4 a). Dies ist ein Indiz dafür, dass der Gebäudebestand bereits zu einem hohen Maße energetisch saniert ist. Dies zeigt sich auch anhand des hohen Anteils an gut gedämmter Wohnfläche: im Jahr 2050 gibt es in diesem Szenario nur noch Gebäude mit einem Heizwärmebedarf ≤ 120 kWh/(m²a). Auch bei den Nicht-Wohngebäuden findet ein sehr starker Wechsel der Dämmniveaus der Gebäude statt. Dieser ist aber – trotz einer sehr hohen energetischen Sanierungsrate – geringer als der der WG (Abbildung 3-4). Der Endenergieverbrauch liegt 2050 bei 274 TWh (WG) und 175 TWh (NWG; vgl. Tabelle 3-3 und Abbildung 3-5).

- **Naturschutzszenario_Kohleausstieg:** Beim Naturschutzszenario_KA (Nat_KA) werden aus Gebäudesicht die Einstellungen aus dem Naturschutzszenario übernommen.

Abbildung 3-3: Sanierungsrate und Wohn-/Nutzflächen im Referenzszenario



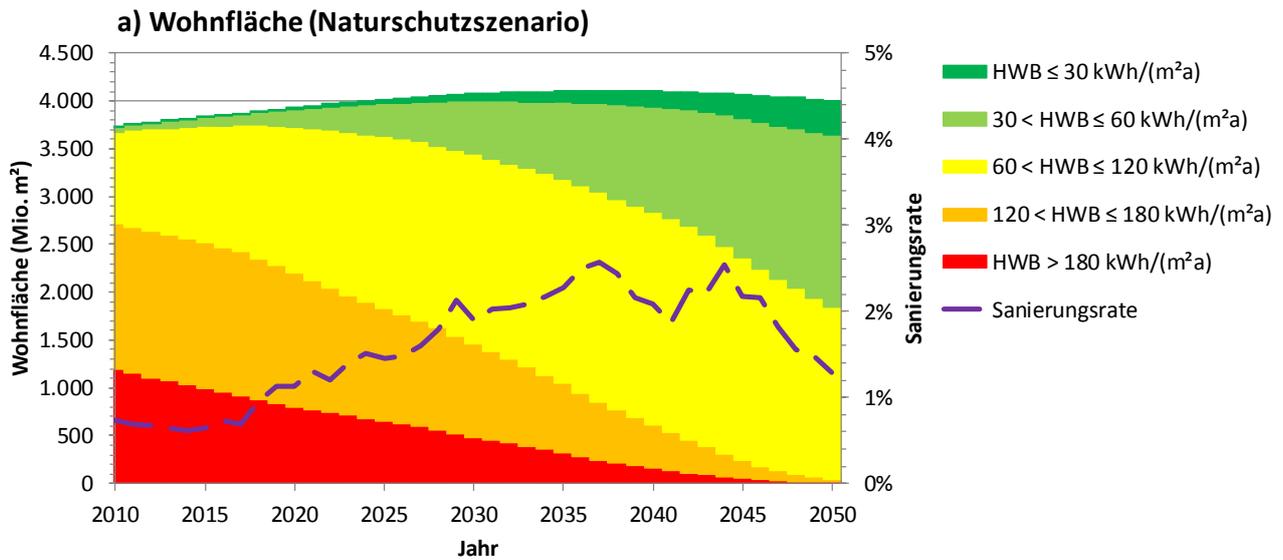
Wohnfläche Klassen in kWh/(m²a)	Alle Gebäude (Mio. m²)					Genutzte Gebäude (Mio. m²)					Leerstehende Gebäude (Mio. m²)				
	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050
HWB>180	1.240,4	861,2	659,2	448,1	244,0	1.136,4	736,5	515,5	320,9	177,1	104,0	124,7	143,6	127,2	66,9
120 < HWB ≤ 180	1.513,9	1.453,0	1.197,5	940,1	627,8	1.378,6	1.287,2	977,5	723,0	460,8	135,3	165,8	220,0	217,2	167,0
60 < HWB ≤ 120	907,0	1.432,7	1.795,9	1.991,0	2.044,4	852,3	1.319,9	1.572,9	1.667,2	1.656,9	54,6	112,7	223,0	323,9	387,5
30 < HWB ≤ 60	42,4	151,9	368,4	622,7	898,3	40,4	142,7	339,1	558,9	780,3	2,0	9,2	29,3	63,8	118,1
HWB ≤ 30	0,0	10,9	55,9	115,2	216,8	0,0	9,5	51,0	106,5	189,4	0,0	1,4	4,9	8,6	27,4
Summe	3.703,7	3.909,7	4.076,9	4.117,2	4.031,4	3.407,7	3.495,9	3.456,1	3.376,5	3.264,5	296,0	413,8	620,8	740,7	766,9



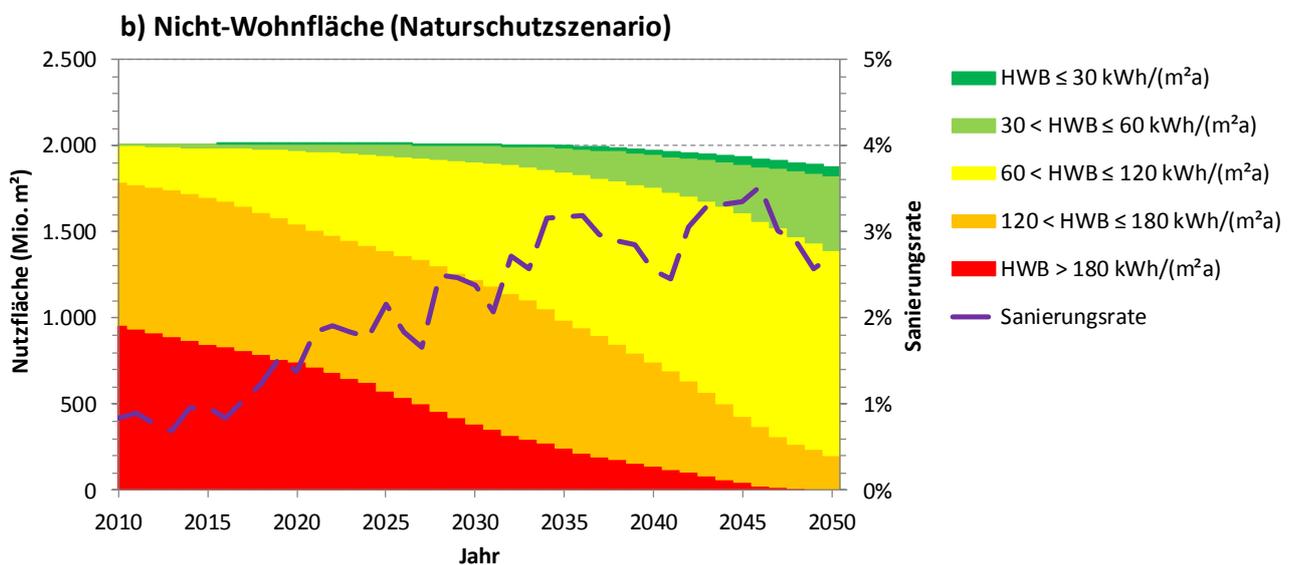
Nutzfläche Klassen in kWh/(m²a)	Alle Gebäude (Mio. m²)					Genutzte Gebäude (Mio. m²)					Leerstehende Gebäude (Mio. m²)				
	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050
HWB>180	984,8	778,4	557,7	277,2	106,6	896,8	703,8	509,4	243,7	88,9	88,0	74,6	48,3	33,4	17,7
120 < HWB ≤ 180	819,4	814,6	814,7	801,7	648,4	805,5	765,4	741,1	746,6	604,5	13,9	49,2	73,6	55,1	43,9
60 < HWB ≤ 120	198,1	389,4	589,7	836,0	1.070,3	189,1	363,1	563,8	777,8	992,1	9,0	26,3	25,9	58,2	78,2
30 < HWB ≤ 60	10,8	27,9	53,0	90,9	177,0	10,8	25,6	49,5	87,8	167,1	0,0	2,3	3,5	3,1	10,0
HWB ≤ 30	0,0	0,4	0,4	2,3	13,0	0,0	0,4	0,4	2,3	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
Summe	2.013,0	2.010,7	2.015,5	2.008,0	2.015,5	1.902,1	1.858,2	1.864,2	1.858,2	1.865,2	110,9	152,5	151,3	149,8	150,2

Quelle: Öko-Institut e.V.; HWB = Heizwärmebedarf.

Abbildung 3-4: Sanierungsrate und Wohn-/Nutzflächen im Naturschutzszenario



Wohnfläche Klassen in kWh/(m²a)	Alle Gebäude (Mio. m²)					Genutzte Gebäude (Mio. m²)					Leerstehende Gebäude (Mio. m²)				
	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050
HWB>180	1.240,4	837,5	519,1	189,3	15,1	1.136,4	711,4	399,2	133,6	10,7	104,0	126,1	119,8	55,8	4,4
120 < HWB ≤ 180	1.513,9	1.437,2	1.019,5	499,6	47,7	1.378,6	1.280,5	825,9	368,0	32,7	135,3	156,7	193,7	131,6	15,0
60 < HWB ≤ 120	907,0	1.457,7	1.943,2	2.215,2	1.879,0	852,3	1.336,3	1.696,7	1.838,5	1.458,8	54,6	121,4	246,5	376,7	420,2
30 < HWB ≤ 60	42,4	159,6	513,6	1.048,8	1.734,6	40,4	149,3	465,9	898,1	1.450,2	2,0	10,3	47,7	150,7	284,5
HWB ≤ 30	0,0	19,5	72,3	152,5	344,9	0,0	19,2	66,9	136,0	289,5	0,0	0,3	5,4	16,4	55,3
Summe	3.703,7	3.911,4	4.067,7	4.105,4	4.021,3	3.407,7	3.496,7	3.454,6	3.374,2	3.241,9	296,0	414,8	613,1	731,2	779,4

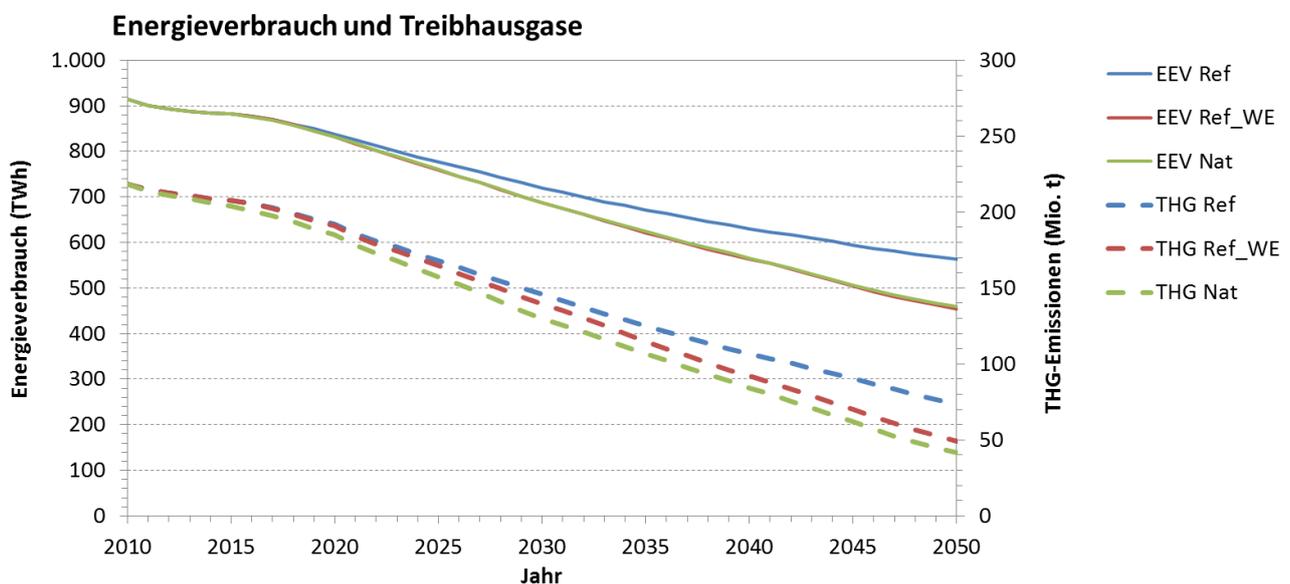


Nutzfläche Klassen in kWh/(m²a)	Alle Gebäude (Mio. m²)					Genutzte Gebäude (Mio. m²)					Leerstehende Gebäude (Mio. m²)				
	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050	2010	2020	2030	2040	2050
HWB>180	984,8	762,6	424,6	156,9	3,9	896,8	689,2	399,7	145,2	3,6	88,0	73,4	24,8	11,7	0,3
120 < HWB ≤ 180	819,4	816,4	833,2	636,4	232,4	805,5	766,2	752,6	576,9	201,9	13,9	50,2	80,5	59,6	30,5
60 < HWB ≤ 120	198,1	396,3	655,9	982,6	1.198,9	189,1	369,2	615,1	915,1	1.107,8	9,0	27,1	40,8	67,5	91,2
30 < HWB ≤ 60	10,8	31,8	87,8	182,9	404,3	10,8	30,6	83,6	176,4	386,9	0,0	1,2	4,2	6,5	17,3
HWB ≤ 30	0,0	0,4	6,0	21,0	48,6	0,0	0,4	6,0	21,0	47,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Summe	2.013,0	2.007,4	2.007,4	1.979,9	1.888,1	1.902,1	1.855,5	1.857,1	1.834,6	1.748,1	110,9	151,9	150,3	145,3	140,1

Quelle: Öko-Institut e.V.; HWB = Heizwärmebedarf.

In Bezug zu den modellierten THG-Emissionen ist in Abbildung 3-5 zu sehen, dass die THG-Minderung im Naturschutzszenario mit 41 Mio. t CO₂e deutlich niedriger ausfällt, als im Referenzszenario (74 Mio. t CO₂e). In 2050 beträgt der Unterschied für WG und NWG etwa 33 Mio. t CO₂e. Das Referenzszenario-Wärmeeffizienz erreicht mit einem Wert von 49 Mio. t CO₂e ebenfalls eine deutliche THG-Minderung. Dieses Ergebnis wird vor allem durch die ambitionierte Wärmedämmung in dem Szenario erreicht, was die Bedeutung von Wärmeeffizienzmaßnahmen unterstreicht. So liegen die Emissionen des Referenzszenario_WE nahe am Naturschutzszenario und das Soll der THG-Minderung aus dem Zielszenario Effizienz (Thamling et al. 2015) werden übererfüllt.

Abbildung 3-5: Endenergieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen (Summe Wohn- und Nicht-Wohngebäude) für die Referenzszenario, Referenzszenario_Wärmeeffizienz und Naturschutzszenario



Quelle: Öko-Institut e.V.; EEV = Endenergieverbrauch; THG = Treibhausgas; Ref = Referenzszenario; Ref_WE = Referenzszenario-Wärmeeffizienz; Nat = Naturschutzszenario.

3.3. Design der Modellkopplung und Schnittstellen

Um die Forschungsfragen zur optimalen Biomasseallokation zwischen dem Strom- und dem Wärmesektor beantworten zu können, wurden das Gebäudemodell Building-STAR und das Strommarktmodell PowerFlex jeweils erweitert (siehe Kapitel 3.1.2 und 3.2.2) und miteinander gekoppelt.

Die Kopplung erfolgte anhand von Schnittstellen. Eine Herausforderung war es dabei, dass sich die Modellierungsansätze von Building-STAR und PowerFlex deutlich voneinander unterscheiden. Dies betrifft vor allem die zeitliche Auflösung der beiden Modelle, die modellierte Zeitspanne und die Auflösung bei der Abbildung der Heizanlagen (vgl. Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Schnittstellenrelevante Unterschiede zwischen der Modellstruktur von PowerFlex und Building-Star sowie verfolgte Lösungsansätze

	PowerFlex	Building-Star	Lösungsansatz
Zeitspanne	1 Jahr (Zeitscheiben: 2020, 2030, 2050)	Jährlich von 2009-2050	„Einsammeln“ der neuen Heizanlagen zwischen den Zeitscheiben in B-Star
Zeitliche Auflösung	1 Stunde	1 Jahr	Übertragung der Jahreswerte aus B-Star in hoch aufgelöste Lastkurven in PowerFlex
Energieträger	Vergleichbar	Vergleichbar	Leichte Anpassungen
Auflösung Heizanlagen	Aggregierte Gruppen	Sehr differenziert je Gebäude-Kohorte	Die Übergabe zu Heizanlagen von B-Star zu PowerFlex erfolgt als Summenwerte für die aggregierten Gruppen. Nach Übergabe der Werte für die aggregierten Gruppen aus PowerFlex nach B-Star werden in B-Star die Heizanlagenkombinationen bis zur Übereinstimmung angepasst (Poolansatz, siehe Abschnitt 3.3.1).

Quelle: Öko-Institut e.V.

Zwei bedeutende Unterschiede zwischen dem Strommarktmodell „PowerFlex“ und dem Gebäudemodell „Building-Star“ liegen in der modellierten Zeitspanne und der zeitlichen Auflösung der Modellierung. So modelliert PowerFlex für ein Jahr (Zeitscheibe) mit einer hohen Auflösung von einer Stunde den Strommarkt in Deutschland. Über den Zeitraum zwischen zwei Zeitscheiben kann PowerFlex keine Aussagen treffen (vgl. Abschnitt 3.1). Building-Star hingegen modelliert jedes einzelne Jahr vom Startjahr 2009 bis 2050. Dabei beträgt die zeitliche Auflösung aber nur ein Jahr, so dass z.B. keine unterjährigen Daten zur Verteilung des Wärmebedarfs vorliegen. Ein weiterer bedeutender Unterschied ist, dass Building-Star sehr differenziert für jede Gebäude-Kohorte Heizanlagen modelliert. PowerFlex hingegen nutzt hier mit 12 verschiedenen Anlagentypen eine deutlich gröbere brennstoff- und technologiespezifische Unterteilung (vgl. Tabelle 3-6). Diese Unterschiede waren beim Design der Modellkopplung und der Definition der Schnittstellen zwischen PowerFlex und Building-Star besonders relevant.

3.3.1. Design der Modellkopplung

Bei der Modellkopplung müssen zwei Punkte erreicht werden:

1. PowerFlex erhält aus BuildingStar Informationen zum Gebäudebestand und zu neuen Heizanlagen, die bis zur für PowerFlex relevanten Zeitscheibe neu eingebaut wurden. So werden z.B. für die PowerFlex-Zeitscheibe 2020 Daten aus Building-Star für die Jahre 2011-2020 übergeben.
2. Building-Star erhält aus PowerFlex Informationen zum Energieeinsatz in den neuen Heizanlagen und der Nahwärmeerzeugung.

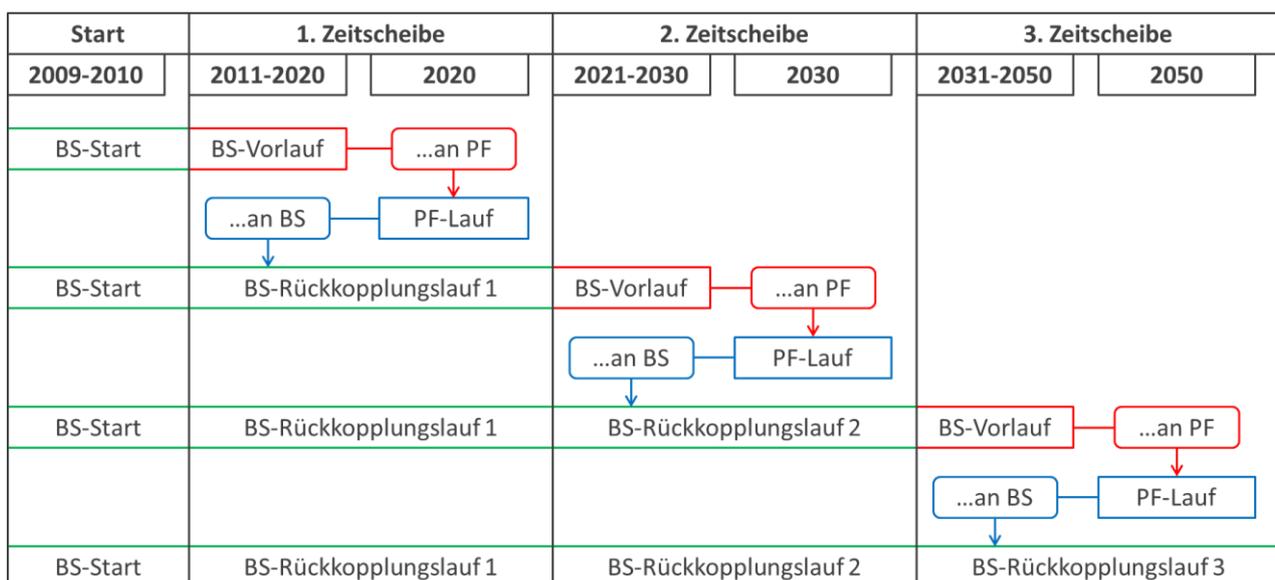
Das Design der Modellkopplung zwischen PowerFlex und Building-Star ist schematisch in Abbildung 3-6 dargestellt und wird im Folgenden kurz erläutert:

- In einer Zeitscheibe (z.B. von 2011 bis 2020) beginnt Building-STar mit einem Vorlauf, in dem neue Heizanlagen entsprechend der Reinvestitionszyklen in Gebäude-Kohorten eingebaut werden. Die Auswahl der Energieträger basiert auf den Einstellungen in Building-STar für das gewählte Szenario.
- Building-STar übergibt Daten zum Gebäudebestand und zu Potenzialgrenzen für neue Heizanlagen an PowerFlex (z.B. im Jahr 2020 in der 1. Zeitscheibe).
- PowerFlex führt einen Szenariolauf für das Jahr 2020 durch. Dabei werden die Informationen zu den Heizanlagen aus Building-STar berücksichtigt.
- PowerFlex übergibt den berechneten Energieeinsatz für die neuen Heizanlagen an Building-STar (z.B. 2020 in der 1. Zeitscheibe).
- Building-STar startet einen Modelllauf, bei dem auf Basis des berechneten Energieeinsatzes in den neuen Heizanlagen aus PowerFlex die Heizanlagenkombinationen angepasst werden (Poolansatz, siehe unten), bis eine hohe Übereinstimmung mit dem vorgegebenen Energieträgereinsatz aus PowerFlex besteht (z.B. Rückkopplungslauf in Zeitscheibe 1).
- In Building-STar geht der Rückkopplungslauf aus der vorherigen Zeitscheibe (z.B. 2011-2020) in einen Vorlauf in der nächsten Zeitscheibe über (z.B. 2021-2030). Ab diesem Punkt wiederholt sich die beschriebene Rückkopplung.

