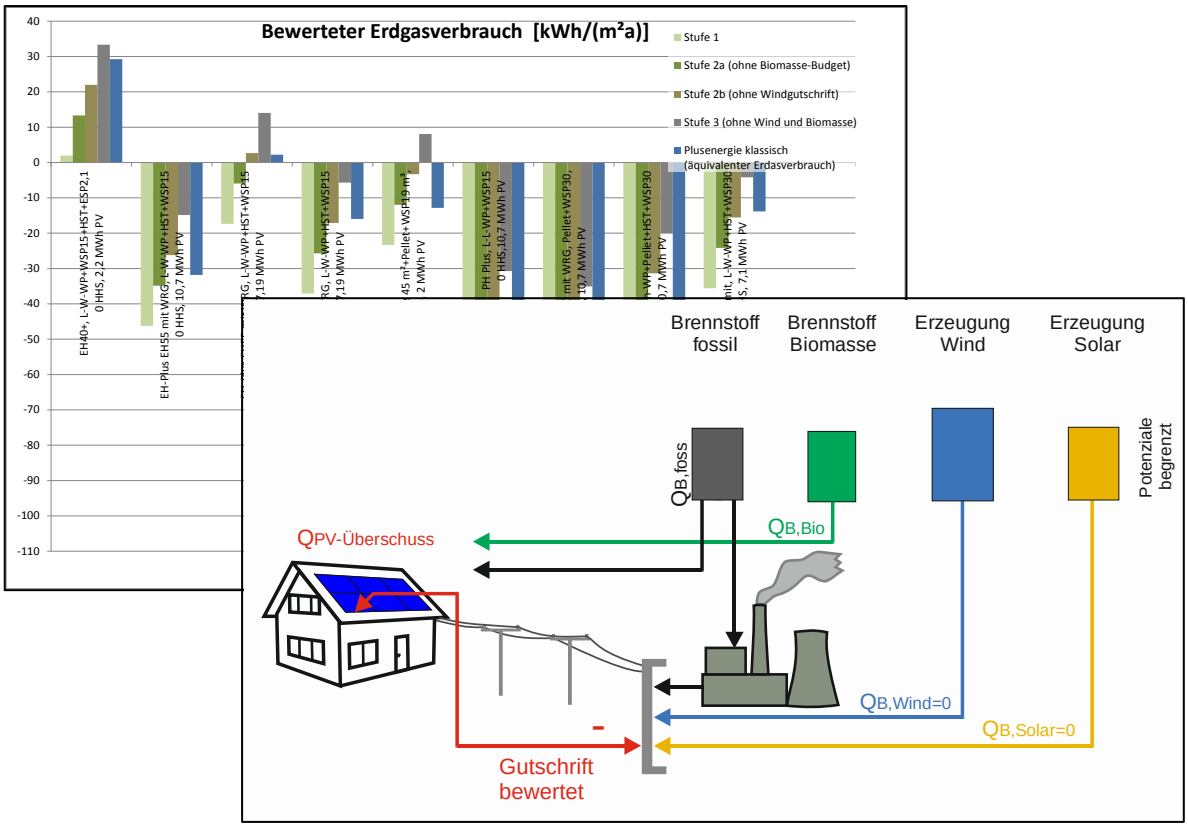
IWU Institut Wohnen und Umwelt

h_da HOCHSCHULE DARMSTADT UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
fbeit FACHBEREICH ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIONSTECHNIK

BET Energie. Weiter denken

Zukunftsfähige Neubauten als Baustein für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand 2050



Endbericht Teil 2 im Projekt
„Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudesektor: Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage (EE-GebaeudeZukunft)“

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie / Projektträger Jülich (PTJ) im Förderschwerpunkt En:SYS
Förderkennzeichen: 03ET4019

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Zukunftsfähige Neubauten als Baustein für einen klimaneutralen Wohngebäudebestand 2050

Endbericht Teil 2 im Projekt:
„Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudesektor: Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage (EE-GebaeudeZukunft)“

Autoren:
Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt
Marc Großklos
Nikolaus Diefenbach
André Müller
Michael Grafe
Stefan Swiderek

Hochschule Darmstadt (h_da), Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
Hann Rupert
Klaus-Martin Graf

Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung (BET), Aachen
Norbert Krzikalla

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

Darmstadt, 19. September 2019

ISBN.: 978-3-941140-64-6

INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH
Rheinstraße 65
64295 Darmstadt
Germany

Telefon: +49(0)6151/2904-0 / Fax: -97
Internet: www.iwu.de

Inhalt

Kurzfassung 1

1 Einleitung 10
1.1 Ziele der Untersuchung 10
1.2 Bestehende Konzepte für klimaneutrale Gebäude 11
1.3 Lösungsansätze 12
1.4 Simulationsmodell 13

2 Grundlagen zukunftsfähiger Gebäude 15
2.1 Das klimaneutrale bzw. klimagerechte Gebäude 16
2.2 „Bestmöglicher Neubau“: Einzelanforderungen an zukunftsfähige Gebäude 19
2.2.1 Gebäudehülle 19
2.2.2 Anlagentechnik 21

3 Modellierung von Einzelgebäuden 25
3.1 Untersuchte Gebäude 25
3.2 Energieversorgung 27
3.3 Randbedingungen für die Untersuchung von Gebäuden mit Netto-Energieüberschuss 28
3.4 Vergleich von Treibhausgasemissionen und Ansätze zur Modellierung des Stromnetzes 29
3.5 Modellierung des Nutzerverhaltens bei Einzelgebäuden 33

4 Ergebnisse der Berechnung von Einzelgebäuden 34
4.1 Basisvarianten für vier Gebäudetypen 34
4.2 Kombinationen unterschiedlicher Anlagentechniken 42
4.2.1 Luft-Wasser-Wärmepumpe 42
4.2.2 Erdreich-Wärmepumpe 44
4.2.3 Gas-Brennwertkessel 46
4.2.4 Gas-Brennwertkessel mit Mini-Wärmepumpe 47
4.2.5 Pellet-Kessel 49
4.2.6 Direktelektrische Wärmeversorgung 51
4.2.7 Bivalente Systeme mit Luft-Wasser-Wärmepumpe 51
4.2.8 Bivalente Systeme mit Erdreich-Wärmepumpe 54
4.2.9 Fazit 56
4.3 Ergebnisse für unterschiedliche Gebäudetypen 59
4.4 Detailuntersuchungen zum Einfluss einzelner Techniken 64
4.4.1 Einfluss von Größe und Nutzung des Wärmespeichers 64
4.4.2 Einfluss der Zirkulations- und Verteilverluste 65
4.4.3 Einfluss des Hilfsenergieverbrauchs 66
4.4.4 Einfluss unterschiedlicher Größen und Systeme von solarthermischen Anlagen 67
4.5 Einfluss der Berücksichtigung des Haushaltsstroms 69
4.5.1 Energie- und Treibhausgas-Bilanz 69
4.5.2 Einfluss des Anteils an erneuerbaren Energien 74

5 Bewertungsschema für zukunftsfähige Gebäude zur Berücksichtigung von Potenzialgrenzen bei unterschiedlichen Energiequellen 82

5.1 Ausgangslage und Lösungsansatz 82
5.2 Bilanzierungsansatz für den zukunftsfähigen Neubau 85
5.3 Varianten des zukunftsfähiger „Null-Emissions-Gebäude“ 89
5.4 Anwendung des Berechnungsansatzes 90

6 Vergleich unterschiedlicher Gebäudekonzepte mit Energiegewinn 95
6.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms 97
6.2 Einfluss der PV-Stromerzeugung auf die Energiebilanz 101
6.3 Ergebnisse mit Berücksichtigung des Haushaltsstroms 105
6.4 Auswertungen zum dynamischen Verhalten von Gebäuden mit Energiegewinn 108
6.5 Fazit 115

7 Auswirkungen von klimaneutralen Neubauten im Wohngebäudebestand 2050 116

8 Ausblick 119

9 Literaturverzeichnis 122

Anhang A : Randbedingungen bei der Modellierung 125
A.1 Einfluss der Modellierung auf das Berechnungsergebnis 125
A.2 Vorgehen zur Ermittlung von mittleren Profilen 129
A.3 Unterschiede des dynamischen Verhaltens in Abhängigkeit der Anzahl der modellierten Gebäude 131
A.4 Einfluss des Standorts und des Untersuchungsjahres 134
A.5 Einfluss des Bewertungsfaktors für Biomasse für Systeme mit Biomasse als Brennstoff 136
A.6 Einfluss des Nutzerverhaltens 137
A.7 Zusammenhang von Speichervolumen und -kapazität 140

Anhang B : Ergebnistabellen 141
B.1 Zu Kapitel 4.2 - Ergebnisse der Berechnung von Kombinationen unterschiedlicher Anlagentechniken 141
B.2 Zu Kapitel 4.3 – Unterschiedliche Gebäudetypen 149
B.3 Zu Kapitel 4.5 – Berücksichtigung des Haushaltsstroms 151
B.4 Zu Kapitel 4.4.1 – Einfluss der Größe des Wärmespeichers 153
B.5 Zu Kapitel 4.4.3 – Einfluss des Hilfsenergieverbrauchs 153
B.6 Zu Kapitel 4.4.4 – Einfluss der thermischen Solaranlage 154
B.7 Zu Kapitel 6 – Gebäudekonzepte mit Energiegewinn 155

Kurzfassung

Forschungsfrage: Zukunftsfähiger Neubau

Der vorliegende Bericht fasst die auf zukunftsfähige Neubauten bezogenen Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudesektor: Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und Nachfrage (EE-GebaeudeZukunft)“ zusammen[1]. Ziel des hier dokumentierten Arbeitspaketes war es zu untersuchen, mit welchen Gebäudestandards beziehungsweise welchem Wärmeschutz und welcher Anlagentechnik heute errichtete Neubauten den Anforderungen eines zukünftigen klimaneutralen Wohngebäudebestandes genügen können. In erster Linie sollen Grundlagen dafür geschaffen werden, denjenigen Bauherren Orientierungshilfen gegeben zu können, die bereits heute mit ihren Gebäuden im Hinblick auf die langfristigen Klimaschutzziele „zukunftsfähig“ sein wollen und daher deutlich höhere Standards als die gesetzlichen Vorgaben anstreben. Im Mittelpunkt der Untersuchung steht also die Frage, wie eine solche „Zukunftsfähigkeit“ sinnvoll beschrieben werden kann und welche Konsequenzen und Spielräume sich aus unterschiedlichen denkbaren Definitionen ergeben.

Untersuchungsansatz und Randbedingungen

Bei der Behandlung der Frage, wie ein zukunftsfähiges Gebäude beschrieben werden kann, werden parallel mehrere Lösungsansätze aufgegriffen, das „klimagerechte“ Gebäude und ein rein qualitativer Ansatz für einen „bestmöglichen“ Neubau. Außerdem wird die neue Größe des „bewerteten Erdgasverbrauchs“ vorgestellt. Mit den verschiedenen Ansätzen werden dann Berechnungen mit dem Untersuchungsmodell durchgeführt, um die Ergebnisse zu vergleichen.

<u>Erster Lösungsansatz: „Klimagerechtes“ Gebäude</u>

Ein klimagerechtes Einzelgebäude oder ein klimagerechter gesamter Gebäudebestand wird in dieser Untersuchung in der Art verstanden, dass die unvermeidlichen Treibhausgasemissionen, die vorwiegend aus fossilen Quellen stammen, so weit reduziert werden können, dass Atmosphäre, Biosphäre und Ozeane die verbleibenden Mengen aufnehmen können. Als vorbildlich kann ein Gebäude gelten, das bereits heute das Klimaschutzziel des Jahres 2050 für einen zukünftigen Wohngebäudebestand einhält. Orientiert man sich am Ziel einer 87,5 % Treibhausgasminderung gegenüber 1990[2] und bricht dieses auf eine erwartete Wohnfläche 2050 herunter, so ergibt sich überschlägig ein Zielwert von 6,5 kg $CO_{2\,äquiv}$/(m²a) für die wohnflächenbezogenen jährlichen Treibhausgasemissionen. Wird der Haushaltsstrom mit betrachtet, so liegt die Obergrenze für die Treibhausgas-Emissionen bei 8,5 kg/(m²a). Zur Erreichung dieser Ziele steht dem Gebäude neben dem Wärmeschutz und einer effizienten Wärmeversorgung in diesem Konzept auch die Möglichkeit der Nutzung erneuerbarer Energien offen, insbesondere auch aus gebäudeeigenen Solaranlagen. Im Gebäude selbst produzierte Überschüsse können aber auf den Zielwert nicht als Gutschrift angerechnet werden. Für den Bezug elektrischer Energie aus dem öffentlichen Netz wird angenommen, dass diese in zukünftigen effizienten Erdgaskraftwerken erzeugt wird. Um den ungünstigen Fall abzubilden, dass die untersuchten Neubauten nicht durch Solar- und Windkraftpotenziale von außen unterstützt werden, wird ein

[1] Es handelt sich um den Teil 2 des Endberichts. Der Teil 1 [Diefenbach et al. 2019] befasst sich mit einer Analyse des gesamten Wohngebäudebestands. Im Projekt wurde auch ein Simulationsmodell entwickelt, das im Zwischenbericht [Diefenbach et al. 2019] dokumentiert ist. Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durchgeführt. Die vorliegende Thematik der zukunftsfähigen Gebäude wurde weitgehend am IWU behandelt. Die Projektpartner, die Hochschule Darmstadt – Fachbereich für Elektrotechnik und Informationstechnik – und das Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung, Aachen, haben das gesamte Projekt beratend begleitet.

[2] Als Mittelwert des 80-bis-95%-Zielintervalls der Bundesregierung für die Emissionsreduktion.

konstanter Treibhausgasemissionsfaktor verwendet, der sich trotz der im Stromnetz stetig wachsenden Solar- und Windstromanteile nicht weiter vermindert[3].

Zweiter Lösungsansatz: „Bestmöglicher" Neubau

Neben diesem ersten wird noch ein zweiter Ansatz für das zukunftsfähige Gebäude verfolgt, der auf die Erstellung einer Energiebilanz völlig verzichtet: Hier wird angenommen, dass sich ein vorbildlicher Neubau auch aufgrund seiner Einzelkomponenten begründen lässt – unter Umgehung aller mit Energiebilanzen zusammenhängenden Bewertungsprobleme und somit für viele Bauherren möglicherweise sogar besser verständlich. Dem Bauherren wird im Neubau nahegelegt, sich an den aus technischer Sicht besten Lösungen zu orientieren - sowohl beim Wärmeschutz auch bei der Wärmeversorgung. Gleichzeitig werden ihm aber auch Spielräume eingeräumt, das Konzept ist also keineswegs so zu verstehen, dass immer nur das Beste vom Besten sinnvoll ist.

Konkret wird für den Wärmeschutz der Einzelbauteile im Neubau eine Spannbreite zur Orientierung aufgezeigt. Diese reicht jeweils von einem sehr weitgehenden, am Passivhaus- bzw. Effizienzhaus-40-Standard orientierten Zielwert für den jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten bis zu einer weniger weitgehenden Obergrenze, die ungefähr dem Effizienzhaus-55-Standard entspricht[4].

Weiterhin wurden für die Anlagentechnik Randbedingungen formuliert, damit das Einzelgebäude mit dem Gesamtsystem interagieren kann und dadurch die maximal zur Verfügung stehenden Potenziale nicht überschritten werden. Diese können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Jedes zukunftsfähige Gebäude muss in der Lage sein, Sonnenenergie zu nutzen – bevorzugt in Form von Photovoltaikanlagen (PV) – da die effiziente Nutzung von regenerativer elektrischer Energie ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Klimaneutralität ist. Dazu ist auch ein deutlicher Ausbau bei der PV-Stromerzeugung erforderlich. Flächen von Neubauten sind aus diesem Grund weitgehend zur Ausschöpfung des Flächenpotenzials zu nutzen.
- Mit PV-Strom alleine ist eine ganzjährige Versorgung von Wohngebäuden aufgrund des hohen winterlichen Wärmebedarfs kaum möglich. Aus diesem Grund müssen die Gebäude in der Lage sein Windstrom zu nutzen, der bis auf wenige Ausnahmen nicht am Gebäude erzeugt wird. Dazu ist in der Regel ein Wärmespeicher zum Ausgleich von Energieangebot und -nachfrage erforderlich, außerdem eine Wärmepumpe oder – weniger effizient – ein Elektroheizstab zur Umwandlung des Windstroms in Wärme. Da die Fähigkeit Windstrom zu nutzen erst benötigt wird, wenn der Ausbau der Windkraft deutlich vorangeschritten ist, müssen die Gebäude die Möglichkeit der Windstromnutzung zumindest nachrüsten können.
- Da im Sommer ausreichend Sonnenenergie zur Verfügung steht, sollte das Gebäude keinen Brennstoff (fossil oder regenerativ) im Sommer verbrauchen, weder direkt noch indirekt über das vorgelagerte Energieversorgungssystem. Bei einer Wärmeversorgung mit Verbrennungsanlagen sind diese bivalent mit einem zusätzlichen regenerativen System auszuführen.

[3] Auch Solar- und Windenergie haben begrenzte Potentiale, so dass eine insgesamt sparsame Stromverwendung notwendig ist. Klimagerechte Gebäude sollten also notfalls auch ohne Inanspruchnahme von Solar- und Windstrom aus dem allgemeinen Stromnetz ihren Zielwert erreichen können. Unabhängig von dieser rein bilanztechnischen Bewertung ist es gleichwohl notwendig, dass aus heutiger Sicht klimagerechte Gebäude zusätzlich die Fähigkeit zur Nutzung von Windstrom zur Wärmeversorgung aufweisen, damit sie noch bessere Emissionswerte in Richtung auf ein tatsächliches Null-Emissions-Gebäude erreichen können. Denn im zukünftigen Wohngebäudebestand werden viele Altbauten vertreten sein, die weniger günstige Voraussetzungen für eine energetische Optimierung aufweisen und die Nutzung von Windstrom zur Wärmeversorgung erweist sich nach [Diefenbach et al. 2019] als wichtiger Faktor zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gesamtbestand.

[4] Diese KfW-Effizienzhausstandards sehen einerseits Mindestanforderungen für den Wärmeschutz der Gebäudehülle vor. Andererseits ergibt sich, da außerdem die Anforderungen an den Primärenergiebedarf einzuhalten sind, im Durchschnitt der geförderten Neubauten ein weitergehendes, über diese Mindestanforderungen hinausgehendes Wärmeschutzniveau. Dieses tatsächlich im Mittel erreichte Wärmeschutzniveau ist gemeint, wenn hier von einem Wärmeschutz gemäß KfW-Effizienzhausstandard-55 bzw. 40 gesprochen wird.

- Als Wärmeerzeuger in zukunftsfähigen Gebäuden sind Wärmepumpen besonders geeignet, aber auch mit anderen Systemen können die Klimaziele im Einzelgebäude erreicht werden. In der Fläche werden gegenwärtig keine Alternativen zur Wärmepumpe gesehen.
- Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung werden empfohlen, Gebäude mit Fensterlüftung können grundsätzlich aber auch gebaut werden; das führt in der Regel aber zu strengeren Anforderungen an den Wärmeschutz und die übrige Anlagentechnik.
- Zukunftsfähige Gebäude benötigen bis zum Jahr 2050 eine Regelung, die die Wärmeerzeugung im Gebäude so weit wie möglich an das Angebot an regenerativen Energien im Netz anpasst und ggf. Überschüsse in Speichern puffert oder bei geringem Angebot ein Backup-Wärmeversorgungssystem nutzt, um Lastspitzen im Netz zu verringern. Die Voraussetzungen für diese Regelung muss aber sowohl auf der übergeordneten Steuerungsebene als auch im Gebäude in den nächsten Jahren noch geschaffen werden, so dass eine geeignete Regelung nachrüstbar sein muss.

Insgesamt liefert dieser zweite Ansatz also eine Art Baukastensystem: Wenn ein guter Wärmeschutzstandard und die beste Systemtechnik kombiniert werden, so ist nach heutiger Kenntnis ziemlich sicher, einen zukunftsfähigen Neubau zu erhalten. Wird nur Mindestwärmeschutz eingesetzt, so steigen die Anforderungen an die Anlagentechnik, um dem Anspruch eines klimagerechten Gebäudes zu genügen. Auf eine konkrete Regel, wo genau die Grenzen bei diesem flexiblen Konzept zu ziehen wären, wird hier verzichtet.

Randbedingungen der Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe von vier Beispielgebäuden durchgeführt: ein Einfamilienhaus, ein Reihenendhaus, ein größeres Mehrfamilienhaus sowie ein kleineres saniertes Mehrfamilienhaus. Für alle Beispielgebäude wurden Ausführungsvarianten der Gebäudehülle für die Standards „Mindestanforderungen der Energieeinsparverordnung 2016“ (EnEV), „KfW-Energiesparhaus 55“ (EH55) sowie „KfW-Energiesparhaus 40“ (EH40) festgelegt.

In dem für die Untersuchungen entwickelten Berechnungsmodell werden für ein oder mehrere Beispielgebäude die Nutzung der PV-Stromerzeugung im Gebäude im zeitlichen Verlauf mit stündlicher Auflösung berechnet. Reicht das lokale Angebot nicht aus, wird der benötigte Strom aus dem Netz der allgemeinen Versorgung berechnet (mit zeitlich konstantem Emissionsfaktor). Gleichzeitig werden für Überschüsse, die das Gebäude in das Stromnetz einspeist, keine Gutschriften angerechnet.

Die Analysen wurden in der Regel nicht für Einzelgebäude mit einem bestimmten Standard-Nutzungsprofil, sondern für eine Gruppe von Gebäuden mit jeweils unterschiedlichen, aus einem empirischen Modell abgeleiteten Nutzungsprofilen durchgeführt und die Bilanzergebnisse dann am Ende gemittelt. Dieser Ansatz erfolgte vor dem Hintergrund, dass Standardprofile in der Regel gegenüber realen Profilen einen geglätteten Verlauf aufweisen, so dass in einer Gebäude- und Anlagensimulation keine realistische Situation abgebildet wird.

Bewertung Biomasse

Da generell eine nachhaltige Gewinnung der Biomasse als nachwachsender Rohstoff vorausgesetzt wird, werden Holz keine direkten Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung zugeordnet. Die Ziele des ersten Lösungsansatzes für das klimagerechte Gebäude werden daher bei Einsatz des Pelletkessels (hier untersucht: Holzpellet-Kessel[5]) fast immer erreicht – auch bei ungünstigsten Annahmen zu Wärmeschutz und sonstiger Anlagentechnik. Dem Problem eines eng begrenzten Biomassepotentials wird ein solcher Ansatz allerdings nicht gerecht.

Als Erweiterung des klimaneutralen Gebäudes wird daher parallel zu dem oben genannten Treibhausgas-Zielwert (6,5 kg/(m²a)) auch noch ein Biomasse-Zielwert von 10 kWh/(m²a) (ohne Haushaltsstrom) defi-

[5] Auch moderne, automatisch geregelte und in das Wärmversorgungssystem eingebundene Pelletöfen sind in dabei mit abgedeckt.

niert, der sich durch Herunterbrechen des angenommenen langfristigen Biomassepotentials auf die Gesamt-Wohnfläche im Wohngebäudebestand ergibt[6].

Mit der Einführung dieses Zielwerts ist die neue Grenze jedoch so eng gezogen, dass sie nur in den seltensten Fällen eingehalten werden kann. Der zusätzliche Biomasse-Zielwert würde nun dazu führen, dass in dem Konzept Biomasseheizungen (anders als Erdgasheizungen) kaum noch überhaupt realisiert werden könnten. Um diese Begrenzung aufzulösen, muss berücksichtigt werden, dass nicht alle zukünftigen Neubauten Biomasse einsetzen. Somit überschreitet nur ein gewisser Anteil den Biomassezielwert, dagegen überschreitet ein Teil der Gebäude möglicherweise den Emissionszielwert. Die Zielwerte müssen aber nicht in jedem Einzelgebäude für sich, sondern in der Gesamtheit der Gebäude erreicht werden. Es wäre also möglich und insgesamt immer noch zielkonform, dass ein gewisser Teil der Gebäude den Emissionszielwert, ein anderer Teil den Biomassezielwert überschreitet.

Ergebnisse der Analysen

Vergleichsanalysen für die beiden Ansätze mit unterschiedlichen Gebäudetypen

Die beiden Untersuchungsansätze („klimagerechtes Gebäude“ und „bestmöglicher Neubau“ mit qualitativer Beschreibung von Standards für Gebäudehülle und Anlagentechnik) wurden für verschiedene Gebäudetypen (Einfamilien- und Reihenhaus sowie zwei unterschiedliche Mehrfamilienhäuser) durchgeführt. Betrachtet wurden verschiedene Kombinationen für Wärmeschutz und Anlagentechnik. Der Haushaltsstrom ist hierbei noch nicht berücksichtigt.

Für das Einfamilienhaus (EFH) und das Mehrfamilienhaus (MFH) ist in Abbildung 1 dargestellt, ob die Anforderungen an Treibhausgasemissionen und Biomasseverbrauch für ein klimagerechtes Gebäude von verschiedenen Kombinationen der Anlagentechnik eingehalten werden, wenn ein Wärmespeicher und eine PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche installiert sind[7].

		Monovalente Systeme										Bivalente Systeme									
		Luft-Wasser-WP		Erdreich-WP		Gas-Brenn-wertkessel		Pellet-Kessel		Direkt-elektrisch		L-W-WP+Gas-BWK		L-W-WP+Pelletkessel		Erdreich-WP+Gas-BWK		Erdreich-WP+Pelletkessel		Gas-BWK+Mini-WP	
		THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.	THG	BrSt.
EFH	EnEV							✓						✓				✓			
	EH 55 ohne WRG			✓	✓			✓						✓		(✓)	(✓)	✓			
	EH 55 mit WRG			✓	✓			✓				(✓)	(✓)	✓		✓	✓	✓			
	EH 40 mit WRG	✓	✓	✓	✓	(✓)	(✓)	✓				✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓
MFH	EnEV							✓						✓				✓			
	EH 55 ohne WRG			(✓)	(✓)			✓						✓		(✓)	(✓)	✓			
	EH 55 mit WRG			✓	✓	(✓)	(✓)	✓				(✓)	(✓)	✓		✓	✓	✓			
	EH 40 mit WRG	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓

Legende:

THG	Treibhausgasemissionen
BrSt.	Brennstoffverbrauch (fossil/Biomasse)
✓	Ziele werden erreicht
(✓)	Ziele können mit Zusatzmaßnahmen erreicht werden
	Ziele werden um weniger als das Doppelte überschritten (akzeptabel, wenn nicht alle Gebäude mit dieser Technik ausgestattet werden)
	Ziele werden auch mit Zusatzmaßnahmen in der Regel nicht erreicht

Abbildung 1: Kombination von Wärmeschutz und Anlagentechnik und die Einhaltung der Zielwerte für Treibhausgasemissionen und Brennstoffverbrauch

Felder mit einem Haken erfüllen die Anforderungen an „klimagerechte „Neubauten, ist der Haken in Klammern gesetzt, können die Anforderungen durch kleinere Verbesserungen der Anlagentechnik gegenüber

[6] Gegenüber früheren Ansätzen zur verfügbaren Biomasse für die Gebäude-Wärmeversorgung wurden deutlich strengere Maßstäbe angesetzt. Diese sind insbesondere dadurch begründet, dass das Biomassepotential für die Wohngebäude-Wärmeversorgung heute insgesamt deutlich pessimistischer eingeschätzt wird.

[7] Die Unterschiede zwischen Einfamilien- und Reihenhaus einerseits und den beiden Mehrfamilienhäusern sind gering und werden in Kapitel 4.3 erläutert.

der gewählten Standardauslegung erreicht werden (z. B. größere PV-Anlage). Rot eingefärbte Felder überschreiten die Ziele für ein klimagerechtes Gebäude meist deutlich.

Es zeigt sich, dass mit dem Anforderungsniveau an die Gebäudehülle[8] nach Energieeinsparverordnung 2016 (EnEV) die Ziele bei den Treibhausgasemissionen für klimagerechte Neubauten nur mit einer Wärmeversorgung auf Basis von Holzpellets erreicht werden (wie in allen untersuchten Standards), gleichzeitig werden die Ziele zur Begrenzung des Biomasseverbrauchs meist sehr deutlich überschritten. Zur Lösung dieses Problems wird weiter unten das Berechnungsverfahren des „bewerteten Erdgasverbrauchs" eingeführt.

Beim Wärmeschutz nach KfW-Effizienzhaus-55-Standard, das auch gleichzeitig etwa dem zweiten qualitativen Mindestansatz entspricht, erreichen Gebäude ohne eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) nur mit einer Erdreichwärmepumpe als der effizientesten Anlagentechnik die Ziele – beim Mehrfamilienhaus sind aber noch anlagentechnische Zusatzmaßnahmen erforderlich, um den Zielwert tatsächlich zu erreichen. Ist zusätzlich eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung vorhanden, so kann der Zielwert leichter erreicht werden und es können weitere Wärmeerzeuger wie Gas-Brennwertkessel oder bivalente Systeme eingesetzt werden. Wird die Gebäudehülle im KfW-Effizienzhaus 40-Standard (EH40) errichtet, so können beim Einfamilien- und beim Mehrfamilienhaus Luft-Wasser- und Erdreich-Wärmepumpen sowie Gas-Brennwertkessel eingesetzt werden. Beim Pelletkessel liegt der Brennstoffverbrauch weniger als bei dem doppelten des Biomassebudgets, so dass unter der Annahme, dass nicht alle Gebäude Holzpellets einsetzen auch diese Wärmeversorgung umsetzbar ist. Nur die ausschließlich direktelektrische Wärmeversorgung erreicht aufgrund ihrer geringen Effizienz auch mit dem besten Wärmeschutz und selbst bei Maximierung der Dach-PV-Anlage nicht die Zielwerte für klimagerechte Neubauten.

Die Ergebnisse der Reihenhäuser liegen grundsätzlich ähnlich denen des Einfamilienhauses und auch die beiden Mehrfamilienhäuser unterscheiden sich in ihren Ergebnissen kaum, nur beim KfW-Effizienzhaus-40-Standard schneidet das modernisierte Mehrfamilienhaus aufgrund von nicht vermeidbaren Wärmebrücken ein wenig ungünstiger ab als der Neubau.

Bei den bivalenten Wärmerzeugungssystemen wird unabhängig vom Gebäudetyp die erforderliche Kraftwerksleistung zur Bereitstellung der elektrischen Energie durch einen Bivalenzbetrieb mit einem brennstoffbetriebenen Spitzenlast-Wärmeerzeuger etwa auf ein Viertel reduziert.

Grob zusammengefasst zeigen die Vergleichsrechnungen, dass bei Ansatz der Wärmeschutz-Obergrenze (d.h. alle Bauteile erreichen nur das Effizienzhaus-55-Niveau) das Ziel des klimagerechten Gebäudes zumeist die bestmögliche Anlagentechnik erfordert (Erd-Wärmepumpe, dabei möglichst vollständige Ausschöpfung der verfügbaren solar nutzbaren Dachfläche). Bei Erreichen der Wärmeschutz-Zielwerte bestehen dagegen deutlich erweiterte Spielräume auch für den Einsatz von Luftwärmepumpen oder Erdgas-Heizkesseln als Haupt-Wärmeerzeuger. Die Ergebnisse bestätigen also insgesamt den oben genannten Hinweis, im qualitativen „Bestmöglich"-Konzept nicht zu sehr von den ehrgeizigeren Empfehlungen bei Wärmeschutz und Anlagentechnik abzuweichen.

Zum Umgang mit begrenzten Potentialen

Die Auswertungen haben gezeigt, dass bei der zukünftigen Energieversorgung begrenzte Potenziale für unterschiedliche Energieträger und -quellen berücksichtigt werden müssen – neben Erdgas (Treibhausgasemissionen) und Holz (begrenzte Biomasse) auch Sonne und Wind (beide besitzen begrenzte Flächenpotenziale). Vor diesem Hintergrund lassen sich für alle vier Energien Potentialgrenzen für die Wohngebäude-Wärmeversorgung definieren und auf die Wohnfläche im zukünftigen Wohngebäudebestand umrechnen.

Allerdings ist es ist nicht notwendig bzw. aus Sicht einer praxisgerechten Anlagentechnik auch nicht sinnvoll, dass jedes Gebäude alle vier Potentialgrenzen gleichzeitig einhält bzw. ausschöpft. Notwendig ist aber ein Mechanismus, der darauf hinwirkt, dass die Potentialgrenzen insgesamt (über alle Gebäude hinweg)

[8] Für den Wärmeschutz gemäß EnEV bzw. gemäß den Anforderungen an die KfW-Effizienzhäuser 55 und 40 werden hier typische Werte für diese Standards angesetzt, die über die jeweiligen Mindestanforderungen bezüglich des Transmissions-Wärmeverlusts noch hinausgehen.

möglichst eingehalten werden. Dazu wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem die Verbräuche der verschiedenen Energieträger und damit die Inanspruchnahme der jeweiligen Potentiale ineinander umgerechnet werden können.

Zunächst wurden für die einzelnen Energieträger generelle Potentialgrenzen im zukünftigen Wohngebäudebestand definiert und auf dieser Grundlage mittlere wohnflächenspezifische Zielwerte ermittelt[9]. Als Leitgröße dient dabei der Erdgasverbrauch, der stellvertretend für die Einhaltung der Treibhausgasziele steht, während mit dem Verbrauch von Holz, Sonne und Wind (fast) keine Treibhausgasemissionen verbunden sind. Ein Einzelgebäude kann nun mit seinem Verbrauch dieser verschiedenen Energieträger über oder unter den ihm zustehenden Potentialgrenzen liegen. Wenn auf diese Weise individuelle Potentialgrenzen von Holzenergie, Sonne oder Windkraft überschritten werden, verringert sich das entsprechende Potential für den restlichen Wohngebäudebestand. Zum Ausgleich muss dann im restlichen Bestand mehr Erdgas verbraucht werden. Umgekehrt führt eine Nichtausschöpfung der Holz-, Wind- bzw. Solarpotentiale dazu, dass diese Energieträger im Gesamtbestand verstärkt zur Verfügung stehen, so dass dort der Erdgasverbrauch abgesenkt werden kann.

Für die Berechnung der Höhe der Mehr- bzw. Minderverbräuche im Gesamtsystem wurden Ergebnisse aus Teilbericht 1 für den gesamten Gebäudebestand herangezogen. Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass in den individuellen Gebäuden erzeugte Solarstromüberschüsse mit bereits bestehenden hohen Anteilen von Solar- und Windstrom im Gesamtsystem konkurrieren, so dass neuer Solarstrom im Gesamtsystem nur teilweise zur Verdrängung von Strom aus brennstoffbetriebenen (Erdgas-)Kraftwerken führt[10]. Der auf diese Weise sich ergebende äquivalente Erdgasverbrauch des Gebäudes ist damit der Bewertungsmaßstab für diesen neuen Bilanzansatz.

Stufen für die Definition eines klimaneutralen Neubaus

Bei den folgenden Stufen wird unterstellt, dass durch zukunftsfähige Neubauten die Treibhausgasemissionen nicht ansteigen sollen, d.h. sie zu keinem Mehrverbrauch bei Erdgas im gesamten Gebäudebestand führen sollen. Außerdem sollen Neubauten mit ihren Dachflächen einen wichtigen Teil der Ausnutzung der Solarpotenziale darstellen, so dass ihnen aus diesem Grund kein externes Solarpotenzial zugewiesen wird. Unter diesen Randbedingungen können verschiedene Stufen eines neuen Konzepts für einen klimaneutralen bzw. „Null-Emissions-“Neubau unterschieden werden:

- Stufe 1: Dem Neubau werden keine Potentiale für Erdgasverbrauch und externe Solarenergienutzung zugeschrieben. Allerdings werden rechnerische Anteile am Biomasse- und Windstrompotential im Wohngebäudebestand berücksichtigt. Auch ist die Anrechnung von Gutschriften aus Solarstromüberschüssen wie beschrieben möglich.
- Stufe 2a bzw. 2b: Von den rechnerischen Biomasse- und Windenergieanteilen werden entweder nur die Windenergie (Stufe 2a) oder nur die Biomasse (Stufe 2b) angerechnet. Es wird also vorausgesetzt, dass die Neubauten das jeweils nicht genutzte Potential schonen, d.h. beispielsweise in Stufe 2b ohne eine (bilanzielle) Inanspruchnahme von Biomasse auskommen müssen.
- Stufe 3: Ausgehend von den vorherigen Konzepten werden weder Wind- noch Biomassepotentiale zugerechnet. Dieses Konzept entspricht einem bilanziellen Null-Energie-Haus „im eigentlichen Sinne“, da nun rechnerisch betrachtet keines der Potentiale der vier verwendeten Energieträger Erdgas, Solarenergie, Wind oder Biomasse in Anspruch genommen wird.

[9] Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, dass hier verschiedene Abstufungen möglich sind, indem nicht immer alle Potentiale gleichzeitig angerechnet werden können.

[10] Für diese Betrachtung wurden mittlere Faktoren der Substitution von Solar- bzw. Windenergie angesetzt. Bei Ansatz des Grenznutzens - beispielsweise also der Ermittlung des Effekts für den Zubau einer einzelnen Photovoltaikanlage im zukünftigen Gebäudebestand, indem das Solarstrompotential bereits weitgehend ausgeschöpft ist – wäre der Nutzen dieser Solaranlage noch einmal deutlich niedriger. Es wird hier aber angenommen, dass heutige und zukünftige Neubauten – auf die diese Überlegungen letztlich abzielen – zunächst einmal selbst dazu beitragen, dass die Solarstrompotentiale über die Jahre hinweg überhaupt ausgeschöpft werden können, so dass der noch strengere Ansatz eines zukünftigen Grenznutzens nicht gerechtfertigt erschien.

Zusammengefasst liegt hier also ein System vor, mit dem sich unterschiedlich strenge Niveaus für klimaneutrale Gebäude abhängig von bestimmten Bewertungsmaßstäben definieren lassen. Für die Definition eines „zukunftsfähigen“ Neubaus erscheint am ehesten die Stufe 3 des neuen Konzeptes für klimaneutrale Gebäude geeignet. Allerdings gibt es bei der Systematik noch offene Fragen. Einerseits ist zu klären, ob die Solarstrom-Gutschriften unbegrenzt angerechnet werden dürfen[11], andererseits kann es sinnvoll sein für unterschiedliche Gebäudetypen (Einfamilien-/Reihen-/Mehrfamilienhäuser) unterschiedliche wohnflächenbezogene Zielwerte zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wären vor weitergehenden Festlegungen noch zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

Vergleichsrechnungen für die verschiedenen Stufen

Für die verschiedenen Stufen des neuen Ansatzes für klimaneutrale Neubauten wurden Beispielrechnungen durchgeführt, indem nun insbesondere der äquivalente (bewertete) Erdgasverbrauch für die in den früheren Analysen verwendeten Beispielgebäude und Anlagentechniken untersucht wurde. Betrachtet wurde das Beispiel des Einfamilienhauses.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass bei mit Biomasse beheizten Gebäuden die neue Systematik in allen Abstufungen höhere Anforderungen an die Gebäude stellt als bei Bilanzverfahren, bei denen Biomasse als regenerativer Energieträger ohne Potentialgrenze betrachtet wurde. Die neue Systematik kann also die Notwendigkeit einer sparsamen Biomasseverwendung angemessen berücksichtigen.

Bei mit Erdgas oder Strom (über Wärmepumpen) beheizten Gebäuden stellt sich in den Beispielbetrachtungen heraus, dass die Anforderungen an das ursprüngliche klimagerechte Gebäude in vielen Fällen strenger sind als für die neu definierten Stufen 1-2. Dies ist insbesondere auf den Einfluss der zusätzlich anrechenbaren Potentiale für Windenergie und Biomasse in Stufe 1 und 2 zurückzuführen, die bei den ursprünglichen Standards nicht berücksichtigt werden konnten. Dagegen zeigt sich, dass die Stufe 3 bei Verwendung von Erdgas bzw. Strom weitgehend mit den Ansprüchen des klimagerechten Gebäudes konform geht und darüber hinaus etwas strengere Anforderungen als Gebäude mit Netto-Energieüberschuss stellt, da der Gutschriftansatz für Photovoltaiküberschüsse in der neuen Stufe 3 konservativer (d.h. weniger weitreichend) als bei Gutschriften mit dem aktuellen Strommix, da nun zukünftige Einschränkungen für die Nutzungsmöglichkeit von Solarstrom mitberücksichtigt sind.

Beispielanalysen für eingeführte zukunftsweisende Neubau-Konzepte

Im Rahmen des Projekts wurden auch Vergleiche mit weiteren Konzepten für zukunftsweisende Gebäude durchgeführt, nämlich dem KfW-Effizienzhaus-40 Plus, dem Effizienzhaus Plus in drei Varianten[12], dem Sonnenhaus, dem Passivhaus Plus und dem Plusenergiegebäude. Hierzu wurden wiederum Beispielrechnungen für das Einfamilienhaus durchgeführt. Als Wärmeerzeuger wurden zumeist Luft-Wärmepumpen, beim Sonnenhaus (ergänzend zur Solaranlage mit Großwärmespeicher) und beim Plusenergie-Gebäude dagegen Pelletkessel angenommen. In den meisten Untersuchungsfällen wurden die Zielwerte des klimagerechten Gebäudes eingehalten, in einigen Fällen mit klein dimensionierter Photovoltaikanlage und/oder weniger anspruchsvollem Wärmeschutz gelang dies allerdings nicht. Das Gesamtbild für den Vergleich mit der neuen Stufe 3 des klimaneutralen Gebäudekonzepts fällt im Großen und Ganzen ähnlich aus, mit dem Unterschied, dass bei wenig ambitioniertem Wärmeschutz und auch für Gebäude mit Pelletkessel das Ergebnis knapp oder negativ ausfallen kann, sich andererseits aber Gutschriften für große Photovoltaikanlagen deutlich positiv bemerkbar machen können. Es kann damit die Schlussfolgerung gezogen werden, dass zumindest in diesen Beispieluntersuchungen die betrachteten existierenden Konzepte für zukunftsfähige

[11] Wenn die Solargutschrift nicht begrenzt wird, besteht die Gefahr, dass Gebäude für eine maximale PV-Stromerzeugung geplant werden, wodurch der Energiebedarf aber wieder ansteigen kann, z. B. wenn Bungalows mit maximierter Dachfläche und gleichzeitig vergrößerte thermischer Hüllfläche gebaut werden.

[12] Hier wurden unterschiedliche Dämmstandards in Anlehnung an die Niveaus von KfW-Effizienzhauses-55 bzw. 40 betrachtet.

Neubauten mit den in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Maßstäben zumindest weitgehend konform gehen.

Demonstration eines klimaneutralen Neubaus im Gesamtsystem

In einer Sonderuntersuchung wurde die Frage behandelt, ob ein klimaneutraler Neubau, also ein Zubau von Gebäuden in relevantem Umfang, in einem zukünftigen Wohngebäudebestand ohne zusätzliche Treibhausgasemissionen tatsächlich möglich ist. Für diesen Zweck wurde das Simulationsmodell entsprechend den Analysen in Teilbericht 1 des Projekts [Diefenbach et al. 2019] auf den gesamten Wohngebäudebestand angewendet. Der zukünftige Wohngebäudebestand wurde als bereits energetisch modernisiert angenommen, und zwar mit entsprechend hohen Anteilen von Solar- und Windenergienutzung, die eine Einhaltung der Klimaschutzziele ermöglichen. In diese Situation wurde dann der Neubau (ebenfalls mit sehr gutem Wärmeschutz und Photovoltaikanlagen) „hinzugebaut“, in den Simulationen also zusätzlich berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Neubau ohne zusätzliche Treibhausgasemissionen im Gesamtsystem tatsächlich möglich ist – im untersuchten Beispiel mit höchstem Wärmeschutzstandard, ausreichend großen Photovoltaikanlagen und unter Anrechnung eines zusätzlichen Biomasse- und Windstrom-Potentials entsprechend der zugebauten Wohnfläche[13].