Die Rückkopplung zwischen Building-STar und PowerFlex erfolgt für die drei Zeitscheiben 2020, 2030 und 2050. Für PowerFlex werden die drei Zeitscheiben als eigenständige Modellläufe abgespeichert. In Building-STar hingegen wird immer ein Modelllauf von 2009 an gestartet und bis zu dem anstehenden Schritt in der Modellkopplung durchgeführt. Am Ende der letzten Zeitscheibe liegt so ein vollständiger Modelllauf für Building-STar vor, der alle Rückkopplungen berücksichtigt und die Ergebnisse aller Jahresschritte abspeichert (vgl. Abbildung 3-6).

Details zu den einzelnen Übergabeparametern zwischen PowerFlex und Building-STar und der Verarbeitung der übergebenen Daten sind in Abschnitt 3.3.2.1 und 3.3.2.2 beschrieben.

Abbildung 3-6: Design der Modellkopplung zwischen PowerFlex und Building-STar



Quelle: Öko-Institut e.V.; PF = PowerFlex; BS = Building-STar

3.3.2. Definition der Schnittstelle und Verarbeitung der übergebenen Daten

3.3.2.1. Datenübergabe von Building-STAR an PowerFlex und Umgang mit den Daten

Aus den Ergebnissen für die modellierten Kohorten in Building-STAR werden spezifische Parameter zusammengestellt, die benötigt werden, um den Gebäudesektor in PowerFlex zu integrieren. Diese Übergabeparameter sind in Tabelle 3-5 aufgeführt.

Bei der Übergabe wird zwischen Werten für Bestandsanlagen, die nicht verändert werden, und Neuanlagen, die innerhalb der Zeitscheibe neu eingebaut werden, unterschieden. Als Informationen zu den Bestandsanlagen werden die CO₂-Emissionen und die verbrauchten Mengen an fester Biomasse (Holz), Strom und Gas von Building-STAR an PowerFlex übergeben. Hinzu kommen Angaben zur leitungsgebundenen Wärmenachfrage (Summe aus Bestandsanlagen und neue Anlagen) und zu Neuanlagen (Wärmenachfrage neuer Heizanlagen als Summe aller Heizanlagen und spezifisch nur für Solarthermie sowie die potenzielle Wärmenachfrage für Wärmepumpen).

Tabelle 3-5: Übergabeparameter aus Building-STAR an PowerFlex

Parameter/Jahr	Einheit
Werte für Bestandsanlagen im Jahr der Zeitscheibe (2020, 2030, 2050)	
CO ₂ -Emissionen aus dezentralen Bestandsanlagen	t CO ₂
Verbrauch an fester Biomasse zur Wärmeerzeugung in dezentralen Bestandsanlagen	MWh
Stromnachfrage zur Wärmeerzeugung in dezentralen Bestandsanlagen	MWh
Gasnachfrage zur Wärmeerzeugung in dezentralen Bestandsanlagen	MWh
Werte für leitungsgebundene Wärme (Bestands- und Neuanlagen) im Jahr der Zeitscheibe (2020, 2030, 2050)	
Nachfrage nach Nahwärme in Bestands- und Neuanlagen	MWh
Nachfrage nach Fernwärme in Bestands- und Neuanlagen	MWh
Werte für Neuanlagen (Summe über die Jahre der Zeitscheibe: 2011-2020, 2021-2030, 2031-2050)	
Wärmenachfrage (Summe) aus dezentralen Neuanlagen	MWh
Obergrenze für die solarthermische Wärmeerzeugung aus dezentralen Neuanlagen	MWh
Obergrenze für die solarthermische Wärmeerzeugung aus Nahwärme-Neuanlagen	MWh
Obergrenze für die Wärmeerzeugung aus Umweltwärme (Wärmepumpen) aus dezentralen Neuanlagen	MWh
Obergrenze für die Wärmeerzeugung aus Umweltwärme (Wärmepumpen) aus Nahwärme-Neuanlagen	MWh

Quelle: Öko-Institut e.V.; Daten exemplarisch für das Referenzszenario.

In Bezug auf die Datenübergabe von Building-STAR zu PowerFlex entsprechen die für Wärmepumpen und Solarthermieanlagen übergebenen Werte jeweils einer Obergrenze:

- In Building-STar darf einer Gebäudekohorte nur dann eine Wärmepumpe zugewiesen werden, wenn ein Heizwärmebedarf von $<90 \text{ kWh/m}^2$ vorliegt, da in einer Gebäudekohorte mit höherem Heizwärmebedarf mit ungünstigen Arbeitszahlen zu rechnen ist. In Building-STar wird die Anzahl an Gebäudekohorten mit einer neuen Heizanlage ermittelt und die Summe des Heizwärmeverbrauchs als Obergrenze an PowerFlex gemeldet.
- Die Veränderung der Solaranlagen wird in Building-STar entsprechend der Szenarieneinstellungen modelliert (siehe Modellbeschreibung in Abschnitt 3.2.1). Die Summe des Heizwärmeverbrauchs aller Gebäudekohorten, der aus Solaranlagen gedeckt wird, wird als Obergrenze an PowerFlex übergeben.

Die aus Building-Star übermittelten Daten (CO₂-Emissionen, Wärmenachfrage, Obergrenzen für den Einsatz von Wärmepumpen und Solarthermie) werden in Powerflex bei der Definition der Randbedingungen des zu lösenden Optimierungsproblems berücksichtigt.

3.3.2.2. Datenübergabe von PowerFlex an Building-STar und Umgang mit den Daten

Nach Abschluss der Modellierung einer Zeitscheibe werden in PowerFlex diejenigen Kenngrößen zusammengestellt, die in Building-STar benötigt werden, um die Zuweisung der neu eingebauten Heizanlagen an die Ergebnisse aus PowerFlex anzupassen (vgl. Abschnitt 3.3.1). Diese Übergabeparameter umfassen die brennstoff- und technologiespezifischen Energiemengen, die als Ergebnis der Optimierung in neuen dezentralen Heizanlagen und in neuen Nahwärmenetzen eingesetzt werden (siehe Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Übergabeparameter aus PowerFlex an Building-STar: Ergebnisse der brennstoffspezifischen Einsatzentscheidung für die Wärmeerzeugung in Neuanlagen

Wärmeerzeugung für die Zeitscheiben 2011-2020, 2021-2030 und 2031-2050	Dezentrale Wärme	Nahwärme
feste Biomasse (Pelletheizungen)	X	
Erdgas und Biomethan (Gasheizung)	X	
Heizöl (Ölheizung)	X	
Solarthermie (Hausdachanlage)	X	
Strom und Umweltwärme (Wärmepumpe)	X	
Strom (Heizstab)	X	
feste Biomasse (Heizkraftwerke)		X
Biogas-BHKW		X
Erdgas-BHKW		X
Erdgaskessel		X
Solarthermie		X
Strom und Umweltwärme (Wärmepumpe)		X

Quelle: Öko-Institut e.V.

Die kostenoptimierten Daten aus PowerFlex zum Energieeinsatz in den neuen Heizanlagen sind stark aggregiert (Energieträger für den Gebäudebestand und alle Jahre bis zur Zeitscheibe). Als erster Schritt werden die Energiemengen anteilig auf die Jahre verteilt (z.B. 2011-2020). Anschließend werden je Jahresschritt in einem Jahr in Building-STAR die Energiemengen je Energieträger aufsummiert und die Differenz zwischen den Angaben aus PowerFlex und denen aus Building-STAR gebildet. Die ermittelte Abweichung stellt je Energieträger einen Pool dar, der auszugleichen ist. Ein Pool kann negative und positive Werte annehmen.

Auf Basis dieser Pools werden die Heizanlagenkombinationen in den Gebäudekohorten in Building-STAR angepasst. Jeder Gebäudekohorte wird in der Modellierung eine Heizanlagenkombination zugeordnet (z.B. Gaskessel (zentral) mit Solarthermie für Warmwasser). Aus einer Liste mit eindeutigen Zuordnungen ergibt sich bei einem Wechsel hin zu einem anderen Energieträger direkt die neue Neuanlagenkombination (z.B. bei einem Wechsel von Gas zu Holz: Holzkessel (zentral) mit Solarthermie für Warmwasser). Für die Anpassung werden für zufällig ausgewählte Gebäude-Kohorten mit einer neuen Heizanlage für jeden Pool folgende Schritte durchgeführt:

1. Frage: Muss aus dem Pool noch Energie ausgeschöpft werden (z.B. Energieträger Holz)? Wenn ja, weiter mit Punkt 2.
2. Zuweisen der neuen Heizanlagenkombination mit dem Ziel-Energieträger aus der oben genannten Liste
3. Zuweisen der Heizanlagentechnologien inklusive Nutzungsgrad entsprechend der Zuordnungsregeln für das Jahr
4. Reduktion des Pools des Ausgangsenergieträgers
5. Aufstocken des Pools des Zielenergieträgers

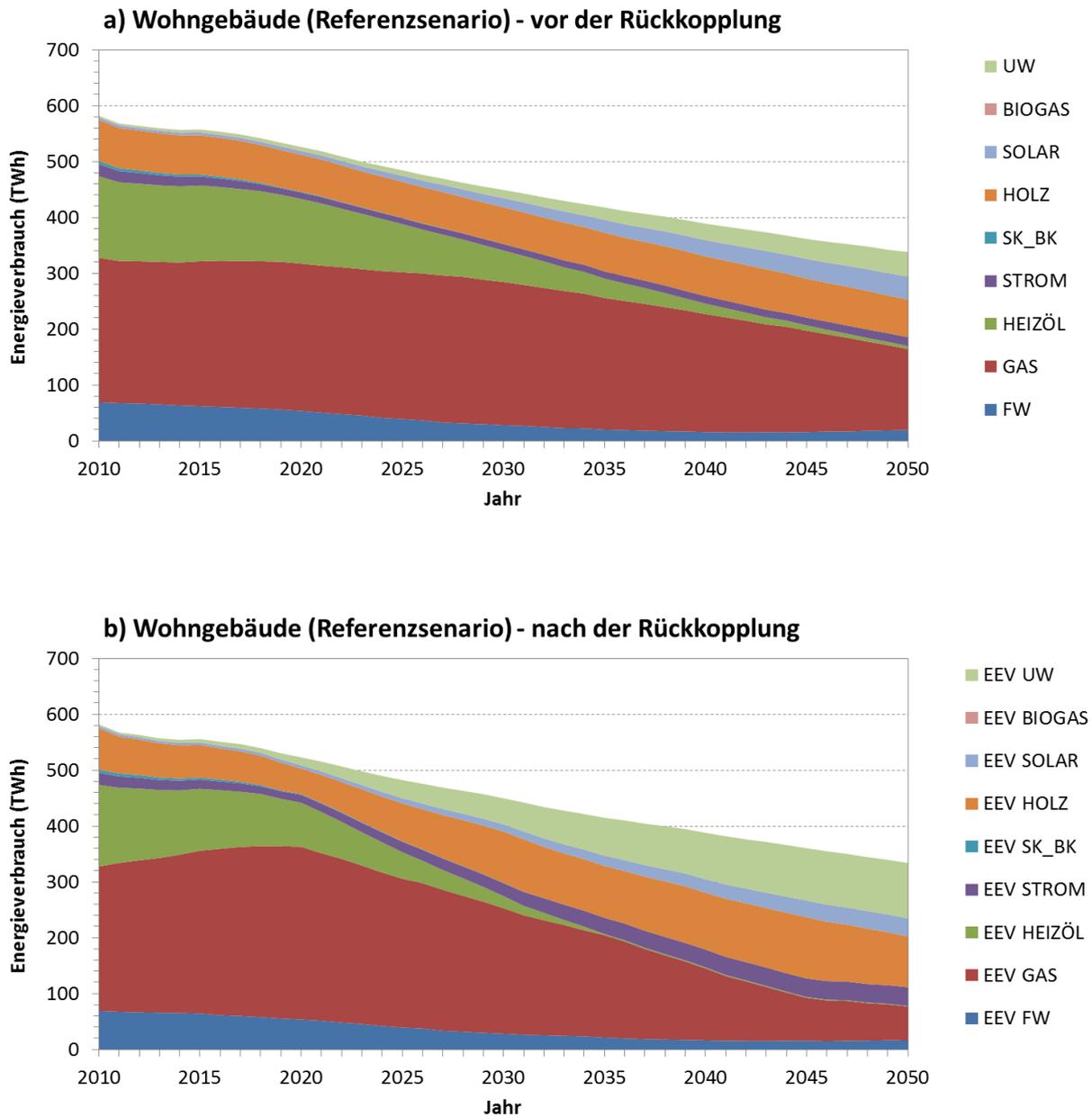
Diese Prozedur wird wiederholt, bis die Pools für die Energieträger ausgeglichen sind.

3.3.3. Beispielhafte Darstellung der Energieträgerverteilung vor und nach der Rückkopplung von Building-STAR an PowerFlex

In diesem Abschnitt wird beispielhaft für Wohngebäude im Referenzszenario der Effekt der Rückkopplung zwischen Building-STAR und PowerFlex dargestellt. In Abbildung 3-7 a ist die Verteilung der Energieträger aufgetragen. Auf Basis der Einstellungen in Building-STAR (ohne Kostenoptimierung) bleibt die Wärmenachfrage an Holz etwa konstant, wohingegen die Wärmenachfrage an Heizöl stark und an Gas und Fernwärme moderat abnehmen. Für die Wärmenachfrage an Umweltwärme und Solarthermie wird ein leichter Anstieg modelliert (Abbildung 3-7 a).

Im Rahmen der Rückkopplung zwischen Building-STAR und PowerFlex wird die Verteilung der Energieträger für Wohngebäude im Referenzszenario durch die Kostenoptimierung in PowerFlex deutlich verändert (Abbildung 3-7 b). So nimmt durch die Rückkopplung die Wärmenachfrage an Gas und Heizöl deutlich stärker ab, wohingegen die Wärmenachfrage an Holz und Umweltwärme stark ansteigt (Abbildung 3-7 b).

Abbildung 3-7: Energieträgerverteilung im Wohngebäudebestand vor und nach der Rückkopplung von PowerFlex und Building-Star



Quelle: Öko-Institut e.V.; FW = Fernwärme, GAS = Gas-Mix, STROM = Strom (inklusive Stromverbrauch für Wärmepumpen), SK_BK = Braunkohle, SOLAR = Solarthermie, UW = Umweltwärme (ohne Stromanteil für Wärmepumpen).

4. Auswertung und Interpretation der Modellierungsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Szenarienanalyse gezeigt, welche mit den Modellen PowerFlex und BuildingStar durchgeführt wurden. In Abschnitt 4.1 wird dargestellt, wie das begrenzte Biomasse-Potenzial auf die Sektoren Strom und Wärme aufgeteilt wird und welche sektor-spezifischen CO₂-Emissionen sich ergeben. In den folgenden beiden Abschnitten wird die spezifische Rolle der Biomasse im Wärmesektor (Abschnitt 4.2) und im Stromsektor (Abschnitt 4.3) diskutiert. In Abschnitt 4.4 werden die aus der Kopplung des Strom- und Wärmesektors resultierenden Wechselwirkungen erläutert. Abschließend werden in Abschnitt 4.5 die Ergebnisse der Biomasseallokation mit den Ergebnissen in anderen Studien verglichen und eingeordnet.

4.1. Aufteilung der Biomasse und des CO₂-Budgets auf den Strom- und Wärmesektor

4.1.1. Aufteilung der verfügbaren Biomasse

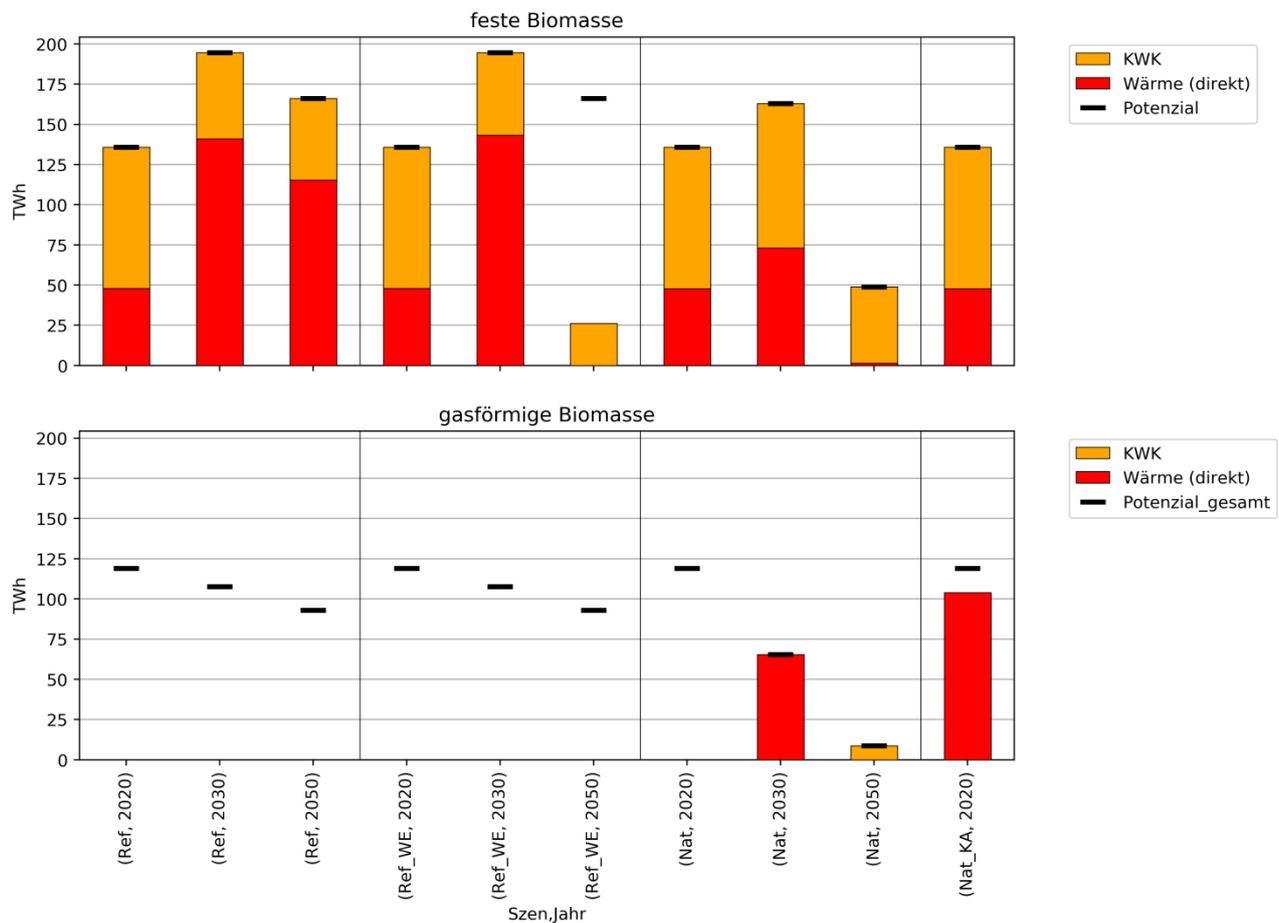
In diesem Abschnitt wird gezeigt, zu welchen Anteilen das begrenzte Biomasse-Potenzial unter den verschiedenen Rahmenbedingungen der Szenarienanalyse eingesetzt wird, und wie die Aufteilung auf den Strom- und Wärmesektor erfolgt.

4.1.1.1. Nutzung fester Biomasse

Das Potenzial zur Nutzung fester Biomasse wird in nahezu allen Szenarien und Stützjahren vollständig ausgeschöpft (Abbildung 4-1). Im Jahr 2020 fließt dabei der größte Teil der festen Biomasse in die Kraft-Wärmekopplung (ca. 70%). Im Jahr 2030 gewinnt die dezentrale Wärmeversorgung auf Holzbasis (Pellet-Heizungen) deutlich an Bedeutung. Langfristig (im Jahr 2050) unterscheidet sich das Nutzungsmuster innerhalb der Szenarien deutlich:

- Im Referenzszenario wird der weitaus größte Teil der festen Biomasse zur dezentralen Wärmeversorgung eingesetzt.
- Im Naturschutzszenario ist das verfügbare Biomasse-Potenzial (auf Grund von Nachhaltigkeitsanforderungen und der erhöhten Nachfrage im Verkehrssektor) deutlich reduziert. Die verfügbare feste Biomasse wird in dem Szenario fast ausschließlich zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme genutzt.

Im Referenzszenario-Wärmeeffizienz wird in 2050 die Nutzung von fester Biomasse zur Strom- und Wärmeerzeugung fast auf Null reduziert. Hier kommen zwei Effekte zur Geltung: Zum einen ist – bei gleichen CO₂-Budget – die Wärmenachfrage geringer als im Referenzszenario. Zum anderen ist ein deutlich größerer Anteil des Gebäudebestands so gut gedämmt, dass dort Wärmepumpen zur Wärmeversorgung eingesetzt werden können. Vor allem letzteres führt dazu, dass im Bereich der direkten Wärmeversorgung feste Biomasse als Energieträger vollständig verdrängt wird (siehe auch Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4).

Abbildung 4-1: Einsatz des Potenzials für feste und gasförmige Biomasse


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.1.1.2. Nutzung von Biogas und Biomethan

Auf Grund der deutlich höheren Brennstoffkosten werden Biogas und Biomethan weniger stark eingesetzt als feste Biomasse (Abbildung 4-1). Gasförmige Biomasse wird im Referenzszenario und im Referenzszenario-Wärmeeffizienz überhaupt nicht eingesetzt.