Ergebnisse mit und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstromes

In den bisherigen Konzepten wurde allein die Wärmeversorgung der Wohngebäude betrachtet. Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes und wegen der engen Verzahnung von Wärme und Strom (Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen) sollte auch die Hinzunahme des Haushaltsstroms betrachtet werden. Nimmt man bei den Auswertungen den Haushaltsstrom hinzu (Kapitel 4.5), so erhöht sich der Stromverbrauch des Gebäudes. Bei der Energiebilanz wurde berücksichtigt, dass die gebäudeeigenen Photovoltaikanlagen nicht mehr nur zur Wärmeerzeugung, sondern nun auch (und zwar vorrangig) zur Deckung des Haushaltsstromverbrauchs im Gebäude eingesetzt werden.

Für den Vergleich der Situation ohne und mit Haushaltsstrom wurde von einer Einsparung beim Haushaltsstrom von etwa einem Viertel im Jahr 2050 gegenüber heute ausgegangen. Bei einem mittleren Verbrauch von 20 kWh/(m²a) wurden in den Berechnungen die unterschiedlichen Profile aus dem Nutzermodell aus Teilbericht 1 verwendet. War es im Reihenendhaus ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms mit dem besten energetischen Standard möglich mit unterschiedlicher Anlagentechnik die Treibhausgasziele für ein klimagerechtes Gebäude zu unterschreiten, so erreicht inklusive Haushaltsstrom und mit einer PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche des Gebäudes nur noch eine Anlagentechnik mit einem Pellet-Kessel die Treibhausgasziele, dann fällt der Biomasseverbrauch aber zu hoch aus. Mit einer Erdreich-Wärmepumpe wird beim Effizienzhaus-40 mit Wärmerückgewinnung der Zielwert von Treibhausgasemissionen und Brennstoff um ca. 15 % überschritten, alle anderen Varianten schneiden noch ungünstiger ab. Bei den Mehrfamilienhäusern erreicht keine der untersuchten Varianten die Kombination aus Treibhaus- und Brennstoff bzw. Biomasseziele. Grund ist bezogen auf die zur verfügbaren PV-Fläche deutlich größere Wohnfläche, die zu einem höheren absoluten Stromverbrauch führt.

Die Auswertung zeigen, dass die Ziele für ein klimagerechtes Gebäude unter Berücksichtigung des Haushaltsstroms alleine mit den Möglichkeiten einer regenerativen Stromerzeugung auf Basis von Photovoltaik kaum erreicht werden. Erst durch die Nutzung von Windstrom – vor allem im Winter – ist die Erreichung der Klimaneutralität erst möglich. Windenergie kann jedoch nicht in nennenswertem Umfang lokal am Gebäude erzeugt werden, so dass es umso wichtiger ist, dass zukunftsfähige Gebäude Windstrom aus dem Netz nutzen können und die begrenzten Potenziale nur minimal in Anspruch nehmen.

[13] Die untersuchte Konstellation ist insofern ungünstig für den Neubau, als dieser nicht wie in der Realität kontinuierlich zugebaut wird, sondern in der Analyse erst am Ende zu einem fertig modernisierten Bestand hinzukommt. Dies bedeutet beispielsweise, dass in der Simulation die Solarstromüberschüsse der Neubauten, anders als in dem hier verfolgten allgemeinen Bewertungsansatz, nur in Form ihres Grenznutzens wirksam werden können (vgl. Fußnote 10).

Weitere Ergebnisse und Ausblick

Aus den Untersuchungen zur Erreichung von zukunftsfähigen, klimagerechten Gebäuden lassen sich weitere Schlüsse für die allgemeine Gebäudeplanung ziehen:

- Je besser der Wärmeschutz, desto mehr Optionen bestehen bei der Anlagentechnik. Als sinnvoller Mindestwärmeschutz für die Einzelkomponenten der Gebäudehülle sind die untersuchten typischen U-Werte des KfW-Effizienzhauses-55 anzusehen. Es sollten aber nicht alle Bauteile gleichzeitig nur diese Minimalniveau erreichen. Wenn möglich ist das für Effizienzhäuser 40 bzw. Passivhäuser typische Wärmeschutzniveau anzustreben.
- Wärmespeicher sind ein wichtiger Faktor für die Nutzung von Solar- und Windenergie zur Wärmeversorgung. In dieser Funktion können sie nicht sinnvoll durch Stromspeicher ersetzt werden, da sie größere Speicherkapazitäten bei geringerem materiellem und finanziellem Aufwand ermöglichen, außerdem sind die kurzzeitigen Verluste der Wärmespeicher in der Regel geringer.
- Aus heutiger Sicht sollten die für Solaranlagen, insbesondere auch Photovoltaik verfügbaren Dachflächen von Neubauten möglichst weitgehend genutzt werden, um die insgesamt begrenzten Potenziale auf bebauten Flächen zu aktivieren. Bei der bilanziellen Verrechnung von Solarstromüberschüssen im Kontext klimaneutraler Neubau-Konzepte ist darauf zu achten, dass hier sinnvolle Grenzen gesetzt werden, insbesondere sollten hier keine wesentlichen Abstriche bei der Energieeffizienz von Gebäudehülle und Anlagentechnik resultieren.

Bei den Untersuchungen in diesem Bericht wurde eine Reduktion der Treibhausgasemissionen beim Einzelgebäude von 87,5 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 zugrunde gelegt. Diese Einsparung bei den Emissionen reicht aber möglicherweise nicht aus, um in Anbetracht der Restriktionen im Gesamtbestand die Klimaneutralität insgesamt zu erreichen. Werden noch höhere Reduktionsziele erforderlich, dann würden nur noch die besten Standards bei der Gebäudehülle in Verbindung mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und einem maximalen Ausbau der Photovoltaik am Gebäude zu weiteren Emissionsreduktionen führen. Außerdem gewinnen dann Techniken wie Power-to-Gas an Bedeutung, um weitere Treibhausgaseinsparungen realisieren zu können.

Die Diskussionen in Deutschland über geeignete Anforderungen für „Nearly Zero Energy"-Gebäude nach EU-Gebäuderichtlinie gehen im Licht der Untersuchungen in diesem Bericht nicht weit genug. Zumindest ein Standard vergleichbar KfW-Effizienzhaus-55 sollte bei Neubauten in den nächsten Jahren angestrebt werden. Wie einfach oder aufwändig die Erreichung der Klimaschutzziele bis 2050 wird, hängt außerdem auch vom Wohnflächenverbrauch im gesamten Gebäudebestand ab – auch hier sollte unabhängig von technischen Lösungen zur Treibhausgasreduktion nach Möglichkeiten für einen sparsamen Umgang mit der existierenden oder neu geschaffenen Wohnfläche gesucht werden.

Die neu entwickelte Kenngröße des „bewerteten Erdgasverbrauchs" ist bisher nur für die Wärmeversorgung geeignet. In weiteren Untersuchungen könnte sie auch auf den Haushaltsstrom ausgedehnt werden, um eine Gesamtbewertung von Gebäuden zu ermöglichen.

Die Ergebnisse in diesem Bericht beruhen auf der Annahme, dass die Wärmeversorgung im Gebäude in der Lage ist, abhängig vom Angebot oder dem Fehlen von erneuerbaren Energien zum jeweiligen Zeitpunkt, den Betrieb zu variieren. Dies bedeutet, entweder Überschüsse in Energiespeichern zu bevorraten oder das Gebäude aus den gefüllten Speichern zu versorgen, wenn zu wenig Wind oder Sonnenenergie zur Verfügung steht. Eine solche Regelung ist bisher am Markt nicht verfügbar und sie benötigt ein Steuersignal, z.B. in Form eines Börsenstrompreises, um geeignet regeln zu können. Im Projekt konnte dargelegt werden, dass die erforderliche Technik und Infrastruktur in den nächsten Jahren erfolgreich entwickelt werden könnte. Ob in den kommenden Jahrzehnten ein entsprechend reformierter Börsenstrompreis eine geeignete Steuergröße sein könnte, muss aber noch in weiteren Untersuchungen herausgearbeitet werden.

1 Einleitung

Wie kann der deutsche Wohngebäudebestand – er umfasste im Jahr 2017 immerhin 18,8 Mio. Gebäude mit 40,3 Mio. Wohneinheiten [dena 2018] – bis zum Jahr 2050 klimaneutral werden? Was bedeutet in diesem Zusammenhang klimaneutral und welche Anforderungen sind an Neubauten zu stellen, die bis 2050 noch neu errichtet werden?

Diesen und weiteren Fragen stellte sich das Forschungsvorhaben „Energieeffizienz und zukünftige Energieversorgung im Wohngebäudesektor: Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und Nachfrage (EE-GebaeudeZukunft)“, das zwischen 2015 und 2019 mit finanzieller Förderung durch das Bundeswirtschaftsministerium durchgeführt wurde. Beteiligt waren das Institut Wohnen und Umwelt, die Hochschule Darmstadt sowie das Büro für Energiewirtschaft BET[14].

In dem Projekt wurde im Hauptarbeitspaket (Teilbericht 1) für das Jahr 2050 unter Berücksichtigung von Potenzialgrenzen bei Gebäuden und Erzeugungsanlagen der gesamte Wohngebäudebestand mit seiner zeitlich hoch aufgelösten Energienachfrage, das dynamische Energieangebot aus regenerativen Energien sowie die Residualleistung in fossilen Kraftwerken im Stromnetz abgebildet und Konzepte für einen weitgehenden Ausgleich von Angebot und Nachfrage entwickelt. Im hier dokumentierten Teilbericht wurden in einem weiteren Arbeitspaket Einzelgebäude betrachtet und Konzepte für Neubauten auf dem Weg zur Klimaneutralität abgeleitet.

1.1 Ziele der Untersuchung

In diesem Teilbericht 2 zu zukunftsfähigen Neubauten wurde untersucht, welche Anforderungen an Neubauten zu stellen sind, damit sie das Gesamtziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes unterstützen. Neubauten, die bis 2050 noch errichtet werden, haben einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am zukünftigen Gebäudebestand, und man ist beim Entwurf und bei der Anlagentechnik vergleichsweise frei, sie unter dem Aspekt der Klimaneutralität optimal zu errichten – anders als das bei Bestandsgebäuden möglich ist.

Es wurden Einzelgebäude oder Gruppen von Einzelgebäuden untersucht, da die individuellen Verbrauchsprofile der Nutzer und die Beschränkungen am Gebäude z. B. bezüglich der möglichen PV-Stromerzeugung mit berücksichtigt werden sollten. Bei der Betrachtung von Einzelgebäuden sind aber Ausgleichseffekte nicht unbedingt zu erkennen, wenn z. B. in einem Gebäude ein Energiebedarf besteht, im Nachbarhaus aber gerade Überschüsse vorhanden sind. Dennoch ist die Betrachtung von einem oder wenigen Einzelgebäuden erforderlich, um die individuellen Grenzen der Gebäude herausarbeiten zu können. Der klimaneutrale Gebäudebestand ist das Gesamtziel, das nicht am Einzelgebäude alleine gelöst werden kann. Das Gebäude und die erneuerbare Energieversorgung müssen zusammen interagieren, um bei begrenzten Potenzialen eine weitgehende Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Dennoch sollten Einzelgebäude, besonders wenn sie neu gebaut werden, eine Reihe von Kriterien erfüllen, um sich in das Energiesystem der Zukunft einzupassen. Diese werden in diesem Bericht in Kapitel 2.2 herausgearbeitet.

In diesem Bericht wird häufig die Formulierung „zukunftsfähige Neubauten“ oder „zukunftsfähige Gebäude“ verwendet. Mit diesen Begriffen werden Gebäudekonzepte (energetischer Standard der Gebäudehülle sowie der Anlagentechnik) bezeichnet, die die durchschnittlichen Anforderungen an die Treibhausgasemissionen in einem künftigen klimaneutralen Gebäudebestand erfüllen und ggf. zu einer Verbesserung der

[14] Die vorliegende Thematik der zukunftsfähigen Gebäude wurde weitgehend am IWU behandelt. Die Projektpartner, die Hochschule Darmstadt – Fachbereich für Elektrotechnik und Informationstechnik – und das Büro für Energiewirtschaft und Technische Planung, Aachen, haben das gesamte Projekt beratend begleitet.

Gesamtbilanz aller Gebäude beitragen. Grundsätzlich sind die Ansätze auch auf Bestandsgebäude übertragbar, sie treffen dort aber auf mehr Restriktionen bei der Umsetzung.

Als Indikator, ob ein einzelnes Gebäude dem Gesamtziel der Klimaneutralität dienlich ist, werden die Treibhausgasemissionen und der Einsatz nicht-erneuerbarer Energieträger betrachtet. Dabei werden unterschiedliche Ausführungen von Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht, weiterhin wird der Frage nachgegangen, wie sich diese Gebäude bei unterschiedlichen Ausbaupfaden für Photovoltaik- (und Wind-) Strom bezüglich ihrer Einspeisung und ihres Energiebezugs verhalten. Erzeugung und Verbrauch werden bei stündlicher Betrachtung und unter Einbeziehung von Wärme und Strom analysiert.

Die Untersuchungen werden in Kapitel 4 für ein Einzelgebäude oder eine Gruppe von Neubauten ohne erneuerbare Energien von außen und mit einem fossilen aber hocheffizienten Kraftwerkspark durchgeführt.

1.2 Bestehende Konzepte für klimaneutrale Gebäude

Für Bauherren kann ein Label wie „(Netto-)Nullemissionshaus“, „(Netto-)Nullenergiehaus“ oder „(Netto-)Plusenergiehaus“ einen Anreiz darstellen, über gesetzliche Vorgaben hinaus zusätzliche Investitionen zu tätigen, die gegenwärtig zwar nicht wirtschaftlich, langfristig für das Gesamtziel der Klimaneutralität aber dienlich bzw. erforderlich sind. Aus diesem Grund soll in diesem Bericht auch untersucht werden, welche Anforderungen unter diesem Gesichtspunkt an Neubauten (und innovative Modernisierungen) zu stellen sind.

Die Frage ist also nicht neu und es werden in bestehenden Gebäudekonzepten bereits Antworten darauf gegeben, die häufig auf dem folgenden Gedanken beruhen: Ein Gebäude ist dann zukunftsfähig, wenn es energie- bzw. klimaneutral ist, d. h. wenn es – bilanziell betrachtet – keine fossilen Energieträger verbraucht bzw. keine Treibhausgasemissionen erzeugt. Auch Plusenergiehäuser mit einer Überschussproduktion an regenerativer Energie sind nach solchen Konzepten möglich.

Dieser Gedanke ist auf den ersten Blick sehr einleuchtend, allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass eine Energie- bzw. Klimaneutralität mit den heute verfügbaren Mitteln nicht wirklich, sondern tatsächlich nur „bilanziell“ erreicht werden kann. Die prinzipielle Machbarkeit eines „Null-Energie-Hauses“ im eigentlichen Sinne, d. h. eines energieautarken, nur mit selbst produzierter Sonnenenergie versorgten Gebäudes, wurde zwar in Deutschland schon demonstriert, Aufwand und Kosten sind aber so hoch, dass dieses Konzept aus heutiger Sicht als nicht verallgemeinerungsfähig erscheint (siehe in [Großklos, Schaede 2016]).

Es stellt sich damit die Frage, was mit einer „bilanziellen“ Energie- bzw. Klimaneutralität gemeint ist und ob dieser Ansatz tatsächlich tragfähig ist. Der in den meisten Konzepten verfolgte Grundgedanke lässt sich folgendermaßen zusammenfassen[15]: Den Gebäuden wird der Verbrauch fossiler Brennstoffe und damit die Erzeugung von Treibhausgasemissionen sehr wohl noch zugestanden – durch direkten Brennstoffeinsatz in den Heizungen oder indirekt durch Strombezug aus dem allgemeinen Stromnetz. Gleichzeitig müssen die Gebäude aber selbst so viel regenerative Energie erzeugen und ins Energiesystem zurückgeben (zumeist heißt das: Einspeisung von überschüssigem Photovoltaikstrom ins öffentliche Netz), dass hierdurch in der Jahressumme mindestens die Menge an Treibhausgasen wieder eingespart wird, die das Gebäude zunächst selbst verursacht hat. Üblicherweise wird für die Verrechnung des eingespeisten Solarstroms der heutige mittlere jährliche Emissionsfaktor des deutschen Stromnetzes angesetzt[16]. Bei Anwendung dieser Definition sprechen wir im Folgenden von einem „klassischen“ Null-Emissions-Haus.

[15] Hier und im Folgenden wird dies für die Klimaneutralität beschrieben, bei Übertragung auf energieneutrale Gebäude im herkömmlichen Sinne wären die Treibhausgasemissionen durch den fossilen Energieverbrauch zu ersetzen.

[16] Dieser ergibt sich aus den gesamten anzurechnenden jährlichen Treibhausgasemissionen aus dem aktuellen Kraftwerksmix dividiert durch den gesamten Stromverbrauch in Deutschland (jeweils bezogen auf das öffentliche Stromnetz).

Dieser Ansatz erscheint zunächst einmal vernünftig, bei näherer Betrachtung ergeben sich allerdings offene Fragen bzw. Kritikpunkte: Einmal entstandene Treibhausgasemissionen lassen sich aus heutiger Sicht nicht wieder zurückholen, vor diesem Hintergrund ist der Anspruch der Klimaneutralität bei Einsatz fossiler Energieträger also per se nicht unproblematisch. Darüber hinaus wirft die Höhe der Anrechenbarkeit (Gutschrift für eingespeiste Energie) von außerhalb des Gebäudes stattfindenden Emissionsreduktionen Fragen auf: Vorübergehend, das heißt so lange der Gebäudebestand und das allgemeine Energiesystem noch weit vom Erreichen der Klimaziele entfernt sind, mag eine 1 zu 1 Gutschrift sinnvoll erscheinen. Zukünftig ist allerdings damit zu rechnen, dass im Energiesystem immer mehr Solar- und auch Windstrom verwendet wird, da andernfalls die Klimaschutzziele nicht erreicht werden können. Es ist dadurch unklar, in welchem Umfang es auf längere Sicht möglich sein wird, durch Einspeisung von überschüssigem Solarstrom an anderer Stelle in relevantem Umfang Treibhausgasemissionen einzusparen.

Dieses Problem wird durch den Umstand verschärft, dass das klassische Null-Emissions-Haus mit Photovoltaikanlage seine Überschüsse weitgehend im Sommer erzeugt, während die eigenen Treibhausgasemissionen des Gebäudes zum größten Teil durch die Heizung im Winter entstehen: Im Sommer wird aber zukünftig generell eher mit Solar- und auch Windstromüberschüssen zu rechnen sein, während sich der winterliche Wärmebedarf nur schwer mit regenerativen Energien decken lässt. Dies ergibt sich insbesondere aus den Untersuchungen im ersten Teil des Projekt-Endberichts, der sich mit der Gesamtperspektive der Erreichbarkeit der langfristigen Klimaschutzziele im Wohngebäudebestand befasst [Diefenbach et al. 2019].

Darüber hinaus zeigt sich, dass sich aus der genannten Null-Emissions-Definition auch Gebäudekonzepte und Schlussfolgerungen ableiten lassen, die sich bereits auf den ersten Blick als problematisch erweisen: So kann im Prinzip auch ein ungedämmter Altbau zum Null-Emissionshaus werden, wenn nur die für Solarstrom nutzbare Dach- und Fassadenfläche groß genug ist. Dies widerspricht der generellen Erkenntnis, dass zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gesamtsystem aus Gebäudebestand und Wärmeversorgung insgesamt ganz erhebliche Anstrengungen zur Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes notwendig sind (vgl. [Diefenbach et al. 2019]). In ähnlicher Weise lässt sich aus der „klassischen“ Definition des klimaneutralen Gebäudes auch der Grundsatz ableiten, dass es aus Klimaschutzsicht besser sei, Einfamilienhäuser (mit entsprechend großer Dachfläche und Solaranlage) als Mehrfamilienhäuser zu bauen. Ein solches Resultat steht zunächst einmal im Widerspruch zu der Tatsache, dass Mehrfamilienhäuser wegen ihres günstigeren (kleineren) Verhältnisses von Außenbauteilflächen zur Wohnfläche bei gleichem Wärmeschutz einen geringeren Heizenergieverbrauch aufweisen als Einfamilienhäuser. Aber auch die größere solar nutzbare Dachfläche der Einfamilienhäuser erweist sich bei genauerer Betrachtung nicht mehr als ein eindeutiger Vorteil: Diese ergibt sich nämlich auf Kosten einer größeren Flächeninanspruchnahme. Das Mehrfamilienhaus spart bei gleicher Wohnfläche gegenüber dem Einfamilienhaus Grundfläche ein, die anderswo z. B. als Naturfläche oder landwirtschaftliche Fläche zur Verfügung steht bzw. gegebenenfalls auch wiederum für die Solarstromerzeugung genutzt werden könnte. Da dies aber außerhalb des Gebäudes und Grundstücks geschehen würde, wird der Nutzen in bisherigen Konzepten kaum berücksichtigt.

1.3 Lösungsansätze

Im vorliegenden Bericht werden nun Beispielgebäude zeitlich hoch aufgelöst hinsichtlich ihres Energieverbrauchs und ihrer lokalen Energieerzeugung aus Photovoltaik analysiert, und es wird ausgewertet welche Treibhausgasemissionen sich bei dieser Betrachtungsweise in einem zukünftigen Energieversorgungssystem ergeben. Dadurch können PV-Überschüsse und Strombedarf aus dem elektrischen Netz präziser berechnet werden. Bei der Bearbeitung der Forschungsfragen wurden unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt:

Ein erster Ansatz wird in Kapitel 2.1 aus den Treibhausgasemissionen abgeleitet, die im Jahr 2050 noch pro Quadratmeter Wohnfläche emittiert werden würfen, wenn die Reduktionsziele heruntergebrochen auf den Wohngebäudebestand eingehalten werden sollen. An solche „klimagerechten“ Gebäude werden keine weiteren Anforderungen bezüglich der Anlagentechnik gestellt.

Der zweite Ansatz wird in Kapitel 2.2 vorgestellt. Dort wird ein vorbildlicher Neubau aufgrund seiner Einzelkomponenten begründet – unter Umgehung aller mit Energiebilanzen zusammenhängenden Bewertungsprobleme ist dieses Vorgehen für viele Bauherren möglicherweise sogar besser verständlich. Deswegen werden dort Obergrenzen und Zielwerte an den Wärmeschutz der Gebäudehülle formuliert. Außerdem werden Anforderungen an die Anlagentechnik formuliert, um den zukünftigen klimaneutralen Gebäudebestand optimal unterstützen zu können.

In Kapitel 5 wird darüber hinaus ein Bewertungsschema vorgestellt, das unterschiedliche Energieträger in einem zukünftigen Energieversorgungssystem für Wohngebäude unter Berücksichtigung von Potenzialgrenzen als „bewerten" Erdgasverbrauch miteinander vergleicht.

Bei den Untersuchungen wurden nur bereits heute eingeführte Techniken berücksichtigt, um zu analysieren, ob und wie damit die gesteckten Klimaschutzziele erreicht werden. Zukünftige technologische Entwicklungen wurden weitgehend ausgeblendet, im Teilbericht 1 [Diefenbach et al. 2019] aber ansatzweise diskutiert. Stehen in Zukunft weitere Techniken oder Konzepte zur Verfügung, so kann das die Zielerreichung vereinfachen. Erbringen Techniken wie z.B. Power-to-Gas nicht die erhofften Effizienzen oder liegen die Kosten zu hoch, so werden in diesem Bericht Konzepte vorgestellt, wie die Ziele auch mit heutiger Technik erreicht werden können.

Da der Blick im Projekt auf das Jahr 2050 gerichtet ist, spiegeln die angegebenen Treibhausgasemissionen nicht die heutigen Emissionen des gleichen Gebäudes wider, da ein zukünftiges Stromnetz simuliert wurde, in dem nur noch fossile Erdgaskraftwerke die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik ergänzen – Kohle- und Atomkraftwerke wurden aus der Betrachtung ausgeklammert.

In diesem Teilbericht wurden keine Kosten für die unterschiedlichen Standards und Anlagentechniken angesetzt, da diese für das Einzelgebäude über einen Zeitraum von mehr als 30 Jahren in die Zukunft gerechnet als zu spekulativ eingeschätzt wurden. Im Teilbericht 1 wurden aber für den Gesamtbestand Abschätzung zu den Kosten unterschiedlicher Varianten dokumentiert.

1.4 Simulationsmodell

Das Berechnungs- bzw. Simulationsmodell, das in dieser Untersuchung angewendet wird, ist detailliert in [Diefenbach et al. 2017] beschrieben. An dieser Stelle soll nur kurz der Ablauf der Berechnungen geschildert werden. Grundsätzlich werden Energiebedarfe und -erzeugung von Einzelgebäuden, Quartieren, Städten oder dem gesamten Gebäudebestand in Deutschland untersucht. Untersuchungszeitpunkt ist das Jahr 2050, und es sollen mit stündlicher Auflösung die Energiebilanzen der Gebäude in einem Energiesystem der Zukunft abgebildet werden. Abbildung 2 zeigt die Schritte bei der Berechnung.

Für die untersuchten Gebäude werden zufällige Zeitprofile für Raumtemperatur und Lüftung, innere Wärmequellen, Warmwasser und Haushaltsstromverbrauch aus einer großen Anzahl von Profilen gezogen und als Eingangsdaten in dem Gebäudemodell verwendet, das den Gebäudewärmebedarf berechnet. Das Gebäudemodell berücksichtigt die aktuelle Außentemperatur und Solarstrahlung am Standort (maximal 30 Standorte können gleichzeitig untersucht werden) aus den Wetterdaten der Jahre 2011 bis 2015. Der Gebäudewärmebedarf wird ebenso wie die Wetterdaten an das Modul für die Berechnung der Energiesysteme übergeben, das abhängig von der untersuchten Anlagentechnik bei der Wärmeversorgung den Brennstoff- und Strombedarf im aktuellen Zeitschritt berechnet. Dazu werden drei Strombilanzen für elektrische Energie gebildet.

Die erste Strombilanz berücksichtigt die aktuelle Erzeugung durch PV- und Windkraft (entweder lokal am Standort des Gebäudes oder verteilt über 30 Standorte in ganz Deutschland), den Haushaltsstromverbrauch und die Ladung/Entladung des Stromspeichers, falls dieser vorhanden ist. Danach werden in der zweiten Strombilanz das Ergebnis der ersten Bilanz und der Strombedarf für die Wärmeversorgung ggf. mit Stromerzeugung aus Kraftwerken gedeckt, wenn keine Überschüsse mehr vorhanden sind. In der dritten Strombilanz werden noch verbleibende Überschüsse in Strom- oder Wärmespeicher geladen. Was in diesem Zeit-

schritt nicht mehr im Gebäude genutzt werden kann, wird ins Netz als Überschussstrom PV/Wind eingespeist, verlässt dabei aber den Bilanzraum, d.h. es werden zunächst keine Gutschriften dafür angerechnet. Bei der Berechnung von Einzelgebäuden in diesem Teilbericht wird in der Regel keine Windstromerzeugung berücksichtigt und PV-Strom wird direkt am Gebäude erzeugt und bilanziert. Je nach Bewertungsmaßstab für das zukunftsfähige Gebäude werden dann auch Gutschriften für Solarstromüberschüsse angerechnet.

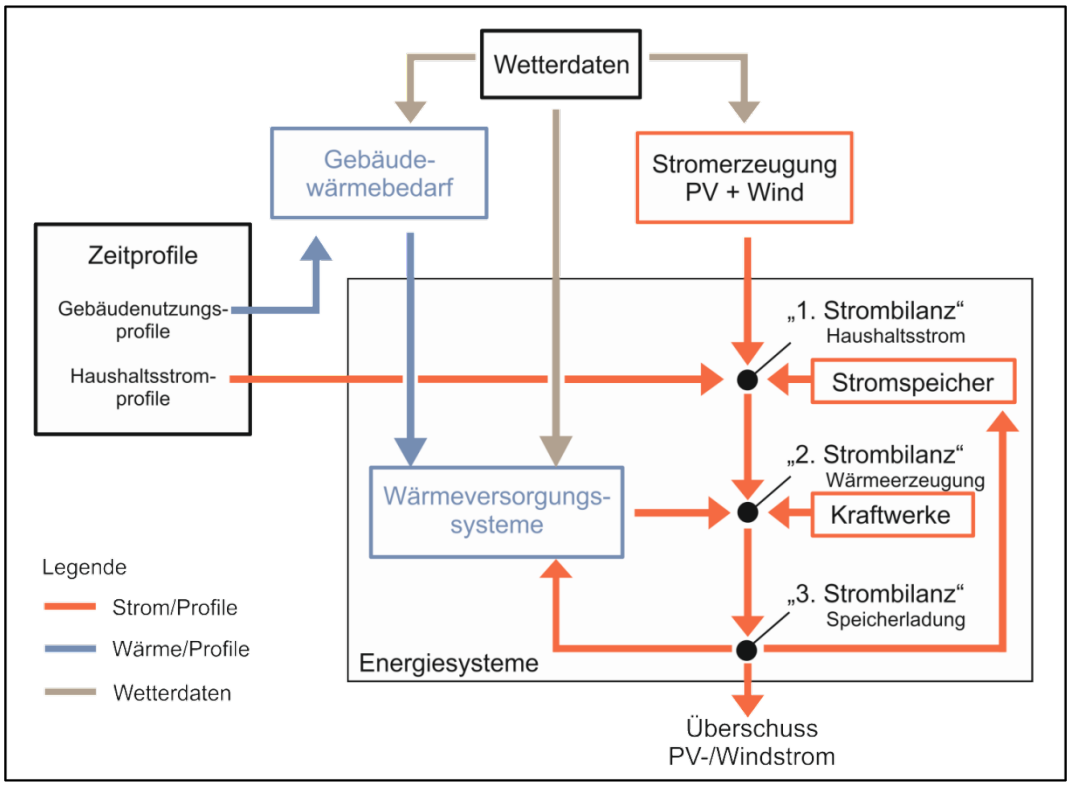


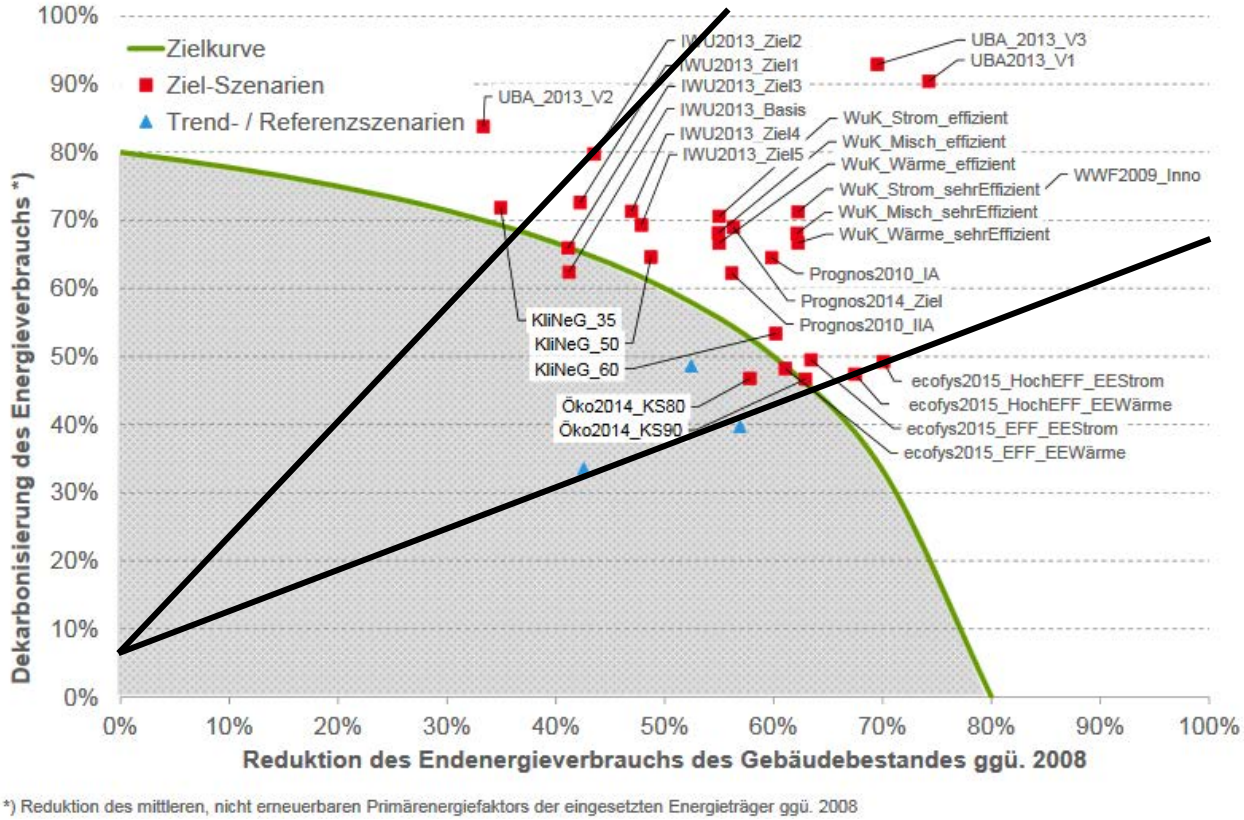
Abbildung 2: Programmmodule und Informationsaustausch im Simulationsmodell [Diefenbach et al. 2017]

Durch den Einsatz einer größeren Anzahl von Nutzungsprofilen wird die Bandbreite möglicher Verbräuche in den Gebäuden besser abgebildet als mit mittleren Profilen.

Eine Besonderheit des Berechnungsmodells ist der Algorithmus vergleichbar dem Merit-Oder-Modell der Strombörse, der für jeden Zeitschritt abhängig von Wärmebedarf, Speicherladung und Angebot an erneuerbaren Energien die Einsatzreihenfolge der Wärmeerzeuger bestimmt. Steht im Winter nicht ausreichend erneuerbarer Strom zur Verfügung, so wählt die Regelung in jedem Haus abhängig von der Effizienz der vorhandenen Wärmeerzeuger, welcher zum aktuellen Zeitpunkt zum geringsten Primärenergieverbrauch führt und setzt diesen ein. Umgekehrt kann bei Überschussstrom der Wärmespeicher z. B. mit der Wärmepumpe oder dem Heizstab geladen werden, je nach Höhe des Überschusses und der freien Speicherkapazität. Als Bewertungsgröße für die Einsatzreihenfolge kann bei der zukünftigen Realisierung möglicherweise ein geeignetes Strompreissignal verwendet werden, da der Strompreis abhängig vom aktuellen Angebot an erneuerbaren Energien, den Kosten für fossile Kraftwerke und den Kosten für Treibhausgas-Zertifikate im Zeitverlauf schwankt. Was bei der Nutzung des Strompreissignals in einem zukünftigen Energiesystem mit überwiegend erneuerbaren Erzeugungsanlagen beachtet werden muss, wird u.a. in Kapitel 8 diskutiert.

2 Grundlagen zukunftsfähiger Gebäude

Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist eine deutliche Reduktion des Endenergieverbrauchs der Gebäude unabdingbar, gleichzeitig müssen die regenerativen Energien in großem Umfang ausgebaut werden. In Abbildung 3 sind Wege zur Erreichung des Ziels einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber 2008 als grüne Linie dargestellt, abhängig vom Verhältnis von Dekarbonisierung zur Energieeinsparung (vor allem durch die Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien zur Wärmeversorgung, aber auch durch effizientere Brennstoffnutzung). Nur Kombinationen oberhalb der grünen Linie erreichen die Klimaschutzziele. Zusätzlich sind Ergebnisse unterschiedlicher Ziel- und Trendszenarien dargestellt. Diese liegen fast vollständig innerhalb des als schwarze Linie ergänzten Zielkorridors. Als Startpunkt der Linie ist unterstellt, dass im Vergleichsjahr 2008 bereits 5 % erneuerbare zur Wärmeversorgung der Gebäude eingesetzt wurden. Die Zielpunkte sind so festgelegt, beim Schnittpunkt mit der Zielkurve eine Dekarbonisierung von knapp 70 % und eine Reduktion des Wärmeverbrauchs von ca. 65 % erreicht werden.



*) Reduktion des mittleren, nicht erneuerbaren Primärenergiefaktors der eingesetzten Energieträger ggü. 2008

Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Dekarbonisierung der Energieversorgung und der Reduktion des Endenergieverbrauchs in 2050 ggü. 2008 [Effizienzstrategie 2015] mit eigenen Ergänzungen

Wird bei den Gebäuden eine Endenergieeinsparung von knapp 40 % (gegenüber 2008) erreicht, dann sind mehr als 65 % erneuerbare Energien zur Versorgung erforderlich (Schnittpunkt der oberen schwarzen Linie mit der grünen Zielkurve). Wenn die Energieeinsparung auf 65 % ansteigt, reichen 45 % Erneuerbare zur Erreichung des 80 %-Ziels aus (untere schwarze Linie). Bei den möglichen Anteilen für die Energieeinsparung und Erneuerbare müssen aber auch die Restriktionen bei den Gebäuden und die Potenzialgrenzen zum Ausbau der Erneuerbaren berücksichtigt werden. Endenergieeinsparungen über 60 % sind im Mittel für den Gebäudebestand sehr ambitioniert, ebenso ein Anteil erneuerbarer Energien über 70 %. Somit ergibt sich ein recht schmaler Korridor zur Erreichung der Klimaschutzziele und die Energieeinsparung im Gesamtbestand muss zwischen 40 % und 60 % liegen. [Renner 2016] geht von einem mittleren Primärener-

gieverbrauch 2050 von 40 kWh/(m²a) aus, so dass der Standard des Effizienzhaus-55 im Mittel aller Gebäude erreicht werden muss. Für Neubauten – aber auch zur Erreichung höherer Treibhausgasminderungen als 80 % – sind die Anstrengungen noch zu verstärken.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass dem Neubau bis 2050 auch im gesamten Wohngebäudebestand und damit für die Klimaschutzstrategie insgesamt eine relevante Rolle zukommt. In den im Projekt verwendeten Szenarienanalysen aus [Diefenbach et al. 2015] wird angenommen, dass im Jahr 2050 insgesamt 17 % der Wohnfläche auf Neubauten mit Baujahren ab 2010 entfällt. Je nach Entwicklung der Neubau- und Abrissraten sind auch höhere Anteile denkbar.

Gleichzeitig stellt sich die Frage, warum das Gesamtziel der Klimaneutralität am Einzelgebäude umgesetzt werden soll, obwohl die Kosten in zentralen Anlagen niedriger und die Ausnutzung (z. B. die Vollbetriebsstunden von Elektrospeichern) im Quartier oder im Stadtteil höher ausfallen würde. An dieser Stelle ist festzuhalten, dass eine Klimaneutralität am Einzelgebäude kaum erreichbar ist. Ganz entscheidend für das Erreichen des Gesamtziels eines klimaneutralen Gebäudebestandes ist die Schaffung von geeigneten Randbedingungen am Einzelgebäude, um später als Baustein im Gesamtsystem eine weitgehend Treibhausgasfreie (THG) Energieversorgung zu ermöglichen. Einige dieser Anforderungen können im engeren Sinne nur im Einzelgebäude erfüllt werden (z. B. Reduktion des Energiebedarfs). Andere (z. B. Nutzung von geeigneten Flächen für Photovoltaik) sind am Gebäude erforderlich, um die begrenzten Flächenpotenziale (siehe Teilbericht 1 [Diefenbach et al. 2019]) weitgehend auszunutzen. Schließlich werden Elemente zukunftsfähiger Gebäude genannt, die sowohl am Einzelgebäude als auch im größeren räumlichen Zusammenhang wie dem Quartier oder zentral in einem Dorf oder einer Stadt installiert werden können (z. B. Elektrospeicher). Diese Techniken werden im Folgenden nicht für das Einzelgebäude gefordert. Allerdings kann es für Bauherren zusätzliche Anreize geben, auch im eigenen Gebäude diese Komponente zu installieren.

2.1 Das klimaneutrale bzw. klimagerechte Gebäude

Klimaneutralität strebt an, die Treibhausgas-Emissionen menschlichen Handelns soweit zu minimieren, bis die verbleibenden Emissionen vom Gesamtsystem Erde ausgeglichen werden können, da Atmosphäre, Biosphäre und Ozeane in der Lage sind eine bestimmte Menge an Treibhausgasen aufzunehmen. Hierfür müssen die Emissionen aber sehr weitgehend reduziert werden – eine Reduktion der Emissionen auf null ist jedoch nicht zwingend erforderlich. Langfristig müssen aber die fossilen Energieträger verdrängt werden. Ein Ausgleich der Bilanz zwischen Quellen (Emissionen) und Senken (Erdsystem) ist die Voraussetzung, um den Treibhausgas-bedingten Temperaturanstieg auf maximal 2 bzw. 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen [Pariser Abkommen 2015]. Die Klimaneutralität in der langfristigen Perspektive bedeutet, dass keine fossilen Treibhausgasemissionen mehr anfallen. Auf dem Weg dorthin ist eine vollständige Vermeidung von Treibhausgasemissionen aufgrund des noch teilweise fossilen Gesamtenergiesystems, aus dem Restenergie bezogen wird, kaum möglich.

Die Emissionen zukunftsfähiger Neubauten sollten aber auf ein minimales Niveau beschränkt werden. Auch wenn die völlige Emissionsfreiheit und das eigentliche klimaneutrale Gebäude nicht erreicht werden können, so sollte zumindest ein sinnvolles Niveau für ein „klimagerechtes“ Gebäude eingehalten werden. Auf dem Weg zu einer vollständigen Emissionsfreiheit wurde für das Bezugsjahr 2010 ein verbleibendes Globalbudget von 750 Mrd. t CO_2 bestimmt, das bis 2050 in Summe weltweit noch emittiert werden dürfte, um das 2-Grad-Ziel nach heutigem Stand des Wissens noch zu erreichen. Der Wissenschaftliche Beitrat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen hat daraus ein Budget von 2,7 t pro Person und Jahr berechnet (ohne Bevölkerungszuwachs) [WBGU 2009]. Dieses Emissionsbudget beinhaltet alle Verbrauchsbereiche, neben Heizung und Strom auch Mobilität, Ernährung, sonstiger Konsum und öffentliche Emissionen. Die folgende Abbildung 4 zeigt die absoluten Emissionen [KlimAktiv 2018] und deren prozentualen Anteile für Deutschland. Wird die Aufteilung der Gesamtemissionen gedanklich beibehalten und auf die mittlere Wohnfläche pro Person umgerechnet (ca. 45 m²/Person), so ergibt sich im Mittel über den Betrachtungszeitraum 2010-2050 ein maximales Emissionsbudget von ca. 13 kg/(m²a) für Heizung und Strom.

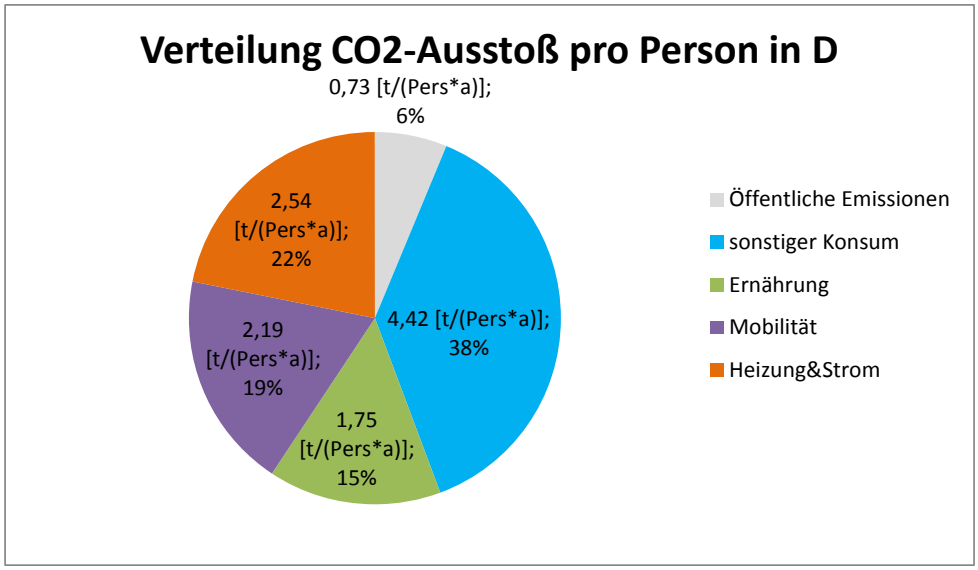


Abbildung 4: Verteilung des CO2-Ausstoßes pro Person in Deutschland nach Sektoren (eigene Darstellung nach [KlimAktiv 2018])

Diese – im Übrigen sehr strengen – Anforderungen können im Folgenden nicht als Maßstab verwendet werden, da hierfür die Entwicklung für den gesamten Wohngebäudebestand im Zeitverlauf in Form von Szenarienanalysen betrachtet werden müsste. Stattdessen werden für die Definition des klimagerechten Gebäudes die Emissionszielwerte der Bundesregierung für 2050 herangezogen.

Im Jahr 2050 müssen die Gebäude die oben genannten aus dem Budgetansatz abgeleiteten mittleren Emissionsobergrenze noch deutlich unterschreiten. Die CO_2-Emissionen lagen im Wohngebäudebestand im Jahr 1990 bei 170 Mio. t [Diefenbach et al. 2013] bzw. bei Treibhausgasemissionen (THG) (inkl. vorgelagerte Emissionen und Klimawirkung von nicht-CO_2-Emissionen) von ca. 200 Mio. t. Berücksichtigt man noch den Haushaltsstrom, so lagen die Treibhausgasemissionen bei 260 Mt. Unterstellt man für das Jahr 2050 eine Wohnfläche in Deutschland von 3,84 Mrd. Quadratmeter ergeben sich je nach Reduktionsziel folgende Zielwerte der Treibhausgasemissionen für Wohngebäude (Tabelle 1):

Um die Mindestanforderungen an die Reduktion der Treibhausgase von 80 % zu erreichen, dürfen die Emissionen 2050 ohne Haushaltsstrom 10,4 kg/(m²a) im Mittel über den Gesamtbestand nicht überschreiten. Da Neubauten günstigere Voraussetzungen aufweisen als der Gebäudebestand und zukunftsfähige Neubauten die maximalen Treibhausgasemissionen nicht ausschöpfen dürfen, um Kompensationsmöglichkeiten für „benachteiligte“ Altbauten zu schaffen, sollte die Treibhausgasreduktion für Neubauten bei mindestens 87,5 % liegen (Mitte des Intervalls von 80 % und 95 % Reduktion). Somit sind nur noch 6,5 kg/(m²a) zulässig, wenn das 95 %-Reduktionsziel erreicht werden soll, sind die Emissionen auf 2,6 kg/(m²a) zu begrenzen. Unter Berücksichtigung des Haushaltsstromes liegt die Emissionsobergrenze bei 8,5 kg/(m²a) (87,5 %) bzw. bei 3,4 kg/(m²a) (95 %). Mit diesen Obergrenzen wird gleichzeitig das Treibhausgasbudget (siehe oben) bis zum Jahr 2050 eingehalten. Gebäude, die diese Zielwerte einhalten, können auch als „klimagerechte“ Gebäude bezeichnet werden.

Tabelle 1: Herleitung der Obergrenzen für klimaneutrale Gebäude 2050 für Treibhausgasemissionen und Erdgasverbrauch – mit und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstromes

	Treibhausgas-Emissionen [Mt/a] bzw. [Mrd. kg/a]		Wohnfläche 2050 [Mrd. m²]	Treibhausgas-Emissionen [kg/(m²a)]		Maximaler Brennstoffverbrauch [kWh/(m²a)]	
	ohne HH-Strom	mit HH-Strom		ohne HH-Strom	mit HH-Strom	ohne HH-Strom	mit HH-Strom
Emissionen Wohngebäude 1990	200	260	3.84	52.1	67.7	212.7	276.3
Wohngebäude 2050 bei Reduktionsziel 80 %	40	52		10.4	13.5	42.4	55.1
Wohngebäude 2050 bei Reduktionsziel 87.5 % (Mittelwert aus 80 % und 95 %)	25	32.5		6.5	8.5	26.5	34.7
Wohngebäude 2050 bei Reduktionsziel 95 %	10	13		2.6	3.4	10.6	13.9

In den folgenden Modellrechnungen werden die Gebäude innerhalb eines eng abgegrenzten Systems betrachtet, d.h. außer Sonnenenergie (ggf. Windkraft) und Biomasse (in dem weiter unten dargestellten Budgetrahmen mit Holzpellets als klimaneutral angenommen) werden für die komplette Restenergieversorgung Erdgas-Kraftwerke eingesetzt, da unterstellt wird, dass im Jahr 2050 sowohl Atom- als auch Kohlekraftwerke nahezu vollständig vom Netz genommen wurden. Dies bedeutet, dass die Restenergie vollständig mit Erdgas gedeckt wird. Somit ergeben sich mit einem Emissionsfaktor von Erdgas von 0,245 kg/kWh maximale Erdgasverbräuche von 26,5 kWh/(m²a) (87,5 %-Reduktion) bzw. 10,6 kWh/(m²a) (95 %-Reduktion) ohne Haushaltsstrom bzw. 34,7 kWh/(m²a) (87,5 %-Reduktion) bzw. 13,9 kWh/(m²a) (95 %-Reduktion) mit Haushaltsstrom.

Für die Biomasse wird ein maximales Potenzial für Wohngebäude von 50 TWh angesetzt (vgl. [Diefenbach et al. 2019]). Unter Berücksichtigung der Wohnfläche im Jahr 2050 darf lediglich 12,5 kWh/(m²a) an Biomasse in Wohngebäuden eingesetzt werden (inklusive Haushaltsstrom).

Da klimaneutrale Neubauten besondere Vorbildfunktion besitzen, werden an sie zusammenfassend folgende Anforderungen gestellt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Obergrenzen für klimaneutrale Gebäude 2050 bezüglich Treibhausgasemissionen, Erdgas- und Biomasseverbrauch – mit und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstromes

	Obergrenzen für klimaneutrale Gebäude 2050	
	ohne Haushaltsstrom	mit Haushaltsstrom
Treibhausgasemissionen	6,5 kg/(m²a)	8,5 kg/(m²a)
Erdgasverbrauch (inkl. Kraftwerke)	26,5 kWh/(m²a)	34,7 kWh/(m²a)
Biomasseverbrauch	ca. 10 kWh/(m²a)	12,5 kWh/(m²a)

Bei diesen flächenbezogenen Obergrenzen ist ein Wohnflächenzuwachs bis zum Jahr 2050 mit berücksichtigt. Fällt dieser stärker aus als angenommen, reduzieren sich die Obergrenzen entsprechend. Bei den Obergrenzen für Erdgas (Brennstoff) und Biomasse wird angenommen, dass diese Energieträger für jedes Gebäude zur Verfügung stehen. Unterstellt man, dass in einem Gebäude in der Regel der Brennstoff entweder als Erdgas (fossil) oder als Biomasse verbraucht wird (Ausnahme sind bivalente Wärmeversorgungs-

systeme), steht dem Einzelgebäude ggf. ein jeweils höherer Betrag als die jeweiligen Einzelwerte zur Verfügung (vgl. hierzu das in Kapitel 5 vorgestellte Konzept).

2.2 „Bestmöglicher Neubau“: Einzelanforderungen an zukunftsfähige Gebäude

Ziel der Untersuchung ist es, Konzepte für Gebäude zu identifizieren, die die Transformation hin zu einer überwiegend regenerativen Energieversorgung im (Wohn-)Gebäudebestand 2050 unterstützen. Solche Gebäude, die in den nächsten Jahren vor allem als Neubauten zu einem Flächenzuwachs bei den deutschen Wohngebäuden führen werden, sollen heute die Energieversorgung insgesamt verbessern und in einem Energiesystem der Zukunft, wenn der Ausbau der regenerativen Energien sehr weit fortgeschritten ist, die Treibhausgasbilanz zumindest nicht verschlechtern.

Es handelt sich somit nicht um einen weiteren Ansatz für Null- oder Plusenergiegebäude, sondern um die Betrachtung, wie Wohngebäude in den nächsten Jahren geplant und gebaut werden sollten, um die Klimaziele für 2050 im Wohngebäudebereich leichter erreichen zu können. Dabei sind qualitative Anforderungen in unterschiedlichen Bereichen einzuhalten, die im Folgenden umrissen werden.

Der dabei zugrunde gelegte „Bestmöglich“-Ansatz sieht vor, in allen Bereichen – bei allen Bauteilen und Anlagenkomponenten – einerseits möglichst gut zu sein, andererseits aber auch begrenzte Spielräume für unterschiedliche Maßnahmen zu eröffnen.

2.2.1 Gebäudehülle

Zukunftsfähige Gebäude müssen einen „guten“ bis „sehr guten“ Standard bei der Gebäudehülle aufweisen, um den Wärmebedarf deutlich zu verringern. Als Ziel-U-Werte bei den opaken Bauteilen werden typische Werte für das KfW-Effizienzhaus-40 bzw. das Passivhaus angesehen. Diese Gebäudeausführung ist in der Praxis erprobt und reduziert den Heizwärmebedarf aus heutiger Sicht auf ein Minimum. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Gebäude in diesem Standard errichtet werden, weil z.B. einschalige Außenwände ohne zusätzliche Dämmstoffschichten eingesetzt werden sollen oder statische Anforderungen die Dämmstoffdicke begrenzen (z. B. unter der Bodenplatte). Auf der anderen Seite stehen die heutigen gesetzlichen Anforderungen an Neubauten (EnEV) bzw. die Bauteilanforderungen bei der Bestandssanierung. Dies sind Standards, die bereits heute nicht überschritten werden dürfen, jedoch noch nicht die für zukunftsfähige Gebäude 2050 erforderliche Reduktion des Heizwärmebedarfs erzielen. Als Obergrenze der Anforderungen für zukunftsfähige Gebäude werden aus diesem Grund U-Werte vorgeschlagen, die zwischen heutigen gesetzlichen Anforderungen und dem Zielwert liegen. Damit ist gewährleistet, dass Gebäude mit unterschiedlichen Konstruktionen und Materialen die Möglichkeit haben, die Ziele für zukunftsfähige Gebäude und gleichzeitig eine Reduktion des Heizwärmebedarfs zu erreichen, und dass sich der zukunftsfähige Ansatz nicht ausschließlich auf die Anlagentechnik stützt. Tabelle 3 zeigt den Vorschlag für Zielwerte und die Obergrenze der Anforderungen der U-Werte von Gebäuden für 2050 im Vergleich zu den Mindestanforderungen bei der Bestandsmodernisierung im Jahr 2018.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der U-Werte der Gebäudehülle für die gesetzlichen Mindestanforderungen bei der Bestandsanierung sowie Zielwerte und Obergrenze der Anforderungen für zukunftsfähige Gebäude 2050

	Gesetzliche Anforderung bei Bestandsanierung [W/(m²K)]	Zukunftsfähige Gebäude	
		Obergrenze Anforderung Gebäude 2050 [W/(m²K)]	Zielwert Anforderungen (KfW-EH40/Passivhaus) [W/(m²K)]
Dach / oberste Geschossdecke	0,24 / 0,20	0,18	0,15
Außenwand	0,24	0,20	0,15
Fenster	1,3 / 1,6	1,0	0,8
Außenwand gegen Erdreich / Bodenplatte	0,3	0,25	0,15

Im Dach stellt die Erreichung eines U-Wertes von 0,18 W/(m²K) in der Regel kein Problem dar. U-Werte für die Außenwand von 0,20 W/(m²K) können auch mit einschaligen Mauerwerk mit maximalen Wanddicken unter 50 cm erreicht werden, so dass zur Erreichung der Obergrenze der Anforderungen im Neubau nicht zwingend zusätzliche Wärmedämmschichten erforderlich sind. Außenwände gegen Erdreich benötigen eine zusätzliche Dämmschicht, ohne Zusatzdämmung ist die Obergrenze der Anforderungen kaum zu erreichen. Bei den Fenstern ist der Mindest-U-Wert von 1,0 W/(m²K) sowohl mit 2- als auch mit 3-Scheiben-Verglasungen zu erreichen. Die Obergrenze der Anforderungen werden bei Gebäuden, die eine Förderung durch die KfW in Anspruch nehmen [KfW-Monitoring 2017], bereits heutzutage unterschritten (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) im Programm „Energieeffizient Bauen 2017“ für verschiedene Bauteile [KfW-Monitoring 2017]

	U-Wert in W/(m²K)
Außenwand: Einschaliges Mauerwerk ohne zusätzliche Dämmung	0,20
Außenwand: Einschaliges Mauerwerk mit Dämmstoffen in den Steinen selbst	0,18
Außenwand: Einschaliges Mauerwerk mit zusätzlicher Dämmung	0,17
Außenwand: Zweischaliges Mauerwerk mit Dämmung	0,16
Außenwand: Holzbau mit Dämmung	0,14
Dach	0,15
Obergeschossdecke	0,15
Fußboden / Kellerdecke	0,21
Fenster (im Mittel)	0,84

Berechnet man den spezifischen Transmissionswärmeverlust H'_T für die vier Modellgebäude aus Kapitel 3.1 (Einfamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus Neubau bzw. saniert) für die Standards Mindestanforderungen der Energieeinsparverordnung 2014/16 (EnEV 2016), KfW-Effizienzhaus-55 (EH55) bzw. KfW-Effizienzhaus-40 (EH40), so ergeben sich die Werte in Abbildung 5. Die H'_T-Werte von Einfamilienhaus

(EFH), Reihenhaus (RH) und saniertes Mehrfamilienhaus (MFH-San) liegen für die unterschiedlichen Standards nahe beieinander, für das große Mehrfamilienhaus (MFH-NB) liegen sie jeweils höher, da es einen größeren Fensterflächenanteil besitzt. Die oben beschriebene Obergrenze der Anforderungen 2050 wird mit dem EH55 nur geringfügig unterschritten, so dass in den weiteren Berechnungen das EH55 als synonym für den Mindeststandard verwendet wird. Der Zielwert, der durch die Mindestanforderungen des Passivhauses etwa beschrieben wird, liegt höher als das EH40, da bei letzterem übliche Ausführungen eines Passivhauses in der Praxis unterstellt wurden, die die maximalen U-Werte des Passivhauses in der Regel unterschreiten. Beim MFH-San liegt H'_T für die EH40-Ausführung höher, da für das modernisierte Bestandsgebäude ein höherer Wärmebrückenzuschlag unterstellt wurde. Für die Einhaltung des Zielwerts wird in diesem Bericht in der Regel der Standard EH40 verwendet.

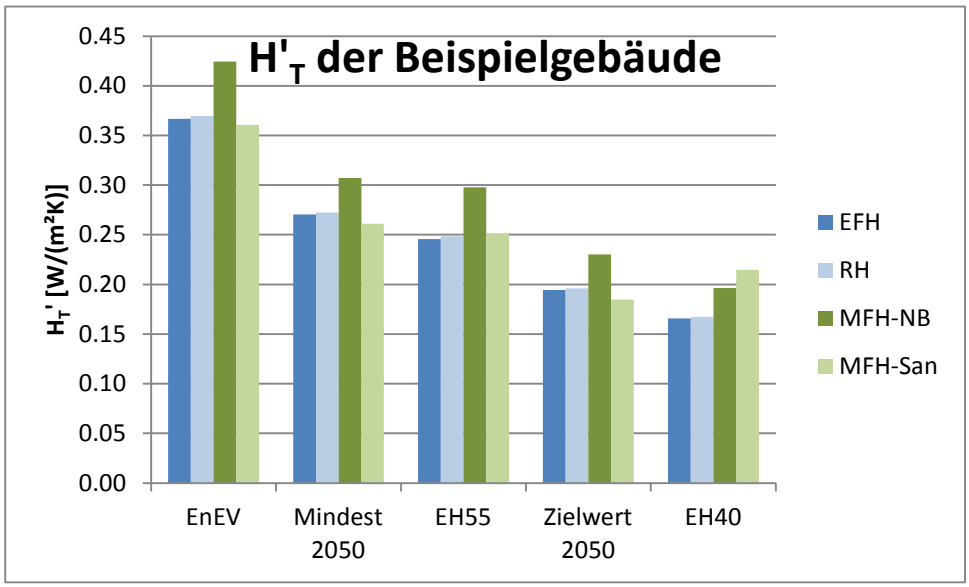


Abbildung 5: Spezifischer Transmissionswärmeverlust H'_T für die vier Modellgebäude und unterschiedliche energetische Standards

Bei der Planung von zukunftsfähigen Gebäuden gibt es einen gewissen Spielraum. Werden lediglich die Werte der Obergrenze der Anforderungen für zukunftsfähige Gebäude beim Wärmeschutz eingehalten, so müssen bei der Wärme- und Stromerzeugung effizientere bzw. komplexere Systeme eingesetzt werden, um die Zielwerte bei den Treibhausgasemissionen und beim Brennstoffverbrauch einzuhalten.

2.2.2 Anlagentechnik

Im Folgenden werden die wesentlichen Anforderungen an zukunftsfähige Gebäude bezüglich der Anlagentechnik umrissen.

Solarenergienutzung

An zukunftsfähige Gebäude wird die Anforderung gestellt Solarenergie im Gebäude nutzen zu können, vor allem als Solarstrom aus Photovoltaikanlagen. Aus diesem Grund ist der Einsatz von PV-Anlagen eine Voraussetzung auf dem Weg zu weitgehend klimaneutralen Gebäuden. Eine Ergänzung durch solarthermische Anlagen kann sinnvoll sein, wenn ausreichend (Dach-)Flächen zur Verfügung stehen.

Windstromfähigkeit

Strom aus Windkraftanlagen ist zur Wärmeversorgung von Gebäuden aufgrund des winterlichen Heizwärmebedarfs unabdingbar für zukünftige klimaneutrale Gebäude, da die Windenergie im Winter deutlich höhere Erträge liefert als die Solarenergie (siehe Teilbericht 1 [Diefenbach et al. 2019]). Die effizienteste Möglichkeit der Windstromnutzung ist die Wärmeerzeugung mit einer Wärmepumpe, die den erzeugten Strom effizient in Wärme umwandelt und in einem Speicher puffert. Deutlich ineffizienter – aber preiswerter – ist die Nutzung von Windstrom mit Hilfe eines Heizstabes und eines Wärmespeichers. An Stelle des Wärmespeichers kann ggf. auch ein elektrischer Energiespeicher zur Zwischenspeicherung von Windstrom-Überschüssen im Netz genutzt werden, die Kosten hierfür würden nach gegenwärtigem Stand auch im Jahr 2050 deutlich über denen eines Wärmespeichers liegen. Stromspeicher sollten daher vor allem mit dem Ziel eines Lastausgleichs bei eigentlichen Stromanwendungen, hier also insbesondere für den Haushaltsstrom, zum Einsatz kommen.

Die Windstromfähigkeit kommt jedoch erst dann zum Tragen, wenn der Ausbau der Windenergie schon sehr weit fortgeschritten ist. Aus diesem Grund muss die Windstromfähigkeit Windstromfähigkeit – in der Regel in Form einer Wärmepumpe (gegebenenfalls auch kleiner Leistung) – zumindest einfach nachrüstbar sein. Bei Techniken, deren technische und wirtschaftliche Lebensdauer deutlich unter 20 Jahren liegt, ist aus diesem Grund u.U. eine spätere Nachrüstung sinnvoller als diese beim Neubau direkt vorzusehen, wenn sie innerhalb der Lebensdauer kaum genutzt werden wird[17]. Die Nachrüstung eines Heizstabes ist in der Regel einfach möglich, wenn ein geeigneter Wärmespeicher vorhanden ist, allerdings im Resultat weniger effizient. Bei Mehrfamilienhäusern ist zu berücksichtigen, dass dezentrale, wohnungsbezogene Konzepte die Windstromfähigkeit des Gebäudes einschränken, da Strom aus Windenergie weniger gut wohnungsweise genutzt und gespeichert werden kann.

Kein Brennstoffverbrauch im Sommer

Für eine weitgehend erneuerbare Energieversorgung von Wohngebäuden müssen die jeweiligen regenerativen Energiequellen optimal genutzt werden. Im Sommer steht grundsätzlich ausreichend Sonnenenergie zur Verfügung, um den Bedarf für Wärme – hier nahezu ausschließlich Warmwasser – und Strom zu decken. Aus diesem Grund dürfen zukünftig im Sommer keine Brennstoffe eingesetzt werden, weder fossile noch regenerative. Erstere können zum Einhalten der Treibhausgasgrenzen nur in sehr begrenztem Umfang genutzt werden (vor allem in Kraft-Wärmekopplung im Winter, wenn das Solarenergieangebot nicht ausreicht), letztere stehen nur sehr begrenzt zur Verfügung und kommen deswegen nur dann zum Einsatz, wenn keine regenerativen Alternativen im Winter vorhanden sind. Damit kein Brennstoffverbrauch im Sommer auftritt, sind Wärmeversorgungen mit Verbrennungsanlagen immer bivalent mit einem zweiten System auf Basis von erneuerbaren Energien zu kombinieren. Ein minimaler Brennstoffbezug im Sommer ist dabei grundsätzlich zulässig, wenn z.B. eine längere Schlechtwetterperiode ausgeglichen werden muss (keine sommerliche Autarkie für Brennstoffe).

Wärmeerzeuger

Zukünftige Neubauten besitzen einen deutlich reduzierten Wärmebedarf, für dessen Deckung aus heutiger Sicht nur eine begrenzte Anzahl von Heizsystemen zur Verfügung steht. Dies sind vor allem:

- Wärmepumpe mit den Wärmequellen Außenluft, Erdreich oder Grund- bzw. Abwasser[18]. Besonders in kleinen Einfamilien- oder Reihenhäusern können diese monovalent ohne zweiten Wärmeerzeuger eingesetzt werden, wodurch aber die benötigte Kraftwerksleistung ansteigt. Aus diesem Grund sind in ei-

[17] Dies wäre zum Beispiel dann der Fall, wenn eine Solarthermieanlage vorliegt, die Wärmepumpe also nicht zur Umwandlung von Solarstrom in Wärme, sondern tatsächlich erst im Hinblick auf zukünftige Windstromüberschüsse gebraucht wird.

[18] Letztere werden im Weiteren nicht weiter betrachtet, da sie als eine Sonderform der Erdreichwärmepumpe gesehen werden können

ner Reihe von Gebäuden auch bivalente Wärmepumpen mit einem zusätzlichen Wärmeerzeuger in Form eines Pelletofens oder eine Gas-Brennwertkessel erforderlich. Diese Systeme werden zukünftig zugeschaltet, wenn das regenerative Energieangebot nicht ausreicht und die Speicher entladen sind. Eine Sonderform stellt die Mini-Wärmepumpe dar, die als Bivalenzsystem mit einem anderen Wärmeerzeuger eingesetzt werden kann.

- Biomassekessel oder -öfen, z. B. als Holzpellet-Ofen sind als Spitzenlasterzeuger sowie für eine Versorgung von solchen Gebäuden interessant, die keine geeigneten Wärmequellen für größere Wärmepumpen nutzen können. Hierbei ist jedoch immer ein zweites Wärmeversorgungsystem einzuplanen, damit im Sommer kein Brennstoff benötigt wird (in der Regel Solarthermie oder eine Mini-Wärmepumpe).
- Erdgas-Brennwertkessel oder -thermen können in sehr begrenztem Umfang auch in Zukunft noch für die Wärmeversorgung eingesetzt werden. Allerdings sollten die Anwendungsfelder entweder im Einsatz als zweites Wärmeerzeugungssystem (Spitzenlastwärmeerzeuger) und vor allem in der Kraft-Wärme-Kopplung liegen, da hier das eingesetzte Erdgas am effizientesten genutzt werden kann.
- Kraft-Wärmekopplungsanlagen stellen im Zusammenhang mit Fern- und Nahwärmesystemen eine wichtige Option dar. In Ein-/Zweifamilienhäusern spielen sie aus heutiger Sicht eine eher untergeordnete Rolle, da der mögliche Anteil an der Stromerzeugung aufgrund der Stromkennzahlen (Verhältnis von Strom- zu Wärmeerzeugung) und der geringen Laufzeiten für die Wärmeversorgung begrenzt ist. In Mehrfamilienhäusern kann dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung als Teil eines bivalenten Systems ökologisch sinnvoll sein. Die leitungsgebundene Wärmeversorgung und die Kraft-Wärmekopplung werden in Teilbericht 1 ([Diefenbach et al. 2019]) näher untersucht, in dem vorliegenden Bericht werden sie nicht weiter betrachtet.
- Neben der Deckung des sommerlichen Wärmebedarfs mit einer solarthermischen Anlage ist als zusätzliche Option auch eine einfache Heizungsunterstützung oder eine Kombination einer großen solarthermischen Anlage mit einem sehr großen (saisonalen) Wärmespeichern denkbar, die auch unter dem Begriff Sonnenhaus vermarktet wird und als Bivalenzsystem einen Biomasseofen oder -kessel besitzt. Dieses System wird in Kapitel 6 mit untersucht.

Eine direktelektrische Wärmeversorgung für Heizung und Warmwasserbereitung wurde in Berechnungen zwar untersucht (siehe Kapitel 4.2.6), scheidet aber aufgrund der schlechten Effizienz für zukunftsfähige Gebäude als alleinige Wärmeversorgung aus.

Insgesamt steht für den Gesamtbestand der Wohngebäude in Deutschland für das Untersuchungsjahr 2050 nur ein begrenztes Potenzial zur energetischen Nutzung von Biomasse zur Verfügung, ebenso darf nur noch eine sehr geringe Menge an fossilem Erdgas verbrannt werden, damit die Zielwerte bei den Treibhausgasemissionen nicht überschritten werden (siehe Kapitel 2.1). Dabei ist es nicht relevant, dass jedes einzelne Gebäude die Potenzialgrenzen einhält, sondern die Obergrenze darf in der Summe aller Gebäude nicht überschritten werden. Aus diesem Grund sind auch in Zukunft Gebäude realisierbar, die statt dem Einsatz von Wärmepumpen entweder nur Biomasse einsetzen oder Erdgas verbrennen. Voraussetzung ist dabei, dass der Wärmeverbrauch sehr weit reduziert wird und nur noch eine geringe Restenergie mit den begrenzten Ressourcen gedeckt wird. Aus diesem Grund ist voraussichtlich auch keine exakte, gebäudescharfe „Steuerung“ des Zubaus bestimmter Anlagentechniken erforderlich, sondern es müssen lediglich die Rahmenbedingungen für den Zubau in einer bestimmten Größenordnung abgesteckt werden.

Lüftungsanlagen

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung reduzieren den Heizwärmebedarf des Gebäudes und verbessern die Luftqualität im Innenraum. Aus diesem Grund sind Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung für zukunftsfähige Neubauten zu empfehlen, zumal im Neubau der Aufwand für Planung und Montage minimiert werden kann. Wird auf eine solche Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung jedoch verzichtet, so sollten die Mindestanforderungen für zukunftsfähige Gebäude beim Wärmeschutz (spezifischer Transmis-

sionswärmeverluste H'_T) unterschritten werden. Umgekehrt sollte eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingesetzt werden, wenn als Brennstoff im Gebäude in größerem Umfang (fossiles) Erdgas (ohne ergänzende Wärmepumpe) eingesetzt wird, um den Gaseinsatz zu minimieren. Dies ist voraussichtlich sowohl ökologisch als auch ökonomisch wichtig, wenn mit Power-to-Gas in Zukunft Gas aus regenerativer Energie hergestellt wird, da die Verluste und die Kosten hoch liegen werden.

Steuer- und Regelungstechnik

Für die Nutzung des regenerativen Stroms aus dem Netz (vor allem Windstrom, aber auch PV-Strom) muss eine Ansteuerinfrastruktur vorhanden sein. Neben Leitstellen, die zentral oder regional Angebot und Bedarf an erneuerbarem Strom überwachen und entsprechende Steuersignale an die Gebäude weiterleiten, werden auch geeignete Regelungen in jedem Gebäude benötigt, die die Steuersignale verarbeiten und den Einsatz der lokal vorhandenen Energiequellen plant. Solchen Steuerungen sind bisher sowohl auf der übergeordneten Ebene als auch für das Einzelgebäude nur in Ansätzen vorhanden. Existierende Konzepte wie der Börsenstrompreis an der EEX oder Wärmepumpen mit dem Smart-Grid-Ready-Label erfüllen noch nicht die Anforderung, die an eine Steuer- und Regelungstechnik der Zukunft für Wohngebäude gestellt werden.

Aus diesem Grund müssen Gebäude, die in den nächsten Jahren errichtet werden, vorgerüstet sein bzw. die Möglichkeit besitzen kostengünstig nachgerüstet zu werden. Dabei ist zu beachten, dass die Lebensdauer von Steuer- und Regelungstechnik in der Regel eher bei 20 Jahren liegt und aus heutiger Sicht bis zur Dekade 2040 bis 2050 voraussichtlich ohnehin noch einmal ausgetauscht werden muss. Dies ist dann der (letztmögliche) Zeitpunkt, die steuer- und regelungstechnischen Voraussetzungen für zukunftsfähige, klimaneutrale Gebäude zu schaffen. Bis dahin müssen geeignete Konzept, Standards und Produkte entwickelt und getestet werden.

Nachrüstbarkeit weiterer Komponenten

Neben der Regelungstechnik sollten bei der Erstellung der Anlagentechnik bereits heute ggf. zukünftig erforderliche Komponenten berücksichtig werden, damit diese in einigen Jahren kostengünstig nachgerüstet werden können. Hier ist die Nachrüstung von Kleinwärmepumpen zur Effizienzsteigerung oder zumindest der nachträgliche Einbau von Heizstäben zu nennen, für die ggf. bereits bei der Errichtung Anschüsse oder Durchbrüche nach draußen eingeplant werden sollten.

3 Modellierung von Einzelgebäuden

Die folgenden Untersuchungen werden mit Hilfe von vier Beispielgebäuden durchgeführt, die mit unterschiedlichen Ausführungen der Gebäudehülle und der Anlagentechnik auf ihre Eignung für einen klimaneutralen Gebäudebestand 2050 analysiert werden.

3.1 Untersuchte Gebäude

Für die Untersuchung von Einzelgebäuden wurden im Unterschied zu [Diefenbach et al. 2017] keine mittleren Gebäude verwendet, die in ihrer Gesamtheit den Gebäudebestand in Deutschland repräsentieren, sondern konkrete Beispielgebäude aus der deutschen Gebäudetypologie [IWU 2015]. Es handelt sich um das Einfamilienhaus (EFH L), das Reihen(end)haus (RH L) und das Mehrfamilienhaus (MFH-NB L), jeweils für die Baujahre ab 2016 (Abbildung 6). Zusätzlich wird als Mehrfamilienhaus ein energetisch modernisiertes Gebäude der Baualtersklasse 1949 bis 1958 (MFH-San D) untersucht.

EFH

RH

MFH-NB

MFH-San (Mittelhaus mit einem Treppenaufgang)

Abbildung 6: Fotos der vier verwendeten Beispielgebäude [IWU 2015]

Die Flächen der Untersuchungsgebäude wurden dem Tabula-Web-Tool[19] entnommen (Tabelle 5).

[19] http://webtool.building-typology.eu/#bm

Tabelle 5: Kenndaten der vier Modellgebäude für die Untersuchungen von Einzelgebäuden

		Einfamilienhaus		Mehrfamilienhaus	
		EFH-L	RH-L	MFH-L	MFH-D saniert
beheizte Wohnfläche	m²	160,4	133,4	1170,0	574,8
Wohnungen	-	1	1	17	9
Stockwerke	-	2	2	5	3
Hüllfläche					
Dach	m²	131,9	75,7	321,1	
Oberste Geschossedecke	m²				355,0
Außenwand	m²	227,3	207,0	1193,2	462,0
Fenster	m²	42,0	25,5	243,6	98,7
Außentür	m²	2,6	2,7	47,9	2,0
Fußboden	m²	107,8	67,8	321,1	355,0

Die U-Werte wurden aus [IWU 2015] für die Standards EnEV 2016, verbesserter Standard (KfW Effizienzhaus-55) und zukunftsweisender Standard (KfW Effizienzhaus-40) in der Regel für den Energieträger Biomasse verwendet[20]. Tabelle 6 zeigt die U-Werte, den Wärmebrückenzuschlag sowie die Ansätze für g-Wert der Verglasung, die Lüftung und die Gebäudemasse.

Tabelle 6: U-Werte und weitere energetische Kenndaten der vier Modellgebäude für unterschiedliche energetische Standards

		EFH-L			RH-L			MFH-L			MFH-D saniert		
		EnEV 2016	EH 55	EH 40	EnEV 2016	EH 55	EH 40	EnEV 2016	EH 55	EH 40	EnEV 2016	EH 55	EH 40
U-Werte													
Dach	W/(m²K)	0,24	0,13	0,10	0,24	0,13	0,10	0,24	0,19	0,08			
Oberste Geschossedecke	W/(m²K)										0,25	0,15	0,11
Außenwand	W/(m²K)	0,27	0,15	0,12	0,27	0,15	0,12	0,28	0,22	0,12	0,23	0,15	0,13
Fenster	W/(m²K)	1,30	1,10	0,70	1,30	1,10	0,70	1,30	0,70	0,70	1,30	0,90	0,80
Außentür	W/(m²K)	1,30	1,10	0,70	1,30	1,10	0,70	1,30	0,70	0,70	1,30	0,90	0,80
Fußboden	W/(m²K)	0,27	0,15	0,12	0,27	0,15	0,12	0,28	0,22	0,12	0,36	0,26	0,26
Wärmebrückenzuschlag	W/(m²K)	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02
g-Wert Fenster	-	0,70	0,60	0,50	0,70	0,60	0,50	0,70	0,60	0,50	0,70	0,60	0,50
Lüftung		Fenster	Fenster	WRG	Fenster	Fenster	WRG	Fenster	Fenster	WRG	Fenster	Fenster	WRG
Gebäudemasse		mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel

Bei den Untersuchungen wurde das Jahr 2012 für ein mittleres Klima bezüglich Wärmebedarf verwendet (Außentemperatur entspricht in etwa dem langjährigen Mittelwert von 45 Stationen in Deutschland), 2013 für ein Jahr mit hohem (0,34 °C unter dem langjährigen Mittelwert) und 2014 für ein Jahr mit niedrigem Gesamtwärmebedarf (1,23 °C über dem langjährigen Mittelwert) (siehe auch Anhang A.4). Für die Dimensionierung der solaren Erzeugungsanlagen wurde das Jahr 2012 verwendet, das bezüglich der Solarstrahlung für ein mittleres Klima steht (Solarstrahlung liegt 3,4 % über dem Mittelwert), aber tendenziell auf der „sicheren Seite“ liegt (siehe auch [Diefenbach et al. 2017]).

[20] Aufgrund des niedrigen Primärenergiefaktors stellt die Kombination mit einer Wärmeversorgung auf Basis von Biomasse in der Regel die geringsten Anforderungen an die Gebäudehülle.
Bei den angenommenen U-Werten handelt es sich um typische Werte, die niedriger (also ehrgeiziger) sind als die in Form des spezifischen Transmissionswärmeverlusts HT‘ festgelegten Mindestanforderungen der verschiedenen Gebäudestandards.

3.2 Energieversorgung

Für die elektrische Energieversorgung der Gebäude kommt in der Regel vor allem Photovoltaik in Frage, bei Mehrfamilienhäusern auch Kraft-Wärmekopplung mit BHKW. Windenergienutzung am Gebäude wurde – auch wenn einige Beispielanlagen mittlerweile in Betrieb sind – aufgrund der geringen Potenziale nicht berücksichtigt. Bei der Photovoltaik wurde unterstellt, dass für das jeweilige Gebäude die vorhandenen Flächen überwiegend genutzt werden, ohne die installierte PV-Leistung zu maximieren. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass eine Optimierung der für PV zur Verfügung stehenden Flächen nicht auf Kosten des Wärmebedarfs gehen darf. So besitzen zwar beispielsweise eingeschossige Bungalows pro m² Wohnfläche einen höheren Anteil Dachfläche für eine PV-Stromerzeugung als kompakte Gebäude, aber sie haben einen höheren Flächenverbrauch und auch der spezifische Energieverbrauch ist ungünstiger.

Für die Modellgebäude wurde die nutzbare Dachfläche ermittelt und bei Satteldächern unterstellt, dass nur die Hälfte überwiegend nach Süden ausgerichtet ist. Bei Flachdächern wurde eine Ost-West-Ausrichtung der Module mit flacher Neigung unterstellt, um die Flächenausnutzung zu optimieren. Anschließend wurde die tatsächlich installierbare Dachfläche abgeschätzt und daraus die installierte Leistung mit modernen Modulen mit 300 W Leistung bestimmt. Tabelle 7 zeigt die Dachflächen, die nutzbaren Flächen und die maximal installierbare Leistung. Anschließend wurde mit einer Modellrechnung an 5 Standorten[21] über Deutschland verteilt der PV-Ertrag auf dem Dach des Gebäudes berechnet.

Tabelle 7: Dachflächen der Modellgebäude und erzielbarer PV-Ertrag

	Bruttodach-fläche [m²]	Anteil nutzbare Dachfläche [%]	Nettodach-fläche [m²]	Maximale Leistung [kWp]	PV-Ertrag mit Modell [MWh/a]
EFH	75,0	80 %	60,0	11,3	10,772
RH	37,8	80 %	30,2	5,7	5,532
MFH-NB	321,1	65 %	208,7	39,1	37,946
MFH-San	177,5	80 %	142,0	26,6	25,815

Das Süddach des Einfamilienhauses (EFH) erlaubt die Installation von 11,3 kWp PV-Leistung, was über 5 Standorte gemittelt einem Jahresertrag von 10,77 MWh entspricht. Bei der Anwendung des Berechnungsmodells wurde eine Erzeugung über Deutschland verteilt unterstellt und dafür die Verteilverluste des elektrischen Netzes derart berücksichtigt, dass am Gebäude der Ertrag von 10,77 MWh/a zur Verfügung steht. Für die weiteren Berechnungen wurde in der Regel nur zwei Drittel des tabellierten maximal möglichen PV-Ertrages berücksichtigt, um Flexibilität für eine weitere Erhöhung der PV-Stromerzeugung zu ermöglichen.

Die verfügbaren Dachflächen sind Teil des erforderlichen PV-Ausbaus auf dem Weg zu einer weitgehend regenerativen Energieversorgung für Wohngebäude. Stehen größere Flächen zur Verfügung z. B. nahezu vollständige Nutzung der Bruttodachflächen durch Dach-integrierte oder -flächenbündige Montage der Module oder Nutzung von Nebengebäuden bzw. von vertikalen Fassadenflächen, so kann das PV-Angebot weiter vergrößert werden.

In den Berechnungen wurde zunächst kein Anteil an Windstrom zur Versorgung der Gebäude angerechnet. Dies geschieht in Kapitel 7. Wenn dennoch im Einzelfall die Auswirkungen eines Anteils Windstrom direkt am Gebäude betrachtet werden soll, so wird das Windpotenzial von 80 TWh/a für Wohngebäude in ganz Deutschland auf die untersuchte Wohnfläche herunter gebrochen[22]. Beim Einfamilienhaus mit 160,4 m² Wohnfläche stehen jedem Gebäude somit 3,208 MWh/a zur Verfügung.

[21] Standorte Hamburg, Düsseldorf, Dresden, Stuttgart und Freiburg i.B.

[22] In [Diefenbach et al. 2019] werden die Potentialgrenzen für die Windstromnutzung zur Wohngebäude-Wärmeversorgung in einem Intervall von 50-100 TWh/a abgeschätzt. Der Ansatz von 80 TWh/a entspricht den Basisvarianten in diesem Bericht.

3.3 Randbedingungen für die Untersuchung von Gebäuden mit Netto-Energieüberschuss

Es existiert eine Reihe von unterschiedlichen Definitionen für Gebäude mit Energiegewinn oder bilanziellem Überschuss [Großklos, Schaede 2016]. Effizienzhäuser Plus z.B. verfügen laut Definition [BMIBH 2018] in der Jahresbilanz unter Berücksichtigung der Eigenerzeugung und Netzrückeinspeisung netto über einen Überschuss sowohl bei der End- als auch bei der Primärenergie. Um diesen energetischen Standard in den Berechnungen in Kapitel 6 (in dem existierende Gebäudekonzepte untersucht werden) abbilden zu können, wurde die mindestens erforderliche Stromerzeugung der Gebäude bestimmt und daraus die benötigte PV-Leistung bzw. PV-Fläche berechnet. Mit dieser PV-Leistung bzw. dem PV-Stromertrag – gemittelt über sechs Standorte in Deutschland – wurden die weiteren Berechnungen durchgeführt, unabhängig davon, ob der Strombedarf im jeweiligen Gebäude geringfügig höher oder niedriger liegt. Dadurch wurde eine Iteration bis zur exakten Übereinstimmung von Angebot und Verbrauch vermieden.

Für die vier untersuchten Gebäudetypen und vier unterschiedlichen energetischen Standards wurde an sechs Standorten (Hamburg, Düsseldorf, Dresden, Würzburg, Stuttgart und Freiburg) für eine Basisauslegung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe (inkl. Zusatzheizstab) der jährliche elektrische Endenergiebedarf inklusive Hilfsstrom und Haushaltsstrombedarf (pauschal gemäß [BMIBH 2018] 20 kWh/(m²a)) für ein mittleres Nutzungsprofil je für EFH und MFH[23] (siehe Kapitel 3.5) berechnet.

Tabelle 8 zeigt den erforderlichen wohnflächenbezogenen Energieertrag für die vier Modellgebäude bei unterschiedlichen energetischen Standards der Gebäudehülle, um einen bilanziellen Ausgleich übers Jahr (in Anlehnung [BMIBH 2018]) zu erreichen, Tabelle 9 stellt die dazu im Mittel erforderliche PV-Leistung dar.