Von gasförmiger Biomasse werden lediglich in den Naturschutzszenarien in den Jahren 2030 und 2050 die verfügbaren Potenziale vollständig genutzt. Im Jahr 2020 tritt nur dann eine deutliche Nutzung von Biogas und Biomethan auf, wenn durch einen beschleunigten Kohleausstieg ein erhöhter Bedarf an CO₂-freien Energieträgern entsteht. Der weitaus größte Teil der Nutzung erfolgt mittels Biomethankesseln in der direkten Wärmeerzeugung. In der Modellierung wurden allerdings Trägheiten, die durch den erforderlichen Ausbau der Infrastruktur zur Bereitstellung von Biomethan verursacht werden, nicht berücksichtigt. Dies führt zu einem ausgesprochen schnellen Ausbau der Nutzung von Biomethankesseln im Naturschutzszenario mit beschleunigtem Kohleausstieg (ca. 100 TWh Brennstoffeinsatz in 2020), der in der Realität nur schwer umzusetzen sein würde.

Andererseits wird die Stromerzeugung aus Biogas, wie sie im Moment und gefördert durch das EEG stattfindet, im Modell nicht exogen fortgeschrieben. Aus diesem Grund ergibt sich ein Bruch zwischen der heutigen Situation und der modellendogenen Allokation für gasförmige Biomasse. In

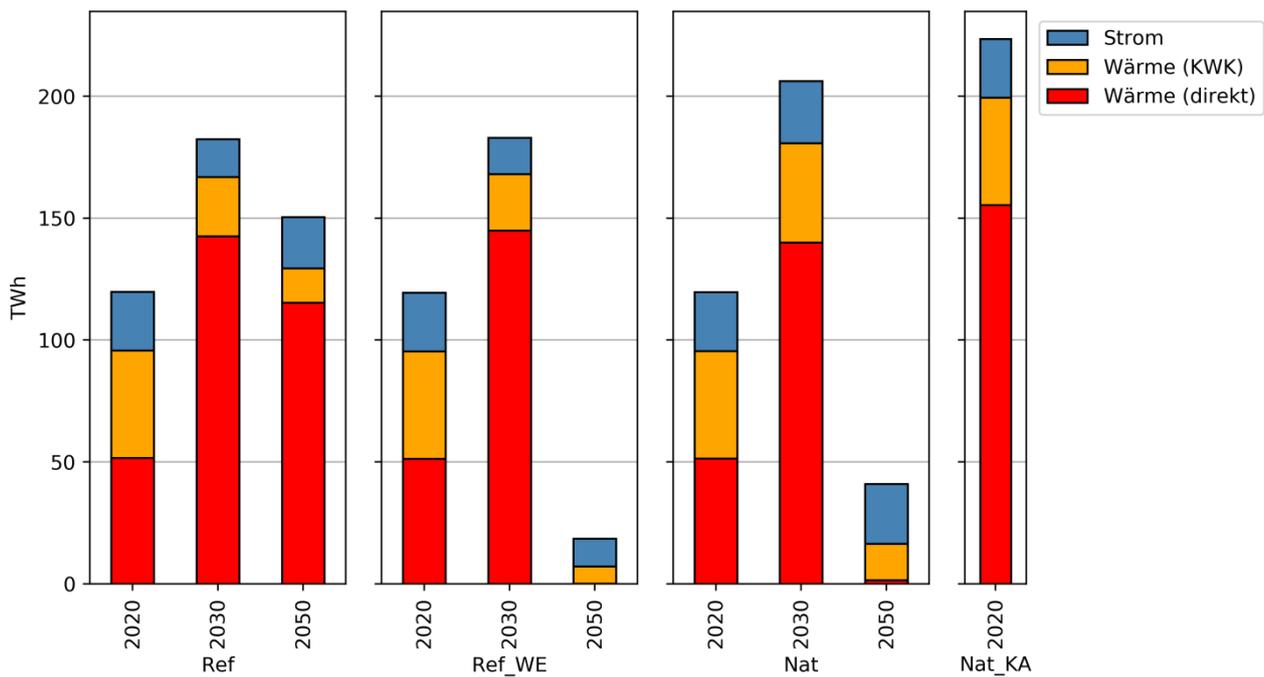
der Realität werden die Biogasanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung solange weiterbetrieben, wie sie eine ausreichende Förderung erhalten.

4.1.1.3. Sektorale Aufteilung der Biomasse-Nutzung

Abbildung 4-2 zeigt, in welchem Umfang Biomasse zur Bereitstellung von Strom und Wärme genutzt wird. Wärme kann dabei entweder direkt (durch Holz- oder Biomethankessel) oder in KWK-Anlagen (Holz-HKW oder Biogas-BHKW) bereitgestellt werden. Strom wird in jedem Fall in KWK-Anlagen erzeugt, wobei überschüssige Wärme auch ungenutzt an die Umgebung abgeführt werden kann.

In allen drei Szenarien nimmt die Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung im Laufe der Zeit ab und der größte Teil der Biomasse wird langfristig zur direkten Wärmeerzeugung genutzt. Der bevorzugte Einsatz von Biomasse zur direkten Wärmeerzeugung ist darauf zurückzuführen, dass die Potenziale für den Einsatz von Solarthermie und Wärmepumpen als CO₂-freie Alternativen ebenfalls begrenzt sind (vgl. Abschnitt 3.2.3). Die einzige Ausnahme bildet hier das Naturschutzszenario im Jahr 2050. Hier führt der große Anteil fluktuierender Erneuerbarer Stromerzeugung zu einer erhöhten Nachfrage nach flexibler Erzeugungsleistung im Stromsektor, die teilweise durch Biomasse-KWK-Anlagen gedeckt wird.

Abbildung 4-2: Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse



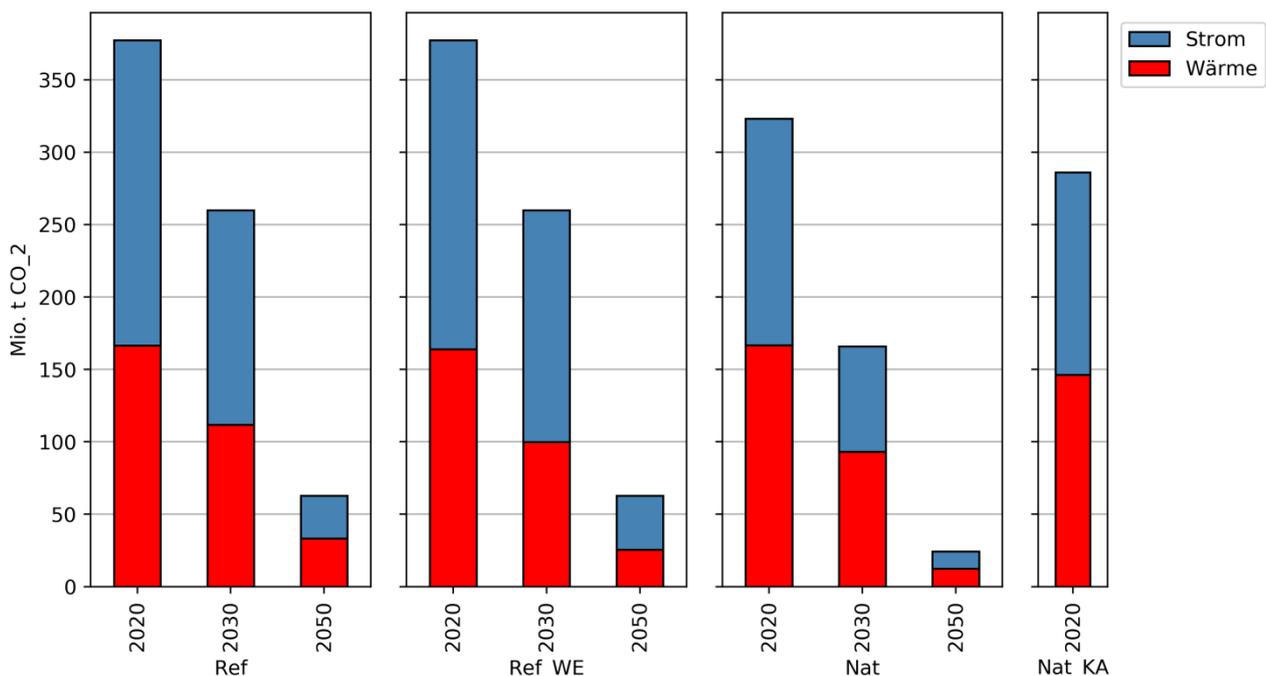
Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.1.2. Aufteilung des CO₂-Budgets

Im Rahmen der Szenarienanalyse wird für jedes Szenario ein gemeinsames CO₂-Budgets für den Strom- und Wärmesektor definiert. Die (kostenoptimale) Allokation dieses Budgets auf die beiden Sektoren ist Ergebnis der Modellierung. Die sektorale Aufteilung der Emissionen ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Die Emissionen, welche durch den Einsatz von Wärmepumpen und Heizstäben entstehen, werden dabei vollständig dem Stromsektor zugewiesen (Quellprinzip). Die Aufteilung der CO₂-Emissionen, die durch den Betrieb von KWK-Anlagen verursacht werden, werden gemäß der finnischen Methode auf den Strom- und Wärmesektor aufgeteilt (Mauch et al. 2010) (AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) 2015).

In beiden Sektoren finden Emissionsminderungen statt, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß: Im Jahr 2020 entfallen 56 % der gesamten CO₂-Emissionen auf den Stromsektor. Bis zum Jahr 2050 kehrt sich dieses Verhältnis im Referenzszenario und Naturschutzszenario um. Lediglich im Referenzszenario-Wärmeeffizienz bleibt der Stromsektor der Hauptemittent, da aufgrund der hohen energetischen Gebäudesanierung bei gleichzeitig gleichbleibendem sektorübergreifenden CO₂-Emissionsbudget der Stromsektor mehr emittieren kann.

Abbildung 4-3: CO₂-Emissionen in Strom- und Wärmesektor



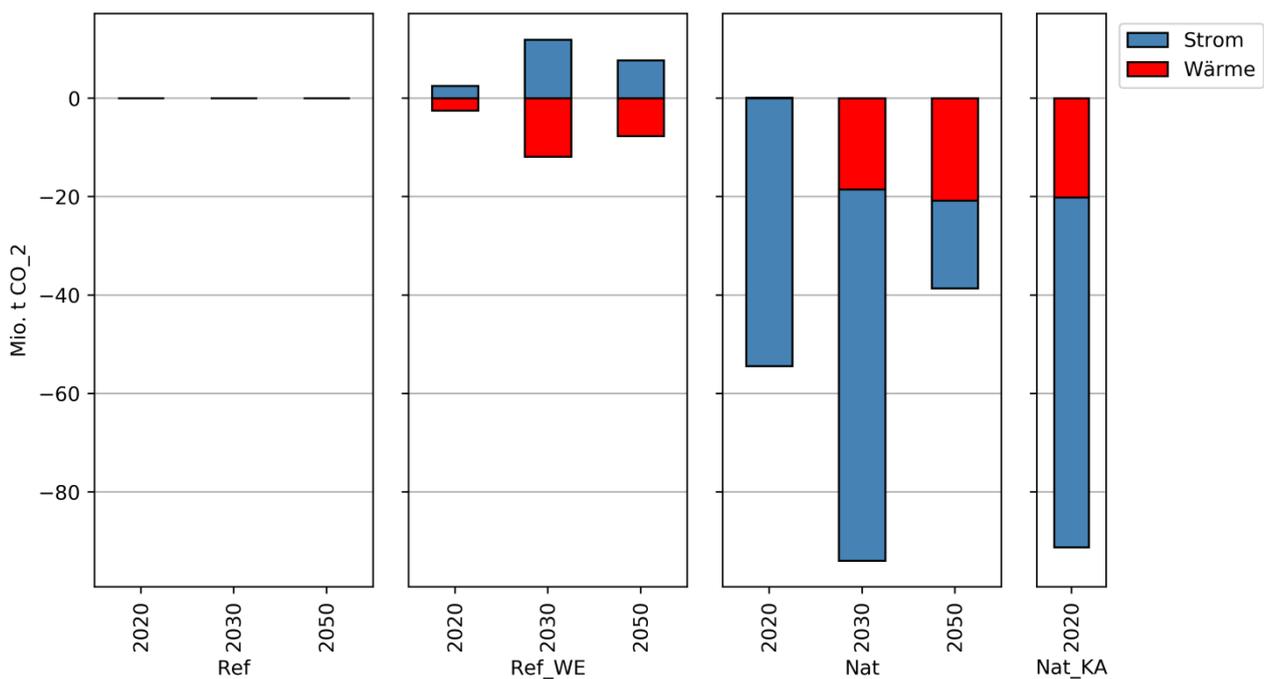
Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-4 zeigt, wie die CO₂-Emissionen der verschiedenen Szenarien sich von den Emissionen im Referenzszenario unterscheiden. Nicht überraschend sind die deutlichen zusätzlichen Emissionsminderungen im Naturschutzszenario. Diese werden in 2020 und 2030 zum weitaus überwiegenden Teil im Stromsektor erbracht. Im Jahr 2050 leistet dann auch der Wärmesektor einen deutlichen Beitrag zur zusätzlichen Emissionsminderung gegenüber dem Referenzszenario.

Im Referenzszenario-Wärmeeffizienz lässt sich erkennen, dass eine Verbesserung der Wärmeeffizienz ohne Anpassung des CO₂-Budgets zu einer Verlagerung der Emissionen vom Wärmesektor in den Stromsektor führt. Dieser Effekt ist im Jahr 2030 besonders ausgeprägt – hier emittiert der Stromsektor ca. 12 Mio. t CO₂ mehr als im Referenzszenario (Abbildung 4-4).

Im Naturschutzszenario-Kohleausstieg zeigt sich hingegen, dass durch die Verschärfung des CO₂-Minderungsziels beide Sektoren zusätzliche Emissionsminderungen erbringen müssen. Wie auch im Naturschutzszenario 2030 zu sehen, trägt der Stromsektor dabei überproportional stark zur zusätzlichen CO₂-Minderung bei.

Abbildung 4-4: CO₂-Emissionen: Differenzen zum Referenzszenario



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Ebenfalls Ergebnis der Modellierung sind die in Abbildung 4-5 dargestellten CO₂-Preise. Diese Preise sind nur eingeschränkt mit den Preisen für Emissionszertifikate im Europäischen Emissionshandelssystem (ETF) zu vergleichen, da am ETF europaweit in erster Linie große Emittenten aus dem Energiesektor und der Industrie beteiligt sind. In der Modellierung wird hingegen nur der Stromsektor in Deutschland als Teil des ETF und zusätzlich auch der Wärmesektor in Deutschland berücksichtigt.⁷ Nichtsdestotrotz können sie als Indikator für das Ausmaß des finanziellen Anreizes sein, der erforderlich ist, um Emissionsminderungen in dem hier gezeigten Umfang anzureizen.

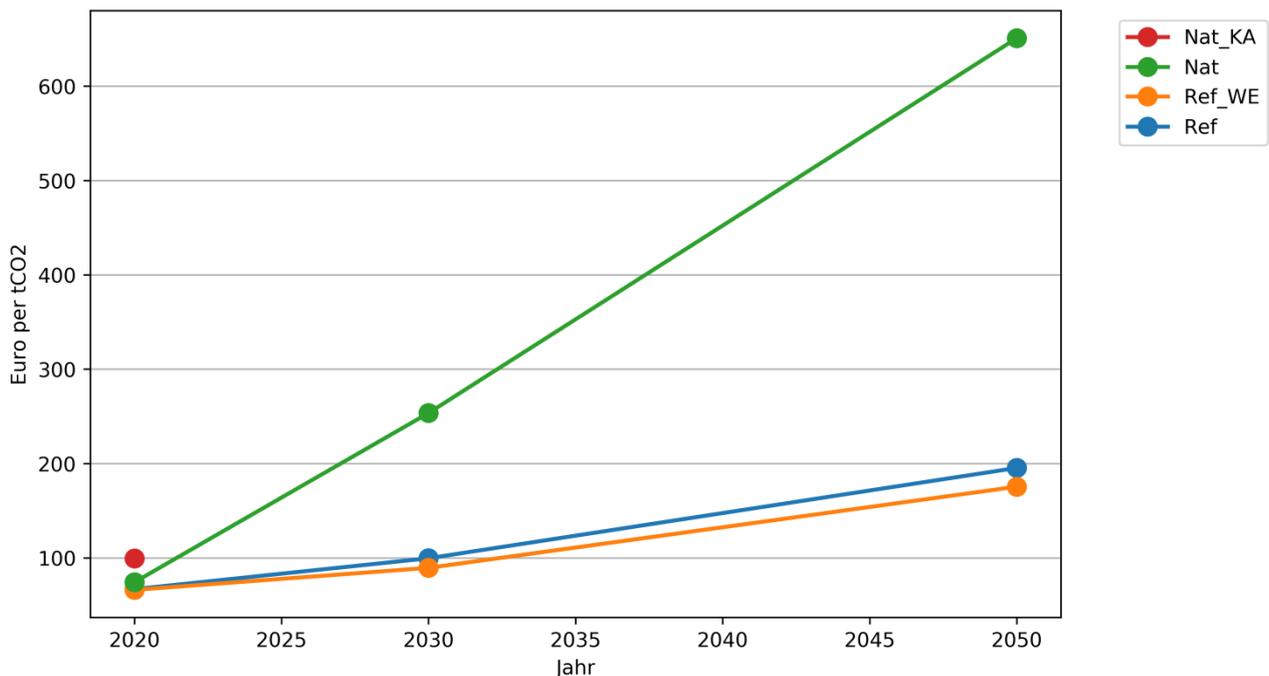
Die CO₂-Preise liegen in 2020 für alle Szenarien bei ca. 65 €/t CO₂. Im Referenzszenario und Referenzszenario-Wärmeeffizienz steigen sie bis 2050 auf ca. 200 €/t CO₂. Die Differenz zwischen beiden Szenarien (in 2050 liegen die Preise im Referenzszenario-Wärmeeffizienz ca. 10 €/t CO₂ unter dem Referenzszenario) spiegeln wider, dass das in beiden Szenarien identische CO₂-Budget

⁷ In einem perfekt funktionierenden Strom- und Wärmesektor umfassenden Markt wäre dies der Zertifikatspreis – oder die äquivalente CO₂-Steuer, die zu einer Minderung der CO₂-Emissionen in dem oben gezeigten Umfang führen würde.

im Effizienz-Szenario auf Grund der niedrigeren Wärmenachfrage mit weniger Aufwand einzuhalten ist.

Im Naturschutzszenario ist der Anstieg der CO₂-Preise – auf Grund der weitaus ambitionierteren CO₂-Minderungsziele – deutlich stärker ausgeprägt. Ein beschleunigter Kohleausstieg (Szenario Nat_KA) führt im Jahr 2020 ebenfalls zu erhöhten CO₂-Preisen von ca. 100 €/t CO₂.

Abbildung 4-5: CO₂-Preise



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.2. Rolle der Biomasse im Wärmesektor

Im Folgenden wird erläutert, welche Erzeugungsoptionen für die Deckung der Wärmenachfrage in den verschiedenen Szenarien genutzt werden, und welche Rolle die Biomasse im Erzeugungsmix spielt.

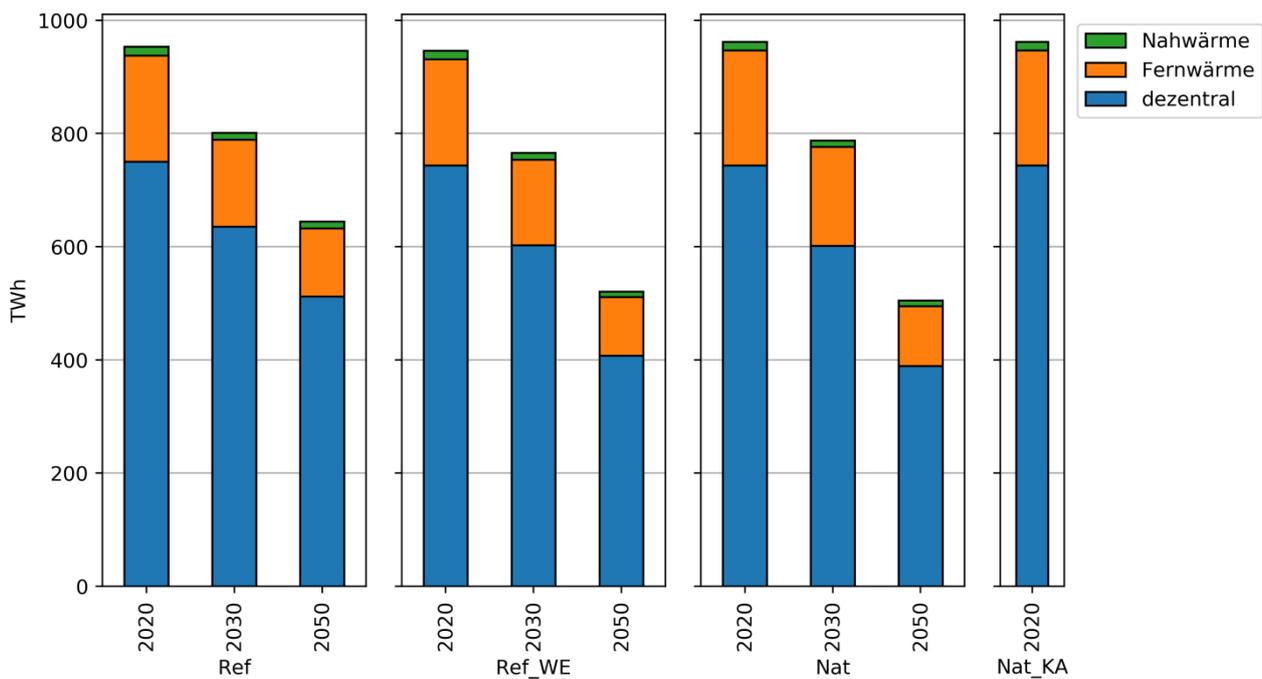
4.2.1. Wärmemix gesamt

Im Jahr 2020 werden in Deutschland etwa 950 TWh an Wärme nachgefragt. Im Referenzszenario sinkt die Wärmenachfrage bis 2050 auf ca. 645 TWh. Im Referenzszenario-Wärmeeffizienz und im Naturschutzszenario fällt diese Abnahme auf ca. 525 TWh bzw. 510 TWh aufgrund der höheren Wärmeeffizienz in Gebäuden deutlich stärker aus.