Tabelle 8: Erforderlicher wohnflächenbezogener Photovoltaik-Stromertrag der Modellgebäude für einen bilanziellen Ausgleich von Erzeugung und Bedarf nach [BMIBH 2018] inklusive Pauschalansatz für Haushaltsstrom

[kWh/(m²a)]	EnEV	EH55	EH40 ohne WRG	EH40 mit WRG
EFH	79,1	70,8	64,0	48,7
RH	70,0	64,6	59,9	42,1
MFH-NB	120,0	98,0	76,2	75,0
MFH-San	107,3	83,2	77,5	74,2

Tabelle 9: Erforderliche installierte PV-Leistung der Modellgebäude für einen bilanziellen Ausgleich von Erzeugung und Bedarf

[kWp]	maximale Leistung auf Dachfläche	EnEV	EH55	EH40 ohne WRG	EH 40 mit WRG
EFH	11,3	14,1	12,6	11,4	8,7
RH	5,7	10,4	9,6	8,9	6,2
MFH-NB	39,1	156	127,4	99,1	97,5
MFH-San	26,6	68,5	53,1	49,5	47,4

Der Vergleich mit den maximalen Leistungen auf der vorhandenen Dachfläche in Tabelle 9 zeigt, dass auch mit dem besten energetischen Standard (EH40 mit WRG) nur das Einfamilienhaus ausreichend Dachfläche

[23] Der Ansatz eines erhöhen Haushaltsstromverbrauchs in [BMIBH 2018] wurde hier nicht verfolgt, da einerseits Stromeffizienz im Haushalt eine wichtige Basis zur Erreichung der Klimaschutzziele darstellt, andererseits Messergebnisse aus realisierten Gebäuden zeigen, dass Haushaltsstromverbräuche unter 20 kWh/(m²a) im Mehrfamilienhaus erreichbar sind [Großklos et al. 2016]

zur Verfügung hat, bei den anderen Beispielgebäuden reicht die Dachfläche nicht für eine bilanzielle Deckung der Verbräuche aus. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse stark differieren können, je nachdem ob Erzeugung und Verbrauch in einer vereinfachten Jahresbilanz oder – wie hier im Berechnungsmodell – mit einer detaillierten Stundenbilanz berechnet werden.

3.4 Vergleich von Treibhausgasemissionen und Ansätze zur Modellierung des Stromnetzes

Bei der Bilanzierung von Gebäuden z. B. nach [DIN V 18599-1] oder [Loga, Imkeller-Benjes 1997]] werden die Treibhausgasemissionen eines Gebäudes auf Basis von Jahresmittelwerten für die verschiedenen Energieträger und für den deutschen Strommix berechnet (siehe auch [Großklos 2014]). Untersuchungen in [Großklos, Frank 2013] zeigten, dass sich für monatlich aufgelöste Emissionsfaktoren keine nennenswerten Änderungen ergeben. Die Auswertungen in [Wörner et al. 2019] auf Basis von (viertel-)stündlich aufgelösten THG-Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix 2017 ergaben für ein Beispielgebäude mit Wärmepumpe um ca. 5 % niedrigere Werte der Jahreswerte der THG-Emissionen im Vergleich zu den dynamischen THG-Emissionsfaktoren.

[Agora Energiewende 2018] stellt für die Jahre 2012 bis 2017 stündliche Stromerzeugungsprofile der Kraftwerke sowie stündlich aufgelöste THG-Emissionsfaktoren zur Verfügung, die die Emissionen im tatsächlich eingesetzten Kraftwerkspark abbilden.

Abbildung 7 zeigt den Jahresverlauf der THG-Emissionsfaktoren im deutschen Strommix für die Jahre 2012, 2015 und 2017. Die Werte weisen eine große Dynamik zwischen 150 und 730 g/kWh auf und schwanken auch zwischen den untersuchten Jahren deutlich. Im Sommer sinken die Emissionsfaktoren tendenziell ab, aber auch hier treten Spitzenwerte von bis zu 700 g/kWh auf.

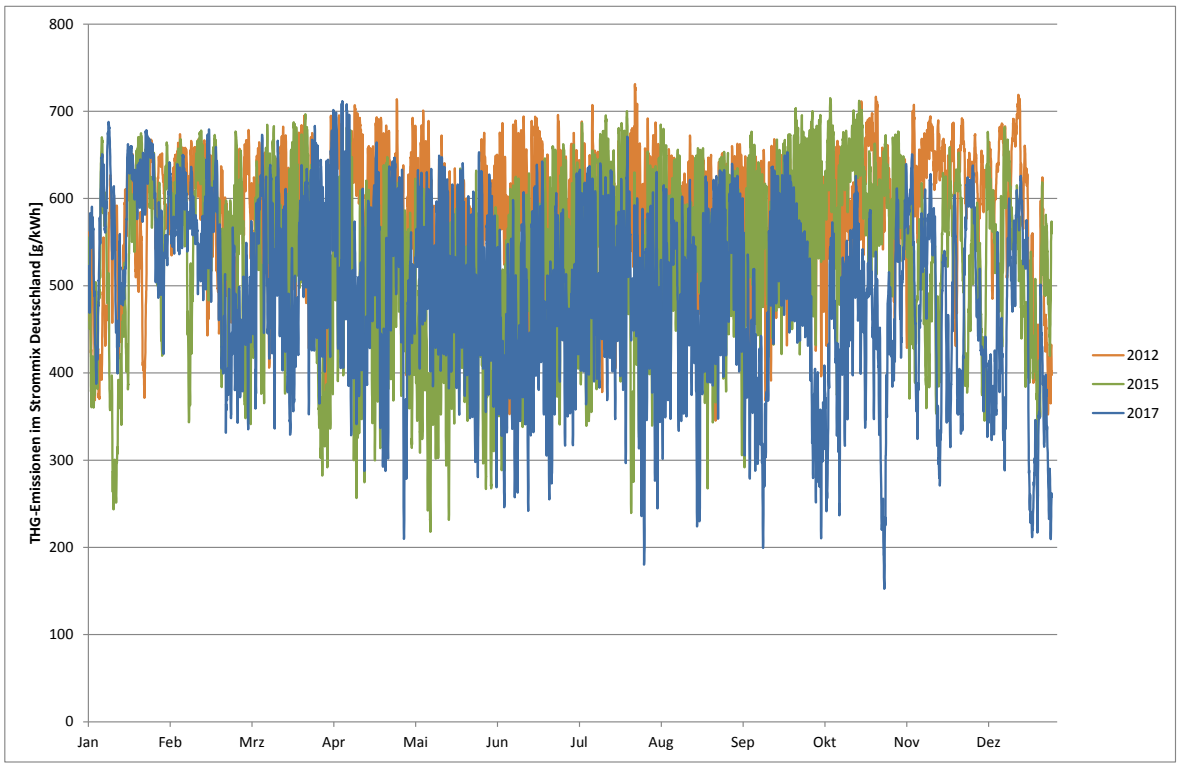


Abbildung 7: Stündliche Treibhausgasemissionen für den Strommix in Deutschland für die Jahre 2012, 2015 und 2017 (eigene Darstellung nach [Agora 2019])

Der ungewichtete Jahresmittelwert der Treibhausgas-Emissionen (alle Stunden des Jahres gleich gewichtet) sank von 579 g/kWh im Jahr 2012 auf 495 g/kWh im Jahr 2017 (Tabelle 10). Gewichtet man die stündlichen Treibhausgasfaktoren mit dem Verbrauch in Deutschland, so ändern sich die Jahresmittelwerte nur um maximal 2 g/kWh.

Tabelle 10: Mittlere Treibhausgasemissionen im deutschen Strommix nach [Agora 2019] und äquivalenter Wirkungsgrad der Kraftwerke, wenn die gesamte Energie mit Erdgaskraftwerken erzeugt würde

		2017	2016	2015	2014	2013	2012
Mittelwert ungewichtet	[g/kWh]	495	521	534	562	574	579
Mittelwert verbrauchsgewichtet	[g/kWh]	493	519	533	563	576	581
äquivalenter Wirkungsgrad Erdgaskraftwerke (verbrauchsgewichtet)	[%]	49%	47%	46%	44%	43%	42%

Unterstellt man für die Stromerzeugung ausschließlich Erdgas-Kraftwerke, so kann man mit einem Emissionsfaktor für Erdgas von 245 g/kWh (bezogen auf H_i) einen äquivalenten Wirkungsgrad der Kraftwerke bestimmen, der ebenfalls in der Tabelle 10 angegeben ist. Er liegt zwischen 42 % im Jahr 2012 und 49 % im Jahr 2017.

Im Berechnungsmodell für klimaneutrale Gebäude werden ebenfalls zeitlich hoch aufgelöst die Treibhausgasemissionen auf Basis eines zukünftigen Kraftwerksparks berechnet, bei dem für die fossilen Kraftwerke eine Stromerzeugung aus Erdgas(-GuD-)Kraftwerken unterstellt wird. Die PV-Stromerzeugung am Gebäude wird dann, wenn sie nicht in diesem selbst verwendet werden kann, nicht in der Bilanz berücksichtigt. Abbildung 8 zeigt den Jahresverlauf der THG-Emissionen eines EFH-EH40 mit WRG, Luft-Wasser-Wärmepumpe, PV-Anlage und ohne Wärmespeicher und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms. Als Kraftwerkswirkungsgrad wird hier zunächst exemplarisch für den Vergleich mit der Situation im Jahr 2012der mittlere Wirkungsgrad von 42 % aus Tabelle 10 angesetzt. Der Vergleich zwischen den THG-Emissionen direkt aus dem Modell und den Emissionen, die über den Strombedarf des Gebäudes mit den [Agora Energiewende 2018]-Emissionsfaktoren für 2012 berechnet wurden, ergibt in der Jahressumme nur 2 % höhere Emissionen aus dem Modell als im dem tatsächlichen Strommix 2012. Somit scheint mit der vereinfachten Betrachtung des Kraftwerksparks im Modell der Strommix in Deutschland auf Basis von Erdgaskraftwerken gut abgebildet werden zu können.

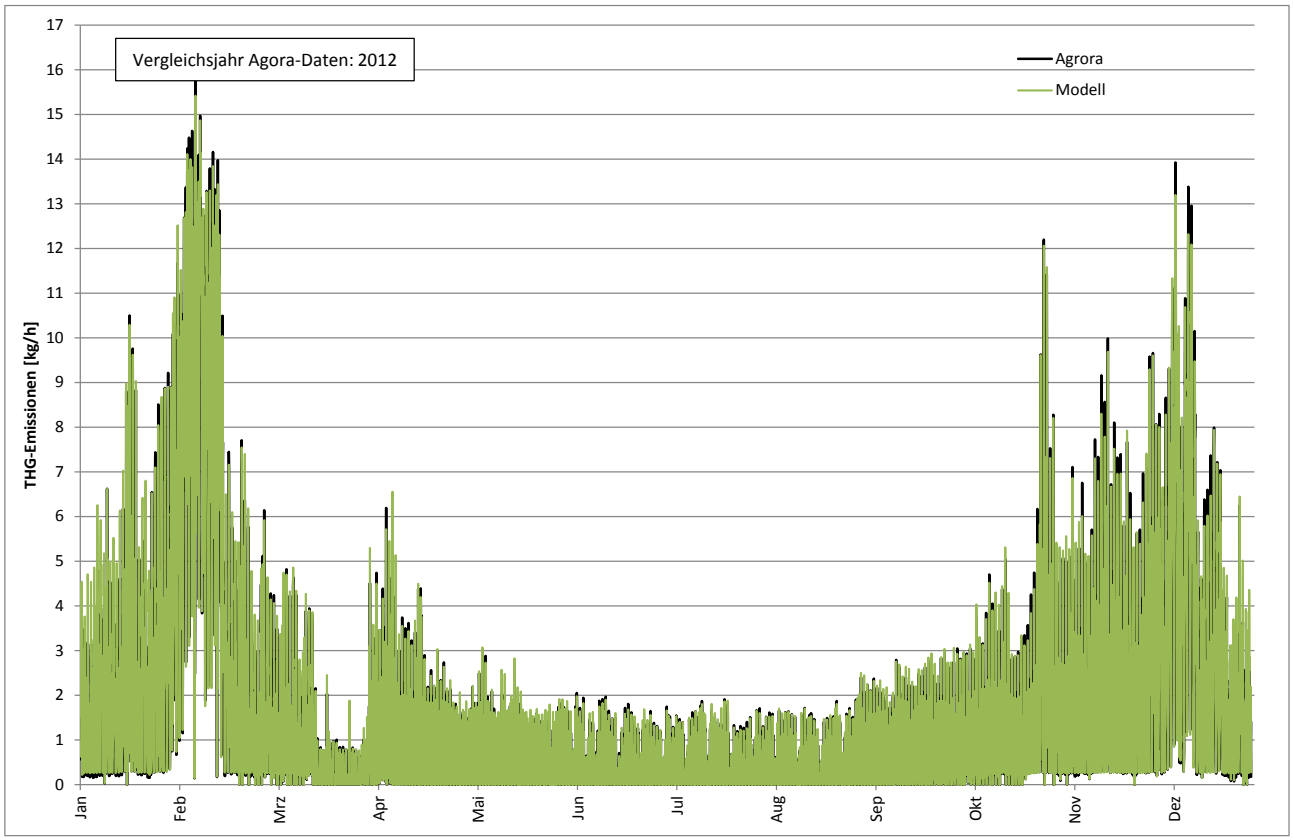


Abbildung 8: Vergleich der stündlichen Treibhausgasemissionen für ein EFH als EH40, WRG mit Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Wärmespeicher aus dem Modell (Kraftwerkswirkungsgrad 42 %) und THG-Emissionen des Gebäudes berechnet aus Strombezug und stündlichen Emissionsfaktoren aus [Agora Energiewende 2018] für das Jahr 2012

Im Berechnungsmodell soll jedoch ein zukünftiger nicht-erneuerbarer Kraftwerkspark im Jahr 2050 abgebildet werden. Dazu wird für die Stromerzeugung in Kraftwerken ein mittlerer Wirkungsgrad von 57 % angesetzt. Vergleicht man die THG-Emissionen für das Modellgebäude mit Wärmespeicher mit der Jahressumme für 2017 aus [Agora Energiewende 2018], so liegen diese im Modell 12 % unter denen des Strommixes Deutschland 2017 (Abbildung 9). Dies liegt darin begründet, dass ein sehr hoher mittlerer Kraftwerkswirkungsgrad unterstellt wurde, der bisher noch nicht die Situation im Netz widerspiegelt – insbesondere in den Wintermonaten, in denen bisher verstärkt Kohlekraftwerke eingesetzt werden. Bis zum Untersuchungsjahr 2050 sollen jedoch keine Kohlekraftwerke mehr betrieben werden, so dass die Modellansätze für die Zukunft dennoch plausibel sind. In den Sommermonaten erkennt man deutlich, dass der Wärmespeicher genutzt wird, um die Tagesschwankungen beim (Warmwasser-)Wärmebedarf zu decken und nur ein Sockelbetrag für Hilfsstrom aus dem Netz bezogen werden muss.

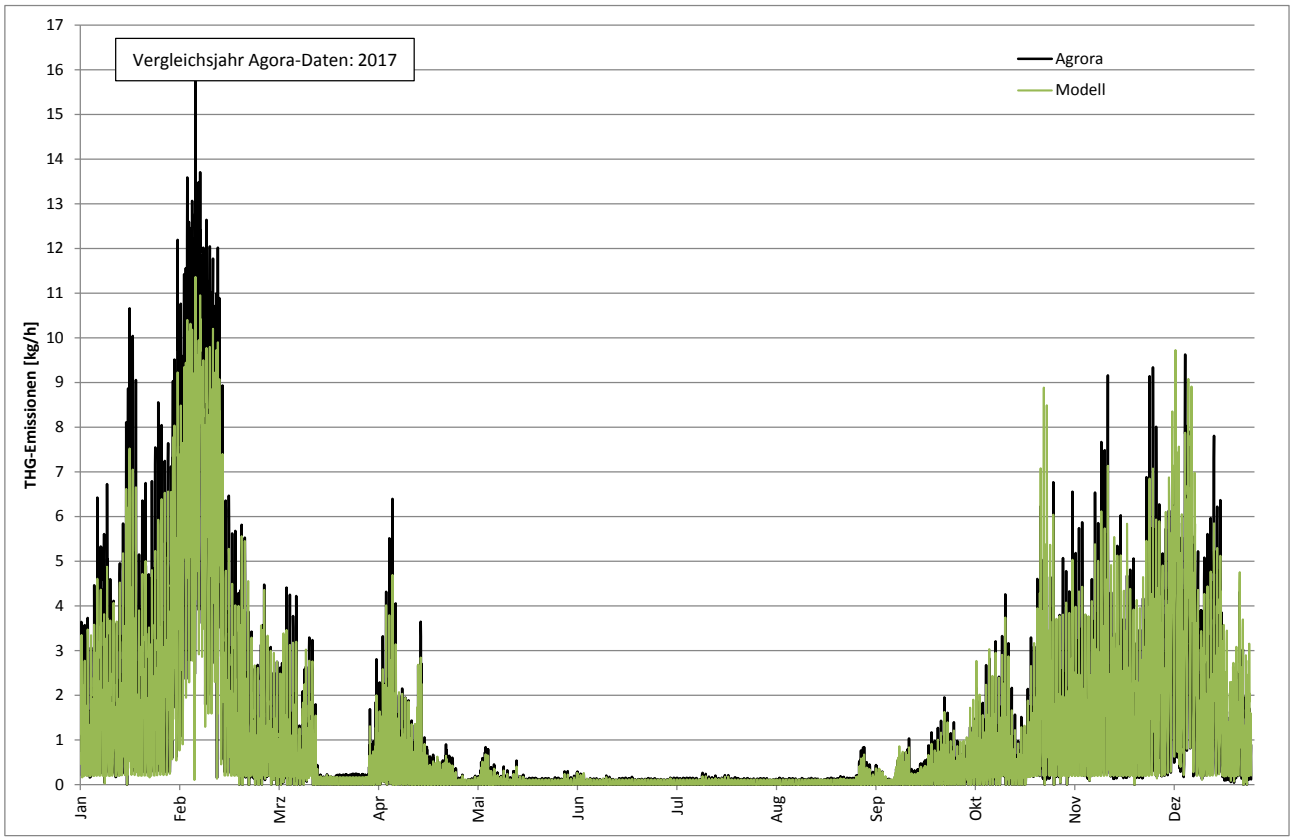


Abbildung 9: Vergleich der stündlichen Treibhausgasemissionen für ein EFH als EH40 mit WRG mit Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmespeicher aus dem Modell (Kraftwerkswirkungsgrad 57 %) und THG-Emissionen des Gebäudes berechnet aus Strombezug und stündlichen Emissionsfaktoren aus [Agora Energiewende 2018] für das Jahr 2017

Der Vergleich zeigt, dass mit dem Kraftwerksmodell, das ausschließlich auf Erdgaskraftwerken mit angepassten, äquivalenten Wirkungsgraden beruht, sowohl die THG-äquivalente Erzeugungsstruktur des heutigen Kraftwerksparks nachgebildet werden kann als auch die Situation für den zukünftigen Kraftwerkspark 2050 plausibel modelliert werden kann.

Windenergie und PV-Anlagen außerhalb des Gebäudes sowie Biomasse werden bei der Betrachtung von Einzelgebäuden im ersten Schritt nicht berücksichtigt, da die zukunftsweisenden Gebäude die Potenziale für die erneuerbaren Energien schonen sollen (siehe auch Kapitel 5).

Unabhängig von diesem bilanztechnischen Ansatz, der auf eine sparsame Verwendung von elektrischer Energie abzielt, ist zu beachten, dass nach [Diefenbach et al. 2019] eine umfassende Fähigkeit zur Windenergienutzung für die Wärmeversorgung zukünftiger Gebäude einen wesentlichen Faktor zur Erreichung der Klimaschutzziele darstellt. Insbesondere zukunftsfähige Neubauten sollten also diese Fähigkeit aufweisen, um die gesetzten Bilanzgrenzen für die Treibhausgasemissionen somit zukünftig noch unterschreiten zu können, wenn tatsächlich ausreichend Windkraft zur Verfügung steht.

3.5 Modellierung des Nutzerverhaltens bei Einzelgebäuden

Bei dem Vergleich unterschiedlicher Ausführungen der Gebäudehülle oder der Anlagentechnik wird meist zur besseren Vergleichbarkeit mit einheitlichen Randbedingungen für die Nutzung des Gebäudes gerechnet. Jedoch zeigt die Auswertung realer Gebäude, dass das Nutzerverhalten sehr unterschiedlich ausfallen kann und Raumtemperaturen, Lüftungsverhalten oder Haushaltsstromverbrauch in der Praxis sehr verschieden sind, was zu sehr unterschiedlichem Energieverbrauch und unterschiedlichen Verbrauchsprofilen führt. Dabei kann die Frage, wann und in welcher Höhe ein Energiebedarf auftritt, sich deutlich z. B. auf die Nutzbarkeit von solarem Energieangebot auswirken. Außerdem sind Standardrandbedingungen (z. B. 20° C Raumtemperatur) teilweise nicht repräsentativ für besonders energieeffiziente Gebäude. Aus diesem Grund ist es wichtig unterschiedliches und typisches Nutzerverhalten zu berücksichtigen, um dessen Auswirkungen beim Einzelgebäude oder Gebäudeensembles, die sich ggf. gegenseitig ausgleichen können, differenziert zu erkennen. Bei den Untersuchungen wurden aus diesem Grund zwei unterschiedlichen Herangehensweisen zur Berücksichtigung des Nutzerverhaltens verfolgt.

Es wurde untersucht, welchen Einfluss die Anzahl der modellierten Nutzerprofile auf die Ergebnisse besitzt (siehe Anhang A.1). Als Kompromiss zwischen Rechengeschwindigkeit und Schwankungsbreite der Ergebnisse wird im folgenden Kapitel meist mit je 2 Gebäuden an 5 Standorten (Hamburg, Düsseldorf, Dresden, Stuttgart und Freiburg) mit jeweils 10 unterschiedlichen Nutzerprofilen berechnet, so dass die Ergebnisse einen Querschnitt aus 50 zufälligen Nutzerprofilen darstellen. Üblicherweise wurden je Standort zwei Gebäude unterstellt – 10 Gebäude insgesamt – und die Ergebnisse für ein einzelnes Gebäude bzw. wohnflächenbezogen ausgegeben. In bestimmten Fällen wurde dagegen mit mittleren Profilen gerechnet, um z. B. Rechenzeit einzusparen. Die mittleren Profile repräsentieren mittleres bzw. typisches Nutzerverhalten, sind aber anders als übliche Standardprofile nicht geglättet. Auswertungen zur Bestimmung von mittleren Nutzungsprofilen sind in Anhang A.2 zu finden.

4 Ergebnisse der Berechnung von Einzelgebäuden

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Anwendung des Berechnungsmodells auf Einzelgebäude mit Blick auf die Erreichung der Treibhausgas- und der Brennstoffziele ausgewertet und dokumentiert.

4.1 Basisvarianten für vier Gebäudetypen

Als Grundausführung der Anlagentechnik wurde eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Heizstab, einem Wärmespeicher (30 kWh Kapazität bei EFH/RH und 60 kWh bei MFH) und einer PV-Anlage mit 2/3 der verfügbaren Dachfläche ausgewählt (siehe Tabelle 8 in Kapitel 3.3), da diese Konfiguration zum Zeitpunkt der Berichterstellung eine gebräuchliche Kombination von Komponenten für die Wärme- und Stromversorgung von Einfamilienhäusern darstellt. Für die vier Modellgebäude wurden jeweils vier energetische Standards (EnEV 2016 und EH55 ohne Lüftungsanlage sowie EH55 und EH40 jeweils mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) mit dieser Basisanlagentechnik untersucht. Es wurden 10 Gebäude parallel, verteilt über 5 Standorte und mit 10 Nutzerprofilen gerechnet (Zu den Auswirkungen der Modellierung und des Nutzerverhaltens siehe Anhang A.1 und Anhang A.6). Der Haushaltsstrom wird in diesem Kapitel noch nicht berücksichtigt.

In den Berechnungen wird die Anlagentechnik abweichend von heutigen Anlagenregelungen simuliert, was bei der Interpretation und dem Vergleich mit heutigen Verbrauchs- und Emissionswerten berücksichtigt werden muss. In diesem Kapitel steht dem Gebäude an regenerativem Strom nur die Erzeugung mit der PV-Anlage auf dem eigenen Dach zur Verfügung. Reicht diese nicht aus, muss Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen werden, der mit Erdgas-GuD-Kraftwerken erzeugt wird. Sind PV-Überschüsse vorhanden (später in Kapitel 4.5.2 auch Windstromangebot im Netz), so versucht die modellierte Anlagenregelung diese Überschüsse im Gebäude zu speichern. Der Wärmespeicher wird erst von der Wärmepumpe (bis auf 60 °C), danach auch vom Elektroheizstab auf höhere Temperaturen erwärmt, als für die direkte Wärmebereitstellung und zur Pufferung von Lastspitzen erforderlich (maximal 80 °C), um solare Überschüsse im Gebäude nutzen zu können. Das wirkt sich auch auf die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe aus, die teilweise niedriger ausfallen als ohne die Erzeugung erhöhter Puffertemperaturen. Das Berechnungsmodell ermittelt dabei die Einsatzreihenfolge der Wärmeerzeuger und die Nutzung des regenerativen Stroms über die Bewertungsgröße Primärenergie wie in [Diefenbach et al. 2017] beschrieben. Ein Bezug von PV-/Windstrom aus dem Netz zur Bevorratung von Überschüssen im Netz findet bisher in Gebäuden de facto nicht statt und unterscheidet grundlegend den simulierten Anlagenbetrieb von der heutigen Wärmeversorgung.

Einfamilien- und Reihenhaus

Die erforderliche Gesamtwärmeerzeugung zur Deckung des Wärmebedarfs für Heizung, Warmwasserbereitung und Verteil- und Speicherverluste hängt vom energetischen Standard der Gebäudehülle und dem Vorhandensein einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ab. In Abbildung 10 ist für das Einfamilien- und das Reihenhaus die Wärmeerzeugung als absolute Werte aufgetragen. Beim Einfamilienhaus liegt die Wärmeerzeugung in der EnEV-Ausführung mit 16.066 kWh etwa doppelt so hoch wie beim EH40 mit WRG (7.821 kWh), vergleichbar sind die Verhältnisse beim Reihenhaus. Der Anteil des Heizstabes, der sich überwiegend aus der Nutzung von PV-Stromüberschüssen zur Wärmeerzeugung ergibt, ist bei allen vier Gebäudestandards etwa gleich, die Wärmepumpe liefert die verbleibende Wärme. Somit ist der prozentuale Anteil des Heizstabs an der gesamten Wärmeerzeugung mit 29 % beim EH40 mit WRG höher als beim EnEV-Gebäude (14 %)[24]. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe liegt zwischen 2,06 beim EnEV-Gebäude und

[24] Der Anteil des Heizstabes an der Wärmebereitstellung liegt mit der hier implementierten Regelung, die PV-Überschüsse möglichst im Gebäude speichert, somit höher als in Wohngebäuden bisher üblich

1,86 beim EH40 (nicht in der Abbildung dargestellt)[25]. Der Wärmespeicher erhöht durch seine Verluste den Wärmeverbrauch des Einfamilienhauses um 3 % in der EnEV-Variante und um 7 % beim EH40, beim Reihenhaus liegt der Verlustanteil aufgrund des geringeren Gesamtverbrauchs zwischen 4 % und 9 %. Abbildung 11 zeigt die Wärmeerzeugung als wohnflächenbezogene Kennwerte.

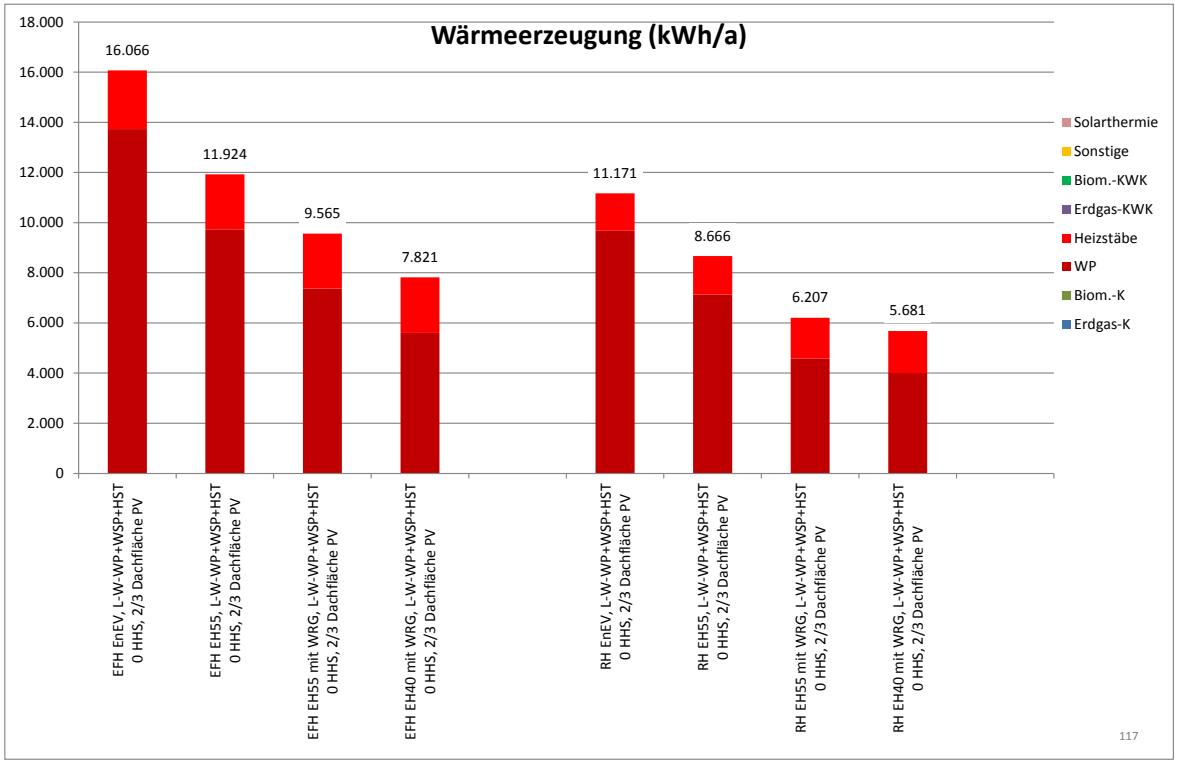


Abbildung 10: Wärmeerzeugung (absolut) in einem Einfamilien- (EFH) und einem Reihenhaus (RH) in den vier Standards für die Gebäudehülle (EnEV, EH55 ohne WRG, EH55 mit WRG, EH40 mit WRG) mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

[25] Hier ist anzumerken, dass im Projekt generell mit vorsichtigen Ansätzen für die Wärmepumpen-Effizienz gerechnet wurde (vgl. [Diefenbach et al. 2019], insbesondere Anhang B.4).

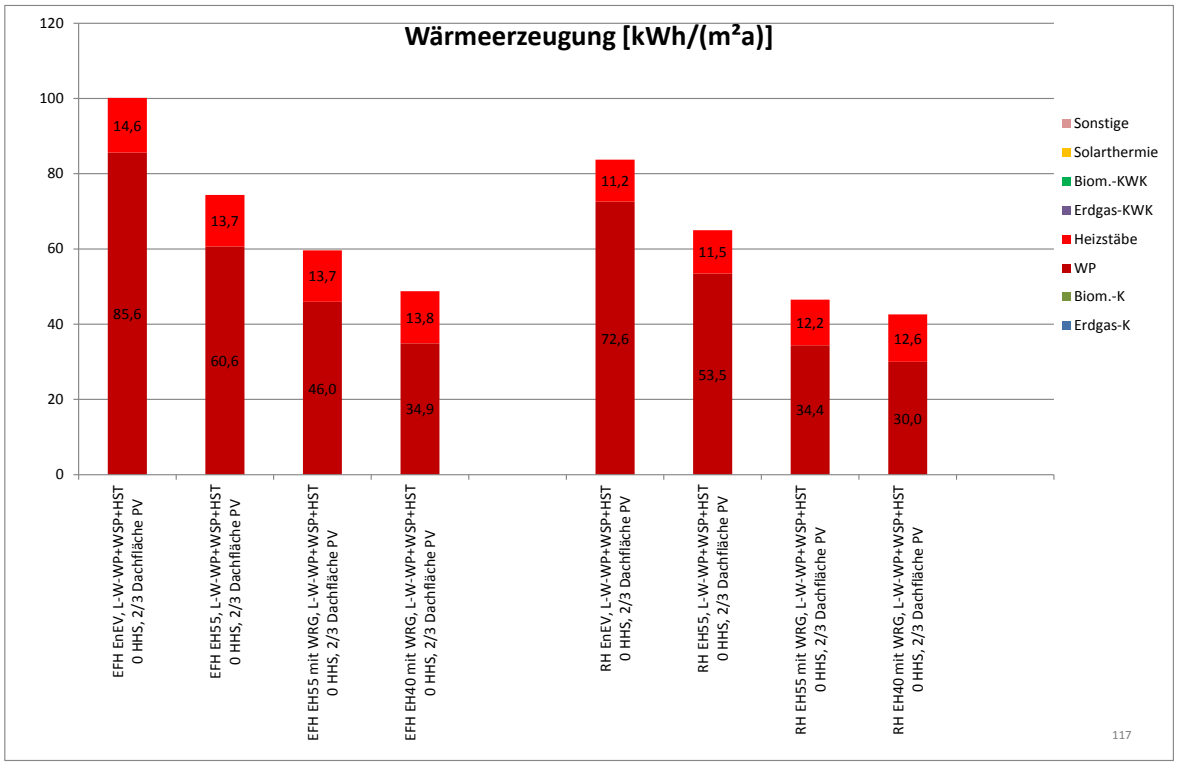


Abbildung 11: Wärmeerzeugung (flächenbezogen) in einem Einfamilien- (EFH) und einem Reihenhaus (RH) in den vier Standards für die Gebäudehülle (EnEV, EH55 ohne WRG, EH55 mit WRG, EH40 mit WRG) mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Stromerzeugung sowie Stromverbräuche der Modellgebäude für die Anlagentechnik (Heizung) und die Hilfsenergie (Lüftung, Steuerung und Pumpen) sind in Abbildung 12 als flächenbezogene Kennwerte dargestellt. Dargestellt ist die Erzeugung der PV-Anlage und wieviel Strom zusätzlich in fossilen Kraftwerken erzeugt werden muss. Dem steht der Gesamtverbrauch der Anlagentechnik gegenüber, der immer kleiner ist als die Summe der PV-Stromproduktion am Gebäude und Erzeugung im Kraftwerk, da ein Teil der PV-Erzeugung als Überschüsse ins öffentliche Netz eingespeist werden, wenn sie nicht im Gebäude nutzbar sind. Die Stromerzeugung aus PV (Windenergie wird hier erst mal nicht betrachtet) hängt von der installierten Leistung ab und ist für jeden Gebäudetyp über alle Ausführungsvarianten gleich, da sich die zur Verfügung stehende Dachfläche nicht mit dem energetischen Standard ändert. Sie reduziert den benötigten Residualstrom aus dem Netz, der in den Basisvarianten (kein Brennstoffeinsatz im Gebäude) zwischen 13,4 kWh/(m²a) (RH EH40 mit WRG) und 31,3 kWh/(m²a) (EFH EnEV) liegt und für die Brennstoff- sowie THG-Bilanz entscheidend ist.

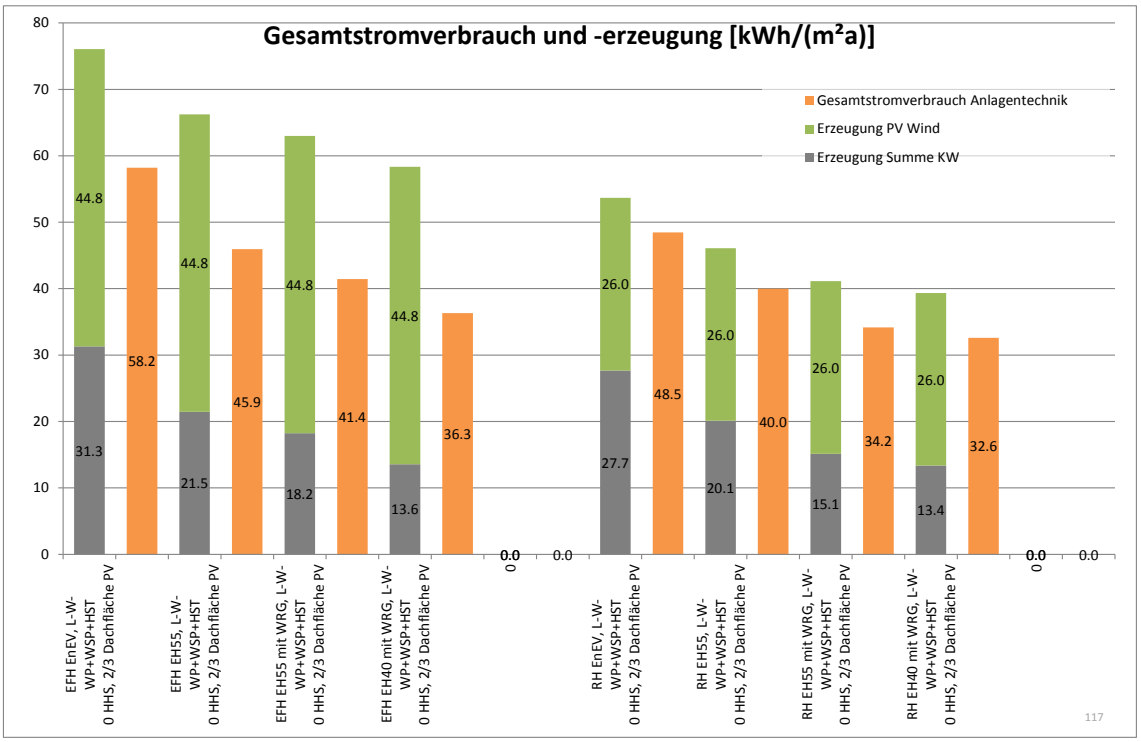


Abbildung 12: Stromerzeugung und -verbrauch für die Anlagentechnik in einem Einfamilien- (EFH) und einem Reihenhaus (RH) in den vier Standards für die Gebäudehülle (EnEV, EH55 ohne WRG, EH55 mit WRG, EH40 mit WRG) mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Das Einfamilienhaus verursacht Brennstoffverbräuche zwischen 25,3 und 58,4 kWh/(m²a) (Abbildung 13). Somit liegt nur das Gebäude im EH40-Standard mit WRG unter dem Zielwert für Brennstoffe von 26,5 kWh/(m²a). Beim Reihenhaus ergeben sich etwas geringere Brennstoffverbräuche. Im Sommerhalbjahr fallen bei dieser Anlagenauslegung keine Brennstoffverbräuche an.

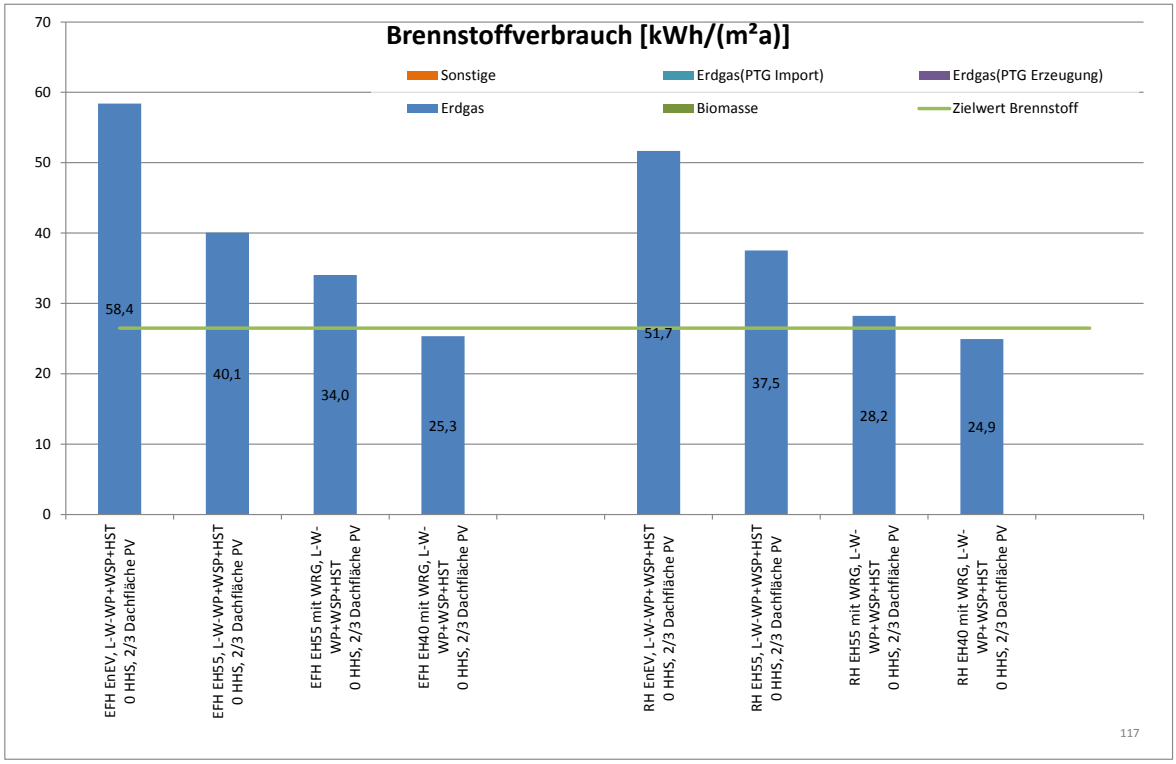


Abbildung 13: Brennstoffverbrauch eines Einfamilien- (EFH) und eines Reihenhauses (RH) in den vier Standards für die Gebäudehülle (EnEV, EH55 ohne WRG, EH55 mit WRG, EH40 mit WRG) mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Die Treibhausgasemissionen (THG) (Abbildung 14) resultieren bei den betrachteten Varianten aus dem Brennstoffverbrauch für Strom aus Kraftwerken (es wurden Erdgas-GuD-Kraftwerke unterstellt) multipliziert mit dem Emissionsfaktor für Erdgas (0,245 kg/kWh). Die THG-Emissionen liegen beim Einfamilienhaus zwischen 6,2 kg/(m²a) beim EH40 mit WRG und 14,4 kg/(m²a) in der EnEV-Ausführung. Beim Reihenhaus mit seiner etwas günstigeren Kubatur werden THG-Emissionen zwischen 6,1 und 12,7 kg/(m²a) erreicht. Somit unterschreitet mit dieser Anlagentechnik nur das Gebäude als EH40 mit WRG den Zielwert der THG-Emissionen für zukünftige klimagerechte Gebäude.