Abbildung 4-6 zeigt, dass die Wärmeversorgung zu einem großen Anteil auf eine dezentrale Wärmeversorgung und zu kleineren Anteilen auf Wärmenetze (Fernwärme und Nahwärme) entfällt. Im Fernwärmebalken ist auch Fernwärme für Industrieprozesse enthalten. Dabei entfallen beispielsweise im Referenzszenario etwa 65 % der gesamten Fernwärmenachfrage auf Industrieprozesse. In allen Szenarien zeigt sich die Tendenz, dass die relativen Anteile der wärmenetzgeführten

Wärmeversorgung über die Jahre leicht zugunsten von dezentralen Systemen abnimmt. Hierzu ist aber festzuhalten, dass der Einsatz an netzgebundener Wärme in Gebäuden nicht durch die kostenminimierende Modellierung in PowerFlex bestimmt wird, sondern ein Ergebnis der Annahmen zur Fortschreibung in Building-STAR ist.

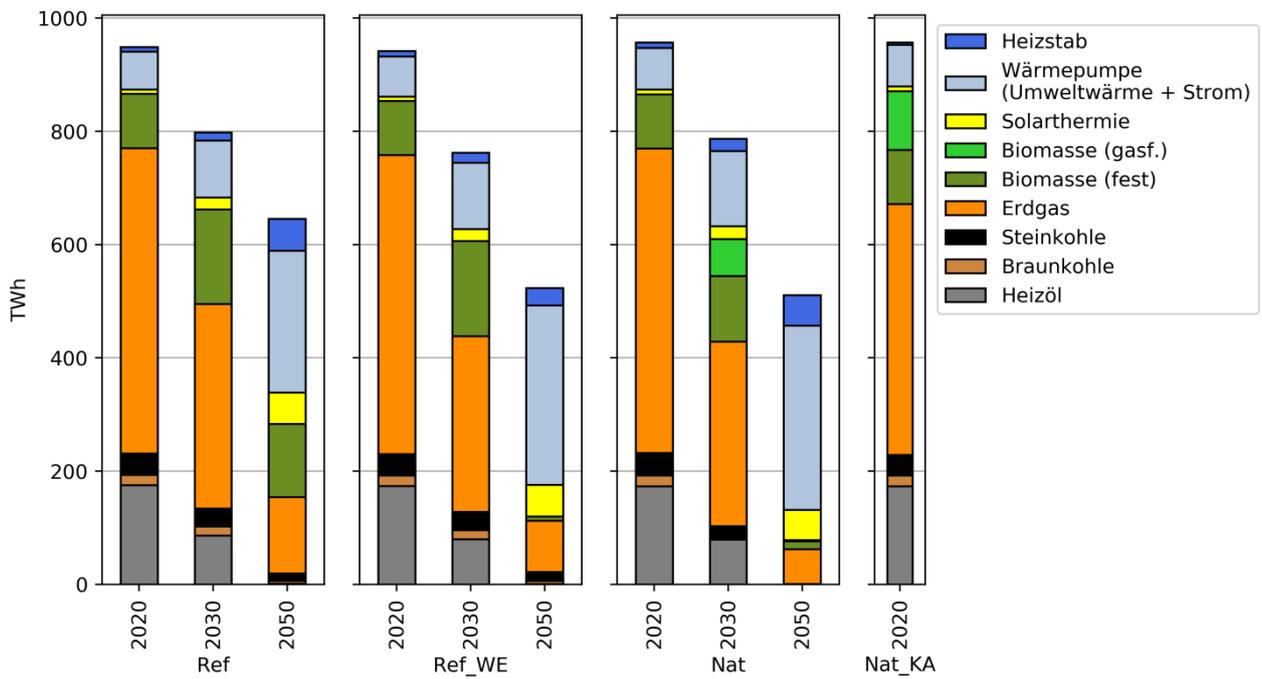
Abbildung 4-6: Aufteilung der Wärmeversorgung in Fernwärme, Nahwärme und dezentrale Wärmeversorgung



Im Hinblick auf den Energieträgermix zur Wärmeerzeugung zeigt sich – neben der generellen Abnahme des Wärmebedarfs – eine Abnahme der fossilen Energieträger Heizöl, Erdgas und Stein- und Braunkohle (Abbildung 4-7). Bis 2050 werden in allen Szenarien Heizöl und Braunkohle nicht mehr als Energieträger genutzt. Steinkohle tritt im Referenzszenario und im Referenzszenario-Wärmeeffizienz aber noch in geringen Mengen in der Fernwärme auf (Abbildung 4-11). Erdgas bleibt im Jahr 2050 in allen drei Szenarien im Energieträgermix erhalten, wobei die Mengen im Referenzszenario mit 135 TWh am höchsten und im Naturschutzszenario mit gut 60 TWh am niedrigsten sind (Abbildung 4-7, Abbildung 4-8).

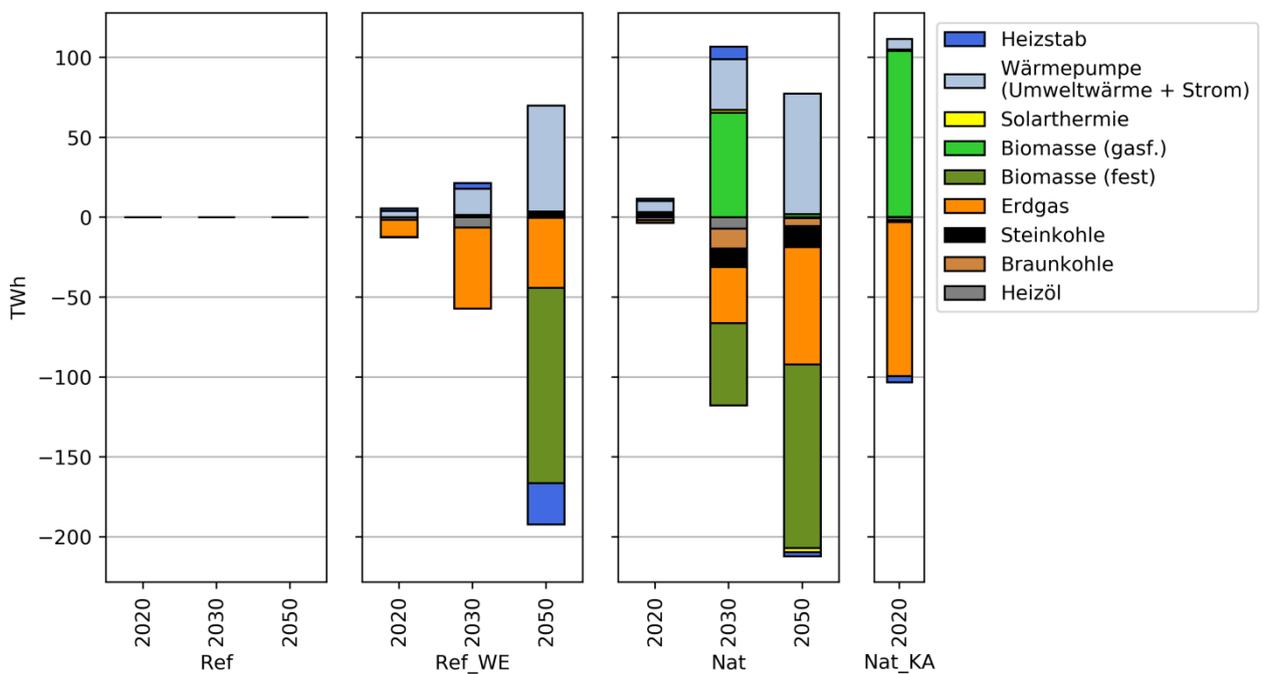
Parallel zur Abnahme an fossilen Energieträgern steigt der Anteil an erneuerbaren Energieträgern im Wärmemix. In allen drei Szenarien spielt dabei die Zunahme an Wärmepumpen eine wichtige Rolle (Abbildung 4-7), sie fällt aber im Referenzszenario geringer als in den anderen beiden Szenarien aus (Abbildung 4-8), da das niedrigere Dämmniveau im Referenzszenario in einer größeren Zahl an Gebäuden keine Wärmepumpen zulässt (vgl. Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4). Die Nutzung von Solarthermie nimmt ebenfalls in allen drei Szenarien kontinuierlich zu und erreicht in 2050 ca. 55 TWh. Der Einsatz von Strom zur Wärmeerzeugung (inkl. dem Strombedarf für Wärmepumpen) erhöht sich in allen drei Szenarien bis zum Jahr 2050, liegt aber im Referenzszenario-Wärmeeffizienz bei niedrigeren Werten als in den anderen beiden Szenarien (Abbildung 4-7, Abbildung 4-8).

Abbildung 4-7: Erzeugungsmix Wärme (gesamt)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-8: Erzeugungsmix Wärme gesamt (Differenz zum Referenzszenario)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Der Einsatz von fester Biomasse zur Wärmeerzeugung steigt im Referenzszenario bis zum Jahr 2030 deutlich an und nimmt im Jahr 2050 wieder leicht ab (Abbildung 4-7). Hingegen spielt die feste Biomasse im Referenzszenario-Wärmeeffizienz und im Naturschutzszenario für die Wärmebereitstellung im Jahr 2050 nur eine untergeordnete Rolle (siehe Abbildung 4-7, Abbildung 4-8 und Erläuterungen in Abschnitt 4.1.1.1). Gasförmige Biomasse kommt für die Wärmeerzeugung nur im Naturschutzszenario im Jahr 2030 und im Naturschutzszenario-Kohleausstieg zum Einsatz (siehe Abbildung 4-7, Abbildung 4-8 und Erläuterungen in Abschnitt 4.1.1.2).

4.2.2. Dezentrale Wärmeversorgung

Da die dezentrale Wärmeversorgung von Gebäuden einen großen Anteil im Wärmesektor einnimmt, folgt die Entwicklung der dezentralen Wärmeversorgung den in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Trends für den gesamten Wärmemix. So nehmen – bei einer generellen Abnahme der Wärmenachfrage – fossile Energieträger bis 2050 auch in der dezentralen Wärmeversorgung stark ab. Heizöl und Steinkohle werden bis 2050 nicht mehr, Erdgas nur noch in kleinen Mengen verwendet (Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10). Erneuerbare Energieträger nehmen deutlich zu, wobei Wärmepumpen im Jahr 2050 in allen drei Szenarien die dezentrale Wärmeversorgung dominieren (vgl. Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10).

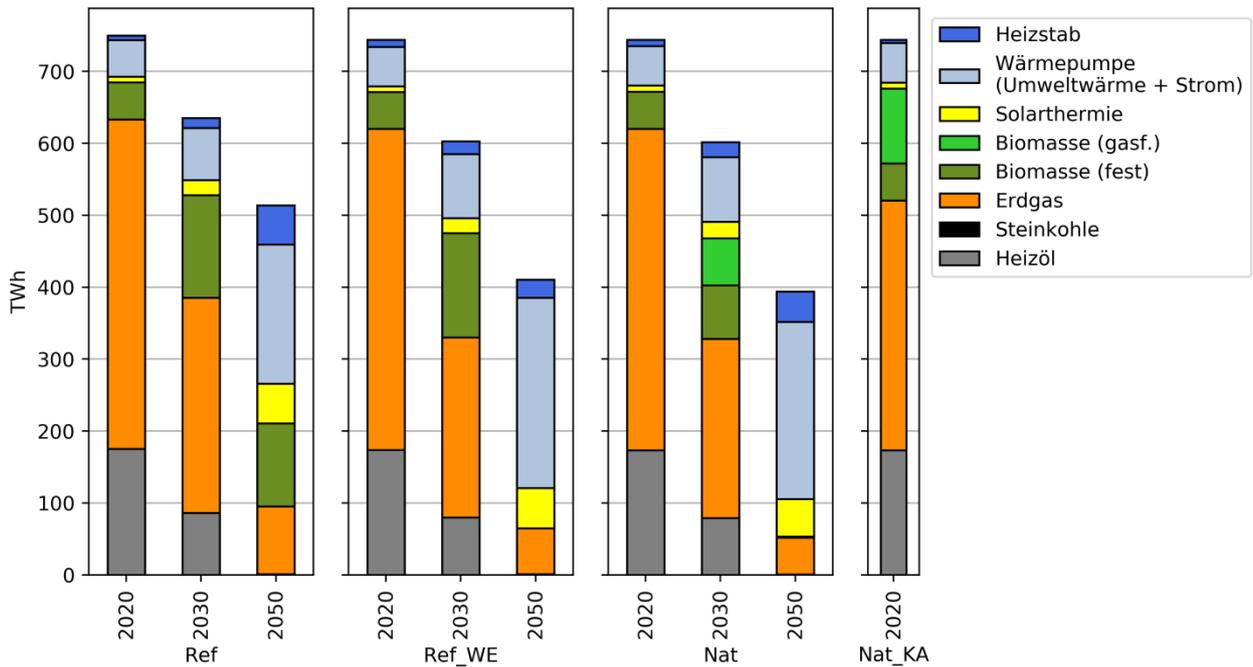
Im Hinblick auf den Einsatz von Biomasse für die dezentrale Wärmeversorgung zeigt sich im Referenzszenario, dass feste Biomasse bis zum Jahr 2030 auf einen Wert von gut 140 TWh zunimmt. Bis 2050 sinkt dieser Wert zwar leicht auf 115 TWh ab. Der relative Anteil von Biomasse an der dezentralen Wärmeerzeugung ist jedoch vergleichsweise hoch (Abbildung 4-9). In Referenzszenario-Wärmeeffizienz nimmt die Verwendung von Holz bis zum Jahr 2030 in gleicher Weise zu wie im Referenzszenario. Allerdings geht sie anschließend bis zum Jahr 2050 auf einen sehr niedrigen Wert knapp über Null zurück. Im Naturschutzszenario ist eine ähnliche Entwicklung wie im Referenzszenario-Wärmeeffizienz mit sehr niedrigen Werten an fester Biomasse in der dezentralen Wärmeversorgung zu beobachten. Im Jahr 2030 wird im Naturschutzszenario mit 140 TWh eine ähnliche Menge an Biomasse für die dezentrale Wärmeversorgung wie im Referenzszenario und im Referenzszenario-Wärmeeffizienz eingesetzt, allerdings mit 75 TWh fester und 65 TWh gasförmiger Biomasse anstatt ausschließlich mit fester Biomasse. Gasförmige Biomasse spielt auch im Jahr 2020 im Naturschutzszenario-Kohleausstieg mit gut 100 TWh eine bedeutende Rolle (Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10).

In den Modellergebnissen zum Energieträgermix in der dezentralen Wärmeversorgung zeigt sich zusammenfassend:

- Erneuerbare Energien verdrängen fossile Energieträger, um die CO₂-Minderung zu erreichen.
- Der Einsatz von Biomasse spielt dann eine Rolle, wenn der Sanierungsstand der Gebäude keinen ausreichenden Einsatz von Umweltwärme erlaubt (siehe auch Abschnitt 4.2.5).
- Gasförmige Biomasse kommt aufgrund hoher Brennstoffkosten nur zum Einsatz, wenn andere erneuerbare Alternativen zur CO₂-Minderung ausgeschöpft sind.

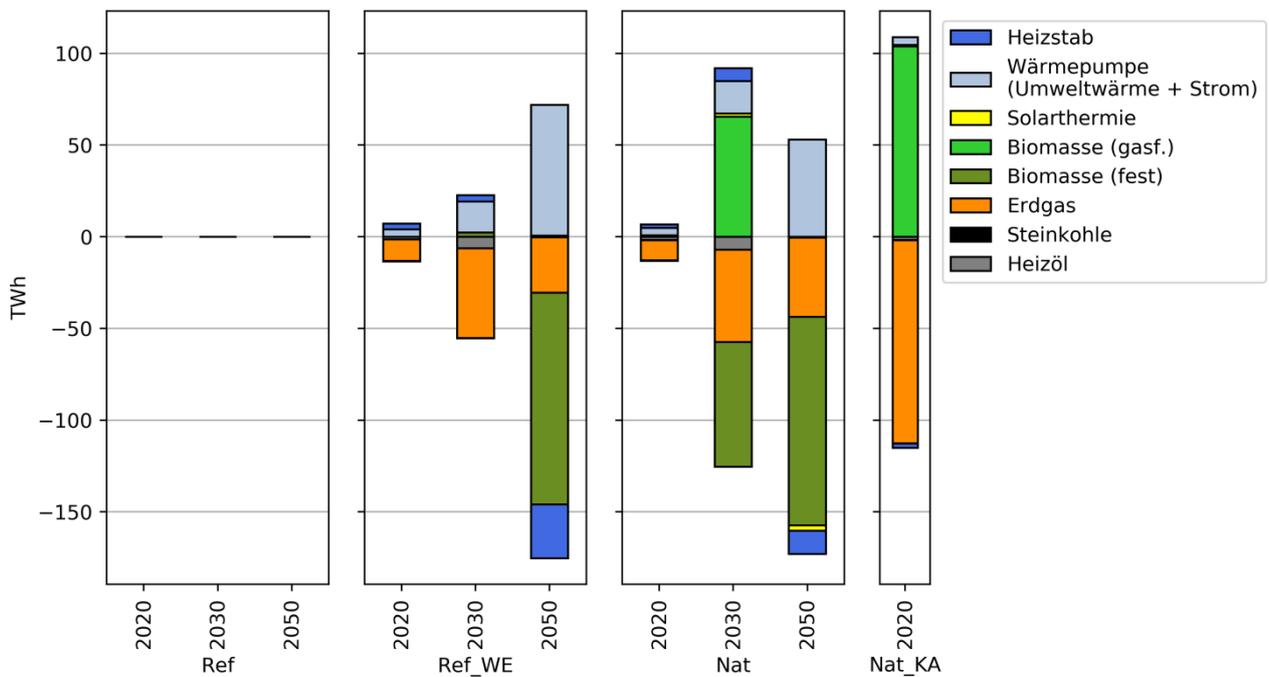
Somit stellt für den Gebäudesektor die Wärmeversorgung mit Biomasse eine Übergangstechnologie dar, bis ein ausreichender Wärmestandard erreicht ist.

Abbildung 4-9: Erzeugungsmix dezentrale Wärmeversorgung



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-10: Erzeugungsmix dezentrale Wärmeversorgung (Differenz zum Referenzszenario)



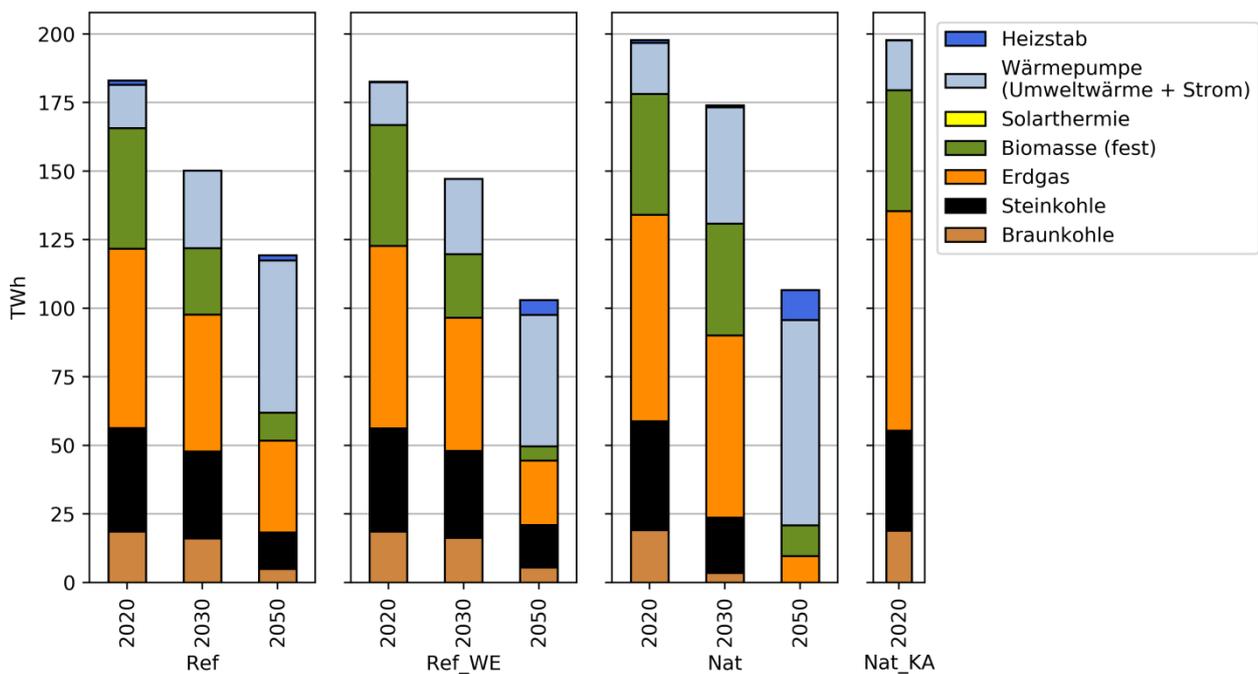
Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.2.3. Fernwärme

Im Jahr 2020 wird der Energieträgermix der Fernwärme stark von den fossilen Energieträgern Braun-, Steinkohle und Erdgas dominiert (Abbildung 4-11). Der Einsatz von fester Biomasse nimmt aber in allen Szenarien einen relativ hohen Anteil von knapp 25 % ein. Parallel zur Abnahme der Nachfrage nach Fernwärme verringert sich in allen drei Szenarien der Anteil an fossilen Energieträgern. Braun- und Steinkohle werden aber nur bei einem starken CO₂-Cap im Naturschutzszenario aus der Fernwärme im Jahr 2050 vollständig verdrängt. Auch der Einsatz von fester Biomasse geht dabei zurück und die entstehende Lücke wird über einen Anstieg an Umweltwärme aus Wärmepumpen und in 2050 auch zu kleinen Anteilen elektrischen Heizstäben, insbesondere im Naturschutzszenario, gedeckt (Abbildung 4-11). Eine Ausnahme ist das Jahr 2030 im Naturschutzszenario, in dem ein relativ hoher Anteil an fester Biomasse gegenüber dem Referenzszenario erhalten bleibt (Abbildung 4-11, Abbildung 4-12) und gleichzeitig der Anteil an fester Biomasse in der dezentralen Wärmeversorgung abnimmt (vgl. Abbildung 4-9).

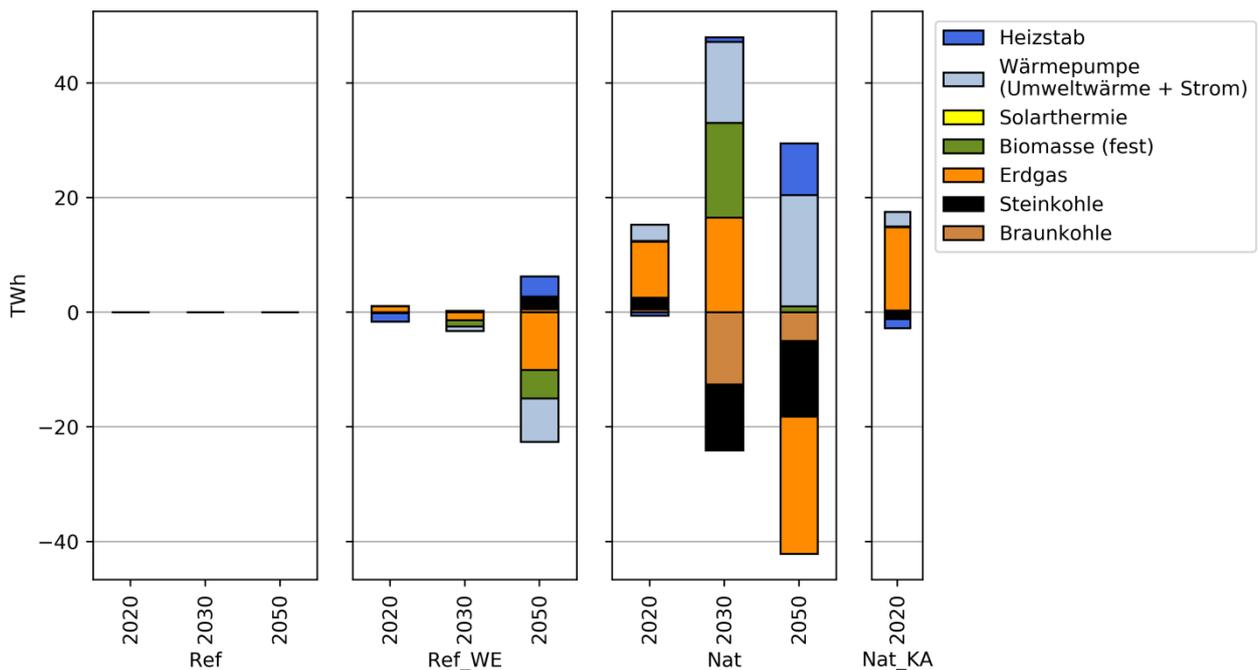
Gasförmige Biomasse kann nicht zur Wärmeerzeugung für Fernwärmenetze eingesetzt werden (vgl. Tabelle 3-1) und ist deshalb auch nicht im Fernwärmemix enthalten (Abbildung 4-11).

Abbildung 4-11: Erzeugungsmix Fernwärme



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-12: Erzeugungsmix Fernwärme (Differenz zum Referenzszenario)

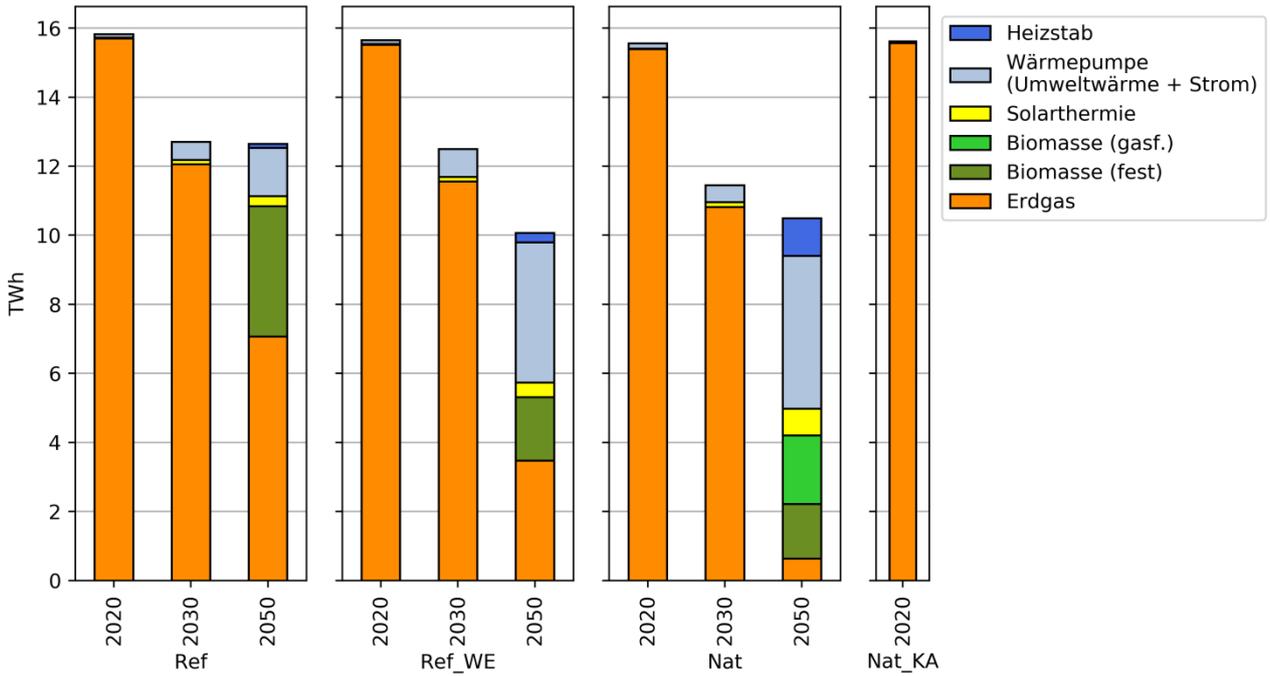


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.2.4. Nahwärme

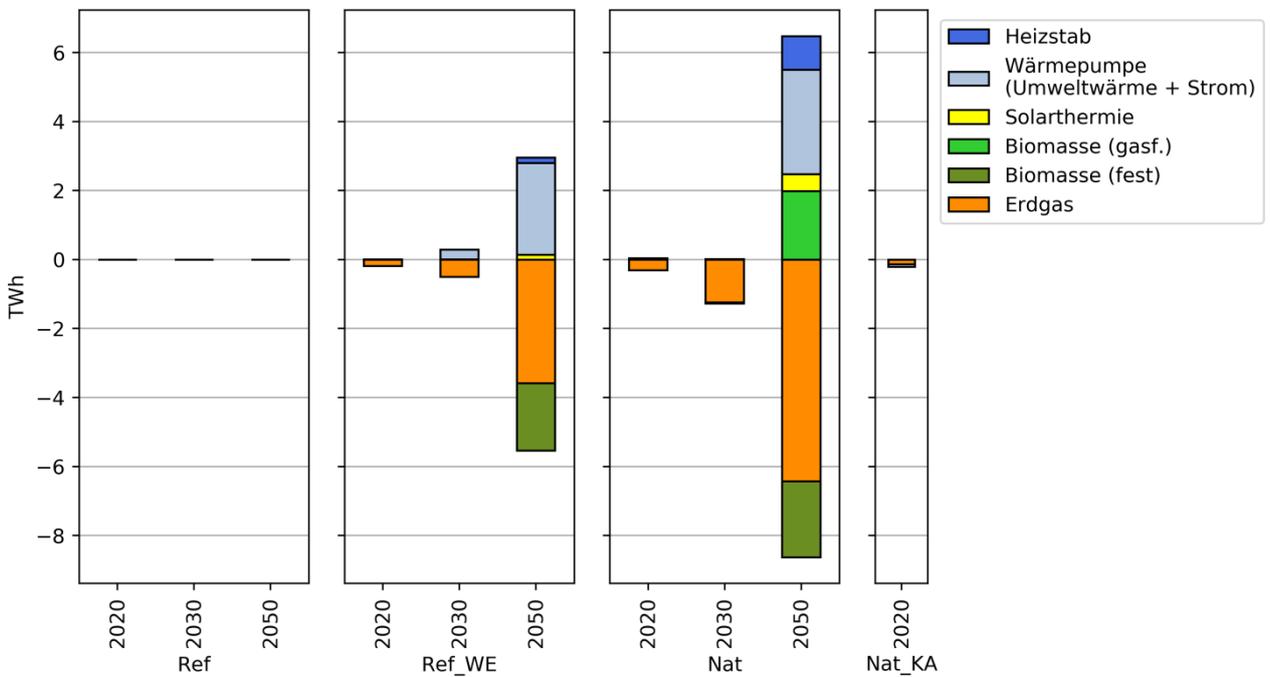
Die Nahwärme nimmt mit Werten unter 16 TWh einen nur kleinen Anteil im Wärmesektor ein. Zudem wird der Energieträgermix der Nahwärme stark vom Energieträger Erdgas dominiert (Abbildung 4-13). Erst im Jahr 2050 findet in den Szenarien eine relevante Verdrängung des Erdgases durch erneuerbare Energieträger statt. Im Referenzszenario im Jahr 2050 wird dies vor allem mit fester Biomasse erreicht, wo hingegen im Referenzszenario-Wärmeeffizienz die Umweltwärme anteilig bedeutender ist. Im Naturschutzszenario wird Erdgas im Jahr 2050 fast vollständig substituiert. Unter den erneuerbare Energieträgern wird Umweltwärme am häufigsten eingesetzt, aber auch feste und gasförmige Biomasse sowie Solarthermie und elektrische Heizstäbe sind mit mittleren bis kleinen Anteilen vertreten (Abbildung 4-13, Abbildung 4-14).

Abbildung 4-13: Erzeugungsmix Nahwärme



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-14: Erzeugungsmix Nahwärme (Differenz zum Referenzszenario)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.2.5. Einsatz der festen Biomasse in Abhängigkeit des energetischen Sanierungsniveaus der Gebäudehülle

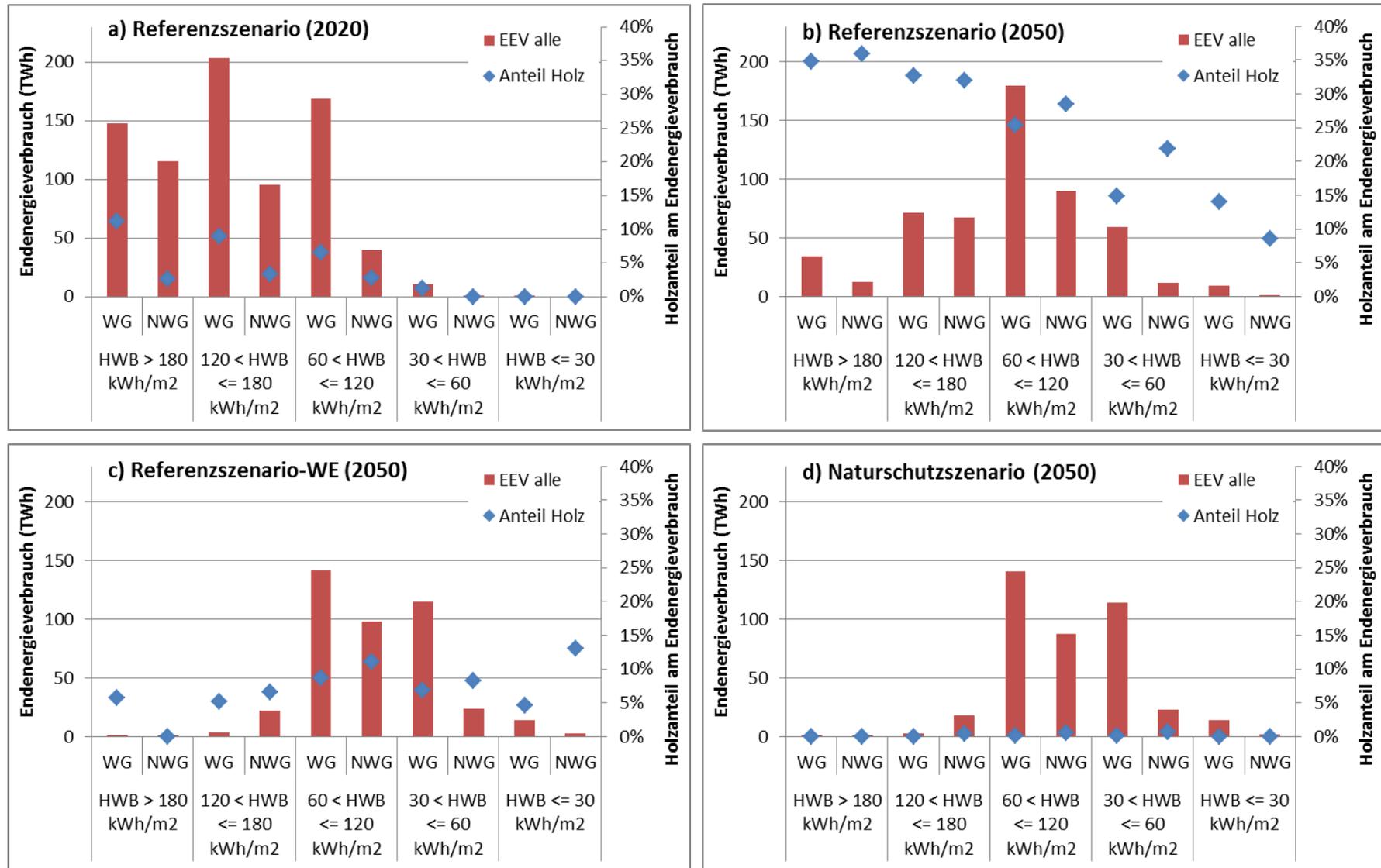
Im Gebäudebestand wird als Bioenergie vor allem feste Biomasse in den Szenarien eingesetzt (siehe oben). Wie in Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 in Abschnitt 3.2.3 dargestellt, verbessert sich das Sanierungsniveau der Gebäude im Zeitverlauf in Abhängigkeit von den Szenarienannahmen. Dabei steigt der Anteil an Gebäuden mit niedrigem Heizwärmebedarf im Naturschutzszenario und im Referenzszenario-Wärmeeffizienz deutlich stärker an als im Referenzszenario.

In Abbildung 4-15 a ist für das Referenzszenario dargestellt, wie sich der Endenergieverbrauch im Jahr 2020 in Abhängigkeit vom Heizwärmebedarf der Gebäude verteilt. In dieser Zeitscheibe weisen die meisten Gebäude einen Heizwärmebedarf von über 60 kWh/m²/a auf. Feste Biomasse wird mit einem höheren Prozentsatz in Wohngebäuden als in Nicht-Wohngebäuden eingesetzt. Zudem ist für Wohngebäude zu sehen, dass feste Biomasse mit einem höheren Anteil in schlechter gedämmten Gebäuden genutzt wird (Abbildung 4-15 a). Im Jahr 2020 unterscheiden sich die Ergebnisse für das Referenzszenario-Wärmeeffizienz und Naturschutzszenario nur geringfügig vom Referenzszenario (nicht dargestellt).

Im Referenzszenario steigt im Jahr 2050 der Anteil an besser gedämmten Gebäuden deutlich an, so dass der Endenergieverbrauch entsprechend in besser gedämmten Gebäuden ein Maximum einnimmt. Gleichzeitig ist aber zu sehen, dass feste Biomasse vermehrt in schlecht gedämmten Häusern eingesetzt wird, in denen z.B. Wärmepumpen aus technischen Gründen nicht zum Zuge kommen können (Abbildung 4-15 b). Dieser Effekt verringert sich deutlich im Referenzszenario-Wärmeeffizienz, da durch die verbesserte Wärmedämmung Wärmepumpen in deutlich mehr Gebäuden eingesetzt werden können (Abbildung 4-15 c). Im Naturschutzszenario (Abbildung 4-15 d) wird im Jahr 2050 kaum noch feste Biomasse als Energieträger zur dezentralen Wärmeerzeugung eingesetzt (vgl. Abbildung 4-9).

In ähnlicher Weise wie die feste Biomasse verhält sich der Anteil an Erdgas, der im Gebäudesektor eingesetzt wird (Daten nicht dargestellt).

Abbildung 4-15: Anteil der festen Biomasse in Abhängigkeit vom Sanierungsniveau der Gebäudehülle



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

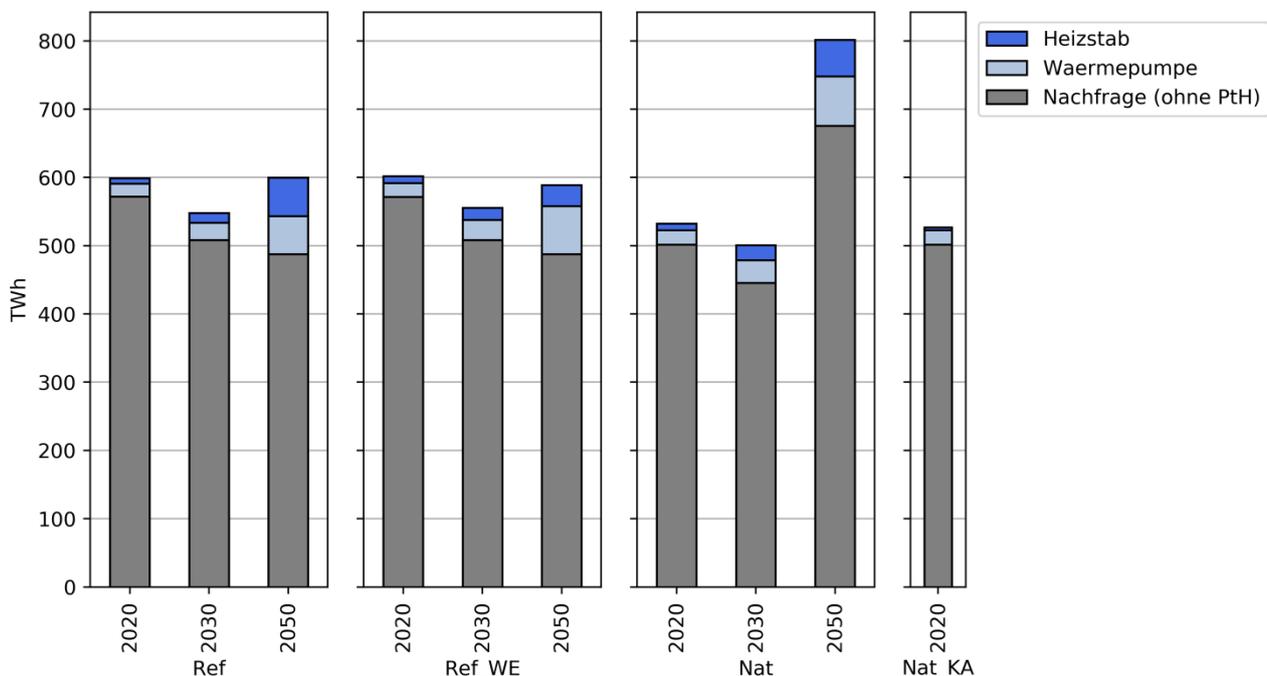
4.3. Rolle der Biomasse im Stromsektor

In diesem Abschnitt wird diskutiert, welche Rolle die Stromerzeugung auf Grundlage von Biomasse in den verschiedenen Szenarien spielt.

4.3.1. Stromnachfrage und Erzeugungsmix

In Abbildung 4-16 ist die Entwicklung der Stromnachfrage dargestellt. Die Stromnachfrage sinkt in allen Szenarien mittelfristig (bis 2030) auf Grund von Effizienzverbesserungen ab. Langfristig (bis 2050) ist ein deutlicher Anstieg der Nachfrage zu erkennen. Dies ist auf die wachsende Bedeutung neuer Stromnachfrager zurückzuführen, insbesondere der Elektrifizierung des Verkehrs- und Wärmesektors. Im Naturschutzszenario ist dieser Effekt besonders stark ausgeprägt. Die steigende Bedeutung neuer Stromnachfrager ist ein wichtiger Faktor, der zum starken langfristigen Anstieg der CO₂-Preise im Naturschutzszenario beiträgt (vgl. Abbildung 4-5). Die Stromnachfrage durch den Wärmesektor (Power-to-Heat) ist dabei Ergebnis der Modellierung. Sie liegt im Jahr 2020 bereits deutlich über historisch beobachteten Werten (ca. 25 TWh/a) und steigt bis 2050 auf 100-120 TWh/a an. Auf Grund der hohen Wirkungsgrade werden Wärmepumpen gegenüber direkter Wärmeherzeugung (Heizstäbe) bevorzugt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Im Referenzszenario-Wärmeeffizienz und im Naturschutzszenario ist der Stromverbrauch durch Wärmepumpen höher als im Referenzszenario. Dies ist auf den besseren Dämmstatus der Gebäude in diesen Szenarien zurückzuführen (vgl. Abschnitt 3.2.3 und 4.2).

Abbildung 4-16: Zusätzliche Stromnachfrage zur Wärmebereitstellung (Power-to-Heat)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut. PtH = Power to Heat (umfasst Strom für Wärmepumpen und die direkte Wärmewertzeugung (Heizstab)).

Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18 zeigen für alle Szenarien die jährliche Stromerzeugung je Energieträger. In allen Szenarien findet im Zeitverlauf eine Verdrängung fossiler Erzeugung (Braun- und Steinkohle sowie Erdgas) durch erneuerbare Energieträger (Wind- und Solarenergie) statt. Im Referenz- und Naturschutzszenario wird im Jahr 2050 vollständig auf die Nutzung von Braunkohle verzichtet. Im Naturschutzszenario erfolgt der Ausstieg aus der Braunkohlenutzung bereits zum Jahr 2030. Zusätzlich wird im Naturschutzszenario die Stromerzeugung durch Steinkohle bis 2050 auf Null reduziert. Erdgas wird in allen Szenarien auch langfristig nicht vollständig verdrängt. Im Referenzszenario-Wärmeeffizienz bleibt aufgrund des geringen CO₂-Caps auch in 2050 ein kleiner Anteil an Braunkohle im Strommix erhalten.

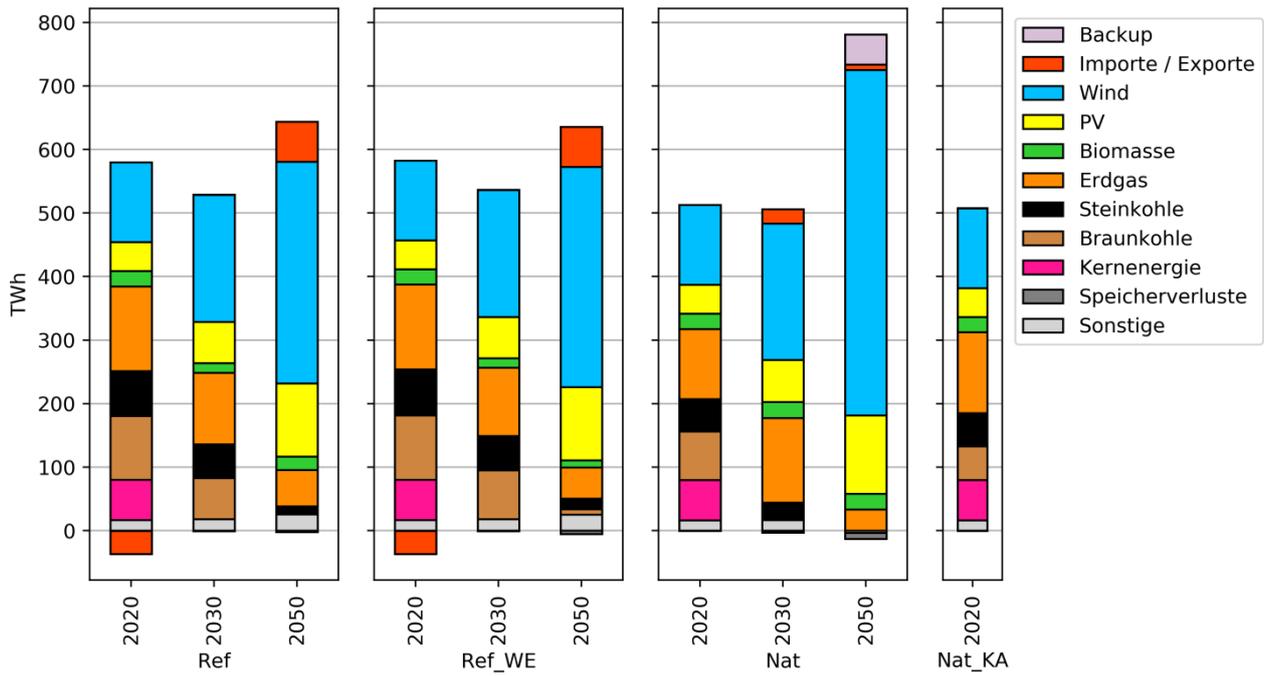
Die Bedeutung der Integration Deutschlands in den europäischen Netzverbund ändert sich ebenfalls im Zeitverlauf – in allen Szenarien wandelt sich Deutschland von Netto-Exporteur (2020) zum Netto-Importeur (2050). Importe und Exporte wurden in diesem Projekt nicht modellendogen berechnet, sondern exogen vorgegeben.

Im Naturschutzszenario wird im Jahr 2050 eine Nachfrage in Höhe von 47 TWh/a durch generisches Backup gedeckt. Dieser Bedarf könnte in der Realität durch zusätzliche Importe oder durch einen zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten gedeckt werden.⁸

Erneuerbare Energien spielen in allen drei Szenarien - insbesondere im Naturschutzszenario im Jahr 2050, die Windkraft und die Solarenergie - eine bedeutende Rolle. Auch Biomasse wird zur Stromerzeugung eingesetzt. Die erzeugte Strommenge ist dabei jedoch relativ klein (ca. 24 TWh/a in 2020) und sinkt im Referenzszenario-Wärmeeffizienz sogar weiter ab auf ca. 11 TWh/a in 2050. Die vorrangige Rolle der Biomasse im Stromsektor ist somit nicht die Bereitstellung von Arbeit, sondern von flexibel einsetzbarer Leistung. Diese These soll im nächsten Abschnitt diskutiert werden.

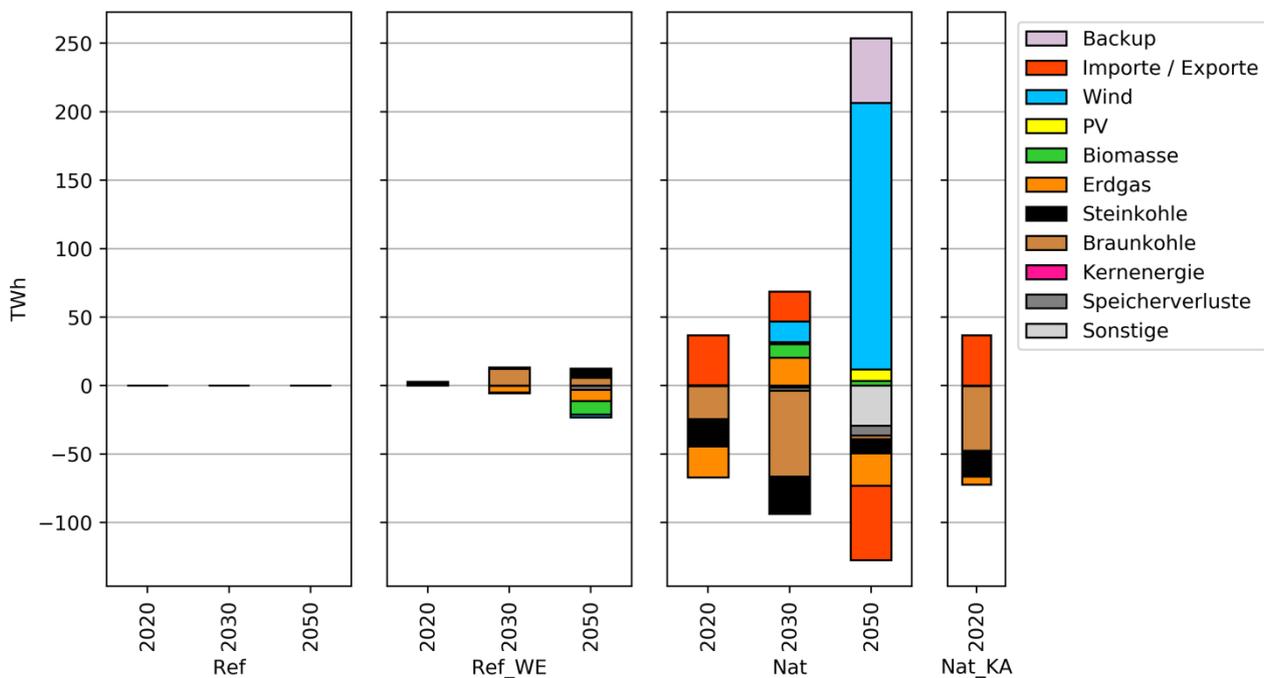
⁸ Vgl. Abschnitt 3.1.3 zur Abbildung von Backup in der Modellierung.

Abbildung 4-17: Erzeugungsmix Strom



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-18: Erzeugungsmix Strom (Differenz zum Referenzszenario)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.3.2. Biomasse als Flexibilitätsoption

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die auf Grundlage von Biomasse erzeugte Strommenge im gesamten Erzeugungsmix eine eher untergeordnete Rolle spielt. Von größerer Bedeutung ist jedoch die durch Biomasse-Anlagen bereitgestellt flexible Erzeugungsleistung, da die Erzeugungsleistung fluktuierender Energieträger (Wind und Photovoltaik) in allen Szenarien im Jahr 2050 deutlich ansteigt. Gleichzeitig sinkt maximal genutzte Leistung von Erdgas- und Kohle-Kraftwerken. (vgl. Abschnitt 4.3.1). Abbildung 4-19 zeigt für alle Szenarien die maximale steuerbare Erzeugungsleistung je Energieträger.⁹ Der steigende Bedarf an Flexibilität im System wird durch Importe, Speicher und durch Verstromung von Biomasse gedeckt. Die maximal genutzte Erzeugungsleistung auf Grundlage von Biomasse steigt von ca. 12GW in 2020 bis zum Jahr 2050 auf ca. 18 GW in Referenzszenario und Referenzszenario-Wärmeeffizienz bzw. auf 28 GW im Naturschutzszenario.

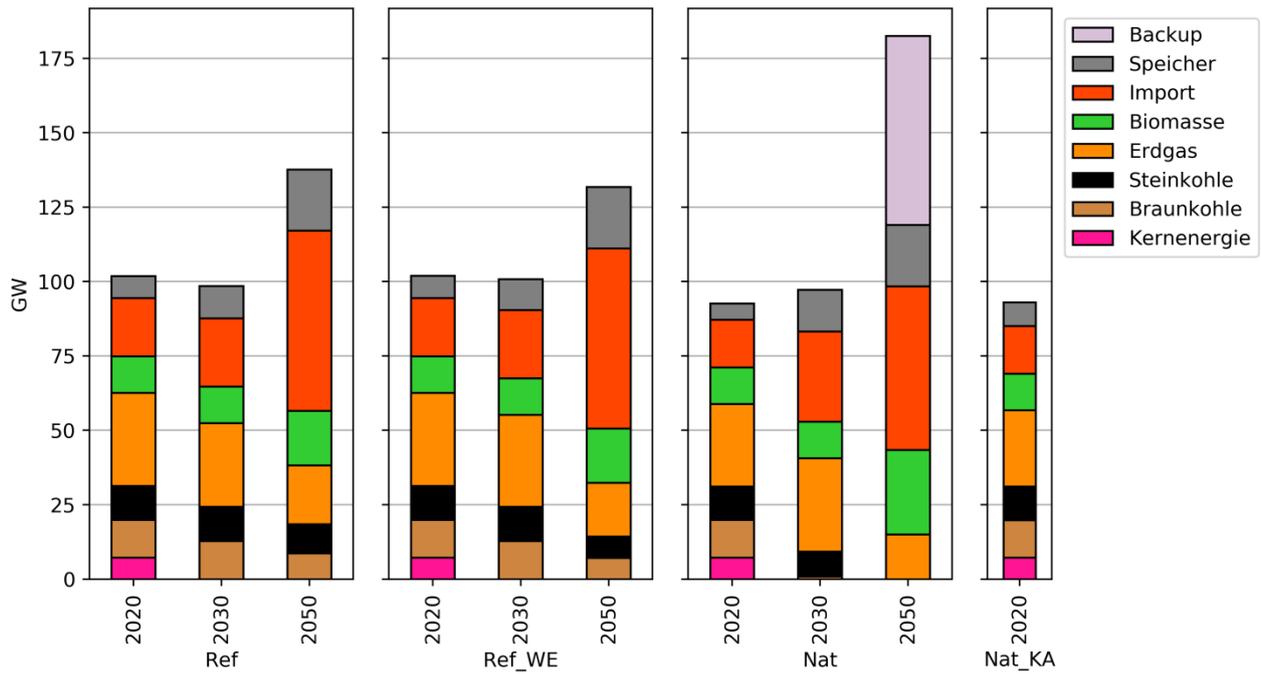
Im Naturschutzszenario wird im Jahr 2050 eine generische Backup-Leistung von max. 64 GW abgerufen (Abbildung 4-19). Diese Leistung könnte in der Realität durch zusätzliche Importe (inklusive dem Import von Biomasse) oder durch einen zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten bereitgestellt werden.¹⁰ Ein zusätzlicher Einsatz von inländischer Biomasse ist jedoch nicht möglich, da die verfügbaren Potenziale vollständig ausgeschöpft werden.

Während die maximal genutzte Erzeugungsleistung in Summe steigt, sinkt zugleich die Auslastung der Kraftwerke. In Abbildung 4-20 sind die Volllaststunden flexibel einsetzbarer Erzeuger dargestellt. Die Volllaststunden von Biomasse-Anlagen sinken von ca. 2.000 h in 2020 auf unter 1.000 h in 2050. Diese neue Rolle der Biomasse als Bereitsteller von Flexibilität unterscheidet sich deutlich von der aktuellen Situation, in der Biomasse-Anlagen, bedingt durch das Förderregime des EEG, im Dauerbetrieb eingesetzt werden.

⁹ Hier sind für jeden Energieträger die im Jahresverlauf maximalen Erzeugungsleistungen dargestellt. Diese Leistungen treten i.d.R. nicht zum gleichen Zeitpunkt auf.

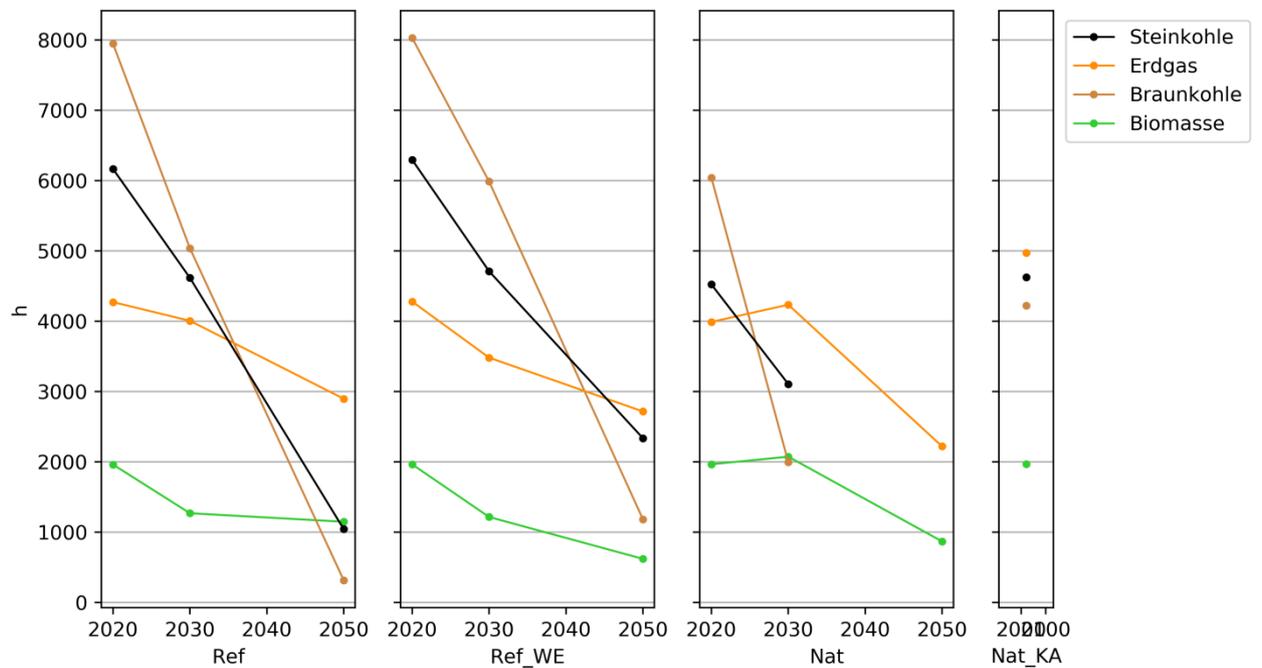
¹⁰ Vgl. Abschnitt 3.1.3 zur Abbildung von Backup in der Modellierung.

Abbildung 4-19: Maximal abgerufene steuerbare Erzeugungsleistung



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-20: Volllaststunden steuerbarer Kraftwerke

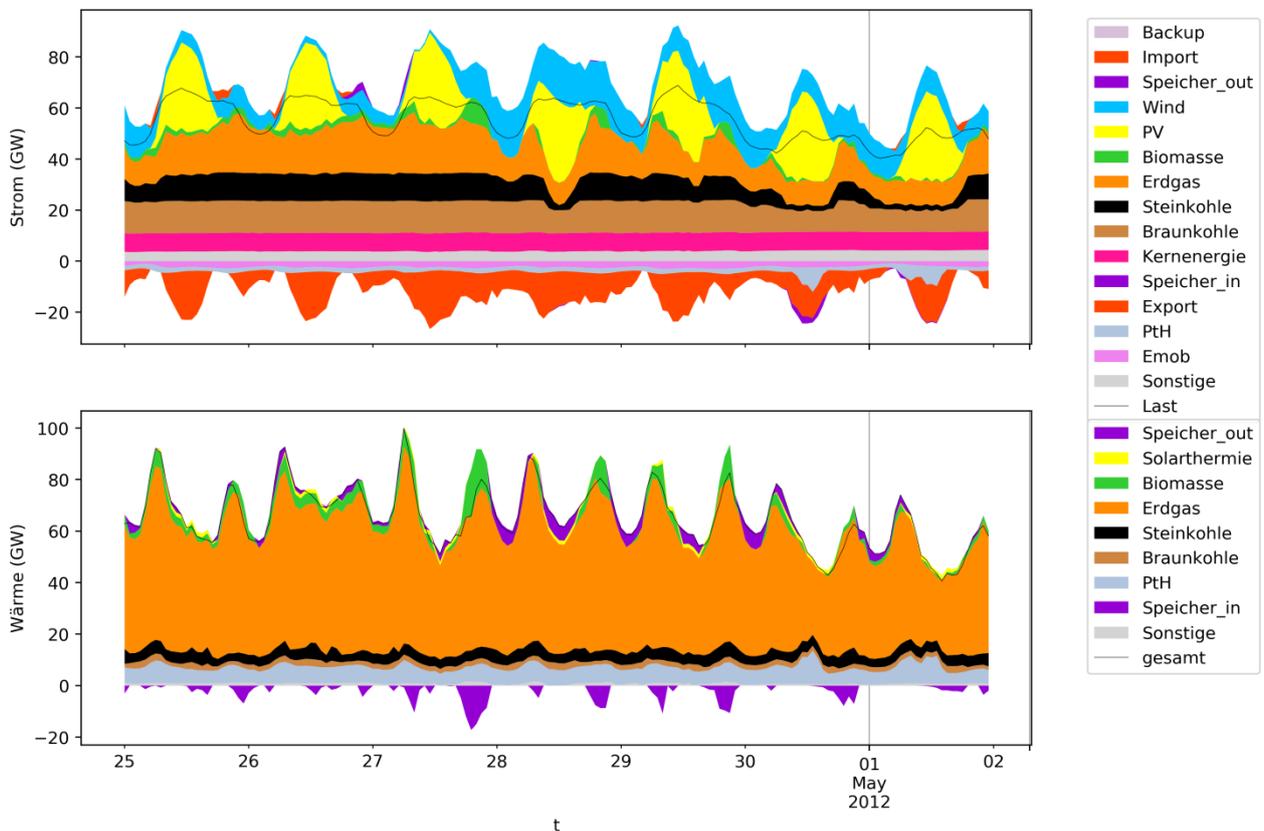


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.4. Kopplung von Strom- und Wärmesektor

Im Rahmen des Projekts wurde die Abbildung der Kopplungseffekte zwischen Strom- und Wärmesektor im Modell Powerflex deutlich verbessert. In Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 ist für das Referenzszenario im Jahr 2020 und 2050, exemplarisch für eine Woche im April in stündlicher Auflösung¹¹, dargestellt, wie Wärme- und Stromsektor in höherer zeitlicher Auflösung betrachtet miteinander interagieren. Dargestellt sind die Erzeugung von Strom und Wärme sowie die zu deckende Nachfrage in beiden Sektoren. Wärmeseitig ist nur die Bereitstellung von leitungsgebundener Wärme (Fern- und Nahwärme) dargestellt, da nur für diese beiden Nachfragesegmente eine stundenscharfe Einsatzplanung im Modell Powerflex berechnet wird. Die direkte Wärmeversorgung wird hier nicht gezeigt.