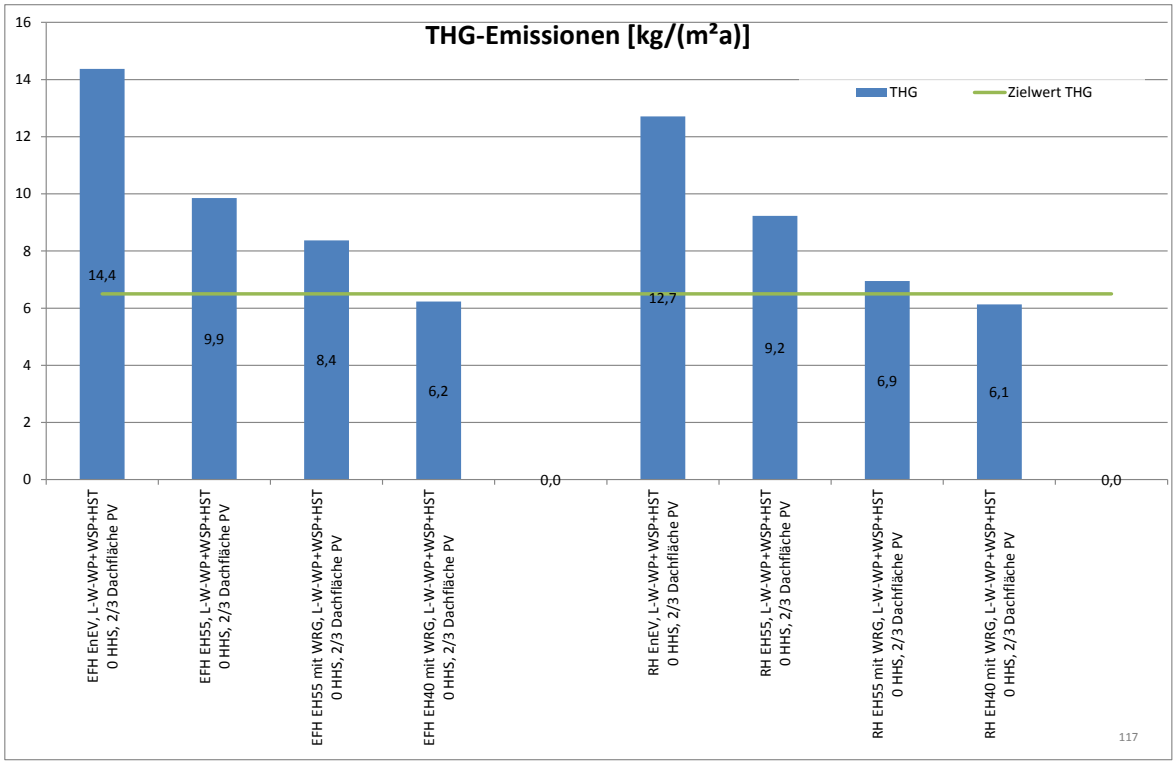


Abbildung 14: Treibhausgasemissionen eines Einfamilien- (EFH) und eines Reihenhauses (RH) in den vier Standards für die Gebäudehülle (EnEV, EH55 ohne WRG, EH55 mit WRG, EH40 mit WRG) mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Mehrfamilienhäuser

Abbildung 15 zeigt die Treibhausgasemissionen der untersuchten Mehrfamilienhausvarianten[26]. Diese liegen beim großen MFH (MFH-NB) bei Ausnutzung von 2/3 der verfügbaren Fläche für PV beim EnEV-Gebäude doppelt so hoch wie der Zielwert von 6,5 kg/(m²a). Auch die beiden Ausführungen als EH55 (ohne und mit Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung) verfehlen das Treibhausgasziel deutlich. Erst als EH40 mit WRG wird der Zielwert unterschritten. Das kleine Mehrfamilienhaus besitzt gemäß Annahmen in Kapitel 3.2 ein Satteldach und damit eine kleinere für PV nutzbare Dachfläche, so dass mit der Luft-Wasser-Wärmepumpe alle Ausführungen die Zielwerte nicht erreichen. Wird die Gebäudehülle als EH40 mit WRG ausgeführt, kann der Zielwert für die Treibhausgasemissionen durch eine vollständige Ausnutzung der geeigneten Dachfläche gerade eingehalten werden (hier nicht dargestellt).

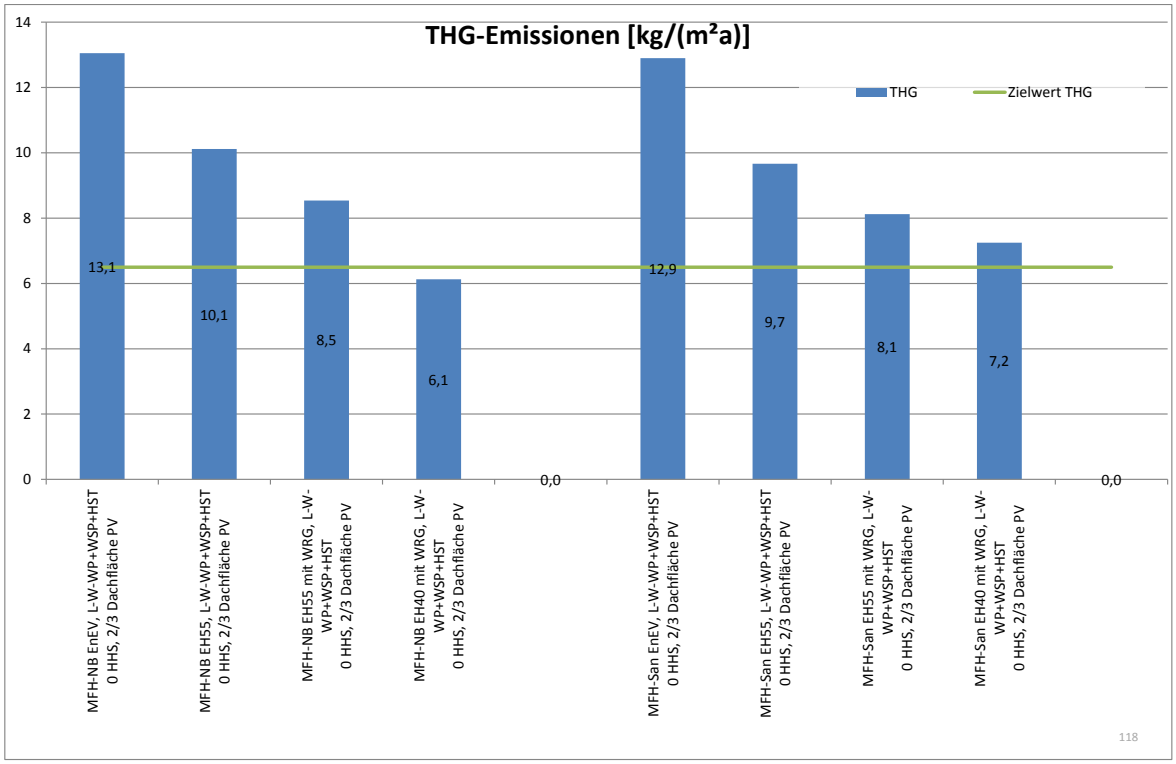


Abbildung 15: Treibhausgasemissionen eines großen (MFH-NB) und eines kleinen (MFH-San) Mehrfamilienhauses in den vier Standards für die Gebäudehülle (EnEV, EH55 ohne WRG, EH55 mit WRG, EH40 mit WRG) mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

[26] Die Grafiken für Wärmeerzeugung, Stromverbrauch und Brennstoffverbrauch sind der Übersichtlichkeit wegen hier nicht mehr dargestellt.

Beim Brennstoffverbrauch (Abbildung 16) der Varianten ergibt sich ein ähnliches Bild, auch hier erreicht beim MFH-NB erst das Gebäude im EH40-Standard mit Wärmerückgewinnung den Zielwert, beim MFH-San mit 2/3-Dachbelegung für PV jedoch keine der Varianten. Auch beim Mehrfamilienhaus reicht die unterstellte Auslegung der PV-Anlage, um den Energieverbrauch des Gebäudes (ohne Haushaltsstrom) zwischen Mai und September vollständig zu decken, so dass in dieser Zeit kein Brennstoffverbrauch in Kraftwerken anfällt.

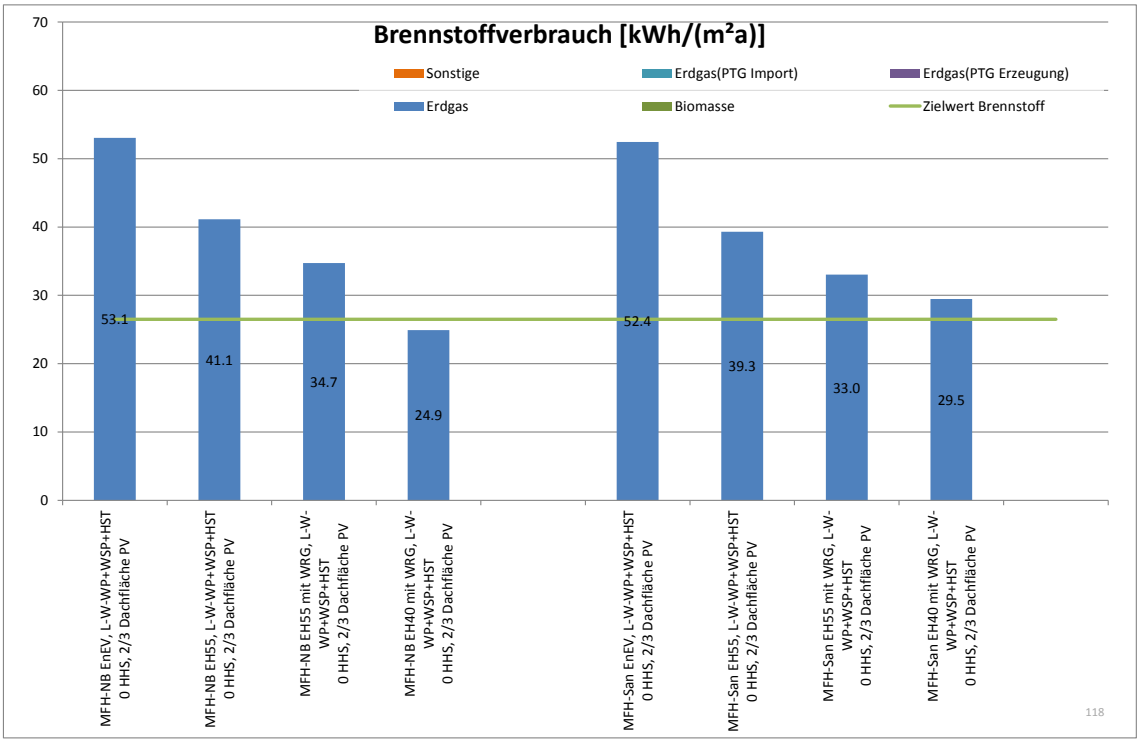


Abbildung 16: Brennstoffverbrauch eines großen (MFH-NB) und eines kleinen (MFH-San) Mehrfamilienhauses in den vier Standards für die Gebäudehülle (EnEV, EH55 ohne WRG, EH55 mit WRG, EH40 mit WRG) mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

4.2 Kombinationen unterschiedlicher Anlagentechniken

Ausgehend von der Basisvariante wird im Folgenden die Anlagentechnik exemplarisch für das EH55 ohne WRG und das EH40 mit WRG variiert, um den Einfluss unterschiedlicher Kombinationen der Anlagen und deren Dimensionierungen herauszuarbeiten. Eine Übersicht der Varianten findet sich in Tabelle 11. Der Haushaltsstrom ist bei den folgenden Auswertungen ebenfalls noch nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 4.5). Bei den Auswertungen sind meist die THG-Emissionen und der Brennstoffverbrauch wiedergegeben.

Tabelle 11: Übersicht der untersuchten Wärmeerzeuger und Ausführungsvarianten der Anlagentechnik

Wärmeerzeuger	**Ausführungsvarianten** (werden mit allen Wärmeerzeugern kombiniert, wo dies sinnvoll ist)
Luft-Wasser-Wärmepumpe (L-W-WP)	Heizstab (HST) ohne PV (0 PV)
Erdreich-Wärmepumpe (Erd-WP)	HST+PV auf 2/3 Dach (=7,18 MWh)
Gas-Brennwert-Kessel (Gas-BWK)	HST+2/3 PV+ Wärmespeicher 30 kWh (WSP2)
Gas-Brennwert-Kessel + Mini-Wärmepumpe (Gas-BWK+Mini-WP)	HST+2/3 PV+ Wärmespeicher 30 kWh reservierter Anteil von 50 % für lokale Wärmeerzeuger[27] (WSP4)
Holz-Pellet-Kessel (Pellet) (in der ersten Ausführungsvariante ohne HST aber mit WSP2)	HST+2/3 PV+ WSP4+ Solarthermie-HZ-WW (Thermie-HZ+WW)
	HST+2/3 PV+ WSP4+ Elektrospeicher 5 kWh (ESP5)
	HST+2/3 PV+Elektrospeicher 5 kWh (ESP5)
	HST+2/3 PV+ Elektrospeicher 20 kWh (ESP20)
	HST+0 PV+ WSP4+ Solarthermie-HZ-WW (Thermie-HZ+WW)
	HST+1/3 PV+ WSP4+ Solarthermie-HZ-WW (Thermie-HZ+WW)

Zusätzlich werden am Ende des Kapitels noch direktelektrische und unterschiedliche bivalente Heizsysteme untersucht.

4.2.1 Luft-Wasser-Wärmepumpe

Wird eine Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Wärmeversorgung im Gebäude eingesetzt, so liegen beim EH55 ohne WRG die Treibhausgasemissionen selbst mit PV-Anlage und ergänzender Solarthermie bei ca. 8,8 kg/(m²a) und erreicht die Zielwerte nicht (Abbildung 17). Alle anderen Varianten schneiden noch schlechter ab. Auch der Brennstoffverbrauch überschreitet im günstigsten Fall mit 35,6 kWh/(m²a) den Zielwert von 26 kWh/(m²a) deutlich (Abbildung 18).

Betrachtet man das Einfamilienhaus mit einer Gebäudehülle im EH40-Standard (ebenfalls Abbildung 17), so liegen die Treibhausgasemissionen bei denjenigen Ausführungen unter dem Zielwert von 6,5 kg/(m²a), bei denen ca. 2/3 der Dachfläche für PV genutzt werden und ein Wärmespeicher vorhanden ist (ein Heizstab wird bei allen Wärmepumpenvarianten grundsätzlich als Spitzenlastwärmeerzeuger unterstellt). Die PV-Anlage ohne Wärmespeicher reduziert die Treibhausgasemissionen bereits um 36 %, der Zielwert wird mit 7,6 kg/(m²a) aber noch nicht erreicht. Ein zusätzlicher Wärmespeicher (hier wurde ein Volumen von ca. 400 Liter für WSP2 angesetzt) führt bereits zur Unterschreitung des Zielwertes auf 5,6 kg/(m²a). Wird zusätzlich

[27] Ein reservierter Anteil bedeutet, dass nur das nicht reservierte Volumen für die Speicherung von Überschüssen mit einem Heizstab zur Verfügung steht.

eine solarthermische Anlage mit 0,1 m² Kollektorfläche pro m² Wohnfläche installiert (hier somit 16 m², die auf der verbleibenden Dachfläche noch montiert werden kann), so sinken die Treibhausgasemissionen auf 4,9 kg/(m²a). Wird der Wärmespeicher durch eine Elektrospeicher mit 5 kWh Nutzkapazität ergänzt (keine solarthermische Anlage, 2/3 der Dachfläche mit PV belegt), so ergeben sich keine nennenswerten Veränderungen gegenüber der Situation ohne Elektrospeicher, da durch Wärmepumpe, Heizstab und Wärmespeicher die PV-Stromerzeugung schon nahezu vollständig genutzt werden kann. Varianten ohne Wärmespeicher aber mit Elektrospeicher (5 bzw. 20 kWh Kapazität) schneiden deutlich schlechter ab (7,3 kg/(m²a)) und erreichen den THG-Zielwert nicht. Auch ein Verzicht auf die PV-Anlage kann mit einer solarthermischen Anlage üblicher Auslegung nicht kompensiert werden (7,8 kg/(m²a)). Durch eine PV-Anlage auf einem Drittel der Dachfläche kann der Zielwert zusammen mit einer solarthermischen Anlage mit Heizungsunterstützung erreicht werden. Die Brennstoffverbräuche folgen für die untersuchten Varianten analog den THG-Emissionen (Abbildung 18).

Die Varianten ohne Wärmespeicher sind nur zum Vergleich dargestellt, um die Auswirkungen der einzelnen Einflussgrößen schrittweise darstellen zu können, technisch wäre eine solche Ausführung aufgrund des Leistungsbedarfs für die Warmwasserbereitung nicht praktikabel.

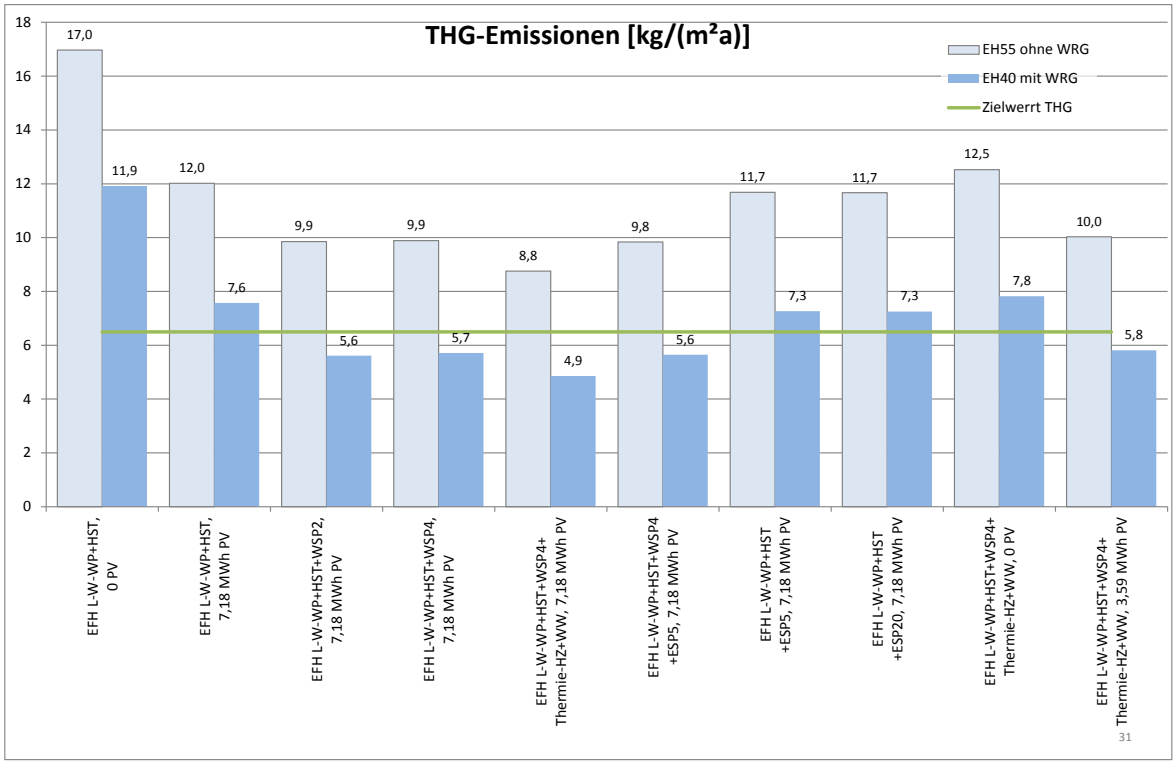


Abbildung 17: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Luft-Wasser-Wärmepumpe sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

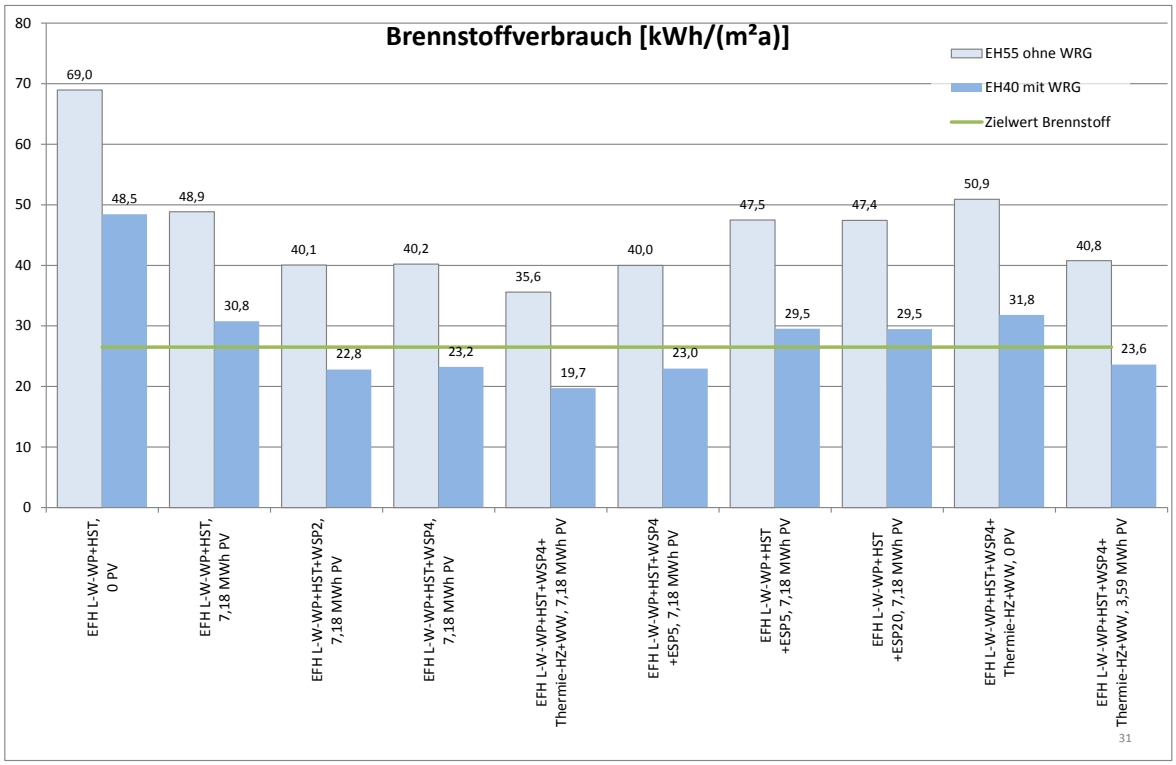


Abbildung 18: Brennstoffverbrauch für ein Einfamilienhaus mit Luft-Wasser-Wärmepumpe sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

4.2.2 Erdreich-Wärmepumpe

Verfügt das Gebäude über eine Erdreichwärmepumpe, so reduzieren sich die Stromverbräuche aufgrund höherer Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Wärmepumpe und mit einer PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche werden die Triebhausgasemissionen bereits beim EH55 ohne WRG beim Einsatz eines Wärmespeichers mit 30 kWh Kapazität nahe an dem Zielbereich von 6,5 kg/(m²a) (Abbildung 19). Auch beim Brennstoffverbrauch wird der Zielwert bereits unterschritten (Abbildung 20). Mit Solarthermie liegen die THG-Emissionen mit 5,9 kg/(m²a) am niedrigsten, steht nur ein Elektrospeicher zur Verfügung, so werden die Zielwerte (ohne Berücksichtigung des Haushaltsstromes) deutlich überschritten. Ist nur eine solarthermische Anlage ohne PV oder eine solarthermische Anlage mit PV-Modulen nur auf einem Drittel der Dachfläche vorhanden, werden die Zielwerte ebenfalls nicht erreicht.

Das EH40 mit WRG erreicht ohne PV-Anlage die Zielwerte ebenfalls nicht. Mit einer PV-Anlage auf zweidritteln der Dachfläche werden die Zielwerte bei Treibhausgasemissionen und beim Brennstoffverbrauch bei allen Varianten mit Wärmespeicher deutlich unterschritten. Bei dieser Ausführung kann auch ein Elektrospeicher statt eines Wärmespeichers eingesetzt werden. Die niedrigsten THG-Emissionen werden durch die Kombination der PV-Anlage (2/3 der Dachfläche) mit einer solarthermischen Anlage erreicht, allerdings sind die Unterschiede mit und ohne Solarthermie gering.

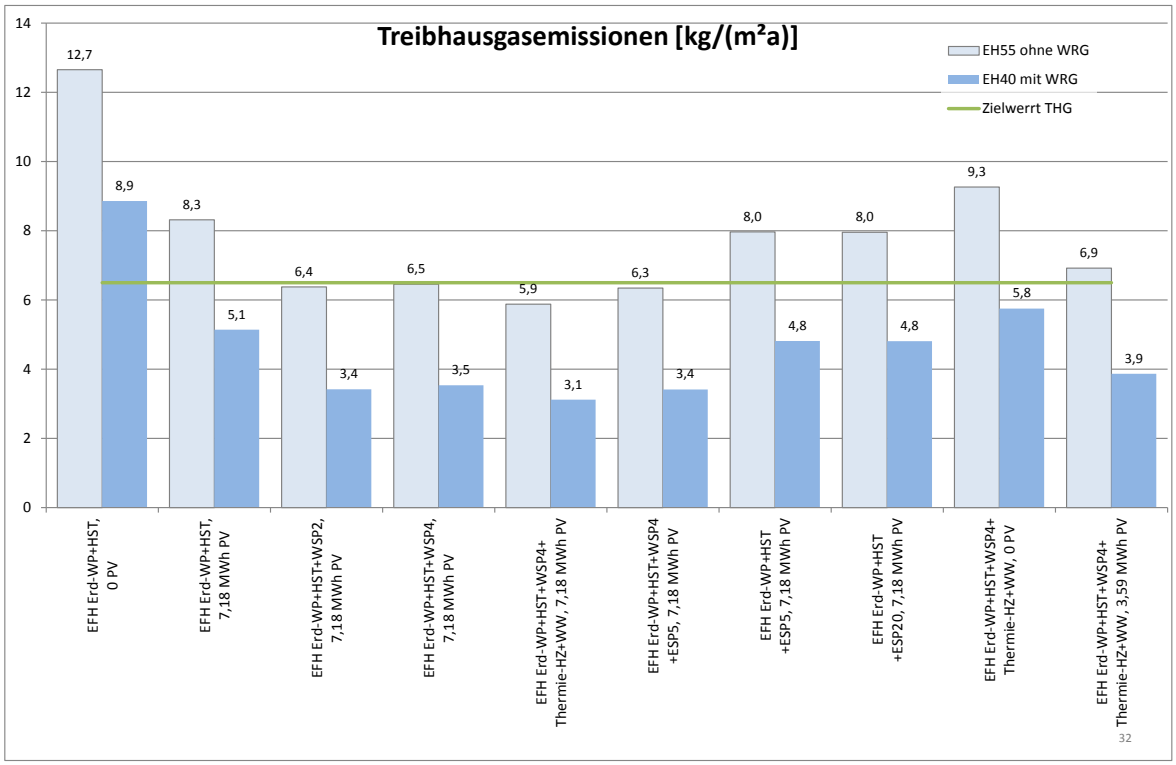


Abbildung 19: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Erdreich-Wärmepumpe sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

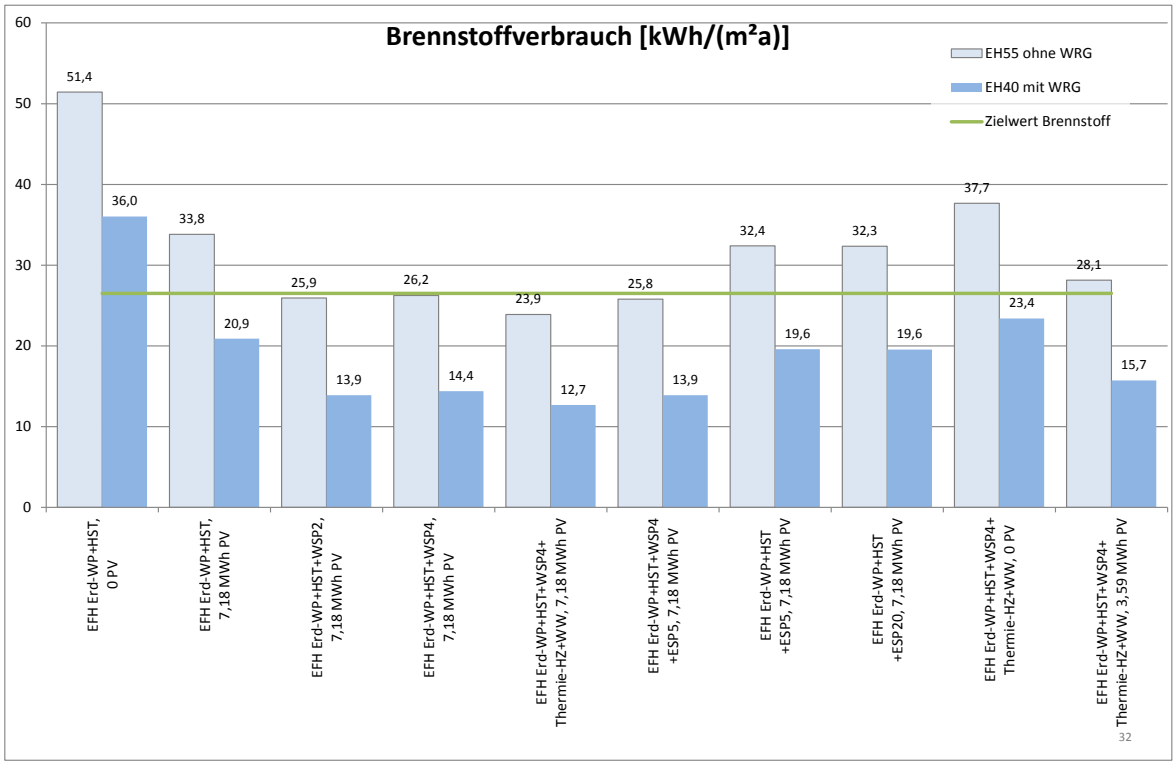


Abbildung 20: Brennstoffverbrauch für ein Einfamilienhaus mit Erdreich-Wärmepumpe sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

4.2.3 Gas-Brennwertkessel

Wird das Gebäude über einem Gas-Brennwertkessel mit Wärme versorgt, so erreicht beim EH55 ohne WRG keine der Varianten die Zielwerte bei Treibhausgasemissionen und Brennstoffverbrauch (Abbildung 21 und Abbildung 22). Beim EH40 mit WRG unterschreiten die Varianten mit der Kombination von PV (1/3 bzw. 2/3 der Dachfläche) und Solarthermie mit Heizungsunterstützung die Zielwerte bei Treibhausgasemissionen und Brennstoffverbrauch. Die Anforderungen an eine Vermeidung eines Brennstoffverbrauchs im Sommer ist in diesen Fällen ebenfalls erfüllt (hier nicht dargestellt). Somit könnten Gebäude selbst mit Gas-Brennwertkessel die Anforderungen an zukunftsfähige Gebäude erfüllen, wenn eine entsprechend aufwändige Anlagentechnik im EH40 eingesetzt wird.

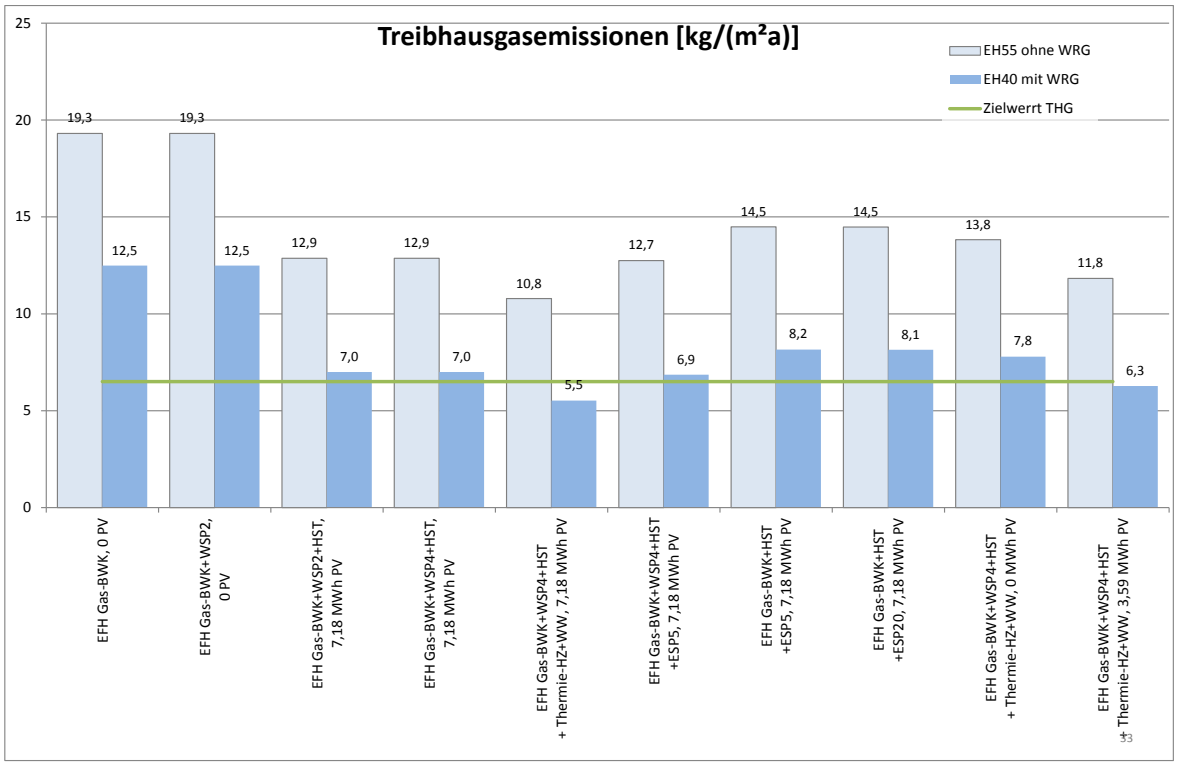


Abbildung 21: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Gas-Brennwertkessel sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

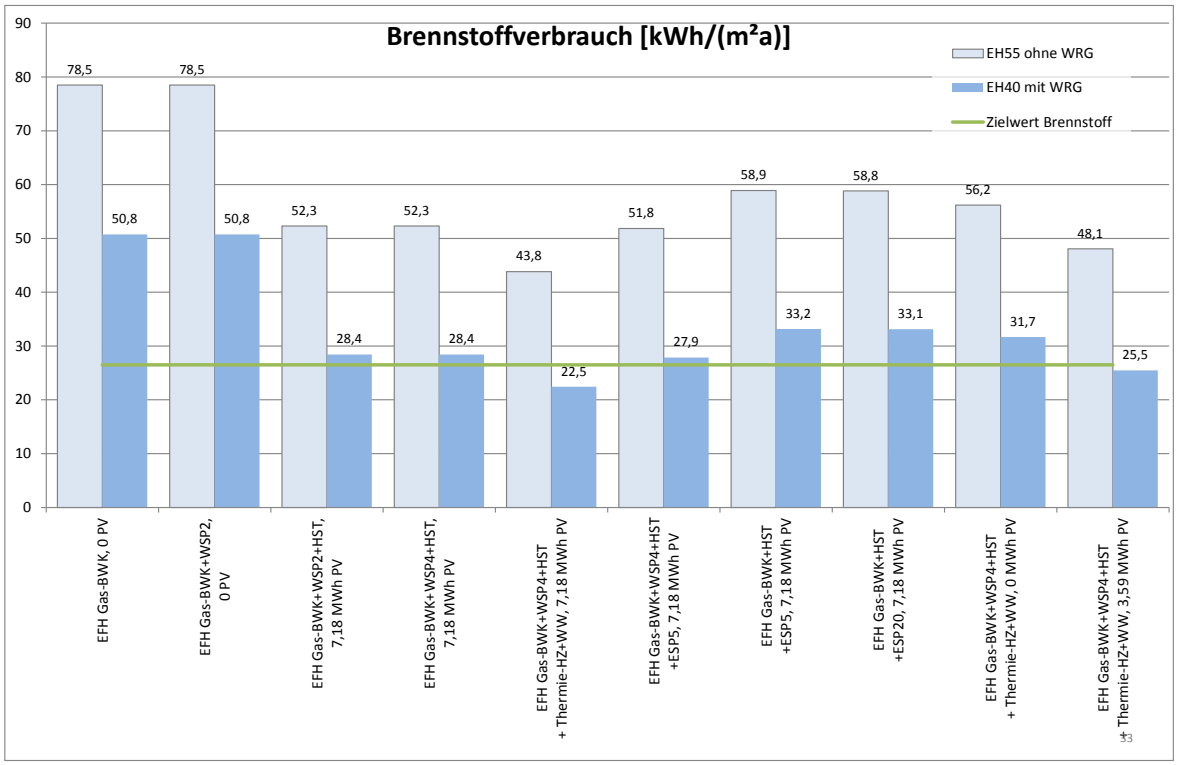


Abbildung 22: Brennstoffverbrauch für ein Einfamilienhaus mit Gas-Brennwertkessel sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

4.2.4 Gas-Brennwertkessel mit Mini-Wärmepumpe

Auch wenn beim EH 55 ohne WRG der Gas-Brennwertkessel durch eine Mini-Wärmepumpe ergänzt wird, wodurch der Endenergiebedarf für die Wärmeerzeugung gesenkt wird, sinken die Treibhausgasemissionen nur um ca. 1 bis 2 kg/(m²a) und liegen noch etwa doppelt so hoch wie der Zielwert (Abbildung 23 im Vergleich mit Abbildung 21). Gleiches gilt für den Brennstoffverbrauch (Abbildung 24 im Vergleich mit Abbildung 22).

Beim EH40 mit WRG liegen alle Varianten mit einem Wärmespeicher und mindesten einer PV-Erzeugung auf zweidrittel der Dachfläche unterhalb der Zielwerte. Die Solarthermie kann einen Teil der PV-Erzeugung kompensieren, so dass auch mit einer PV-Erzeugung auf lediglich einem Drittel der Dachfläche der Zielwert erreicht wird (letzte Säule). Wie auch in den vorherigen Varianten, erreicht ein Gebäude mit einer PV-Anlage und einem elektrischen Energiespeicher aber ohne Wärmespeicher nicht die Zielwerte.

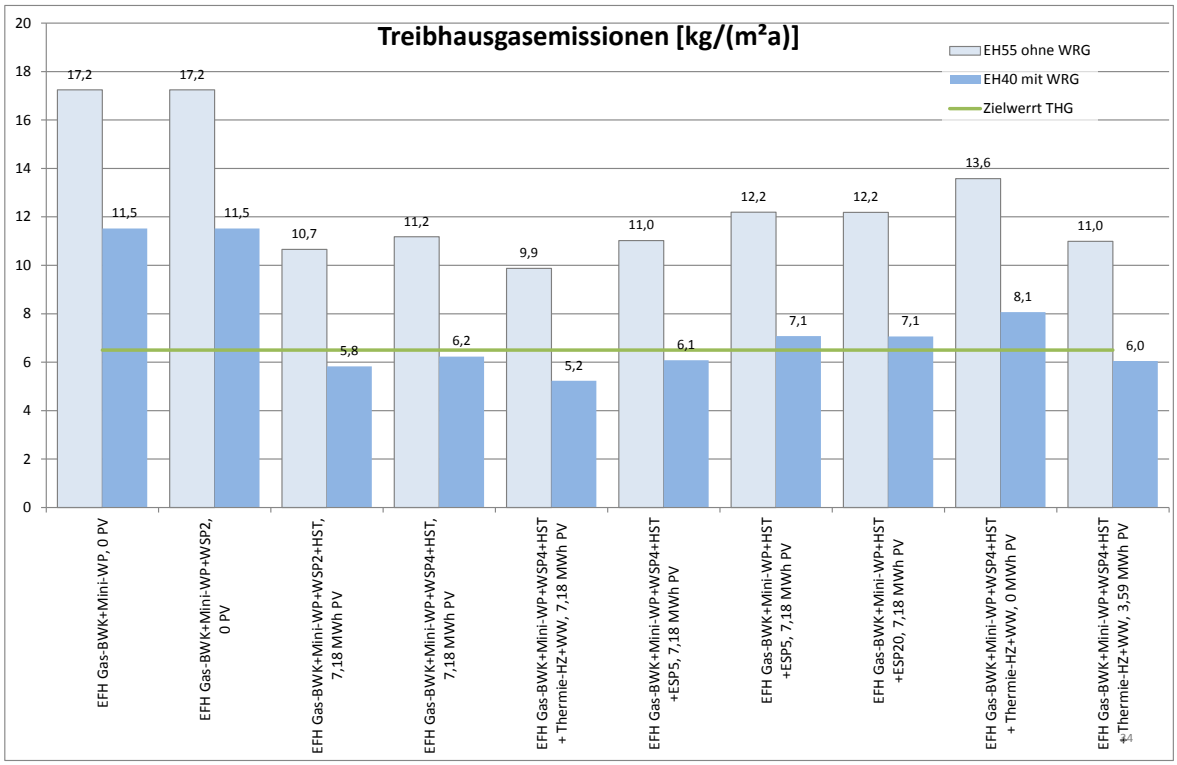


Abbildung 23: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Gas-Brennwertkessel und Mini-Wärmepumpe sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

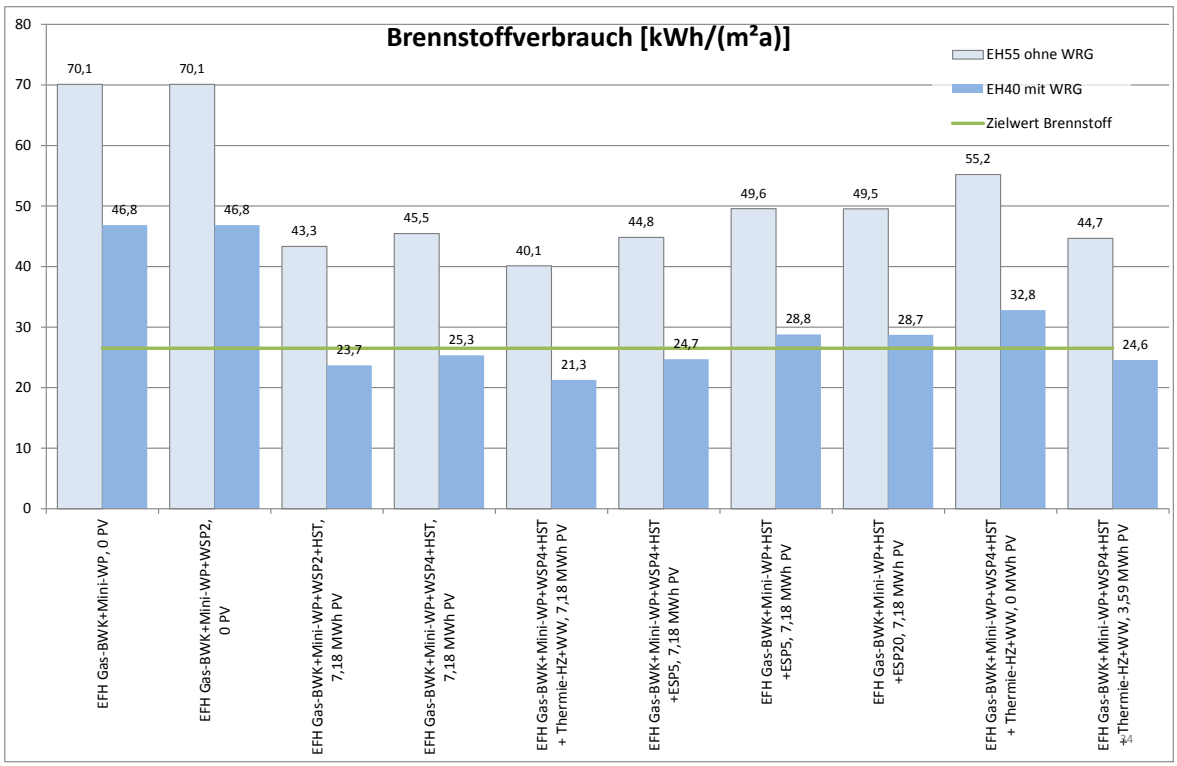


Abbildung 24: Brennstoffverbrauch für ein Einfamilienhaus mit Gas-Brennwertkessel und Mini-Wärmepumpe sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

4.2.5 Pellet-Kessel

Beim Pellet-Kessel unterschreiten beide Gebäudestandards mit allen Varianten für die Anlagentechnik die Treibhaus-Zielwerte – bedingt durch den geringen Emissionsfaktor von Holzpellets (Abbildung 25). Hier ist vor allem der Brennstoffverbrauch für die Bewertung von Bedeutung, da Biomasse nur begrenzt zur Verfügung steht.