Abbildung 4-21: Strom- und Wärmeerzeugung in stündlicher Auflösung (Aprilwoche, Referenzszenario 2020)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

In Abbildung 4-21 (Referenz, Jahr 2020) ist zu erkennen, dass Kernenergie und Braunkohle-Kraftwerke mit nahezu konstanter Leistung ein Grundlastband bereitstellen. Steinkohle und vor allem Erdgaskraftwerke werden flexibel eingesetzt, um Fluktuationen bei Last und erneuerbarer

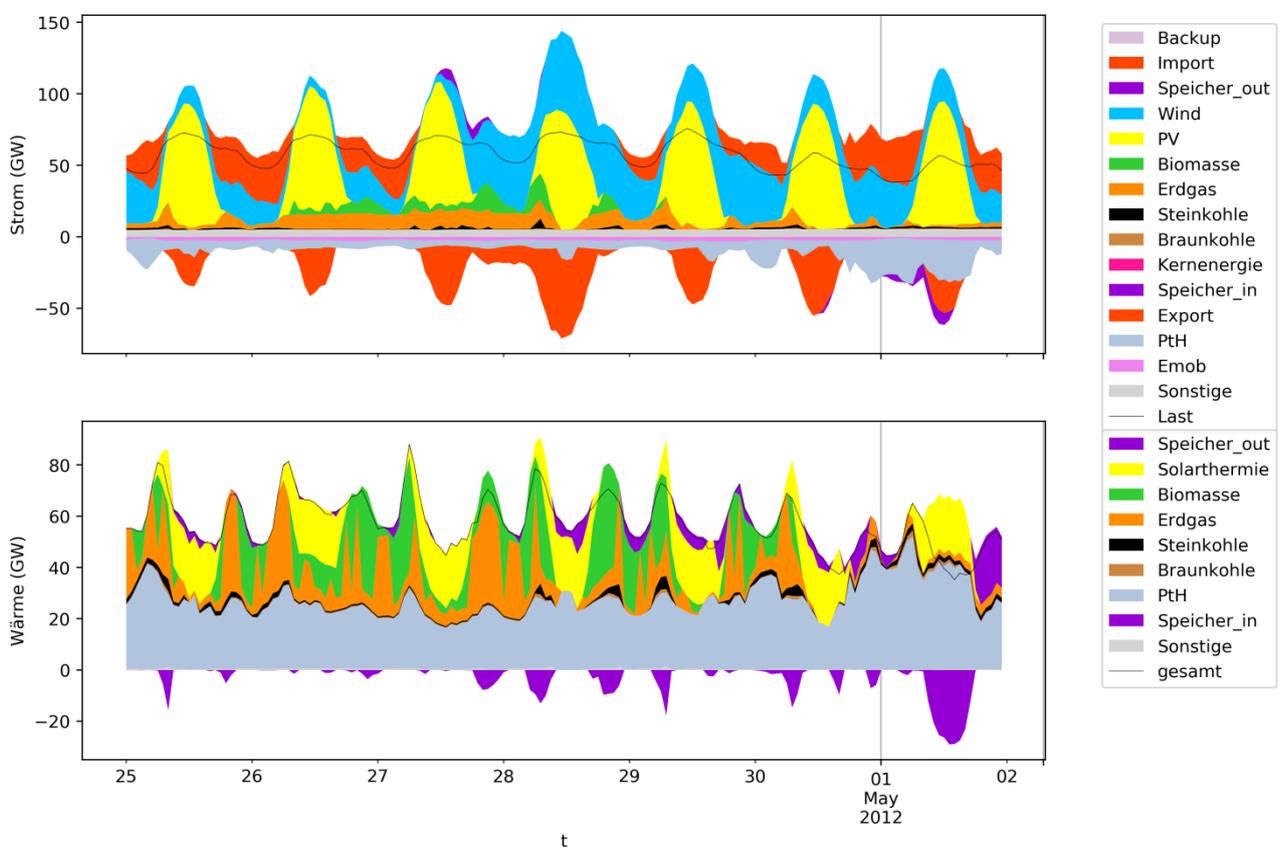
¹¹ Darstellt werden nur Ergebnisse der Strommarktmodellierung mit Powerflex. Ergebnisse von BuildingStar sind nicht gezeigt, da nur in Powerflex eine Einsatzplanung in stündlicher Auflösung abgebildet wird. Daher berücksichtigen die Abbildungen wärmeseitig nur Anlagen, die im entsprechenden Stützjahr zum Austausch bereitstehen.

Stromerzeugung auszugleichen. Eindrücklich zu sehen sind die charakteristischen Tagesprofile der Photovoltaik-Erzeugung, die jeweils zur Tagesmitte konventionelle Erzeuger verdrängen.

Stromexporte (negativ dargestellt) sind ebenfalls als wichtige Flexibilitätsoption zu erkennen. Importe spielen aber nur eine sehr untergeordnete Rolle (Abbildung 4-21).

Biomasse wird flexibel zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt, und zwar hauptsächlich in den Morgen- und Abendstunden, in denen die Wärmenachfrage besonders hoch und die Stromerzeugung aus Photovoltaik niedrig ist. Mit der auf diese Weise erzeugten Wärme werden zusätzlich Wärmespeicher befüllt, die zu anderen Tageszeiten Wärme bereitstellen können.

Abbildung 4-22: Strom- und Wärmeerzeugung in stündlicher Auflösung (Aprilwoche, Referenzszenario 2050)

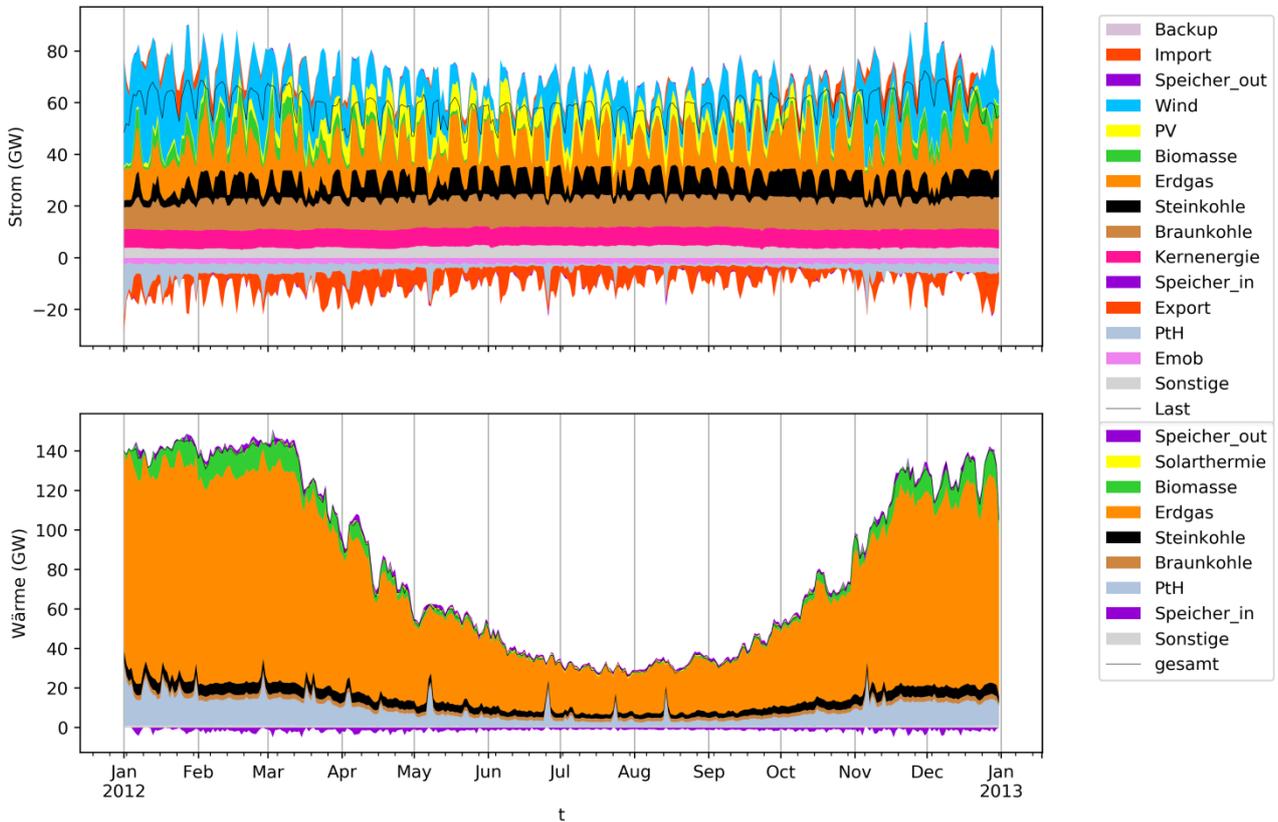


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Im Jahr 2050 (Abbildung 4-22) zeigt sich ein anderes Bild. Ein großer Teil der Wärmenachfrage wird durch Power-to-Heat (Wärmepumpen und Heizstäbe) gedeckt. Solarthermie spielt eine deutlich größere Rolle im Wärmesektor als in früheren Jahren, und auch die durch Biomassenutzung bereitgestellte Wärme hat deutlich zugenommen.

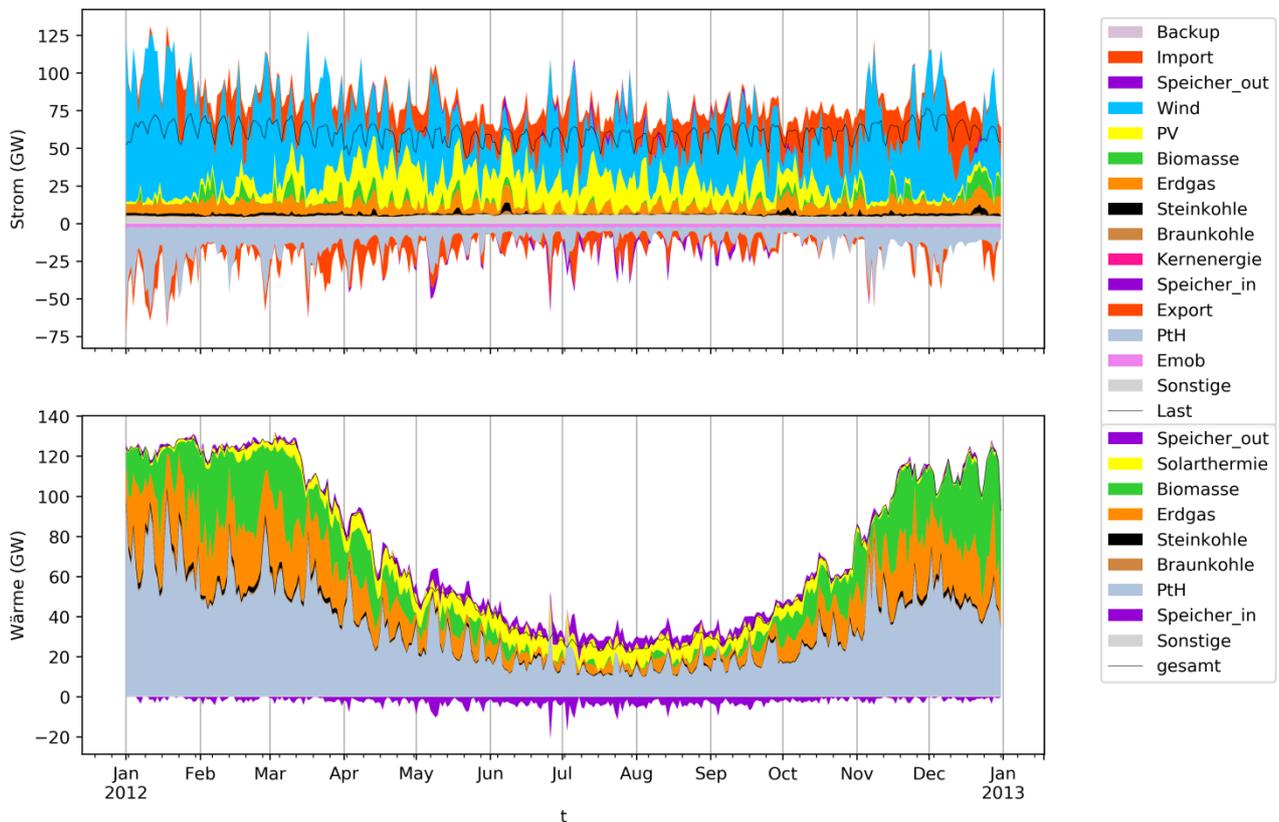
Strom wird fast vollständig durch die fluktuierenden Energieträger Photovoltaik und Windenergie bereitgestellt. Die Bedeutung von Importen hat deutlich zugenommen, und sowohl Importe als auch Exporte werden flexibel eingesetzt, um Fluktuationen von Angebot und Nachfrage auszugleichen.

Abbildung 4-23: Strom- und Wärmemix im Jahresgang (Referenzszenario 2020)



Quelle: Berechnungen Öko-Institut

Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24 zeigen die Erzeugungsprofile im Strom- und Wärmesektor im gesamten Jahresgang. Dargestellt sind Tages-Mittelwerte. Deutlich zu erkennen ist das charakteristische Jahresprofil der Wärmenachfrage – im Wärmesektor sind die saisonalen Nachfrageschwankungen deutlich ausgeprägter als im Stromsektor. In beiden Jahren wird im Wärmesektor während der Heizsaison deutlich mehr Biomasse eingesetzt als im Sommer (sowohl absolut als auch anteilig an der gesamten Wärmeerzeugung).

Abbildung 4-24: Strom- und Wärmemix im Jahresgang (Referenzszenario 2050)


Quelle: Berechnungen Öko-Institut

4.5. Einordnung Ergebnisse zum Biomasseeinsatz im Vergleich zu anderen Studien

Grundsätzlich ist für den Vergleich zu anderen Studien festzuhalten, dass im Bereich der Gebäudewärme in der Vergangenheit überwiegend sektorspezifische Modelle zum Einsatz gekommen sind (z.B. Thamling et al. (2015), Bürger et al. (2017)). Auch Studien, die das gesamte Energiesystem betrachten, verwenden hierzu typischerweise Sektor-spezifische Modelle für die Nachfragesektoren, welche ihre individuellen Energiebedarfe dann an den Angebots-Sektor (Strom- und Fernwärme) weitergeben, woraufhin ein Modell für die Angebotsseite versucht, diese Nachfrage optimal zu decken (so z.B. in den Studien Repenning et al. (2015), Fraunhofer ISI et al. (2017) oder The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos (2018)).

In der vorliegenden Studie wird in den gewählten Stützjahren und den zugeordneten vorangegangenen Jahren hingegen der Energieträgereinsatz Sektor-übergreifend für den Strom- und Wärmesektor optimiert. Der Verkehrssektor ist dabei nicht Teil der Optimierung und die sektorspezifischen Biomasseemengen wurden dem Verkehrssektor im Rahmen der Szenariendefinition direkt zugeordnet.

4.5.1. Biomassenutzung für die dezentrale Wärmeerzeugung im Gebäudebereich

Die Modellergebnisse zur Biomassenutzung für die dezentrale Wärmeerzeugung im Gebäudebereich liegen für das Jahr 2020 in allen Szenarien bei rund 50 TWh. Von 2020 auf 2030 kommt es

dann in allen Szenarien zu einem Anstieg auf rund 140 TWh. Dieses Ergebnis ist zum einen auf die volle Erschließung des Biomassepotenzials im Jahr 2030 zurückzuführen. Zum anderen ist im Gebäudebestand im Jahr 2030 noch eine hohe Anzahl an unzureichend gedämmten Gebäuden vorhanden, die auf Biomasse als erneuerbare Wärmeversorgung angewiesen sind. Im Jahr 2050 geht die Biomassenutzung für die dezentrale Wärmeerzeugung dann im Referenzszenario-Wärmeeffizienz auf Null und im Naturschutzszenario auf 2 TWh zurück. Dies ist zum einen auf den hohen energetischen Standard der Gebäude zurückzuführen und im Naturschutzszenario zum anderen auch auf das geringe verfügbare Biomassepotenzial für die energetische Nutzung im Strom- und Wärmesektor, wie es über die Szenariendefinition vorgegeben wird. Im Referenzszenario verbleibt sie hingegen mit 115 TWh auch im Jahr 2050 auf einem relativ hohen Niveau (vgl. Abschnitt 4.2.2).

In der Literatur finden sich Studien und Szenarien, die analog zum Referenzszenario-Wärmeeffizienz und zum Naturschutzszenario den Biomasseeinsatz im Gebäudesektor bis 2050 aus unterschiedlichen Gründen ebenfalls sehr stark reduzieren:

- „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ des Umweltbundesamts (UBA 2014): Hier werden, wie auch im Naturschutzszenario, enge Biomasse-Restriktionen und geringe Biomassepotenziale unterstellt, was dazu führt, dass im Gebäudesektor keinerlei Biomasse mehr zum Einsatz kommt.
- In der Studie „Klimapfade für Deutschland“ im Auftrag des BDI (The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos 2018, S. 221) geht im 95 %-Pfad der Biomasseeinsatz für Raumwärme und Warmwasser auf 11 TWh in 2050 zurück. Die verfügbare Biomasse wird in 2050 dabei überwiegend im Industriesektor eingesetzt, um dort fossile Brennstoffe zur Wärmeerzeugung bis 500°C zu ersetzen.
- In der dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ geht im Elektrifizierungsszenarien EL95 mit 95% THG-Minderung in 2050 der Biomasseeinsatz für Raumwärme und Warmwasser auf 22 TWh in 2050 zurück (Deutsche Energie Agentur (dena) 2018, S. 96 Teil B). Die Wärmeerzeugung basiert überwiegend auf erneuerbarem Strom und elektrischen Wärmepumpen.
- „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ (Bürger et al. 2017): Im Szenario „KliNeG ZB - 60%“ wird, ebenfalls wie in dieser Studie im Referenzszenario-Wärmeeffizienz und im Naturschutzszenario, sehr stark auf Energieeffizienz gesetzt. Der verbleibende Biomasse Einsatz in Gebäuden geht auf gut 10 TWh/a zurück.

Auch als Vergleichsgröße für das Referenzszenario gibt es in der Literatur Studien und Szenarien, die für das Jahr 2050 noch eine nennenswerte Biomassenutzung im Gebäudebereich vorsehen:

- In der Studie „Klimapfade für Deutschland“ im Auftrag des BDI geht im Referenz-Pfad der Biomasseeinsatz für Raumwärme und Warmwasser nur wenig zurück und verbleibt in 2050 bei 75 TWh (The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos 2018, S. 221).
- In der dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ geht im Referenzszenario der Biomasseeinsatz für Raumwärme und Warmwasser von 113 TWh in 2015 auf 63 TWh in 2050 zurück (Deutsche Energie Agentur (dena) 2018, S. 96 Teil B).
- In der Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ im Auftrag des BMWi geht im Basisszenario, welches das zentrale Zielszenario der Langfristszenarien ist, der Biomasseeinsatz für Raumwärme und Warmwasser von 54 TWh in 2020 auf 31 TWh in 2050 zurück (Bernath et al. 2017, S. 126).

- „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“ (Bürger et al. 2017): Im Szenario „KliNeG ZB - 35%“ wird weniger auf Energieeffizienz und mehr auf Technologieoffenheit gesetzt. Entsprechend wird auch mehr Biomasse benötigt – knapp 70 TWh/a im Jahr 2050.
- Technologiemix-Szenario der dena Gebäudestudie (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH et al. 2017): Der Biomasse-Einsatz im Gebäudesektor beläuft sich hier auf gut 50 TWh/a im Jahr 2050.
- Hintergrundstudie zur Energieeffizienzstrategie Gebäude (Thamling et al. 2015): hier gehen beide Zielszenarien von einem Biomasse-Einsatz von über 95 TWh/a im Jahr 2050. Das Effizienz-Szenario liegt bei gut 95 TWh/a und das Erneuerbare Szenario bei knapp 140 TWh/a im Jahr 2050.

Als Fazit lässt sich ziehen, dass in dieser Studie der Gebäudesektor nach der durchgeführten Sektorkopplung im Vergleich zu anderen Studien häufig einen höheren Biomasseeinsatz für die dezentrale Wärmeerzeugung im Gebäudebereich aufweist. Dies ist insbesondere im Jahr 2030 und unter der Annahme einer geringen Wärmeeffizienz der Fall. Im Jahr 2050 liegt der Biomasseeinsatz in dieser Studie bei der Annahme einer hohen Wärmeeffizienz unter den Ergebnissen vergleichbarer Szenarien.

4.5.2. Biomassenutzung zur Wärmeerzeugung für Nah- und Fernwärme

Die Modellergebnisse zur Biomassenutzung für Nah- und Fernwärme liegen für das Jahr 2020 in allen Szenarien bei rund 45 TWh. Von 2020 auf 2030 kommt es dann im Referenzszenario und im Referenzszenario-Wärmeeffizienz zu einem Rückgang auf knapp 25 TWh. Dieser Rückgang setzt sich bis 2050 weiter fort und liegt dann im Referenzszenario bei 14 TWh und im Referenzszenario mit Wärmeeffizienz bei 7 TWh. Im Naturschutzszenario bleibt der Biomasseeinsatz in 2030 auf einem ähnlichen Niveau wie in 2020 (rund 40 TWh) und geht in 2050 auf 13 TWh zurück (vgl. Abschnitte 4.2.3 und 4.2.4).

In der Literatur finden sich nur wenige Studien und Szenarien, die den Brennstoffmix der Fernwärmeerzeugung separat ausweisen:

- In der Studie „Klimapfade für Deutschland“ im Auftrag des BDI geht sowohl im Referenzpfad als auch im 95 %-Pfad der Biomasseeinsatz für Nah- und Fernwärme leicht von 21 TWh in 2020 auf 15 TWh bis 19 TWh in 2050 zurück (The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos 2018, S. 223).
- In der Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ im Auftrag des BMWi wird die Stromerzeugung aus Biomasse KWK-Anlagen separat ausgewiesen. Unter der Annahme einer Stromkennzahl von 0,5 kann dann die Wärmeerzeugung abgeschätzt und der Nah- und Fernwärmeerzeugung zugeordnet werden. Im Basisszenario, welches das zentrale Zielszenario der Langfristszenarien ist, liegt die Biomassenutzung für Nah- und Fernwärme unter diesen Annahmen dann bei 25 TWh in 2020, 55 TWh in 2030 und 40 TWh in 2050 (Bernath et al. 2017, S. 223).

Als Fazit lässt sich ziehen, dass in dieser Studie die Biomassenutzung für Nah- und Fernwärme im Vergleich zu anderen Studien und den jeweils passenden Szenarien einen ähnlichen bis etwas höheren Biomasseeinsatz aufweist.

4.5.3. Biomassenutzung zur Stromerzeugung

Die Biomassenutzung zur Stromerzeugung liegt in allen hier untersuchten Szenarien im Jahr 2020 bei rund 24 TWh. Während sie im Naturschutzszenario in den Jahren 2030 und 2050 auf diesem Niveau verbleibt, geht sie im Referenzszenario-Wärmeeffizienz auf 15 TWh in 2030 und 11 TWh in 2050 zurück. Im Referenzszenario sinkt hingegen die Biomassenutzung zur Stromerzeugung in 2030 zunächst (16 TWh) und steigt dann bis 2050 wieder leicht an (21 TWh) (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Im Vergleich dazu weisen andere Studien für die Jahre 2020 und 2030 eine höhere Stromerzeugung aus Biomasse aus. Der Hauptgrund hierfür: in dieser Studie wird die Stromerzeugung aus Biogas nicht exogen vorgegeben, sondern ist Teil der Optimierung. Der Biomasseeinsatz wird so nur durch eine sektorübergreifende Potenzialgrenze beschränkt und es gibt keine vorgegebene Mindestenergieerzeugung (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Aufgrund der hohen Grenzkosten wird Biogas zur Stromerzeugung in dieser Studie, mit Ausnahme für das Naturschutzszenario im Jahr 2050, modellendogen nicht eingesetzt. Aus diesem Grund „fehlt“ die Stromerzeugung aus Biogas im Vergleich zu Studien, wo sie überwiegend exogen vorgegeben wird:

- Der Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Version 2017) geht für den Zeitraum 2030 bis 2035 von einer Stromerzeugung aus Biomasse in Höhe von 33 TWh bis 39 TWh aus (50Hertz Transmission GmbH et al. 2017). Volllaststunden und installierte Leistung für Biomassekraftwerke werden dabei über den Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans vorgegeben.
- Die Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland weisen im Basisszenario einen Rückgang der Stromerzeugung aus Biomasse von rund 52 TWh in 2020 und 2030 sowie 25 TWh in 2050 aus (Bernath et al. 2017, S. 223).
- In der Studie „Klimapfade für Deutschland“ geht der Biomasseeinsatz zur Stromerzeugung von 56 TWh im Jahr 2020 auf 20 TWh bis 33 TWh im Jahr 2050 zurück (The Boston Consulting Group (BCG) und Prognos 2018). Die Ergebnisse zum Rückgang der Stromerzeugung aus Biomasse von 2020 bis 2050 sind mit denen in dieser Studie vergleichbar.
- In der dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ steigt die Stromerzeugung aus Biomasse in allen fünf Szenarien von 38 TWh in 2020 auf 42 TWh in 2030 und 49 TWh in 2050 an (Deutsche Energie Agentur (dena) 2018, S. 198 Teil B). Die Stromerzeugung aus Biomasse wird dabei zwar modellendogen bestimmt, liegt jedoch in allen Szenarien am unteren Rand einer vorgegebenen Mindestenergieerzeugung.
- In der WWF Studie „Zukunft Stromsystem II“ geht die Stromerzeugung aus Biomasse sowohl im Szenario „Energiewende-Referenz“ als auch im Szenario „Fokus Solar“ von 45 TWh in 2020 auf 26 TWh in 2030 und 13 TWh in 2050 zurück (Matthes et al. 2018, S. 148f). Hinsichtlich des Rückgangs der Stromerzeugung aus Biomasse von 2020 bis 2050 sind die Ergebnisse mit denen in dieser Studie vergleichbar.

Als Fazit lässt sich ziehen, dass in dieser Studie die Biomassenutzung zur Stromerzeugung insbesondere für das Jahr 2020 geringer ausfällt als in anderen Studien und Szenarien. Dies stellt zumindest teilweise das korrespondierende Gegenstück im Vergleich zum in anderen Studien und Szenarien höher ausfallenden Biomasseeinsatz für die Wärmeerzeugung dar. Darüber hinaus geht der geringer ausfallende Biomasseeinsatz zur Stromerzeugung auf nicht gesetzte exogene Vorgaben zur Mindeststromerzeugung aus Holz und insbesondere Biogas zurück. Für das Jahr 2020 bedeutet das einen Bruch mit der aktuellen und vom EEG geprägten Ausgangssituation.

5. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

In diesem abschließenden Kapitel werden aus den Modellergebnissen Schlussfolgerungen gezogen und Handlungsempfehlungen abgeleitet, um die zu Beginn aufgestellten Forschungsfragen zu beantworten:

1. Sollte das verfügbare Bioenergieangebot eher für den Stromsektor (z.B. stromgeführte KWK als Flexibilitätsoption) oder besser im Wärmemarkt als erneuerbare Wärmequelle (wärmegeführte KWK oder nur Wärme) eingesetzt werden, um die Klimaschutzziele für den Strom- und Wärmesektor möglichst kosteneffizient einzuhalten?
2. Wie sensitiv reagiert der Einsatz von Biomasse im Strom- und Wärmesektor auf Änderungen der Wärmenachfrage im Gebäudesektor, wie sie sich infolge unterschiedlicher Sanierungsintensitäten ergibt?
3. Welche Wechselwirkungen ergeben sich zwischen dem Wärme- und dem Stromsektor, und welche Funktion nimmt die Biomasse dabei ein?

In Bezug auf diese Fragen lassen sich die nachfolgenden Schlussfolgerungen ziehen:

Schlussfolgerung 1: Erneuerbare Energien verdrängen im Zeitverlauf sowohl im Stromsektor als auch im Gebäudesektor fossile Energieträger, um die vorgegebenen CO₂-Minderungsziele zu erfüllen.

Im Stromsektor sind vor allem Windenergie und Photovoltaik die dominierenden erneuerbaren Energieträger. Der Anteil der Biomasse im Strommix liegt nur zwischen 3 % und 5 %. Im Gebäudesektor spielen vor allem erneuerbarer Strom zum Betrieb von Wärmepumpen, feste Biomasse und Solarthermie eine Rolle.

Schlussfolgerung 2: Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass sowohl Biogas als auch daraus aufbereitetes Biomethan erst bei sehr hohen THG-Minderungszielen und einem gleichzeitig geringem Angebot an fester Biomasse eingesetzt werden (Naturschutzszenario mit beschleunigtem Kohleausstieg im Jahr 2020 sowie Naturschutzszenario 2030 und 2050).

Dies liegt daran, dass gasförmige Biomasse am Ende der Merit Order für die CO₂-freien Brennstoffe steht und somit erst als letzte Option für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Es ist deshalb zu prüfen, ob gasförmige Biomasse nicht bevorzugt im Verkehrssektor eingesetzt werden sollte, wo für Kraftstoffe ein höheres und auch mittelfristig steigendes Preisniveau zu erwarten ist (siehe auch Biomethan im Verkehr als Post-EEG-Strategie in (Thrän et al. 2015)). An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf, um den Verkehrssektor mit in die hier durchgeführte ökonomische Optimierung aufzunehmen.

Schlussfolgerung 3: Der Einsatz von fester Biomasse stellt in der dezentralen Wärmeversorgung eine wichtige Übergangstechnologie dar, insbesondere für schlecht gedämmte bzw. nur unzureichend energetisch sanierbare Gebäude.

Als Ausgangspunkt der Modellierung ist im Gebäudebestand noch ein vergleichsweise hoher Anteil weniger gut gedämmter Gebäude vorhanden. In diesen Gebäuden wird dann vorrangig feste Biomasse als erneuerbare Energiequelle eingesetzt, um die nötigen THG-Minderungen zu gewährleisten (vgl. Abbildung 4-15). Auch wenn es aus energetischer Sicht sinnvoller wäre, die Biomasse in stromgeführten KWK-Anlagen einzusetzen, wird das verfügbare Biomassepotenzial vorzugswei-

se in den schlecht gedämmten Gebäude verbraucht, da diese – ähnlich wie der Flug- und Schiffsverkehr im Verkehrssektor – auf feste Biomasse als CO₂-freien Energieträger angewiesen sind. Dies gilt zum Beispiel für Gebäude, die aufgrund von Denkmalschutzanforderungen nicht ausreichend gedämmt werden können.

Schlussfolgerung 4: In den Ergebnissen aus der Modellierung ist zudem zu sehen, dass die Kopplung des Wärme- und Stromsektors von 2020 bis 2050 zunimmt. Diese Kopplung erfolgt über erneuerbaren Strom und elektrische Wärmeerzeugung sowie mit Hilfe von flexiblen KWK-Kraftwerken. Biomasse spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Der Einsatz von elektrischen Wärmeerzeugungstechnologien steigt in allen Szenarien deutlich an, wobei aufgrund der höheren Effizienz in erster Linie Wärmepumpen eingesetzt werden. Stößt der Einsatz von Wärmepumpen an Potenzialgrenzen oder andere Restriktionen, wie zum Beispiel aufgrund eines schlechten Sanierungszustands von Gebäuden, werden auch Heizstäbe eingesetzt (vgl. Abbildung 4-7).

Ergänzend dazu wird auch Biomasse flexibel eingesetzt, um sowohl Erzeugungsdefizite in der Stromerzeugung auszugleichen, als auch um den höheren Wärmebedarf im Winterhalbjahr zu decken (vgl. Abbildung 4-21 bis Abbildung 4-24). Dies geschieht in flexibilisierten Biomasse-KWK-Kraftwerken, die dann allerdings nur noch geringe Volllaststunden aufweisen (vgl. Abbildung 4-20).

Schlussfolgerung 5: Die energetische Sanierung und Dämmung der Gebäudehülle und den daraus folgenden Rückgang des Wärmebedarfs stellt die Grundlage für die CO₂-Minderung im Wärmesektor dar.

Der Rückgang der Wärmenachfrage durch Effizienzmaßnahmen und energetische Sanierung wirkt sich direkt auf einen Rückgang des Energieträgereinsatzes aus. Anders als im Stromsektor kann Wärme aus nicht mehr ausgelasteten Heizungsanlagen nicht zu anderen Verbrauchern „exportiert“ werden. Zudem setzt der effiziente Einsatz von Wärmepumpen einen energetischen Mindeststandard des Gebäudes voraus, so dass eine unzureichende Gebäudesanierung den effizienten Einsatz von erneuerbarem Strom zur Wärmebereitstellung behindert.

Um eine ausreichende Wärmedämmung zu erreichen, ist eine jährliche Sanierungsrate von bis zu 2 % bei Wohngebäuden und von bis zu 3 % bei Nicht-Wohngebäuden nötig (Abbildung 3-4). Hierzu muss die Entscheidung für eine energetische Sanierung am Ende eines Reinvestitionszyklus auf 90 % in 2040 ansteigen. Zudem ist eine ästhetische Dämmrestriktion in 2050 bei 90 % der betreffenden Wohn- und 75% der Nicht-Wohngebäude aufzugeben, um eine Außendämmung statt einer Innendämmung einzusetzen. Generell ist zu beachten, dass aufgrund der langen Reinvestitionszyklen bei der Gebäudehülle heutige Dämmmaßnahmen möglichst den energetischen Ansprüchen in 2040 und 2050 entsprechen sollten. Findet bei einer Renovierungsmaßnahme keine energetische Sanierung statt, ist das entsprechende Bauteil vorerst für eine energetische Sanierung geblockt und erhöht den bereits bestehenden Sanierungsstau.

Aufbauend auf der effizienten energetischen Sanierung der Gebäudehülle kommt die Dekarbonisierung des Energieträgermixes zur Wärmeerzeugung als weitere Maßnahme hinzu. Im Rahmen der Substitutionsstrategie für fossile Energieträger sind zeitnah vorzugsweise Ölheizungen zu ersetzen, so dass der „Heizölausstieg“ im Gebäudesektor das korrespondierende Element zum Kohleausstieg im Stromsektor ist. Ist das Gebäude noch nicht ausreichend gedämmt, kommt Holz als CO₂-freier Energieträger zum Einsatz. Mit zunehmendem THG-Minderungsniveau muss dann zeitlich verzögert auch der Einsatz von Erdgas substituiert werden, wobei insbesondere elektrisch betriebene Wärmepumpen zur dominierenden Heizungstechnologie in energetisch sanierten Ge-

bäuden werden. Verbesserte Wärmepumpen, die auch bei höheren Vorlauftemperaturen gute Arbeitszahlen erreichen, können diesen Substitutionsschritt auf der Zeitachse auch schon früher stattfinden lassen.

Schlussfolgerung 6: Der Stromsektor kompensiert die Restriktionen des Gebäudebestands und beteiligt sich überproportional an der gesamten sektorübergreifenden CO₂-Minderung.

Eine überproportionale Minderung der CO₂-Emissionen im Stromsektor ist insbesondere dann der Fall, wenn die Gebäude nur in geringerem Umfang gedämmt werden (wie im Referenzszenario) oder der CO₂-Minderungsdruck besonders hoch ist (wie im Naturschutzszenario).

Dabei ist zunächst festzustellen, dass sich der Stromsektor im Vergleich zum Gebäudesektor durch höhere verfügbare Flexibilitäten und Potenziale zur CO₂-Minderung auszeichnet, wie zum Beispiel die Möglichkeit zum Import und Export von Strom sowie ein breiteres Angebot an erneuerbaren Energieträgern.

Darüber hinaus sind Veränderungen im Gebäudebestand aufgrund zahlreicher Hemmnisse im Bereich der energetischen Gebäudesanierung, der Vielzahl an Eigentümern und deren heterogener Struktur zudem deutlich langsamer umsetzbar als im Stromsektor. Auch ist im Gebäudesektor bislang keine Erhöhung der energetischen Sanierungsrate erkennbar, wodurch sich über die letzten Jahrzehnte ein Sanierungstau aufgebaut hat. Im Vergleich zu den sektorspezifischen THG-Minderungszielen für das Jahr 2030 aus dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung zeigt sich aus den Modellergebnissen dieser Studie, dass sich eine Übererfüllung der Minderungsvorgabe für den Stromsektor einstellt (bei einer gleichzeitigen Verfehlung der Zielvorgabe für den Gebäudesektor).

Schlussfolgerung 7: Die Reduktion der Kohleverstromung und der Ausbau der Wind- und PV-Stromerzeugung stellen die beiden zentralen Komponenten für die CO₂-Minderung im Stromsektor dar.

Anders als im Wärmesektor sind im Stromsektor wenige große Punktquellen für den überwiegenden Teil der CO₂-Emissionen verantwortlich, so dass sich durch die Stilllegung von Kohlekraftwerken große CO₂-Emissionsmengen vermeiden lassen.

Der Kohlestromanteil geht in den Modellergebnissen je nach Szenario unterschiedlich schnell zurück. Im Naturschutzszenario kommt es bis zum Jahr 2030 zu einem Ausstieg aus der Braunkohleverstromung und bis zum Jahr 2050 auch zu einem Ausstieg aus der Steinkohleverstromung. Das Naturschutzszenario-Kohleausstieg weist mit jeweils rund 50 TWh Stromerzeugung aus Braunkohle und Steinkohle den geringsten Kohlestromanteil für das Jahr 2020 aus. Im Referenzszenario mit erhöhter Wärmeeffizienz im Gebäudesektor ist der Rückgang der Kohleverstromung am geringsten ausgeprägt, wobei auch hier der Kohlestromanteil von rund 30 % im Jahr 2020 auf unter 5 % im Jahr 2050 zurückgeht.

Neben dem Ausstieg aus der fossilen Stromerzeugung kommt dem Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland eine ebenfalls wichtige Rolle zu. Sie stellt die korrespondierende Maßnahme zum Ausstieg aus der fossilen Stromerzeugung und damit der Dekarbonisierung der Stromerzeugung dar. Ein möglichst CO₂-armer Strommix ist dabei die Voraussetzung für die Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen im Bereich der Kopplung des Strom- und Wärmesektors: Auch der durch Sektorenkopplung zusätzlich nachgefragte Strom muss mit einem entsprechenden Ausbau von Wind- und PV-Stromanlagen einhergehen.

6. Literaturverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (2017): Netzentwicklungsplan Strom 2030, Version 2017. 2. Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. Berlin, Dortmund, Bayreuth, Stuttgart, zuletzt geprüft am 29.05.2017.
- AG Energiebilanzen e.V. (AGEB) (2017): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. 1990 bis 2016. Online verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>, zuletzt geprüft am 02.11.2017.
- AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (Hg.) (2015): Arbeitsblatt FW 308. Zertifizierung von KWK-Anlagen. Ermittlung des KWK-Stromes. Frankfurt a. M., zuletzt geprüft am 22.11.2018.
- Bernath, Christiane; Bossmann, Tobias; Deac, Gerda; Elsland, Rainer; Fleiter, Tobias; Kühn, André et al. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Unter Mitarbeit von Fraunhofer ISI, Consentec GmbH, Ifeu, TU Wien, M-Five und TEP Energy GmbH. Hg. v. Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 06.09.2017.
- BMWi (2018): Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung.
- Bolzau, T. (2014): Biogasmonitoring: Kosten von Biogasherstellung, -einspeisung und -transport. Biogaspartner Dialogprozess „Zukunft Biomethan“. Hg. v. Bundesnetzagentur. Berlin, zuletzt geprüft am 10.01.2018.
- Brosowski, André; Adler, Philipp; Erdmann, Georgia; Stinner, Walter; Thrän, Daniela (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status Quo in Deutschland. Hg. v. Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow-Prüzen (Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe), zuletzt geprüft am 16.11.2017.
- Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi); Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (Hg.) (2018): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland (Stand Dezember 2017). unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), zuletzt geprüft am 12.03.2018.
- Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Hg. v. Bundesregierung Deutschland.
- Bürger, Veit; Hesse, Tilman; Palzer, Andreas; Köhler, Benjamin; Herkel, Sebastian; Engelmann, Peter (2017): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Endbericht. Unter Mitarbeit von Dietlinde Quack. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau (Climate Change, 11/2017).
- Deschermeier, Philipp (2016): Einfluss der Zuwanderung auf die demografische Entwicklung in Deutschland. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW Trends), zuletzt geprüft am 28.06.2018.
- Deutsche Energie Agentur (dena) (Hg.) (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin. Online verfügbar unter https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf, zuletzt geprüft am 06.08.2018.
- ewi Energy Research & Scenarios gGmbH; Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden GmbH (ITG); Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (FIW) (2017): Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor. Gebäudestudie. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), zuletzt geprüft am 26.02.2018.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2015): Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe. Gülzow-Prüzen, zuletzt geprüft am 21.11.2018.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2017): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2016. Gülzow, zuletzt geprüft am 10.01.2018.

Fraunhofer ISI; Consentec GmbH; Ifeu (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe, Aachen, Heidelberg, zuletzt geprüft am 13.02.2018.

Hinz, Eberhard (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt, zuletzt geprüft am 02.05.2016.

IWU (2011): Deutsche Gebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden (TABULA).

IWU (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. zweite erweiterte Auflage.

IWU; BEI; Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Hg. v. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) und Berliner Energie Institut (BEI).

Juhrich, Kristina (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Climate Change, 27/2016).

Koch, Matthias; Bauknecht, Dierk; Heinemann, Christoph; Ritter, David; Vogel, Moritz; Tröster, Eckehard (2015): Modellgestützte Bewertung von Netzausbau im europäischen Netzverbund und Flexibilitätsoptionen im deutschen Stromsystem im Zeitraum 2020–2050. In: *ZfE* 39 (1), S. 1–17. DOI: 10.1007/s12398-015-0147-2.

Koch, Matthias; Flachsbarth, Franziska; Bauknecht, Dierk; Heinemann, Christoph; Ritter, David; Winger, Christian et al. (2017a): Dispatch of Flexibility Options, Grid Infrastructure and Integration of Renewable Energies Within a Decentralized Electricity System. In: Valentin Bertsch, Wolf Fichtner, Vincent Heuveline und Thomas Leibfried (Hg.): *Advances in energy system optimization. Proceedings of the first International Symposium on Energy System Optimization*. Cham, Switzerland: Birkhäuser (Trends in Mathematics), S. 67–86.

Koch, Matthias; Hesse, Tilman; Kenkmann, Tanja; Bürger, Veit; Haller, Markus; Heinemann, Christoph et al. (2017b): Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration. Wissenschaftlicher Endbericht – aktualisierte Fassung, zuletzt geprüft am 12.07.2018.

Lechtenböhrer, Stefan; Gils, Hans-Christian; Sterchele, Philip; Kost, Christoph; Brucker, Lucas; Janßen, Tombke et al. (2018): RegMex - Modellexperimente und -vergleiche zur Simulation von Wegen zu einer vollstaendig regenerativen Energieversorgung, zuletzt geprüft am 12.07.2018.

Matthes, Felix Chr.; Emele, Lukas; Hermann, Hauke; Loreck, Charlotte; Peter, Frank; Ziegenhagen, Inka; Cook, Vanessa (2017): Zukunft Stromsystem - Kohleausstieg 2035. Vom Ziel her denken. Studie für WWF Deutschland. Öko-Institut; Prognos. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-Kohleausstieg-2035.pdf>, zuletzt geprüft am 19.01.2017.

Matthes, Felix Chr.; Flachsbarth, Franziska; Loreck, Charlotte; Hermann, Hauke; Falkenberg, Hanno; Cook, Vanessa (2018): Zukunft Stromsystem II: Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung. Vom Ziel her denken. Hg. v. WWF Deutschland. Berlin, zuletzt geprüft am 10.10.2018.

Mauch, Wolfgang; Corradini, Roger; Wiesemeyer, Karin; Schwentzek, Marco (2010): Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. In: *Energie-wirtschaftliche Tagesfragen* 55 (9), S. 12–14, zuletzt geprüft am 22.11.2018.

Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Öko-Institut e.V.; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, zuletzt geprüft am 15.05.2017.

Repenning, Julia; Emele, Lukas; Blanck, Ruth; Dehoust, Günter; Förster, Hannah; Greiner, Benjamin et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Öko-Institut; Fraunhofer ISI.

Statistische Bundesamt (Destatis) (2018): Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis März 2018, zuletzt geprüft am 11.07.2018.

Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (Hg.) (2009): Bevölkerung Deutschlands bis 2060. Ergebnisse der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2012): Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte - Fachserie 5 Heft 1 - 2010, zuletzt geprüft am 20.01.2015.

Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2017): Bevölkerungsentwicklung bis 2060. Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Aktualisierte Rechnung auf Basis 2015.

Thamling, Nils; Pehnt, Martin; Kirchner, Joachim (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude. Erstellt im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Hintergrundpapier. Prognos, IWU, ifeu. Berlin, Heidelberg, Darmstadt, zuletzt geprüft am 02.05.2016.

The Boston Consulting Group (BCG); Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. BCG; Prognos AG. Unter Mitarbeit von Philipp Gerbert, Patrick Herhold, Jens Burchardt, Stefan Schönberger, Florian Rechenmacher, Almut Kirchner et al. Berlin, Basel, Hamburg, München, zuletzt geprüft am 13.02.2018.

Thrän, Daniela; Arendt, Oliver; Ponitka, Jens; Braun, Julian; Millinger, Markus; Wolf, Verena et al. (2015): Meilensteine 2030. Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. Endbericht zu FKZ 03KB065 und FKZ 03MAP230. Leipzig: FISCHER druck&medien (Schriftenreihe des Förderprogramms "Energetische Biomassenutzung", 18).

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (Climate Change, 07).

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2017): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017 Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015. Dessau-Roßlau (ISSN 1862-4359), zuletzt geprüft am 11.01.2018.