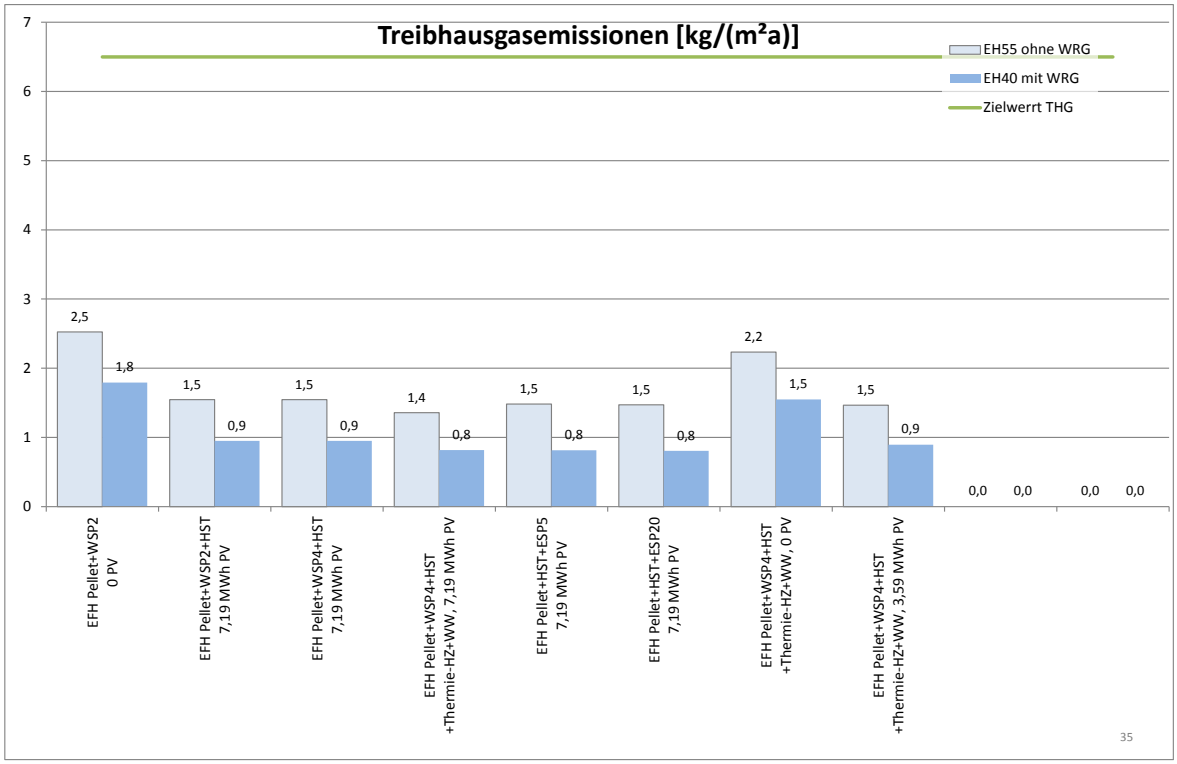


Abbildung 25: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Pellet-Kessel sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

Wird die Gebäudehülle als EH55 ausgeführt, so wird der Zielwert für den Biomasseverbrauch von ca. 10 kWh/(m²a) (ohne Haushaltsstrom) bei allen Ausführungen der Anlagentechnik deutlich überschritten (Abbildung 26). Der Erdgasverbrauch tritt durch Strombezug aus dem Kraftwerk für Hilfsstrom auf.

Beim EH40 mit WRG liegt ebenfalls bei allen untersuchten Anlagenvarianten der Brennstoffverbrauch über dem Zielwert. Die niedrigsten Brennstoffverbräuche werden durch eine Kombination mit einer PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche und zusätzlicher solarthermischer Anlage erreicht. Der Brennstoffverbrauch im Sommer muss beim Einsatz von Pellets ebenfalls beachtet werden. Abbildung 27 zeigt den Biomasseverbrauch im Zeitraum Mai bis September. Die Basisvariante ohne PV verbraucht auch in diesem Zeitraum mit ausreichendem Solarenergieangebot in nennenswertem Umfang Pellets, ebenso die Varianten ohne Wärme- aber mit Elektrospeicher. Ist eine solarthermische Anlage vorhanden, so ist nur ein minimaler Pelletverbrauch vorhanden.

Unterstellt man, dass nur ein Teil der Gebäude Biomasse in Anspruch nimmt, so sind Pelletkessel in Kombination mit Solarthermie und zusätzlicher PV-Erzeugung (kein Sommerverbrauch) in begrenztem Umfang bei Neubauten dennoch umsetzbar, ohne die Zielwerte für den gesamten Gebäudebestand zu überschreiten. Grundsätzlich zeigen die Auswertungen aber, dass es bei Biomasse ein Bewertungsproblem bezüglich der maximalen Potenziale gibt – vergleichbar den Potenzialen für Photovoltaik und Windenergie. Aus diesem Grund wird in Kapitel 5 ein Bewertungsschema vorgestellt, bei dem die unterschiedlichen Potenziale in der Bewertung berücksichtigt werden.

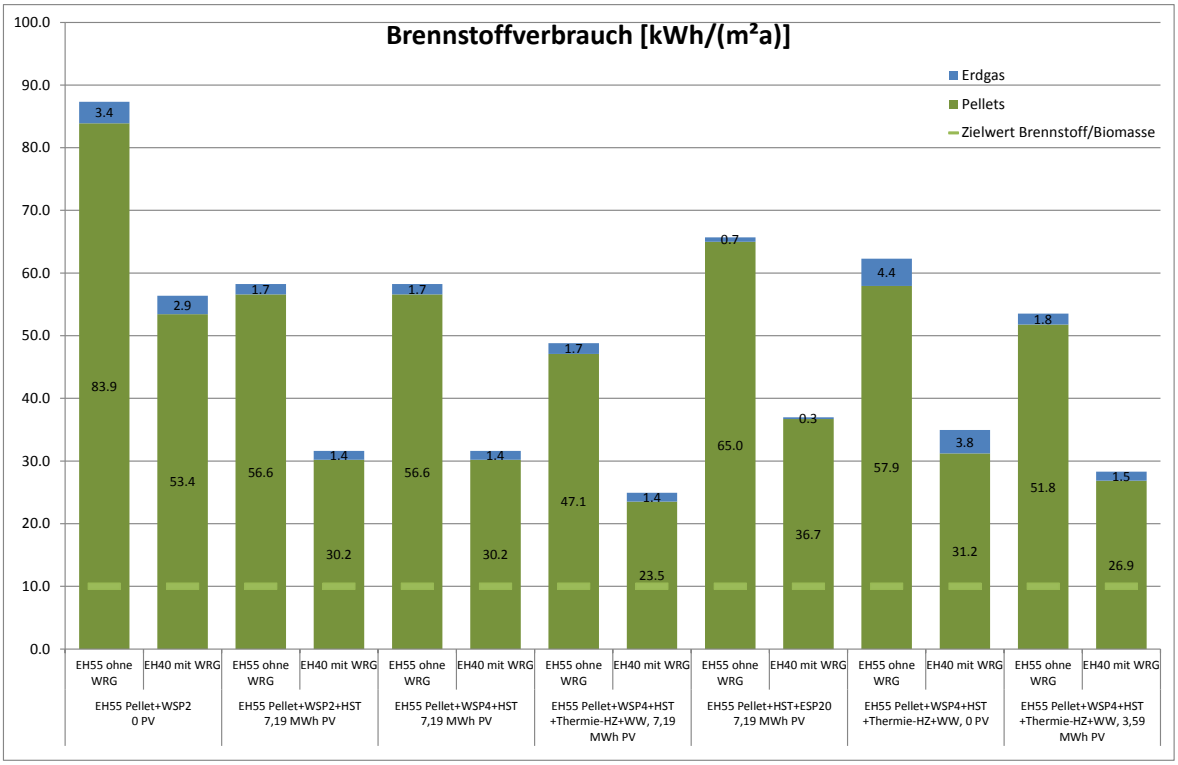


Abbildung 26: Brennstoffverbrauch für ein Einfamilienhaus mit Pellet-Kessel sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

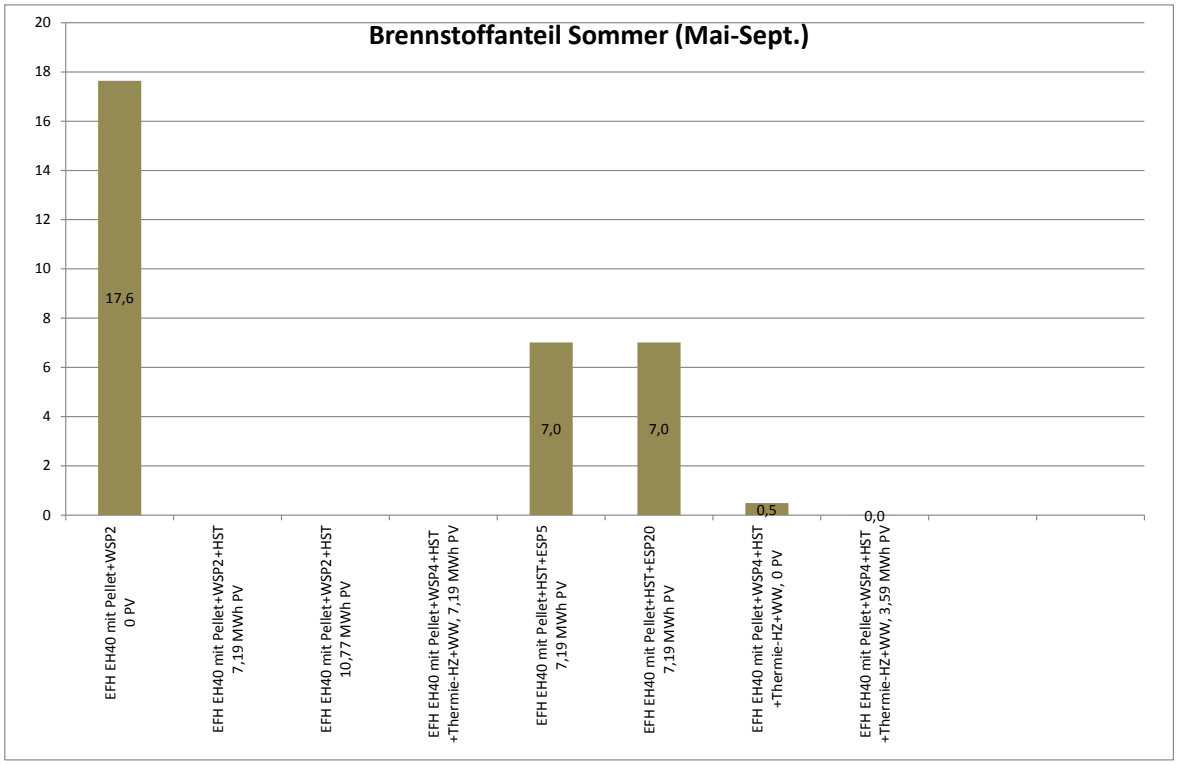


Abbildung 27: Brennstoffverbrauch im Sommer (Mai-September) für ein Einfamilienhaus mit Pellet-Kessel sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

4.2.6 Direktelektrische Wärmeversorgung

Exemplarisch wurde ebenfalls untersucht, wie eine direktelektrische Wärmeversorgung (für Heizung und Warmwasserbereitung) in einem Einfamilienhaus im EH40-Standard mit Wärmerückgewinnung abschneidet, wenn 100 % der Dachfläche für PV verwendet werden. Für die Betrachtung ohne Haushaltsstrom ergeben sich Treibhausgasemissionen von 13,7 kg/(m²a). Würde ein thermischer Speicher eingesetzt, um PV-Überschüsse besser nutzen zu können, so reduzieren sich die Emissionen auf 10,6 kg/(m²a) – liegen aber immer noch deutlich über dem Zielwert von 6,5 kg/(m²a). Ein elektrischer Energiespeicher mit 5 bzw. 10 kWh Kapazität kann aufgrund der geringen Kapazität die Emissionen nur geringfügig gegenüber der Variante „nur Heizstab“ verringern. Der Brennstoffverbrauch (hier nicht dargestellt) liegt mit Direktheizung bei 55,7 kWh/(m²a) und somit deutlich über den Erfordernissen für klimaneutrale Gebäude, durch den Wärmespeicher kann der Brennstoffverbrauch auf 42,9 kWh/(m²a) abgesenkt werden, ein Elektrospeicher reduziert den Brennstoffverbrauch auf 54,4 kWh/(m²a). Somit weisen direktelektrische Systeme nicht die erforderliche Effizienz für einen Einsatz als (Haupt-)Wärmeerzeuger in klimaneutralen Gebäuden auf.

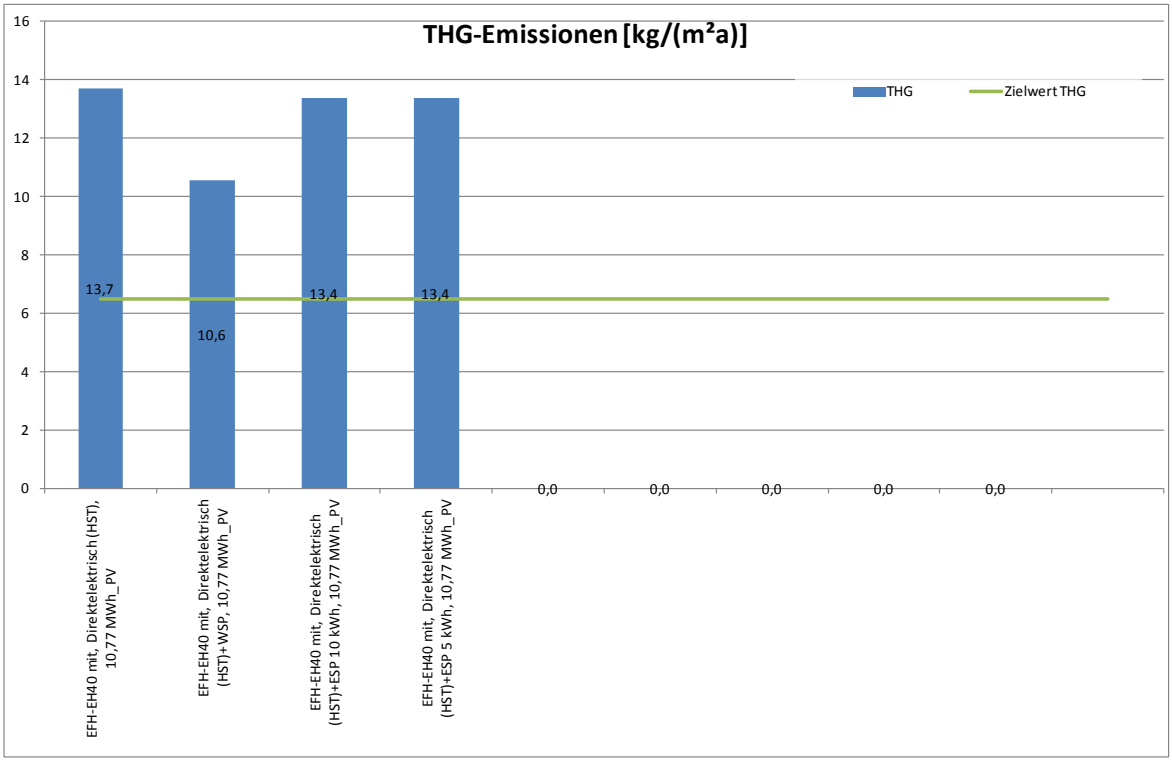


Abbildung 28: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Elektrodirektheizung sowie unterschiedlicher Anlagentechnik als EH40 mit WRG

4.2.7 Bivalente Systeme mit Luft-Wasser-Wärmepumpe

Wird eine Wärmepumpe bivalent betrieben und entweder ein Pellet-Kessel bzw. -ofen oder ein Gas-Brennwert-Kessel als Spitzenlastwärmeerzeuger eingesetzt, so können die maximalen Lasten im Stromnetz für den Betrieb der Wärmepumpe reduziert werden.

Kommt in einem EH55 ohne WRG eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Wärmespeicher, einem Pellet-Ofen (oder –kessel) als Spitzenlastwärmerzeuger und eine PV-Anlage (2/3 bzw. 100 % der Dachfläche gerechnet) zum Einsatz, so werden zwar die Treibhausgasziele mit der geeigneten Speicherbeladung (kein Vorrang für die Wärmepumpe, WSP2) eingehalten (Abbildung 29), der Brennstoffverbrauch liegt jedoch deutlich über den Zielwerten (Abbildung 30). Wird eine Vorrangladung des Speichers eingesetzt (WSP4), so kann zwar der

Biomasseverbrauch auf ca. 10 kWh/(m²a) begrenzt werden, zusätzlich fällt Erdgasverbrauch im Kraftwerk an. Auch hier stellt sich wieder die Bewertungsproblematik, für die in Kapitel 5 ein Vorschlag dokumentiert ist.

Wie hoch der Pelleteinsatz im Gebäude ausfällt, hängt im Modell auch vom Bewertungsfaktor für die Einsatzreihenfolge der Energieträger ab. Im Anhang A.5 sind die Auswirkungen einer Variation des Bewertungsfaktors dokumentiert.

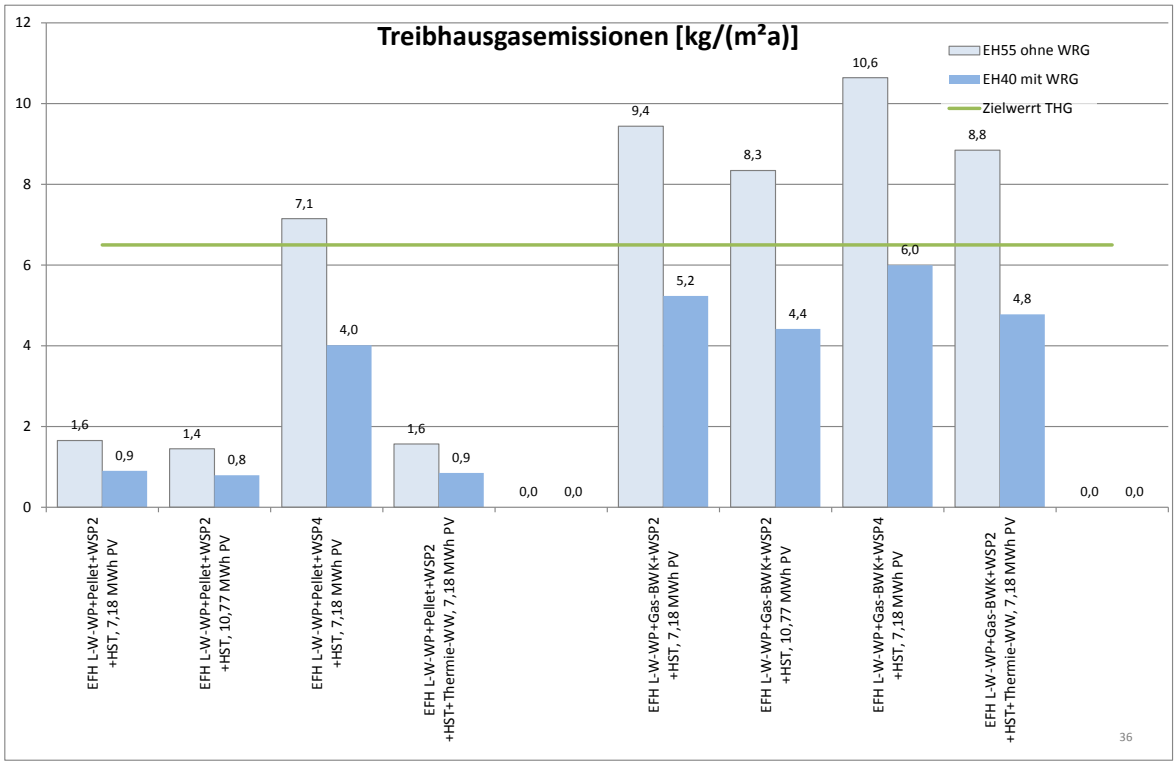


Abbildung 29: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Pellet-Kessel als bivalentes System Ausführung als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

Im EH40 mit WRG werden bei allen untersuchten Varianten die THG-Ziele unterschritten, beim Brennstoffverbrauch kommt nur beim Einsatz einer zusätzlichen solarthermischen Anlage der Brennstoffverbrauch in den Zielbereich. Gleichzeitig fällt auf, dass die Frage, ob es im Wärmespeicher einen Vorrang für die Wärmepumpe gibt oder nicht, zu deutlichen Verschiebungen beim Brennstoffverbrauch führt. WSP4 mit 50 % reservierter Kapazität für die Wärmepumpe erzeugt 60 % der Wärme mit der Wärmepumpe, während bei WSP2, der als Pufferspeicher keinen Vorrang für eines der Heizsysteme besitzt, 93 % der Wärme aus dem Pellet-Kessel stammen. Dies erklärt sich durch die Wahl der Bewertungsgröße für den Einsatz der Energieträger (siehe Anhang A.5). Ist ein Gas-Brennwertkessel als Spitzenlastwärmeerzeuger vorhanden, so werden in allen Varianten die Brennstoffziele eingehalten.

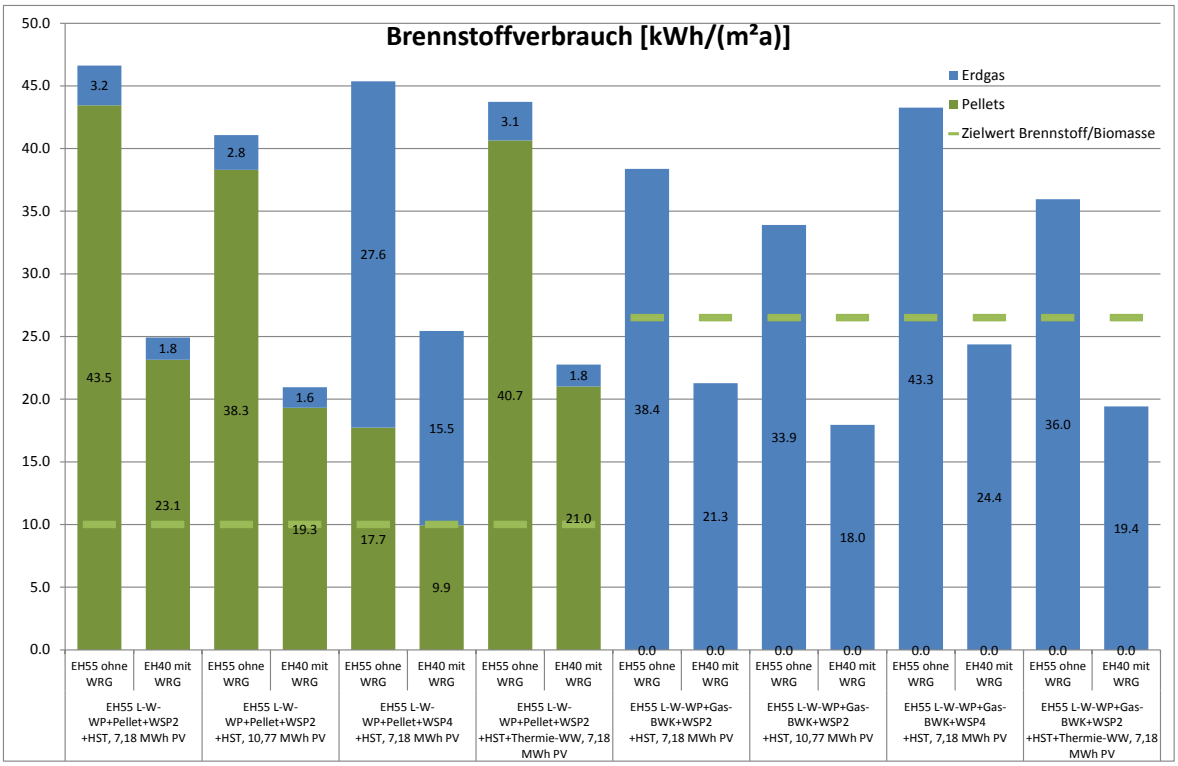


Abbildung 30: Brennstoffverbrauch für ein Einfamilienhaus mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Pellet-Kessel als bivalentes System Ausführung als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

Wird die Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einem Spitzenlastwärmeerzeuger gekoppelt (Pellet/Gas), so reduziert sich die maximalen Kraftwerksleistungen für bezogenen Anlagen- und Hilfsstrom von 33,3 bzw. 36,3 W/m² mit der monovalenten Variante (hier nicht dargestellt) auf 4,2 und 10,3 W/m², wenn ein Pelletkessel als Spitzenlast-Wärmeerzeuger vorhanden ist (Abbildung 31). Mit Erdgas-Spitzenlastkessel sinkt die maximale elektrische Kraftwerkslast nur auf ca. 10 W/m², da durch die Einsatzoptimierung und die flexibleren Einsatzmöglichkeiten der Spitzenlastkessel nicht so häufig genutzt wird. Grundsätzlich zeigt sich aber, dass durch einen Spitzenlastwärmeerzeuger die maximale Kraftwerkslast auf ein Drittel oder noch stärker reduziert werden kann.

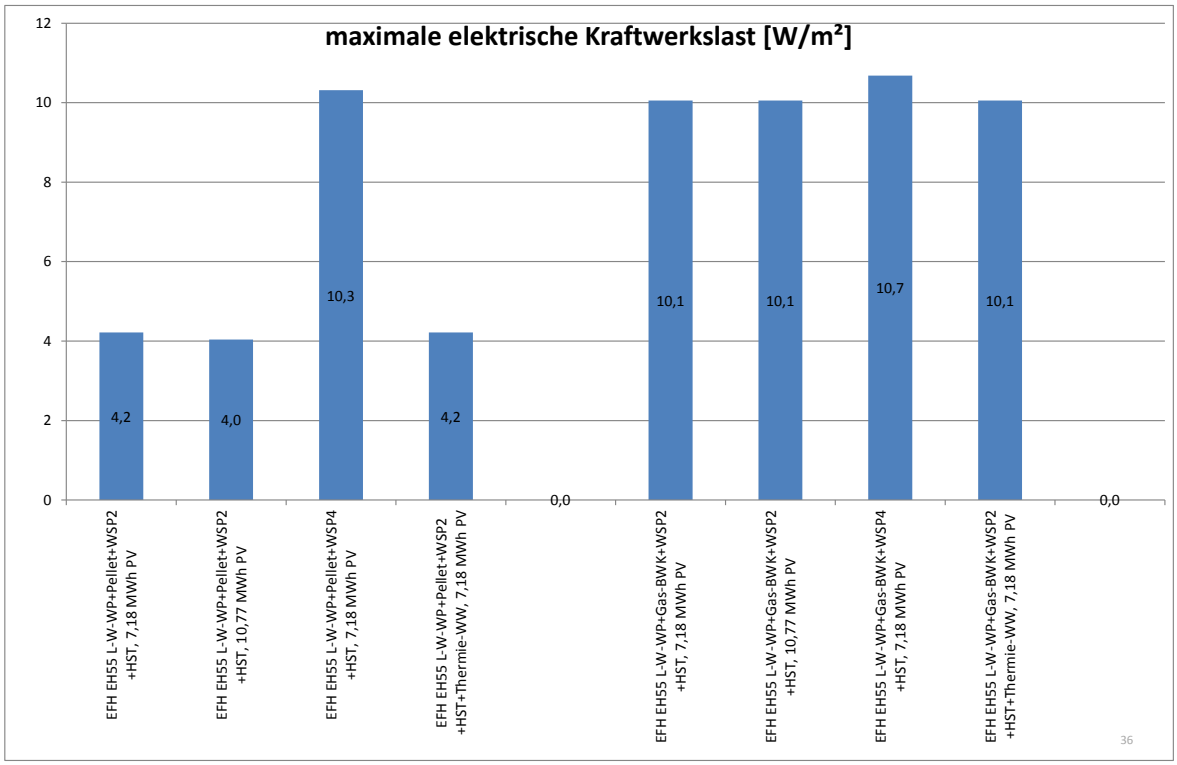


Abbildung 31: Maximale elektrische Kraftwerksleistung für ein Einfamilienhaus mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Pellet-Kessel als bivalentes System Ausführung als EH55 ohne WRG

Die maximale Kraftwerksleistung kann beim EH40 mit WRG von 26,3 W/m² im Mittel über alle Varianten auf ca. 2,5 W/m² mit Pelletkessel und 7,5 W/m² mit Gas-Spitzenlastkessel reduziert werden.

4.2.8 Bivalente Systeme mit Erdreich-Wärmepumpe

Wird im bivalenten Wärmeerzeugungssystem eine Erdreich-Wärmepumpe mit ihrer höheren Jahresarbeitszahl eingesetzt, so erreichen im EH55 ohne WRG alle Varianten mit Pelletkessel und 2/3 bzw. 100 % Dachflächennutzung für PV die Treibhausgas-Emissionsziele (Abbildung 32 links). Bei der Variante mit Vorrang für die Wärmepumpe (WSP4) – d. h. es steht nur ein Teil der Kapazität für die Speicherung von Überschüssen zur Verfügung – liegen die Emissionen höher als ohne Vorrang, da weniger Biomasse eingesetzt wird. Durch die solarthermische Anlage kann hier nur ein geringer Emissionsbetrag eingespart werden.

Die Kombination von Erdreich-Wärmepumpe und Gas-Brennwertkessel (Abbildung 32 rechts) erreicht annähernd die Zielwerte, wenn 100 % der Dachfläche für PV genutzt wird; mit weniger PV-Strom finden mehr oder weniger große Überschreitungen statt. Beim Brennstoffverbrauch (Abbildung 33) liegen alle Varianten mit Pellets als zweitem Wärmeerzeuger über den Zielwerten, zumal hier noch in nennenswertem Umfang Erdgas zusätzlich benötigt wird. Wird Erdgas im Spitzenlastwärmeerzeuger eingesetzt, so erreicht die Variante mit 100 % Dachflächennutzung sowohl bei den Treibhausgasen als auch bei Brennstoffverbrauch nahezu die Zielwerte, die hier nur in den Nachkommastellen überschritten werden. Die übrigen Varianten verfehlen die Ziele bei beiden Parametern.

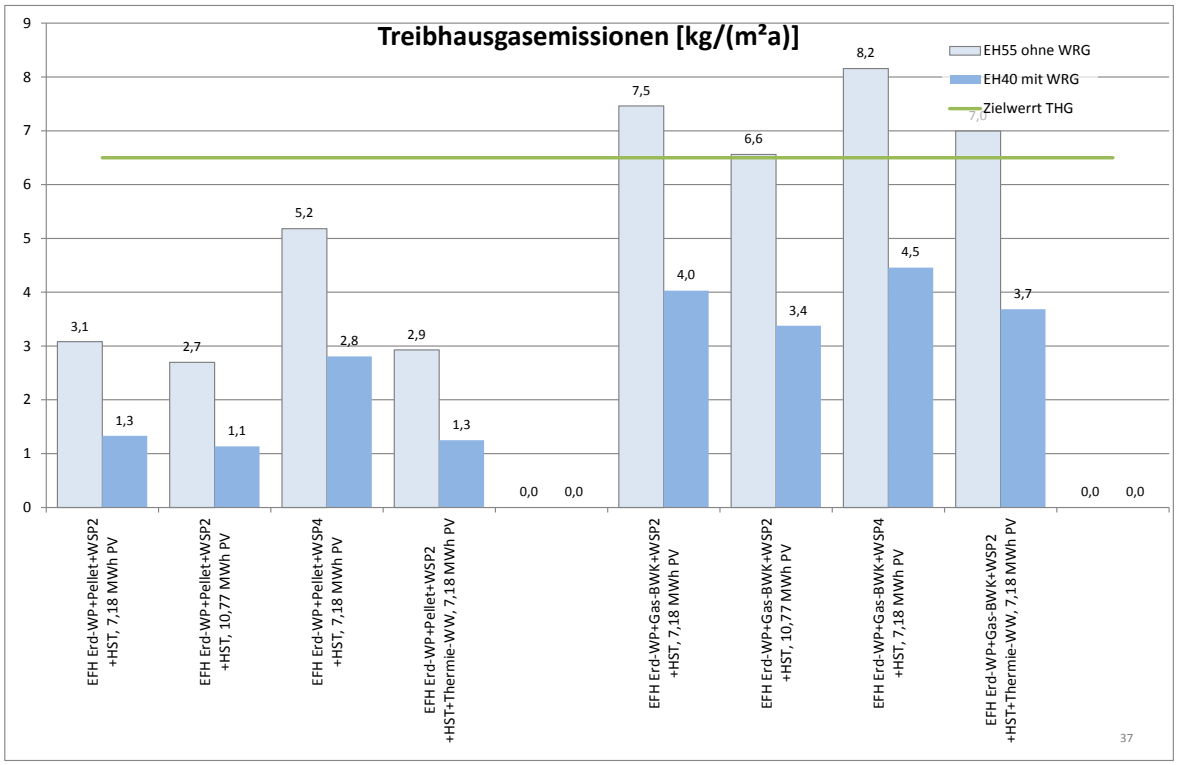


Abbildung 32: Treibhausgasemissionen eines Einfamilienhauses mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Pellet-Kessel als bivalentes System Ausführung als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

Im EH40 mit WRG unterschreiten alle Varianten mit Pellet als Spitzenlastwärmeerzeuger die Treibhausemissionsziele deutlich, beim Biomasse-/Brennstoffverbrauch wird der Zielwert bei Biomasse außer bei einem Speicher mit reservierter Kapazität für die Wärmepumpe (dritte Variante von links) deutlich überschritten, der Gesamtbrennstoffverbrauch liegt aber immer unter dem Zielwert. Mit Erdgas-Brennwertkessel als Spitzenlastwärmeerzeuger werden die Zielwerte sowohl bei den Treibhausgasemissionen als auch beim Brennstoffverbrauch eingehalten.

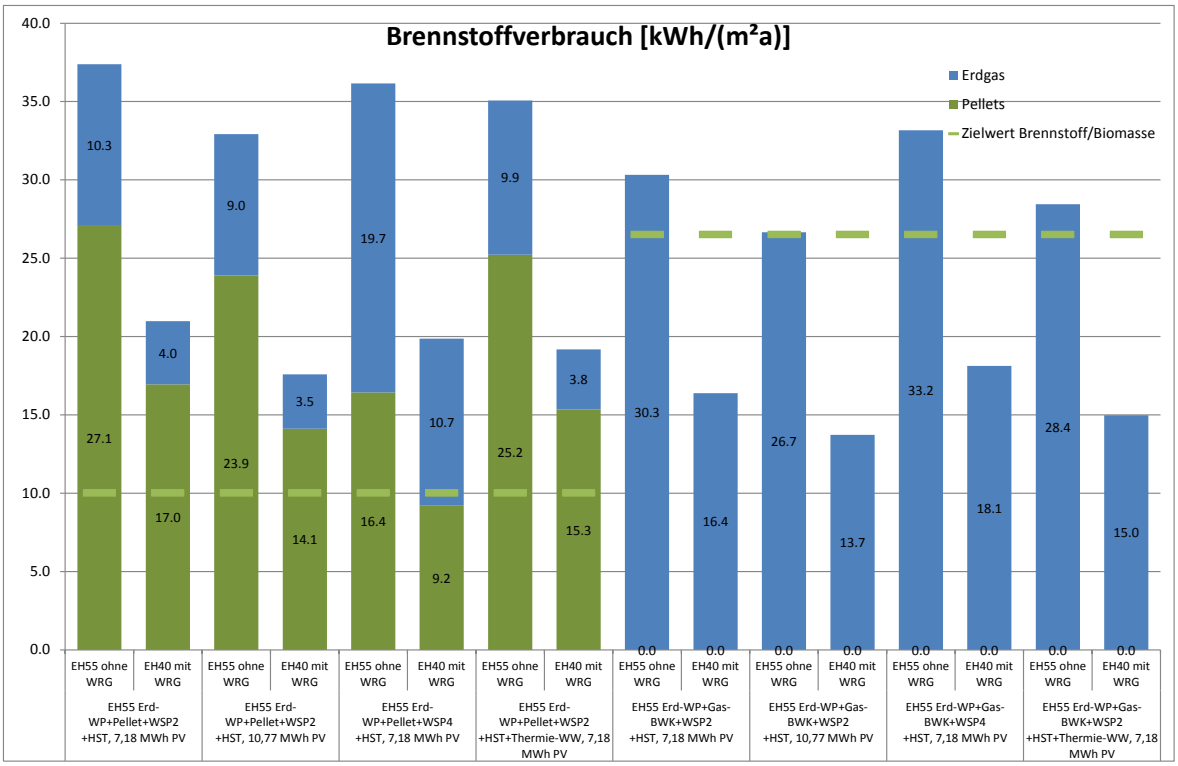


Abbildung 33: Brennstoffverbrauch für ein Einfamilienhaus mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und Pellet-Kessel als bivalentes System Ausführung als EH55 ohne WRG sowie als EH40 mit WRG

Die maximale elektrische Last im Kraftwerk für Anlagen- und Hilfsstrom sinkt beim EH55 ohne WRG von 20,4 W/m² auf 6,9 W/m² mit Pellets bzw. 7,9 W/m² mit Gas-Spitzenlastkessel. Beim EH40 mit WRG sinkt sie von ca. 26,3 W/m² auf 3,5 W/m² mit Pellets und 6,6 W/m² mit Gas-Spitzenlastkessel. Durch den geringeren absoluten elektrischen Verbrauch mit Erdreich-Wärmepumpe verringern sich somit auch die Einsparungen bei der Kraftwerksleistung – eine Reduktion auf etwa ein Drittel beim EH55 ohne WRG und auf unter ein Viertel beim EH40 mit WRG sind durch den Bilvalenzbetrieb möglich.

4.2.9 Fazit

Die Auswertungen in diesem Kapitel zeigen, dass das Treibhausgasziel für zukunftsfähige Gebäude sehr anspruchsvoll ist und konsequenter Energiekonzepte bei Gebäudehülle und bei der Anlagentechnik erfordert. Dennoch kann es mit sehr unterschiedlichen Ansätzen erreicht werden. Die folgende Abbildung 34 zeigt Varianten, die sowohl das THG- als auch das Brennstoff- bzw. Biomasseziel einhalten. Dabei wurde für jeden energetischen Standard immer die Variante mit dem geringsten Aufwand bei der Anlagentechnik dargestellt.

Mit einer Gebäudehülle im EH55-Standard ohne Wärmerückgewinnung unterschreitet nur die Wärmeversorgung mit Erdreich-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher und einer PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche die THG-Zielwert. Wird beim EH 55 zur Reduktion der elektrischen Spitzenlast ein Erdgas-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger hinzugefügt, so liegen bei einer Maximierung der PV-Fläche die THG-Emissionen nur geringfügig über dem Zielwert, so dass die Anforderung als noch erfüllt angesehen werden kann, wenn man die klimatischen und regionale Schwankungsbreite berücksichtigt (siehe unten). Wird das Gebäude mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet, so kann der Zielwert erreicht werden.

Die Anzahl an Varianten, die den Zielwert einhält, steigt an, wenn die Gebäudehülle als EH40 mit Wärmerückgewinnung ausgeführt wird. Dann kann sowohl mit Luft-Wasser- als auch mit Erdreichwärmepumpe der THG-Zielwert deutlich unterschritten werden. Dies gilt auch für das EH40 mit Erdgas-Brennwertkessel,

wenn er mit einer großen solarthermischen Anlage zur Heizungsunterstützung kombiniert wird. Weiterhin erreicht das Gebäude mit einem Pelletkessel und einer großen solarthermischen Anlage (kein Brennstoffverbrauch im Sommer) sowie bei den bivalenten Systemen aus Wärmepumpe und Kessel (Erdgas, Biomasse) den Zielwert.

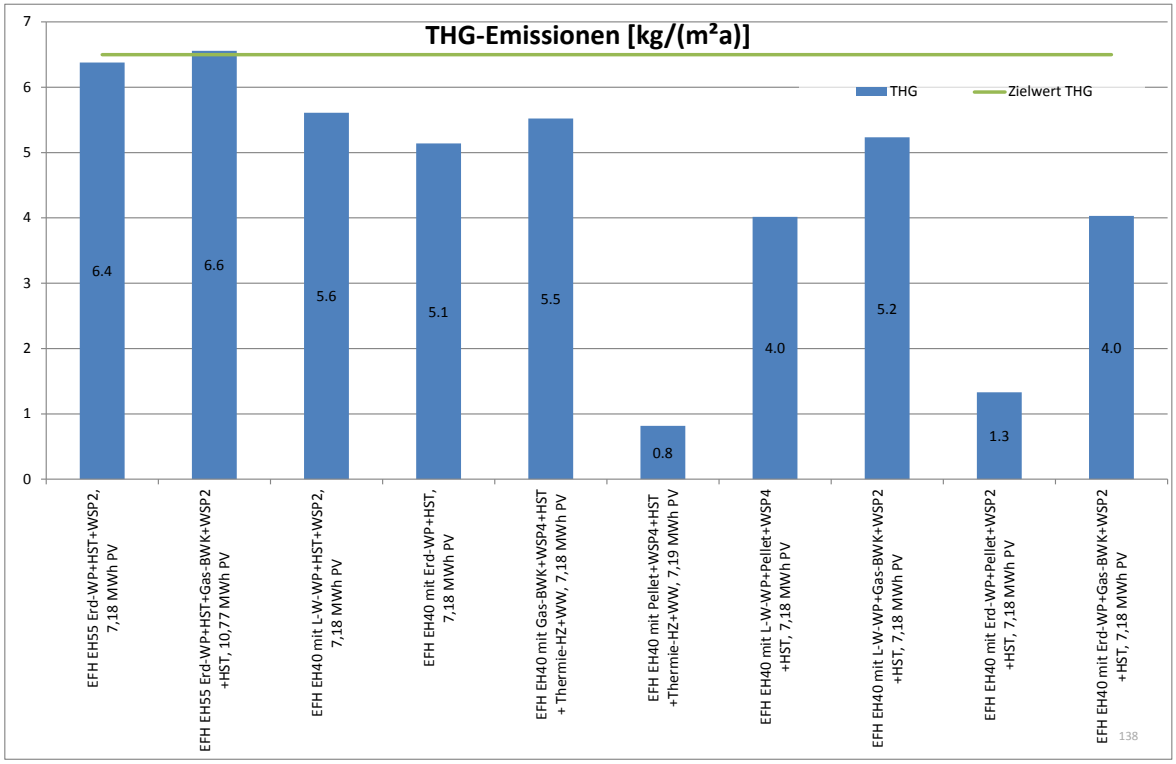


Abbildung 34: Zusammenstellung von Gebäudekonzepten und Anlagentechnik, die die Zielwerte für Treibhausgasemissionen und Brennstoffverbrauch einhalten

Die dargestellten Kombinationen erfüllen auch im Fall von Erdgas die Anforderungen an den Brennstoffverbrauch, allerdings überschreiten die Varianten mit Pelletkessel das Gebäude-bezogene Biomassebudget um bis zum 1,5-fachen. Unterberücksichtigung des in Kapitel 5 vorgestellten bewerteten Erdgasverbrauchs, bei dem auch die Budgetgrenzen bei Biomasse und Windenergie berücksichtigt werden, erfüllt auch der Pelletkessel mit einer thermischen Solaranlage zur Heizungsunterstützung die Ziele für zukunftsfähige Gebäude.

Alle dargestellten Varianten erfüllen auch die Anforderungen des bewerteten Brennstoffverbrauchs an Nullemissions-Häuser (siehe Kapitel 5) der höchsten Stufe 3, so dass die Ergebnisse auch bei mit diesem modifizierten Bewertungsverfahren als stabil zu bezeichnen sind.

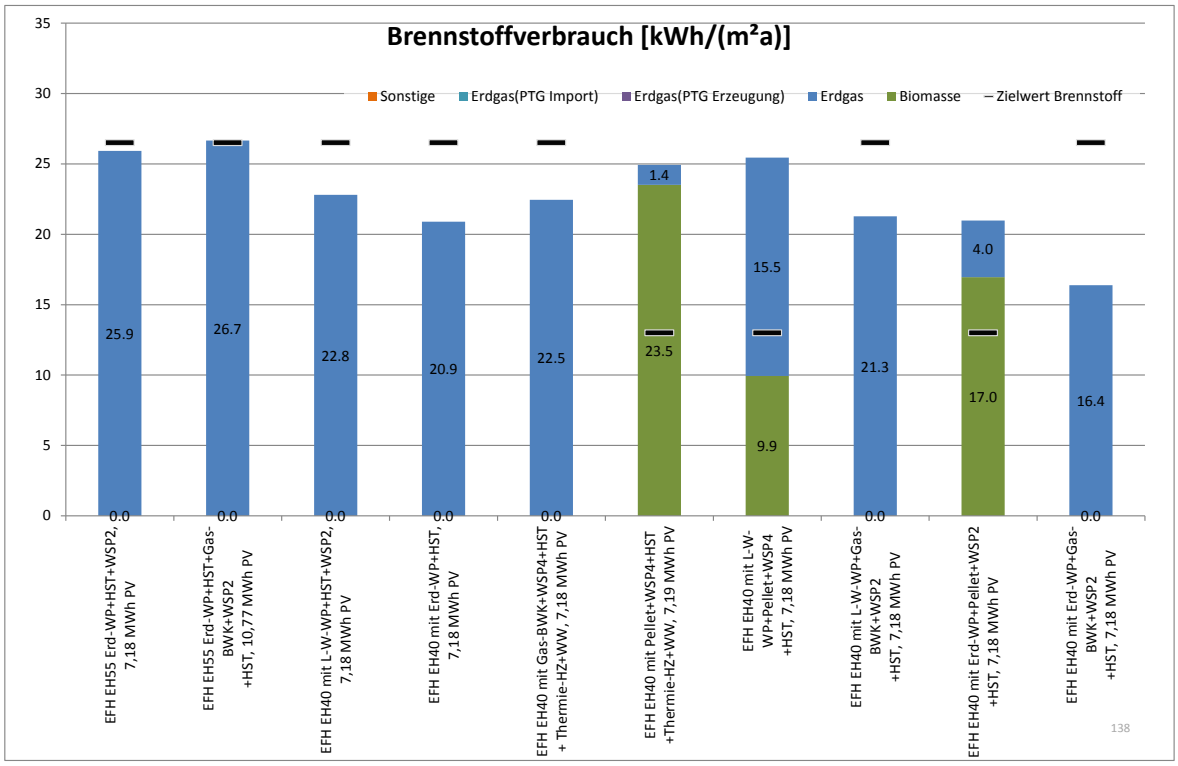


Abbildung 35: Brennstoffverbrauch der Gebäude, die die Zielwerte für Treibhausgasemissionen einhalten

Grundsätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse in diesem Kapitel mit dem Klima des Jahres 2012 und verteilt über fünf Standorte in Deutschland gemittelt berechnet wurden. Besonders dann, wenn die Zielwerte nur knapp erreicht wurden, können sich in ungünstigen Jahren oder an kühleren Standorten deutlich höhere Emissionen ergeben (siehe auch Anhang A.4). Aus Sicht des Klimaschutzes sollte aus diesem Grund eine Planung in Richtung einer deutlichen Unterschreitung des Zielwertes bei den THG-Emissionen angestrebt werden.

4.3 Ergebnisse für unterschiedliche Gebäudetypen

Im vorherigen Kapitel wurde die Anlagentechnik am Beispiel des Einfamilienhauses variiert und analysiert. Verschiedene Gebäudetypen erreichen jedoch unterschiedliche Kennwerte für Treibhausgasemissionen und Brennstoffverbrauch, je nach Wärmebedarf und Fläche, die für PV-Anlagen zur Verfügung steht. Die folgende Abbildung 36 zeigt nochmals zusammenfassend für das Einfamilienhaus als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG die Wärmeerzeugung. Für jeden Standard der Gebäudehülle ist die Summe der Wärmeerzeugung gleich, die Anteile der verschiedenen Wärmeerzeuger unterscheiden sich aber je nach Anlagentechnik deutlich. Der Anteil, der über Heizstäbe aus PV-Strom an Wärme erzeugt wird, liegt bei ca. 14 kWh/(m²a) bei einer Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger und bei ca. 26 kWh/(m²a) mit einem brennstoffbetriebenen Wärmeerzeuger (Erdgas oder Holz-Pellets). Die verbleibende Restenergiemenge, die über den Hauptwärmeerzeuger bereitgestellt wird, reduziert sich deutlich bei einer Verbesserung des Wärmeschutzes. Somit sorgt die im Modell implementierte Regelung dafür, dass bei ineffizienterer Heiztechnik mehr Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird, um die Treibhausgasemissionen zu minimieren.

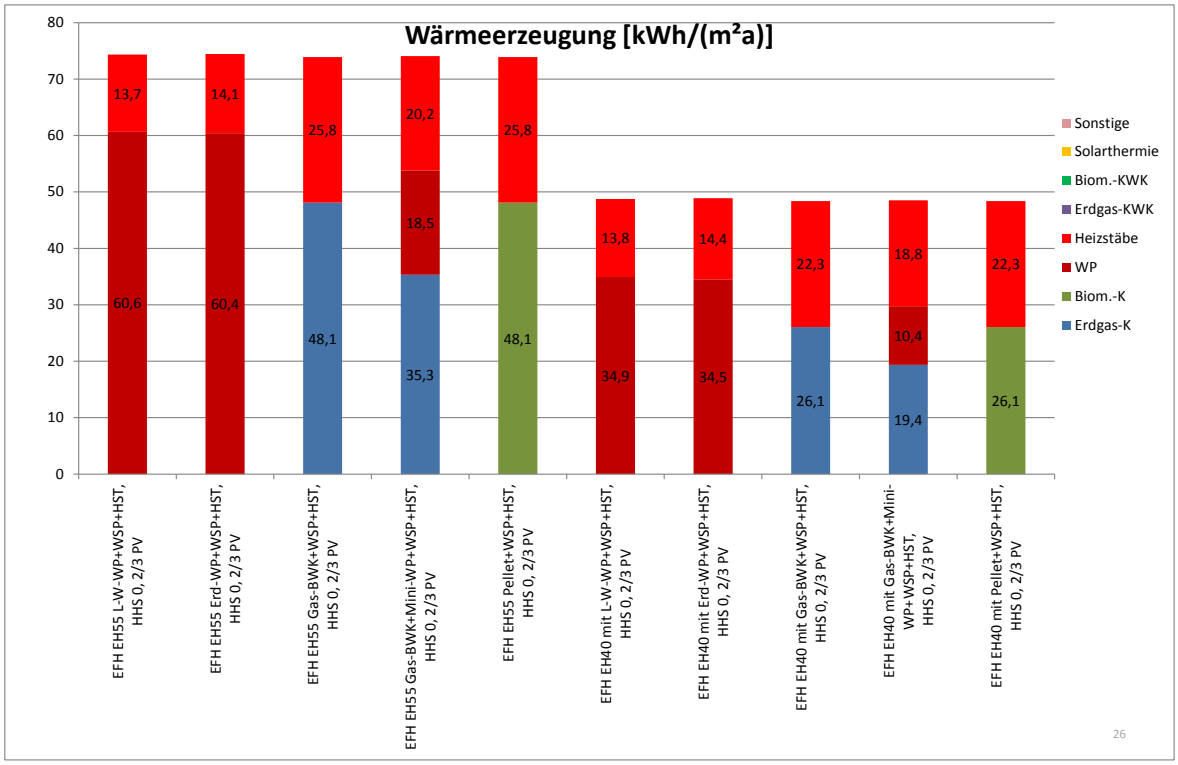


Abbildung 36: Wärmeerzeugung für ein EFH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG bei unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnik

Dennoch kann die PV-Stromerzeugung am Gebäude nicht vollständig genutzt werden. Der Anteil der PV-Überschüsse, die ins Netz eingespeist werden, steigt mit Verbesserung des Wärmeschutzes aber nur geringfügig an (siehe Abbildung 37), bei dem Gebäude mit dem besseren energetischen Standard (EH40 mit WRG) ein größerer Anteil des Gesamtverbrauchs gedeckt werden kann und es muss weniger Strom in fossilen Kraftwerken erzeugt werden.

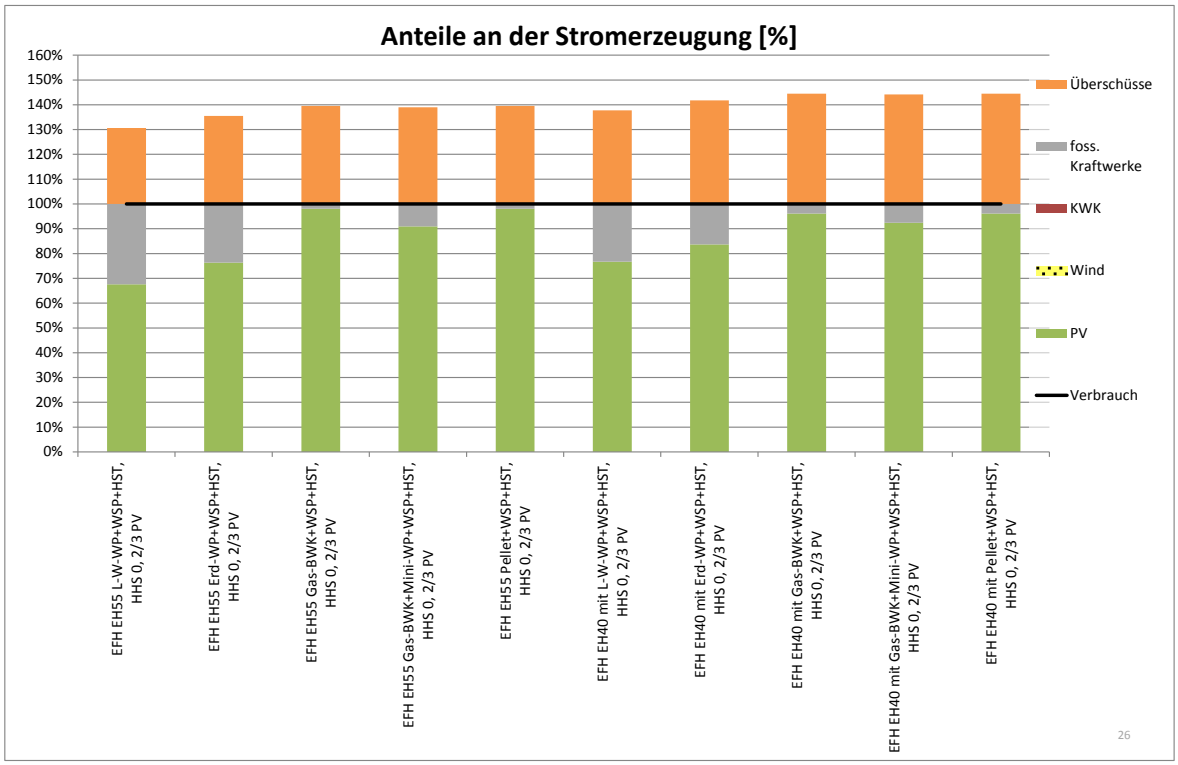


Abbildung 37: Deckung des Strombedarfs eines EFH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG und verbleibende Überschüsse der PV-Stromerzeugung

Im Folgenden sind für die vier Modellgebäude jeweils fünf Basisversorgungssysteme für eine Ausführung als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG dargestellt, Haushaltsstrom ist dabei nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse für das Einfamilienhaus zeigt Abbildung 38 (jeweils linke Säule), wobei eine PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche unterstellt wurde. Mit Luft-Wasser-Wärmepumpe erreicht das Gebäude als EH55 ohne WRG (linke Seite) nicht die THG-Ziele, mit Erdreich-Wärmepumpe werden diese jedoch knapp unterschritten. Beim Einsatz eines Erdgas-Brennwertkessels liegen die THG-Emissionen doppelt so hoch wie der Zielwert, mit ergänzender Mini-Wärmepumpe immer noch deutlich über dem Zielwert von 6,5 kg/(m²a). Der Pelletkessel führt bereits beim EH55 ohne WRG zu sehr niedrigen THG-Emissionen.

Beim EH40 mit WRG (rechte Seite) unterschreiten beide Wärmepumpenvarianten die Zielwerte für THG-Emissionen, genauso wie die Variante mit Pelletkessel. Mit Gas-Brennwertkessel wird der Zielwert zwar überschritten, mit Mini-Wärmepumpe jedoch nur knapp.

Betrachtet man parallel den Brennstoffverbrauch (Abbildung 39), so werden die Zielwerte auch hier in den gleichen Fällen wie bei den THG-Emissionen eingehalten oder auch nicht, außer bei der Wärmeversorgung mit Holz-Pellets, die die Potenzialgrenzen bei Biomasse in beiden energetischen Standards deutlich überschreiten.

Für das Reihenhaus ergeben sich in Abbildung 38 (jeweils rechte Säule) etwas niedrigere THG-Emissionen als für das Einfamilienhaus, die grundsätzlichen Aussagen zu den einzelnen Versorgungsvarianten verändern sich aber nicht. Das gilt auch für den Brennstoffverbrauch in Abbildung 39. Nur der Gas-Brennwertkessel mit Miniwärmepumpe unterschreitet im RH als EH40 mit WRG die Zielwerte für THG-Emissionen und Brennstoff.

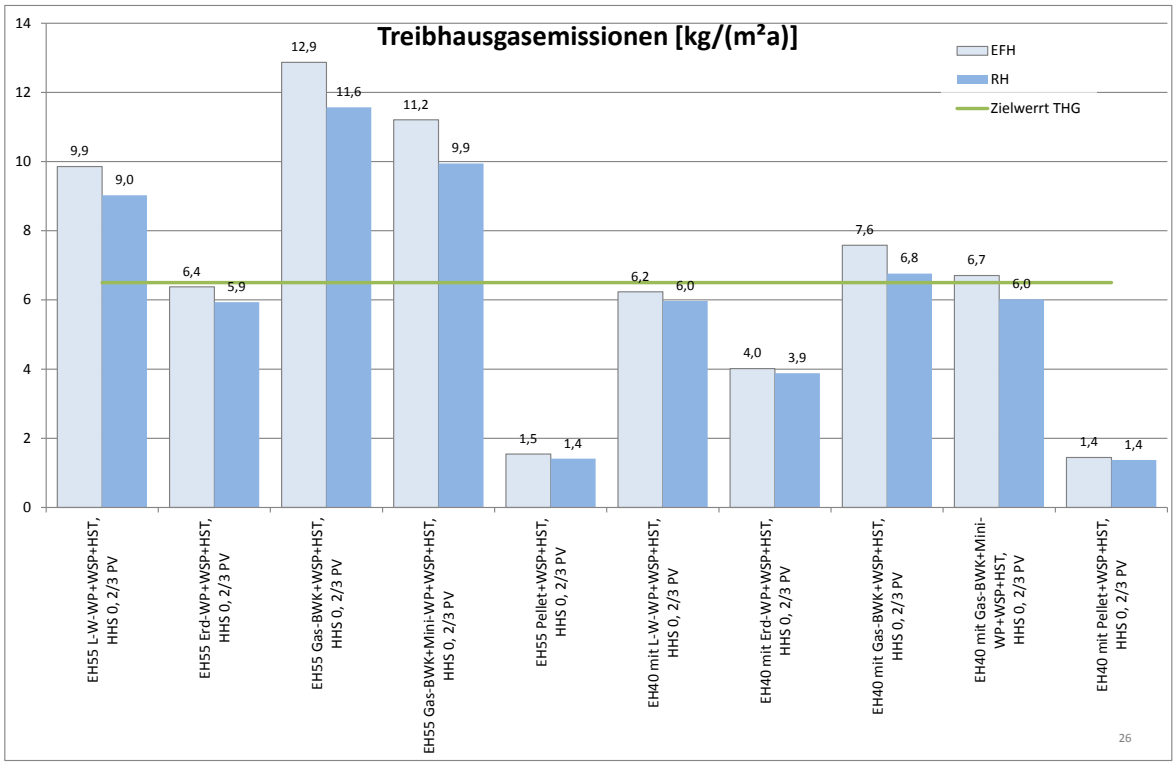


Abbildung 38: THG-Emissionen eines EFH und eines RH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG bei unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnik

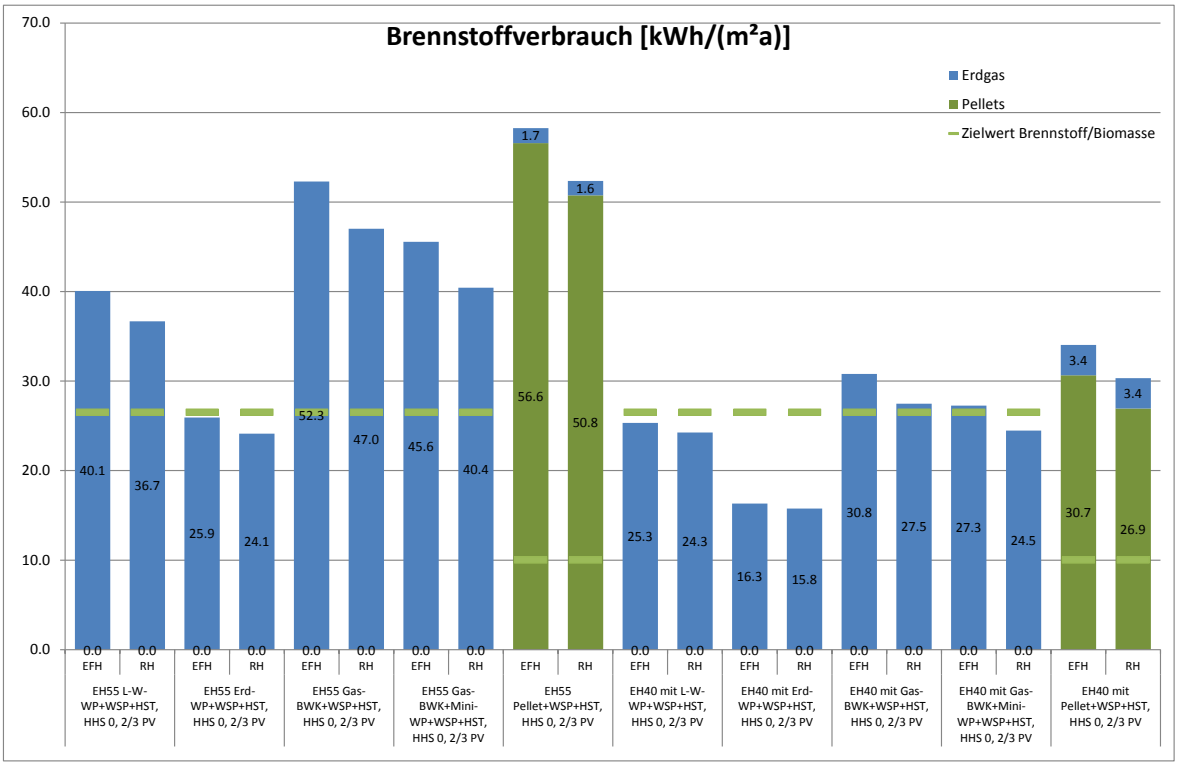


Abbildung 39: Brennstoffverbrauch eines EFH und eines RH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG bei unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnik

Beim Mehrfamilienhaus MFH-NB (linke Säulen) werden bei einer Ausführung als EH55 ohne WRG und einer Wärmeversorgung mit Luft-Wasser-Wärmepumpe die THG-Ziele nicht eingehalten (Abbildung 40, linke Seite), gleiches gilt für das sanierte MFH-San (rechte Säulen). Mit Erdreich-Wärmepumpe überschreitet das MFH-NB den Zielwert nur geringfügig, das MFH-San unterschreitet ihn. Mit dem Einsatz eines Gas-Brennwertkessels können die Zielwerte bei beiden Mehrfamilienhäusern und auch mit Unterstützung eine Miniwärmepumpe nicht eingehalten werden. Mit Holz-Pellet erzielen auch die Mehrfamilienhäuser extrem niedrige THG-Emissionen. Berücksichtigt man gleichzeitig den Brennstoffverbrauch (Abbildung 41), so erkennt man, dass hier sowohl der Erdgas-Zielwert als auch das Biomassebudget deutlich überschritten werden.

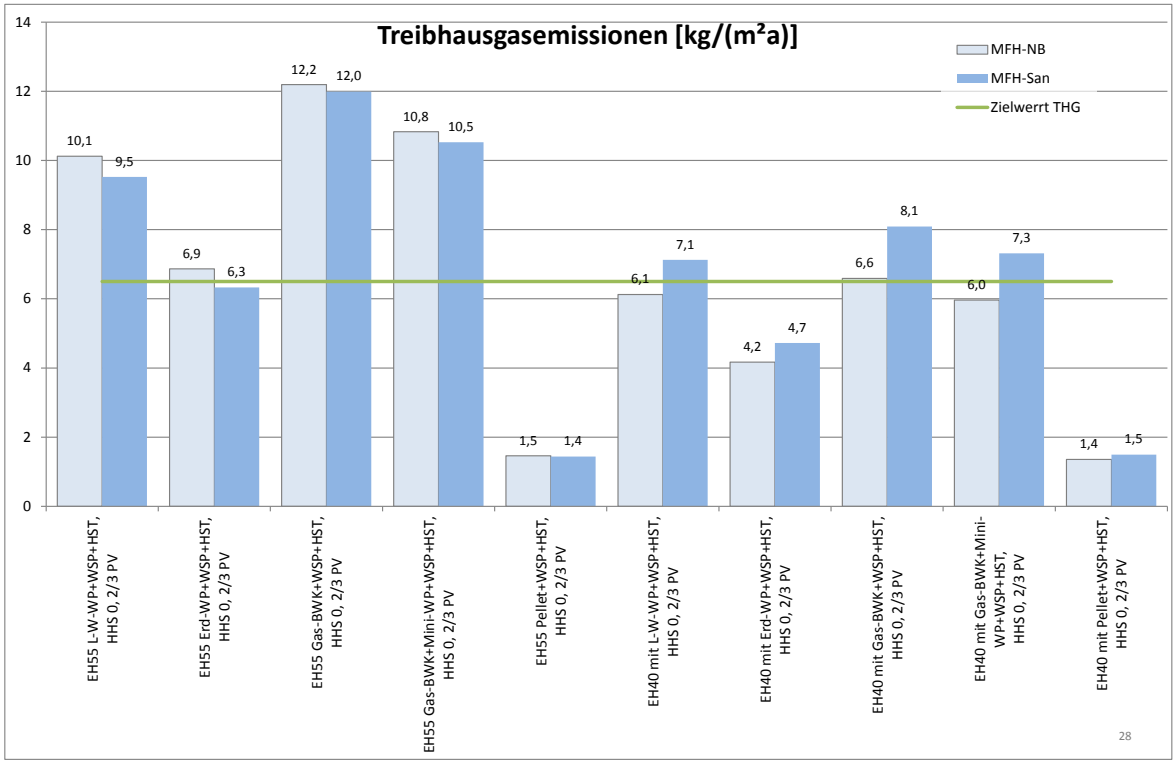


Abbildung 40: THG-Emissionen des MFH-NB und des MFH-San als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG bei unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnik

Wird das Mehrfamilienhaus als EH40 mit WRG ausgeführt (rechte Seite in Abbildung 40), so erreicht das MFH-NB mit allen dargestellten Anlagentechnikvarianten den THG-Zielwert nahezu oder unterschreitet ihn teilweise sogar deutlich. Für das modernisierte Mehrfamilienhaus MFH-San wurde beim EH40 ein höherer Anteil an Wärmebrücken unterstellt, deswegen besitzt es trotz mehr PV-Ertrag (29,9 kWh/(m²a) im Vergleich zu 21,6 kWh/(m²a) beim Neubau) etwas höhere THG-Emissionen und benötigt eine Erdreich-Wärmepumpe oder einen Pellet-Kessel, um die THG-Ziele zu unterschreiten. Allerdings werden mit Pelletkessel auch die Zielwerte für Biomasse überschritten (Abbildung 41).

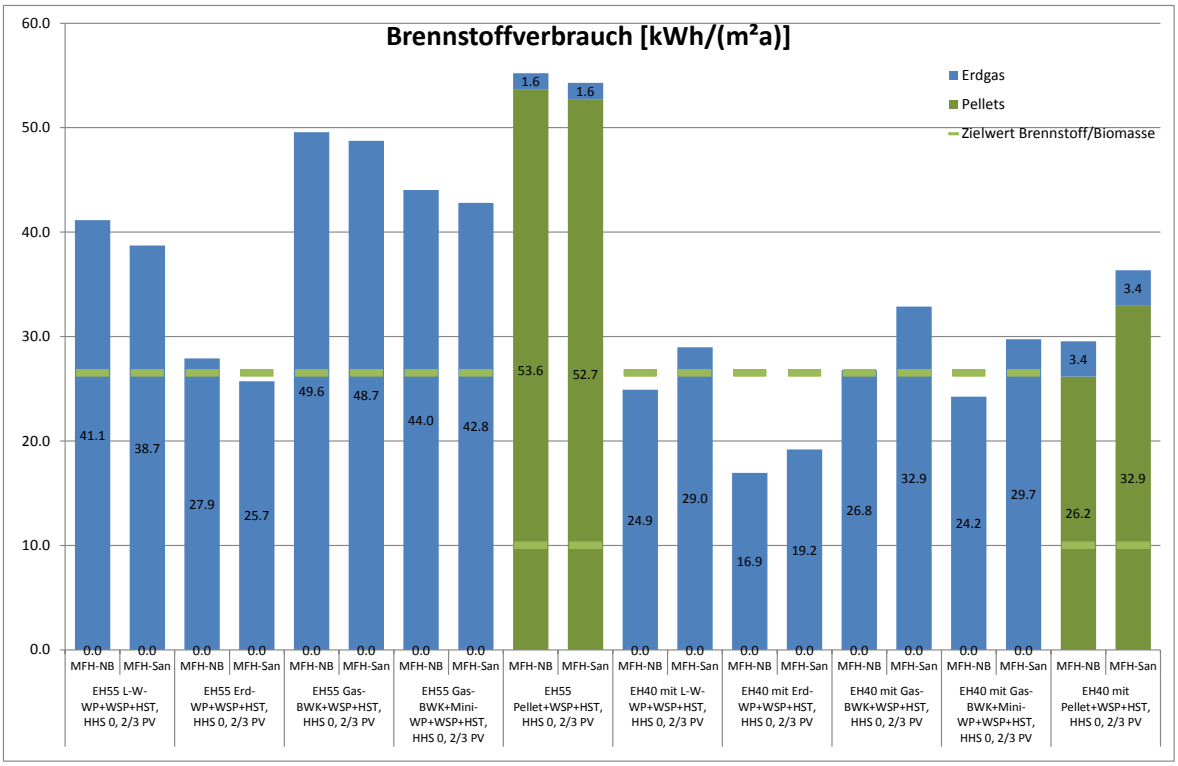


Abbildung 41: Brennstoffverbrauch des MFH-NB und des MFH-San als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG bei unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnik

Einfamilien- und Reihenhaus können die Zielwerte bei den gleichen Kombinationen von Gebäudewärmeschutz und Anlagentechnik erreichen. Im Mehrfamilienhaus konnten mit ähnlichen Kombinationen die Zielwerte eingehalten werden, wobei hier Grenzen mit zunehmender Gebäudegröße zu berücksichtigen sind (hier nicht weiter untersucht), da über die Dachflächen die erforderliche Energieerzeugung nicht mehr realisiert werden kann (siehe auch [Großklos, Schaede 2016]). Für sehr große Gebäude muss die Empfehlung ausgesprochen werden, dass zukunftsfähige Neubauten einen Wärmeschutz im Bereich der Zielwerte für die Gebäudehülle erhalten und eine sehr effiziente Anlagentechnik erhalten. Außerdem kann hier in begrenztem Umfang auch eine stromgeführte Kraft-Wärmekopplung zur Deckung des Wärmebedarfs als bivalenter Wärmeerzeuger von Interesse sein.

4.4 Detailuntersuchungen zum Einfluss einzelner Techniken

Im folgenden Kapitel soll der Einfluss von Wärmespeichern, Zirkulations- und Verteilverlusten, Hilfsenergie sowie solarthermischer Anlagen und ihrer Dimensionierung auf die Bilanzergebnisse dargestellt werden.

4.4.1 Einfluss von Größe und Nutzung des Wärmespeichers

Für ein Einfamilienhaus mit dem Gebäudestandard EH55 ohne WRG, mit Erdreich-Wärmepumpe und ohne Berücksichtigung von Haushaltsstrom zeigt Abbildung 42 den Einfluss des Wärmespeichers auf die Ergebnisse für die Treibhausgasemissionen. Von links nach rechts sind zuerst drei Speicher mit den Kapazitäten 15, 30 und 45 kWh ohne Vorrang für die Wärmeversorgung mit der Wärmepumpe (WSP2) dargestellt (für den Zusammenhang von Speicherkapazität und -volumen siehe Anhang A.7). Die Treibhausgasemissionen sinken mit ansteigender Speicherkapazität leicht ab (max. 0,4 kg/(m²a)). Danach sind Wärmespeicher mit 15, 30 und 45 kWh Kapazität dargestellt, bei denen 50 % des Volumens für die Wärmepumpe reserviert sind (WSP4), d.h. es steht weniger Volumen für die Nutzung von Erzeugungsspitzen zur Verfügung. Bei der Vergrößerung der Kapazität von 15 auf 30 kWh sinken die THG-Emissionen leicht ab, danach steigen sie aufgrund der Speicherverluste wieder an. Die Auswirkung des reservierten Anteils im Speicher ist dann mit 25 %, 50 % und 75 % für einen 60 kWh-Speicher dargestellt. Durch eine Verringerung des reservierten Anteils sinken die Emissionen, da mehr Kapazität flexibel genutzt werden kann, mit 75 % reservierter Kapazität liegen die Emissionen mit 8,7 kg/(m²a) noch über denen ohne Wärmespeicher (8,3 kg/(m²a)). Verdoppelt man die Wärmeverluste (180 W statt 90 W) eines Wärmespeichers mit 60 kWh Kapazität bei 50 % reserviertem Volumen, so erhöhen sich die Emissionen in diesem Beispiel von 7,2 auf 7,4 kg/(m²a).

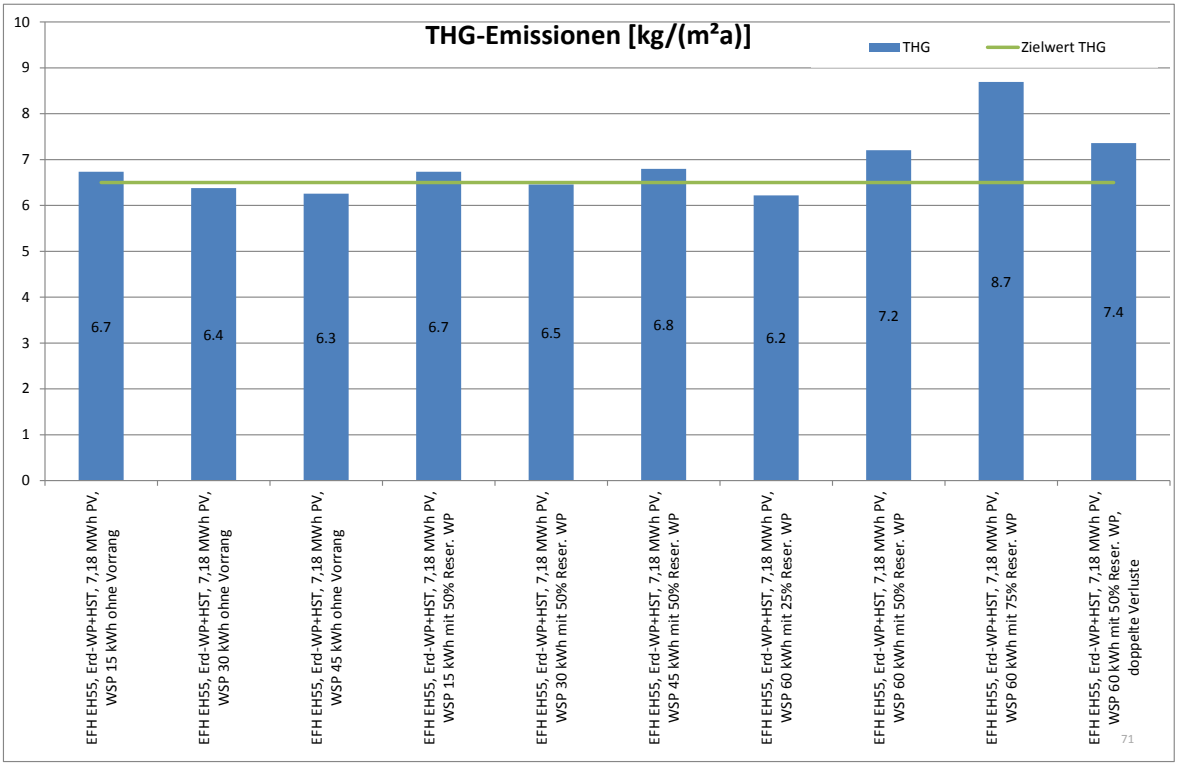


Abbildung 42: Treibhausgasemissionen eines EFH als EH55 mit Erdreich-Wärmepumpe sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche und unterschiedlichen Größen des Wärmespeichers

Die Auswertungen zeigen, dass für das EFH im Standard EH55 ohne WRG die optimale Speichergröße im Bereich von 30 bis 45 kWh liegt und nur ein kleiner Anteil der Kapazität für den Hauptwärmeerzeuger reserviert werden sollte, damit erneuerbarer Strom möglichst flexibel genutzt werden kann.

4.4.2 Einfluss der Zirkulations- und Verteilverluste

Bei den bisherigen Berechnungen war ein Anteil an Zirkulationsbetrieb, vor allem im Mehrfamilienhaus angesetzt. Wie sich der Brennstoffverbrauch ändert, wenn die Zirkulation durchgängig in Betrieb ist oder keine Zirkulation vorhanden ist (minimaler und maximaler Einfluss), wurde mit einer separaten Berechnung untersucht. Der Verteilverlust für Warmwasser q_{vW} wurde nach folgender Formel berechnet:

$$(1) \quad q_{vW} = C1_W + C2_W \, x \, q_W$$

mit:

q_{vW}:	Verteilverlust für die Warmwasserbereitung
$C1_W$:	Offset der Verteilverluste Warmwasser [kWh/(m²a)]: 2,0 für EFH und 2,5 für MFH
$C2_W$:	Verbrauchsabhängiger Anteil der Verteilverluste Warmwasser: 20 % für EFH und MFH
q_W:	Wärmebedarf für Warmwasser

In Abbildung 43 ist für ein Mehrfamilienhaus im EnEV-, EH55 ohne WRG-, EH55 mit WRG und im EH40 mit WRG-Standard mit einem Gas-Brennwertkessel, Wärmespeicher und einer PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche zu sehen. Zwischen einem Gebäude ohne Zirkulation und einem ganztägigen Zirkulationsbetrieb liegt für alle Gebäudestandards die Differenz beim Brennstoffverbrauch bei ca. 0,25 kWh/(m²a). Da der Offset mit 2 kWh/(m²a) gewählt wurde, konnte ein Großteil der Zirkulationsverluste mit Hilfe der PV-Stromerzeugung gedeckt werden. Die Auswirkungen der Warmwasserzirkulation sind somit bei dem untersuchten Beispielgebäude nicht gravierend, aufgrund der weitgehenden Emissionsminderungsziele aber nicht ganz zu vernachlässigen, zumal die Verteilverluste bei ungünstiger Ausführung deutlich höher ausfallen können.

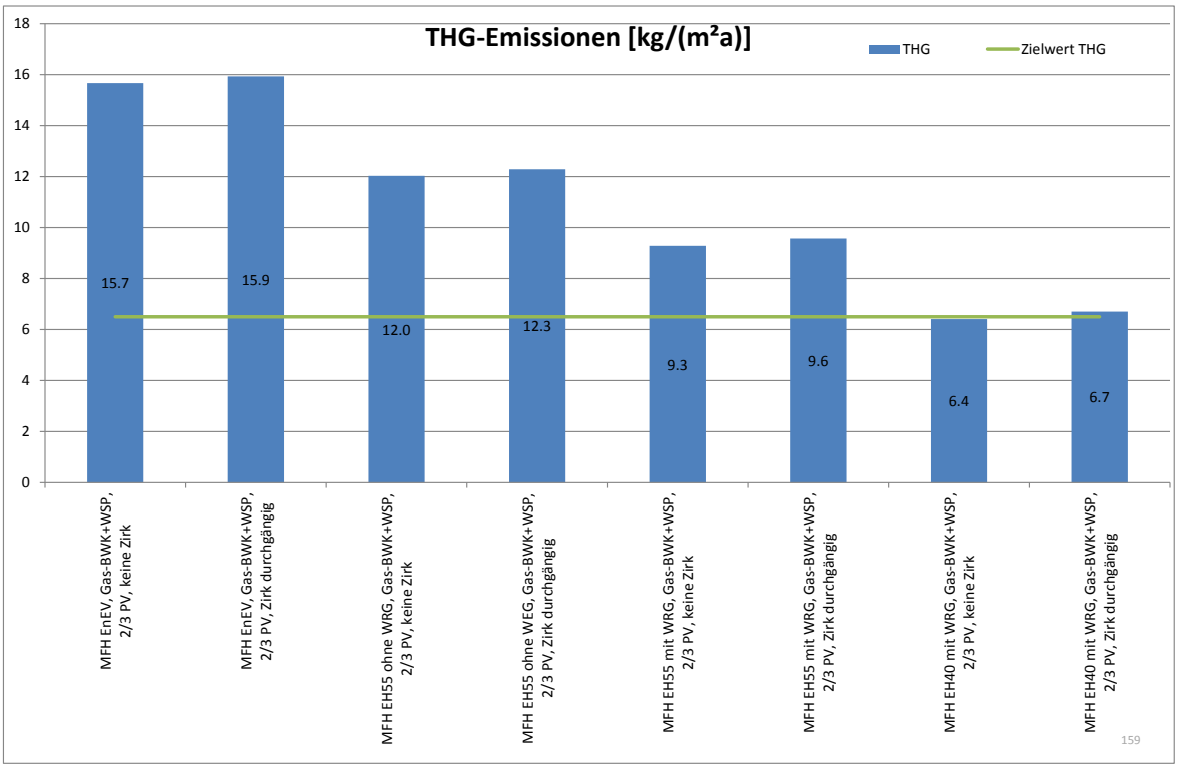


Abbildung 43: Spezifischer Brennstoffverbrauch eines MFH in EnEV, EH55 ohne und mit WRG und EH40 mit WRG-Ausführung mit Gas-Brennwertkessel; Warmwasser-Bereitung jeweils ohne Zirkulation bzw. Zirkulation ganztägig in Betrieb

4.4.3 Einfluss des Hilfsenergieverbrauchs

Der Einfluss des Hilfsenergieverbrauchs auf die Treibhausgasemissionen wurde am Einfamilien- und am großen Mehrfamilienhaus untersucht. Tabelle 12 zeigt die fünf unterschiedlichen Varianten zwischen „sehr sparsam“ und „sehr hoher Verbrauch“. Variiert wurden der Sockelbetrag für Stromverbrauch von Steuerungen, Zirkulationspumpen sowie weiteren Verbrauchern für die Wärmeversorgung[28], wärmeverbrauchsabhängig der Aufwand für die Heizungspumpen, solarertragsabhängig der Aufwand für Solarthermie, die Leistung der Lüftungsanlage sowie der Anteil des Sommerbetriebs der Lüftungsanlagen.

Tabelle 12: Untersuchte Varianten für die Hilfsenergie

		Variante				
Hilfsstromverbräuche	**Einheit**	**Sehr sparsam gesamt**	**Sparsam bei Heizung**	**Standard**	**Hoher Verbrauch**	**Sehr hoher Verbrauch**
Sockelbetrag für Steuerung und sonstige Grundverbräuche	W/m²	0,1	0,1	0,15	0,3	0,45
Verbrauch Heizungspumpe	kWh/kWh Q_H	0,01	0,01	0,01	0,03	0,05
Verbrauch Solaranlage	kWh/kWh Q_{Sol}	0,015	0,015	0,02	0,05	0,05
Leistung Lüftungsanlagen	W/m²	0,25	0,3	0,3	0,5	0,5
davon im Sommer aktiv	%	25%	50%	50%	50%	100%

Die untersuchten Gebäude sind als EH 40 mit Wärmerückgewinnung ausgeführt, besitzen eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, eine thermische Solaranlage mit Heizungsunterstützung sowie eine Wärmespeicher mit Heizstab. Die Dächer sind jeweils auf 2/3 der Nettodachfläche mit PV belegt.

Abbildung 44 zeigt die Treibhausgasemissionen für beide Beispielgebäude. Gegenüber der Standardauslegung beim mittleren Balken für jedes Gebäude, lassen sich durch noch sparsamere Technik 5 bis 6 % bei den Treibhausgasemissionen einsparen. Beim hohen Verbrauch steigen die Emissionen für das Gesamtgebäude um ca. 18 % an, beim sehr hohen Verbrauch, bei dem vor allem die Lüftungsanlagen auch im Sommer durchgehend betrieben werden sogar um über 30 %. Ein Drittel des Mehrverbrauchs gegenüber den Standardansätzen wird durch die Lüftungsanlage mit dem ganzjährigen Betrieb verursacht. Bei einem sehr hohen Hilfsstromverbrauch werden auch die Zielwerte der Treibhausgasemissionen nicht mehr erreicht, so dass auch im Bereich Hilfsenergie auf effiziente Technik und minimale Einsatzzeiten geachtet werden muss.

[28] Beim Mehrfamilienhäuser sind häufig z.B. Betriebswasseraufbereitungs-, Druckhalte- oder Hebeanlagen vorhanden

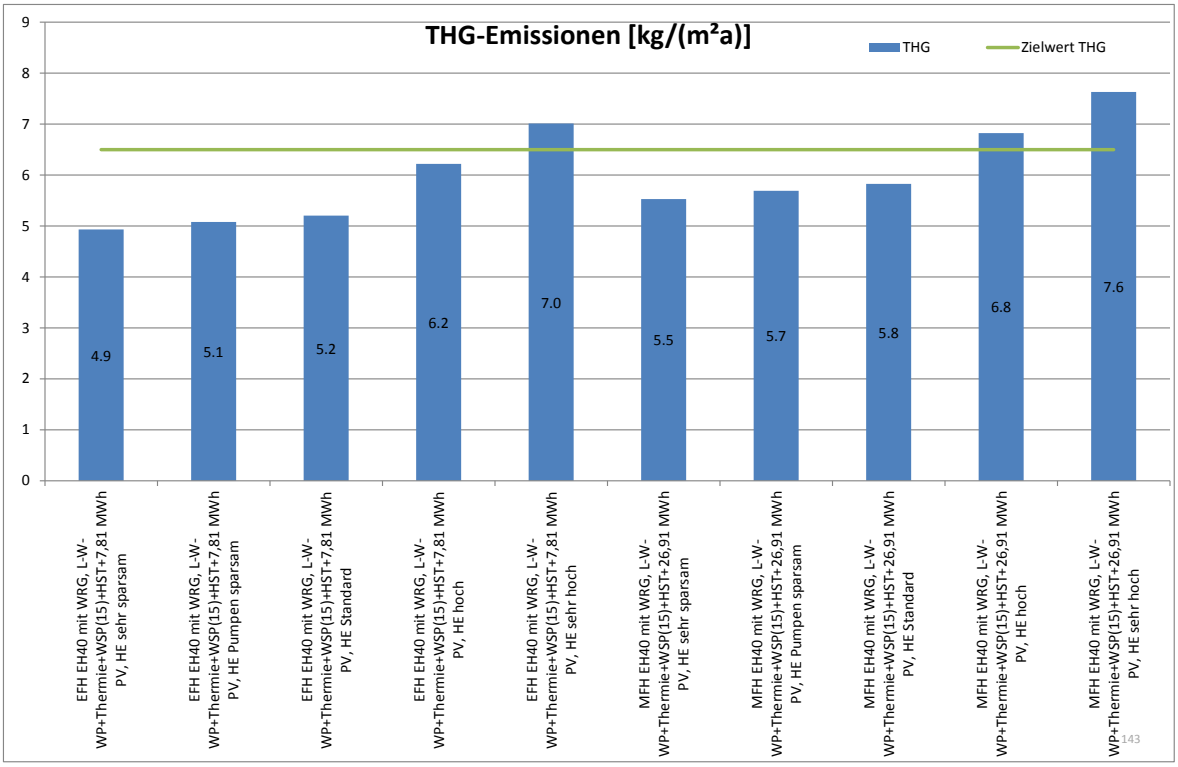


Abbildung 44: Treibhausgasemissionen eines EFH (links) und eines MFH-NB (rechts) als EH40 mit WRG mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Solarthermie mit Heizungsunterstützung und PV auf 2/3 der Dachfläche

4.4.4 Einfluss unterschiedlicher Größen und Systeme von solarthermischen Anlagen

Für ein Einfamilienhaus und eine ungünstige Kombination von Gebäudestandard und Anlagentechnik (EH55 ohne WRG, mit Erdgas-Brennwertkessel, nur 33 % der Dachfläche für PV verwendet) wurde untersucht, welche Auswirkungen die Installation zusätzlicher solarthermischen Anlagen besitzt. Es wurden folgende Anlagenkonfigurationen betrachtet (Tabelle 13):

Tabelle 13: Untersuchte thermische Solaranlagen und deren Kenndaten

	Aperturfläche Kollektor	Speicherkapazität Wärme-speicher
Flachkollektor für WW-Bereitung	6,4 m²	30 bzw. 60 kWh
Flachkollektor für Heizung+WW-Bereitung	16 m²	30* bzw. 60* bzw. 120 kWh
Flachkollektor für Heizung+WW-Bereitung + Heizstab	16 m²	30 bzw. 60 kWh
Vakuumröhrenkollektor für Heizung+WW-Bereitung	16 m²	30 bzw. 60 kWh
Flachkollektor für Heizung+WW-Bereitung, sehr groß	48 m²	60 bzw. 120 bzw. 240 kWh

* jeweils ohne und mit Elektroheizstab berechnet

Die Berechnungen wurden ohne Berücksichtigung von Haushaltsstrom durchgeführt.

Bei der Auswertung (Abbildung 45) muss beachtet werden, dass das Berechnungsmodell Wärmespeicher mit 3 Temperaturschichten abbildet und nicht in der Lage ist, besonders große Wärmespeicher detailliert zu modellieren. Dennoch wurden auch die großen Wärmespeicher als Orientierungsgröße mit ausgegeben.

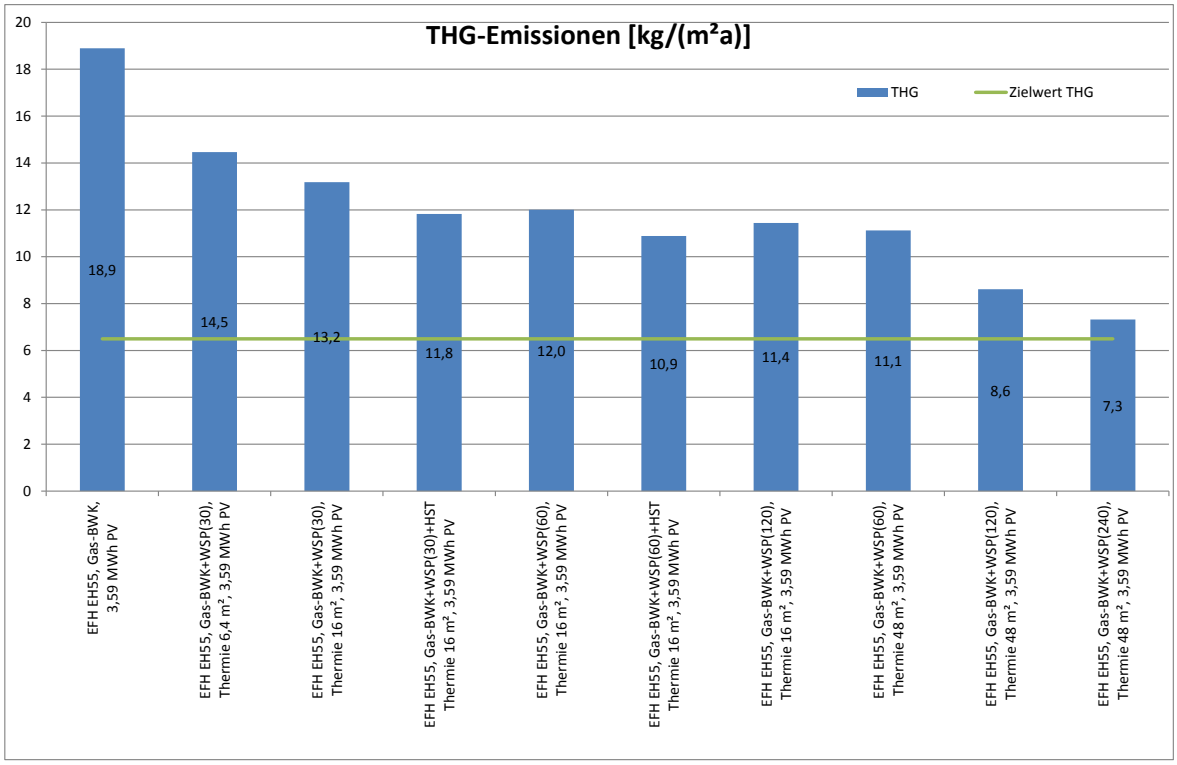


Abbildung 45: Treibhausgasemissionen eines EFH als EH55 ohne WRG, mit Erdreich-Wärmepumpe sowie einer PV-Anlage auf 1/3 der nutzbaren Dachfläche und unterschiedlichen Größen einer solarthermischen Anlage

Mit der Steigerung der Kollektorgröße reduzieren sich die Treibhausgasemissionen. Eine Kleinanlage (6,4 m² Fläche) für die Warmwasserbereitung kann in diesem Beispiel ca. 4,5 kg/(m²a) an Treibhausgasen im Vergleich zum Gebäude ohne Solarthermie einsparen, eine Anlage mit Heizungsunterstützung (16 m²) erhöht die Einsparung um bis zu 3 kg/(m²a). Bei der Großanlage mit 48 m² Kollektorfläche (letzte drei Säulen rechts) werden je nach Speichergröße mehr als 50 % solarer Deckungsgrad erreicht und entsprechend sinken auch die Treibhausgasemissionen auf minimal 7,3 kg/(m²a). Durch den Einsatz eines Heizstabes können bei einer Anlage mit Heizungsunterstützung die Treibhausgasemissionen um über 1 kg/(m²a) reduziert werden bzw. durch den Heizstab werden mehr Treibhausgasemissionen reduziert, als durch eine Verdoppelung des Speichervolumens, da PV-Überschüsse ebenfalls genutzt werden können (die Verbesserung der „Windstromfähigkeit“ ist hierbei noch nicht berücksichtigt). Vakuumröhrenkollektoren mit gleicher Kollektorfläche (hier nicht dargestellt) reduzieren die Treibhausgasemissionen um ca. 0,2 kg/(m²a). Keine der Varianten mit Gas-Brennwertkessel erreicht den Zielwert bei den THG-Emissionen.

Die beschriebenen Treibhausgasreduktionen durch eine solarthermische Anlage fallen in Gebäuden mit einem besseren Wärmeschutz oder bei effizienterer Anlagentechnik entsprechend niedriger aus.

4.5 Einfluss der Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Die bisherigen Analysen untersuchten die Wärmeversorgung der Gebäude inklusive deren Hilfsstromeinsatz. Nun soll analysiert werden, wie sich die zusätzliche Berücksichtigung von Verbräuchen an Haushaltsstrom auf die Treibhausgasemissionen auswirkt. Die Variante ohne Haushaltsstrom wird hier noch nur zu Vergleichszwecken mitbetrachtet.

4.5.1 Energie- und Treibhausgas-Bilanz

In Abbildung 46 sind als Referenz das EH55 ohne WRG (linke Seite) sowie das EH40 mit WRG (rechte Seite) mit je fünf unterschiedlichen Anlagentechniken und einer PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche aber ohne Berücksichtigung von Haushaltsstrom dargestellt.

Beim EH55 ohne WRG erreicht das Gebäude sowohl mit Erdreichwärmepumpe als auch mit Pelletkessel die Zielwerte für die Treibhausgasemissionen, beim EH40 mit WRG zusätzlich auch das Gebäude mit Luft-Wasser-Wärmepumpe. Die Varianten mit Gas-Brennwertkessel (ohne und mit Mini-Wärmepumpe als zusätzlicher Wärmeerzeuger) überschreiten den Zielwert beim EH40 leicht.

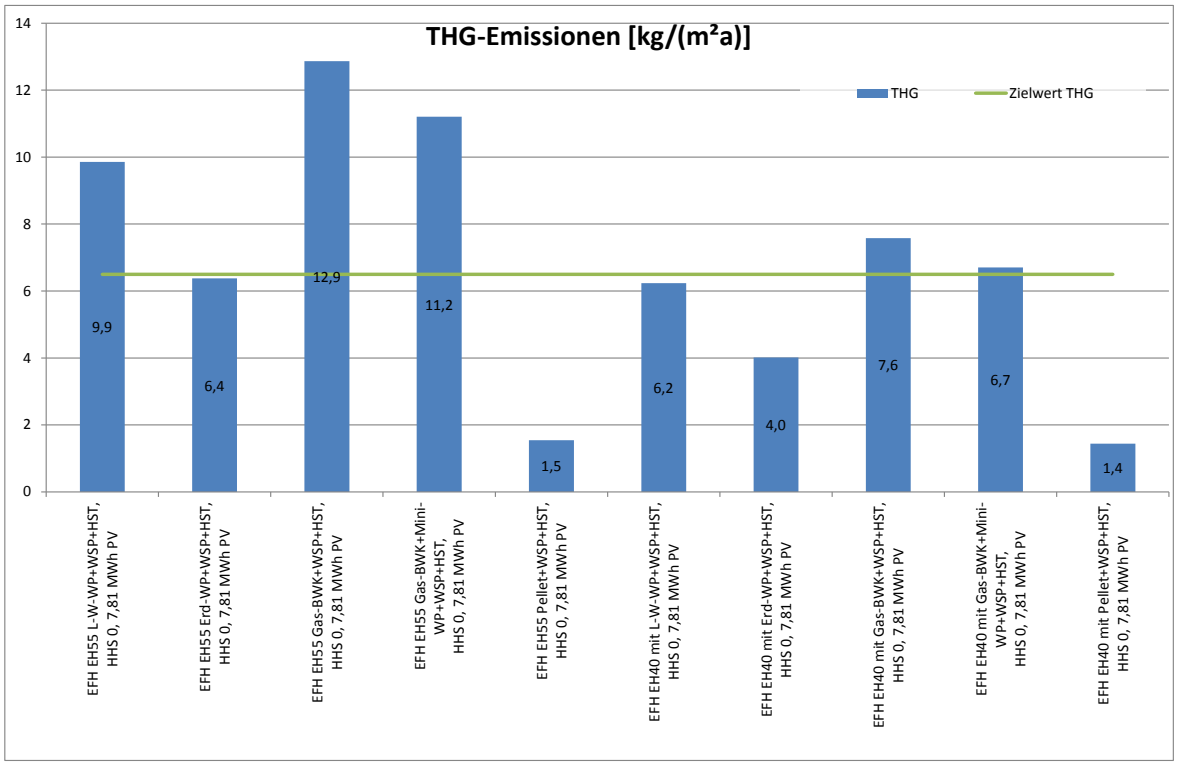


Abbildung 46: Treibhausgasemissionen eines EFH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche ohne Haushaltsstrom

Betrachtet man die Gebäude nun mit Haushaltsstrom, so ist ein erhöhter Zielwert von 8,5 kg/(m²a) bei den THG-Emissionen anzulegen, der unterschritten werden muss (siehe Tabelle 1 in Kapitel 2.1). Unterstellt man einen pauschalen Haushaltsstromverbrauch von 20 kWh/(m²a) in den Gebäuden[29], so erreichen nur noch die Gebäude mit Pelletkessel die THG-Ziele (Abbildung 47, linke Spalte), allerdings werden die Ziele

[29] Im Berechnungsmodell werden unterschiedliche zeitliche Profile beim Haushaltsstromverbrauch verwendet, die aber auf 20 kWh/(m²a) als Jahreskennwert normiert werden.

beim Brennstoff- bzw. Biomasseverbrauch deutlich überschritten (hier nicht dargestellt). Werden sogar 30 kWh/(m²a) für Haushaltsstrom verbraucht (mittlere Säulen), so erreicht keine der untersuchten Varianten mehr die THG-Ziele. Werden statt den auf einen Jahresverbrauch normierten Werte die unnormierten Profile verwendet, so wie sie sich direkt aus dem Nutzermodell ergeben, so liegt der Haushaltsstromverbrauch beim EH55 ohne WRG bei 20,3 kWh/(m²a) und beim EH40 mit WRG bei 18,7 kWh/(m²a) (die Differenzen wegen den zufällig gezogenen Profilen). Somit liegen die Ergebnisse mit nicht normierten Haushaltsstromverbräuchen in der Größenordnung, wie die auf 20 kWh/(m²a) normierten und nur die Varianten mit Pelletkesseln unterschreiten die THG-Ziele, nicht jedoch die Ziele für Biomasse. Somit sind die Varianten mit Normierung auf 20 kWh/(m²a) und die nicht normierten, bei denen eine Effizienzsteigerung beim Haushaltsstrom gegenüber heute unterstellt wurde (siehe auch Anhang B 1.4 in Teilbericht 1 in [Diefenbach et al. 2019]) nahezu gleichwertig. Im Folgenden wird mit auf 20 kWh/(m²a) normierten Haushaltsstromverbräuchen gerechnet, um zufällige Verzerrungen zu vermeiden.

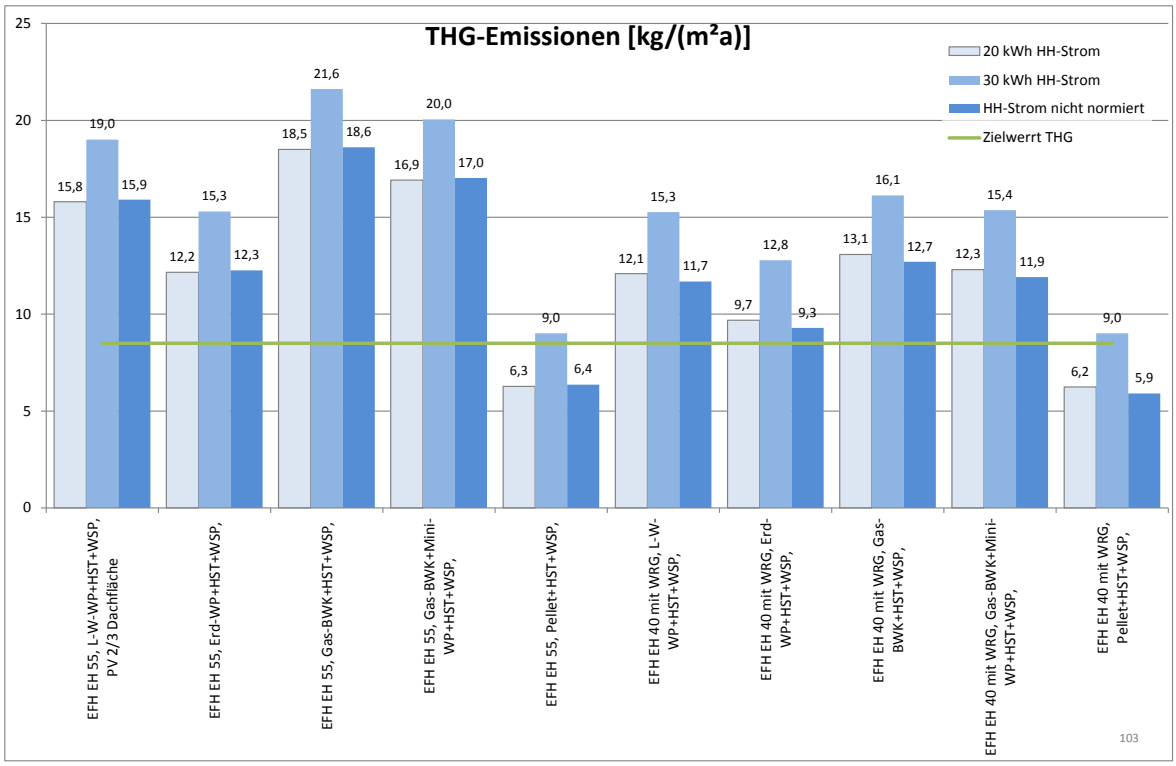


Abbildung 47: Treibhausgasemissionen eines EFH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche mit Haushaltsstrom normiert auf einen Jahresverbrauch von 20 bzw. 30 kWh/(m²a) sowie nicht normierten Nutzungsprofilen

Betrachtet man das Reihenhaus ohne Haushaltsstrom, so erreichen bei EH55 ohne WRG das Gebäude mit Erdreich-Wärmepumpe und mit Pellet-Kessel die THG-Ziele, beim EH40 mit WRG überschreitet nur die Variante mit Gas-Brennwertkessel die Zielwerte geringfügig (Abbildung 48, linke Säulen).

Werden 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom im Gebäude berücksichtigt, so verschieben sich die Verhältnis auch hier und nur die Gebäude mit Pellet-Kessel erreichen gerade noch den Zielwert (Abbildung 48, rechte Säulen), aber auch hier werden die Anforderungen an den Brennstoff (34,7 kWh/(m²a)) und das Biomassepotenzial deutlich überschritten (Abbildung 49).

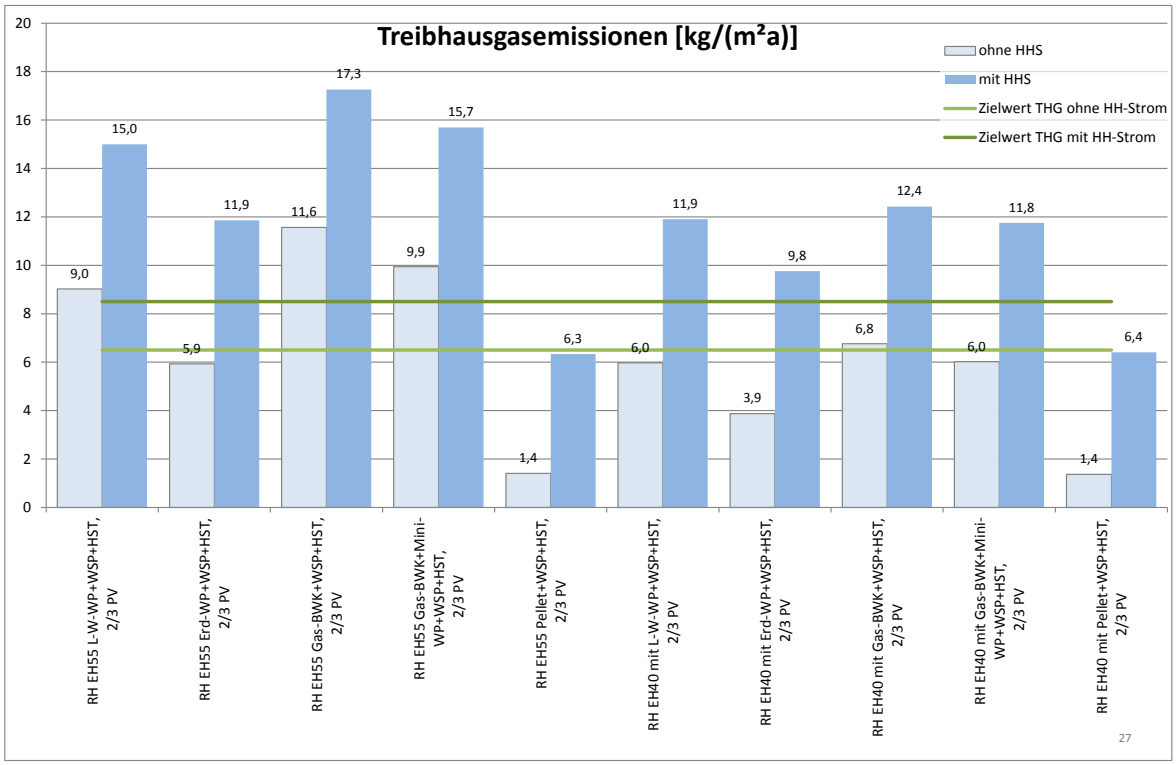


Abbildung 48: Treibhausgasemissionen eines RH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche ohne und mit Haushaltsstrom

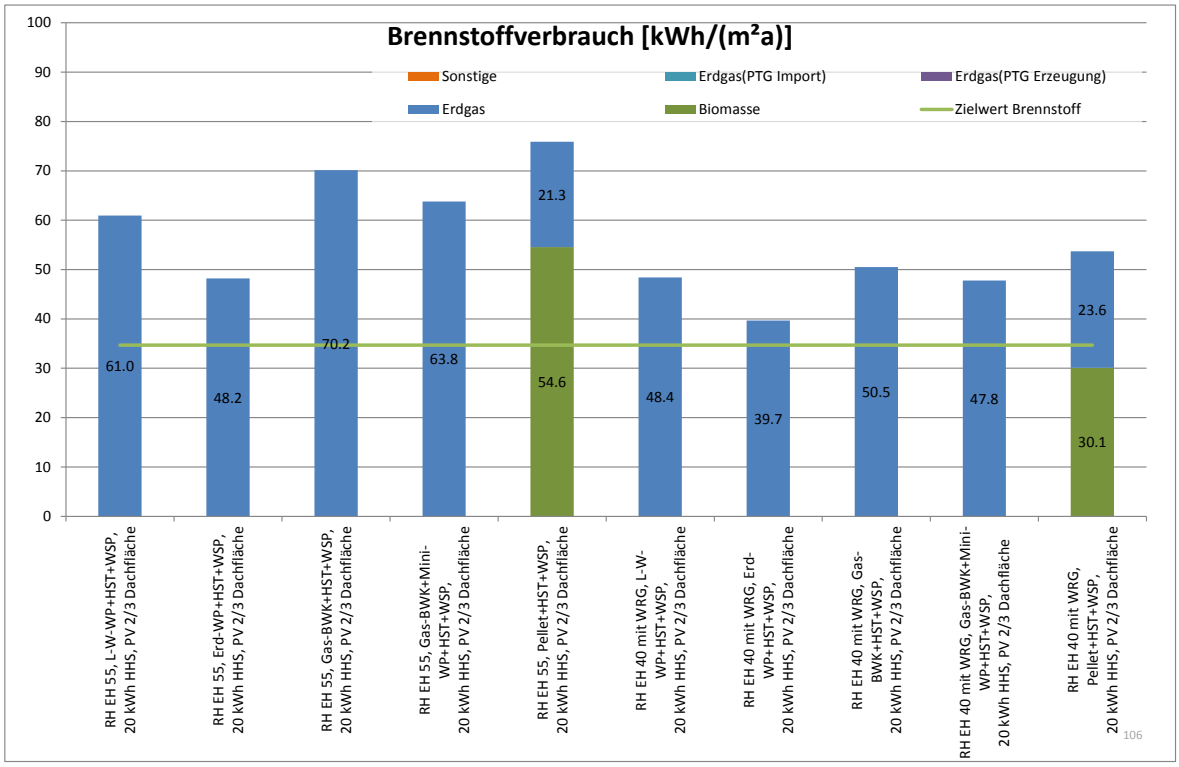


Abbildung 49: Brennstoffverbräuche eines RH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche mit Haushaltsstrom normiert auf einen Verbrauch von 20 kWh/(m²a)

Im großen Mehrfamilienhaus (MFH-NB) werden bereits ohne Berücksichtigung des Haushaltsstrom bei einer Ausführung als EH55 die Zielwerte für die Treibhausgasemissionen nur mit Pellet-Kessel erreicht, aber auch hier wird deutlich zu viel Biomasse benötigt (hier nicht dargestellt). Beim EH40 mit WRG liegen alle Varianten unter oder im Bereich der Emissionsziele (Abbildung 50, linke Säulen).

Werden nun zusätzlich 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom berücksichtigt, so überschreiten alle Varianten beim EH55 ohne WRG das THG-Ziel – zum Teil deutlich (Abbildung 50, rechte Säulen). Beim Brennstoffverbrauch erfüllt keine der Varianten die Anforderungen. Aber auch beim EH40 mit WRG liegt nur die Ausführung mit Pellet-Kessel im Bereich des Zielwertes, aber mit sehr hohem Biomasseverbrauch (Abbildung 51). Hier tritt der Nachteil von Mehrfamilienhäusern mit ihrer im Vergleich zur Wohnfläche geringeren Dachfläche für PV-Stromerzeugung deutlich zu Tage.

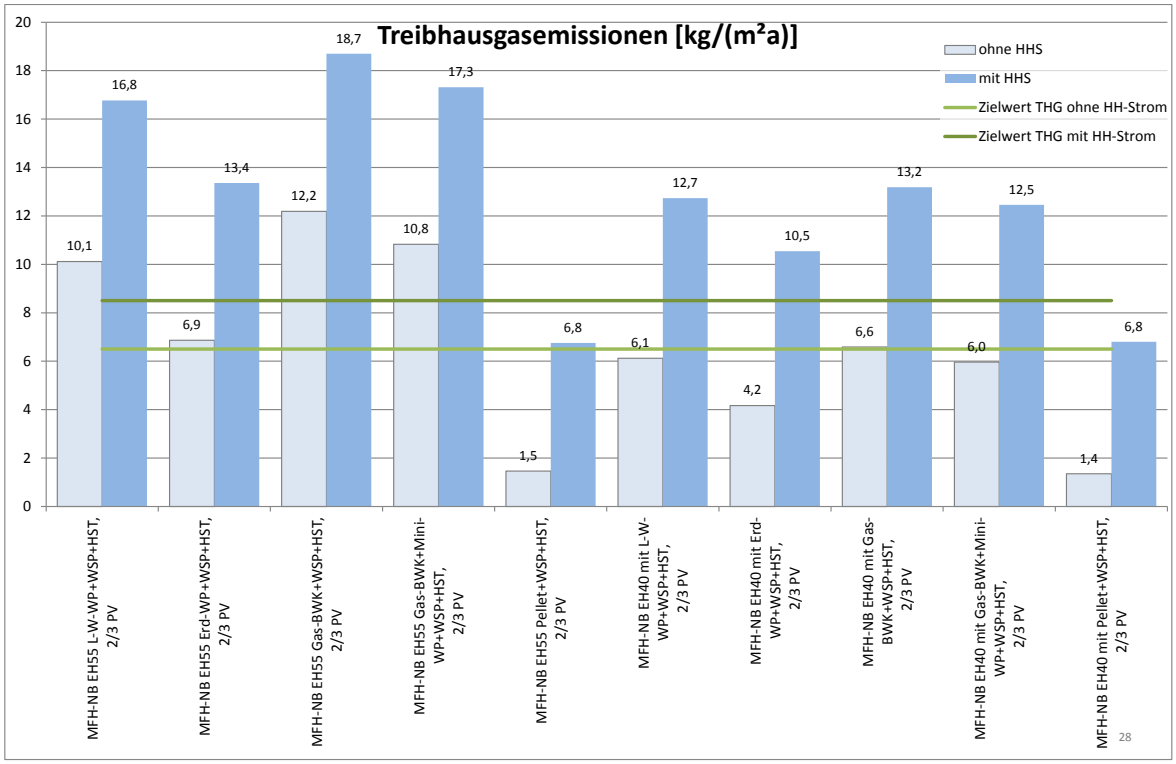


Abbildung 50: Treibhausgasemissionen eines MFH-NB als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche ohne und mit Haushaltsstrom

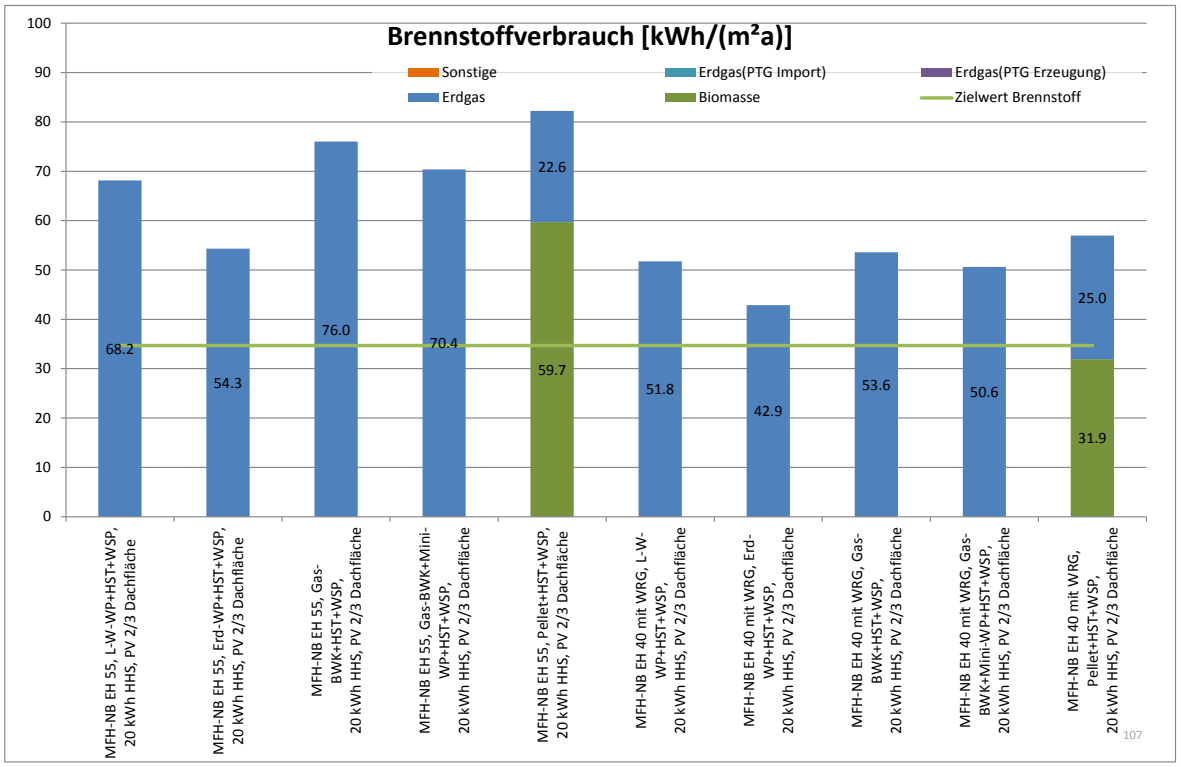


Abbildung 51: Brennstoffverbräuche eines MFH-NB als EH55 und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche mit Haushaltsstrom normiert auf einen Verbrauch von 20 kWh/(m²a)

Beim kleineren Mehrfamilienhaus (MFH-San) erreichen bereits ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms beim EH55 ohne WRG wieder die Ausführungen mit Erdreich-Wärmepumpe und mit Pellet-Kessel die THG-Ziele, beim EH40 mit WRG werden diese bei Luft-Wasser-Wärmepumpe und den Gaskessel-Varianten leicht überschritten (Abbildung 52, linke Säulen).

Durch die Berücksichtigung des Haushaltsstroms ergibt sich ein ähnliches Bild, wie beim MFH-NB, dass nur die Pellet-Kessel-Varianten die Treibhausgasemissionen gerade noch einhalten (Abbildung 52, rechte Säulen), der Brennstoffverbrauch aber sehr hoch ausfällt.

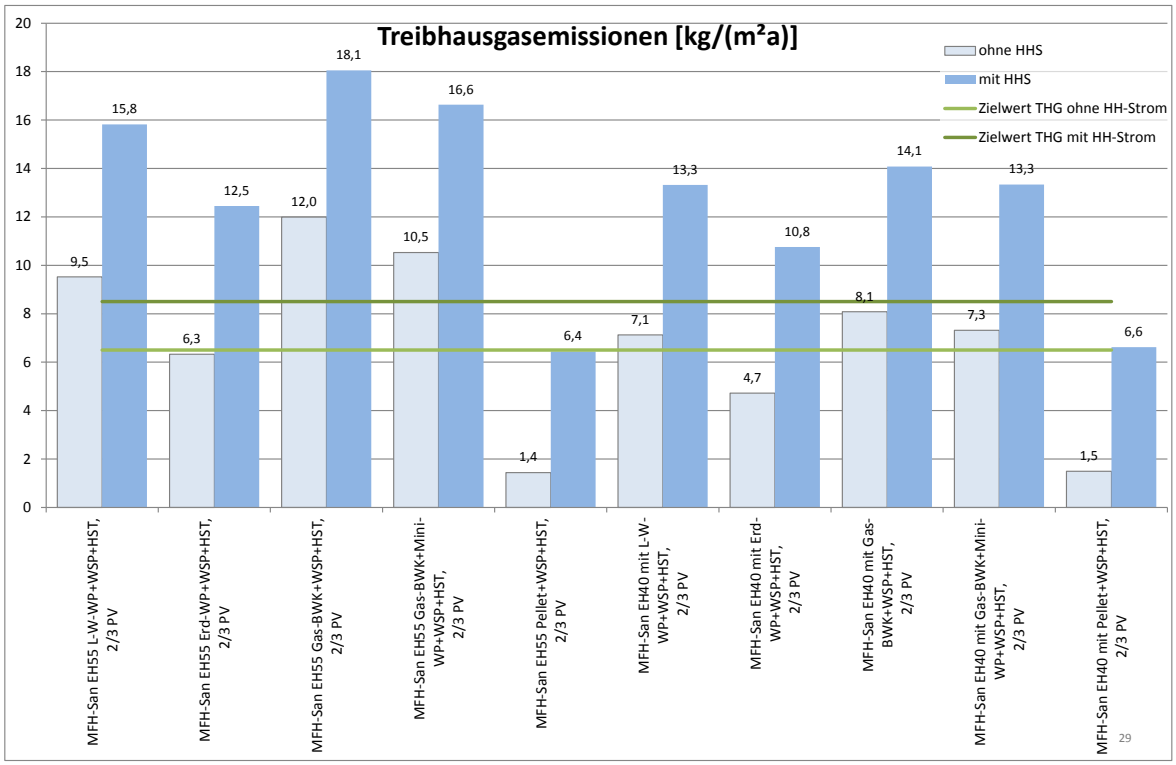


Abbildung 52: Treibhausgasemissionen eines MFH-San als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche ohne und mit Haushaltsstrom

Fazit

Die Analysen zeigen, dass das Erreichen der Klimaschutzziele bei Berücksichtigung des Haushaltsstromes deutlich erschwert ist, wenn nur PV-Stromerzeugung am/auf dem Gebäude angerechnet wird. Um die Ziele für Klimaneutralität mit allen Betriebsenergieverbräuchen zu unterschreiten ist einerseits auch beim Haushaltsstrom ein sehr sparsames Verhalten erforderlich, andererseits sind die Ziele ohne eine Einbeziehung von Windkraft aus dem Netz kaum zu erreichen. Aus diesem Grund wird die Einführung eines Windkraft-Budget bzw. einer Gutschrift für Windenergie vorgeschlagen (siehe Kapitel 5). Die Auswirkungen von zusätzlichem Windstromangebot werden in Kapitel 4.5.2 sowie Kapitel 7 untersucht.

4.5.2 Einfluss des Anteils an erneuerbaren Energien

Bilanziert man ein Modellgebäude mit Haushaltsstrom und betrachtet dabei nicht nur die lokale PV-Erzeugung sondern auch ein PV- bzw. Windenergieangebot, so verbessert sich aufgrund der unterschiedlichen Erzeugungsstruktur von PV- und Windenergie die erneuerbare Versorgung des Gebäudes und die THG-Emissionen können sinken. Erhöht man den für ein Gebäude zur Verfügung stehenden Anteil an Wind- und PV-Strom schrittweise (dem Gebäude stehen dann entsprechend den Wetterdaten 2012 diese Menge an PV-/Windstrom zur Verfügung), so kann man die Veränderung der Nutzung des erneuerbaren Stroms im Gebäude auswerten (Verwendung oder Überschüsse). Dabei wurde PV-Strom immer regional verteilt betrachtet und nicht dem einzelnen Gebäude zugerechnet. Eine PV-Eigenstromerzeugung wie in den bisherigen Analysen wurde hier also nicht explizit berücksichtigt. Die angegebenen Anteile erneuerbaren Stroms verstehen sich als verfügbarer Strom im Gebäude, d.h. die Verteilverluste im elektrischen Netz müssen zusätzlich gedeckt werden.

Für das EFH als EnEV-Gebäude und als EH40 mit WRG und mit einer Anlagentechnik bestehend aus Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab, Wärmespeicher (15 kWh) und unter Berücksichtigung von 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom ist in den folgenden Abbildungen der Einfluss des erneuerbaren Strom-Anteils (Windkraft und PV getrennt) auf verschiedenen Parameter dargestellt.

Getrennte Betrachtung von Wind- und PV-Strom

Die gesamte Wärmeerzeugung des Gebäudes verändert sich mit ansteigendem Wind- oder PV-Stromangebot nur wenig durch die Nutzung des Wärmespeichers (im Mittel höhere Verluste durch höheres Temperaturniveau im Speicher zur Nutzung von Überschüssen) und zwischen Wind- und PV-Strom zeigen sich dabei keine nennenswerten Unterschiede (Abbildung 53). Die beiden energetischen Standards zeigen einen vergleichbaren Verlauf, jedoch auf sehr unterschiedlichem Niveau.

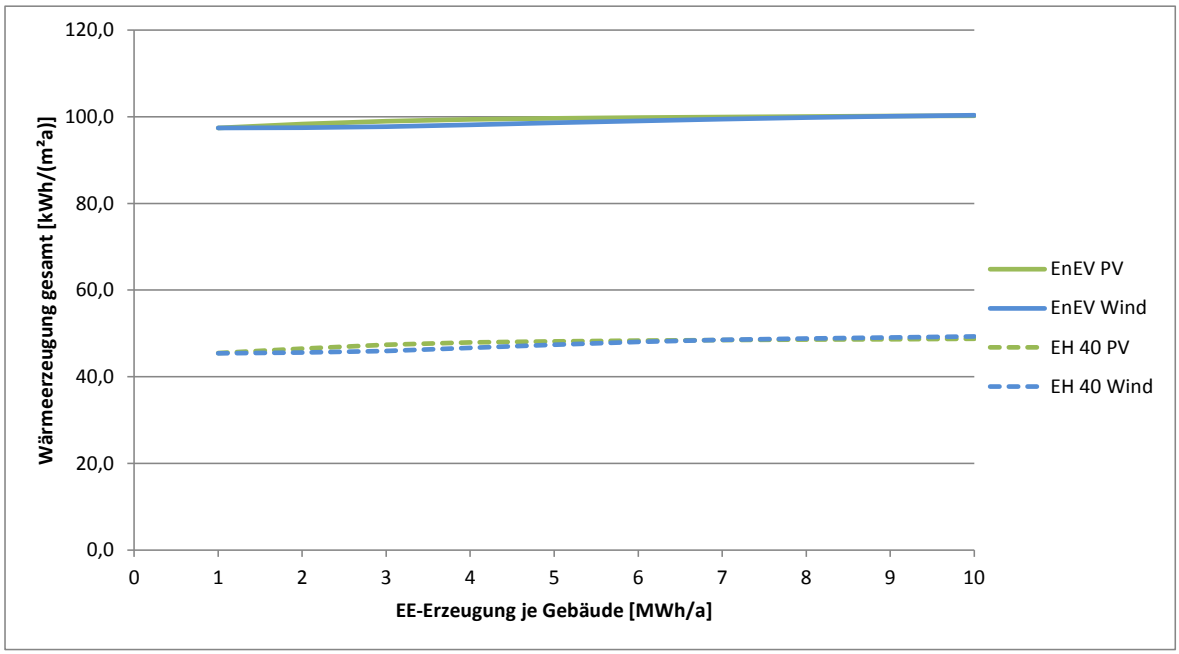


Abbildung 53: Wärmeerzeugung gesamt für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Wind- und PV-Stroms

Kann das erneuerbare Stromangebot nicht direkt genutzt werden, so wird versucht, dieses teilweise in dem thermischen Speicher zu puffern (hier 15 kWh Kapazität angesetzt). Wird diese im Gebäude nicht direkt nutzbare Energie nun auch mit elektrischen Heizstäben statt nur mit der Wärmepumpe in Wärme umgewandelt (da die Wärmepumpe zu diesem Zeitpunkt bereits vollständig ausgelastet ist), so stellt dies eine Lösung mit niedriger Energieeffizienz dar. In Abbildung 54 ist der Verlauf der Wärmeerzeugung über dem Heizstab (der hier immer parallel zur bereits unter Volllast laufenden Wärmepumpe betrieben wird) bei steigendem Angebot an erneuerbaren Energien dargestellt. Bis zur zweiten MWh an erneuerbarem Strom (EE-Strom) verlaufen die Kurven für PV- und Windstrom sowohl beim EnEV-Gebäude als auch beim EH40 mit WRG sehr ähnlich. Oberhalb von 2 MWh/a PV-Strom wird jedoch verstärkt mit dem Heizstab Wärme erzeugt – beim EnEV- und beim EH40-Standard nahezu in gleichem Umfang. Bei Windstrom ist der verstärkte Einsatz des Heizstabes erst ab 4 MWh/a Angebot an erneuerbarem Strom zu erkennen und erst oberhalb von 5 MWh/a Windstromangebot wird dieser stärker mit Heizstäben in Wärme umgewandelt als PV-Strom. Hierbei zeigt sich aufgrund des geringeren absoluten Wärmebedarfs ein deutlich höherer Anteil Heizstab-Betrieb beim EH40. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass im Mittel nur ein Potenzial von 3,21 MWh/a Windstrom besteht (siehe Kapitel 3.2), so dass Heizstabbetrieb bei Windstrom eher selten auftreten wird.

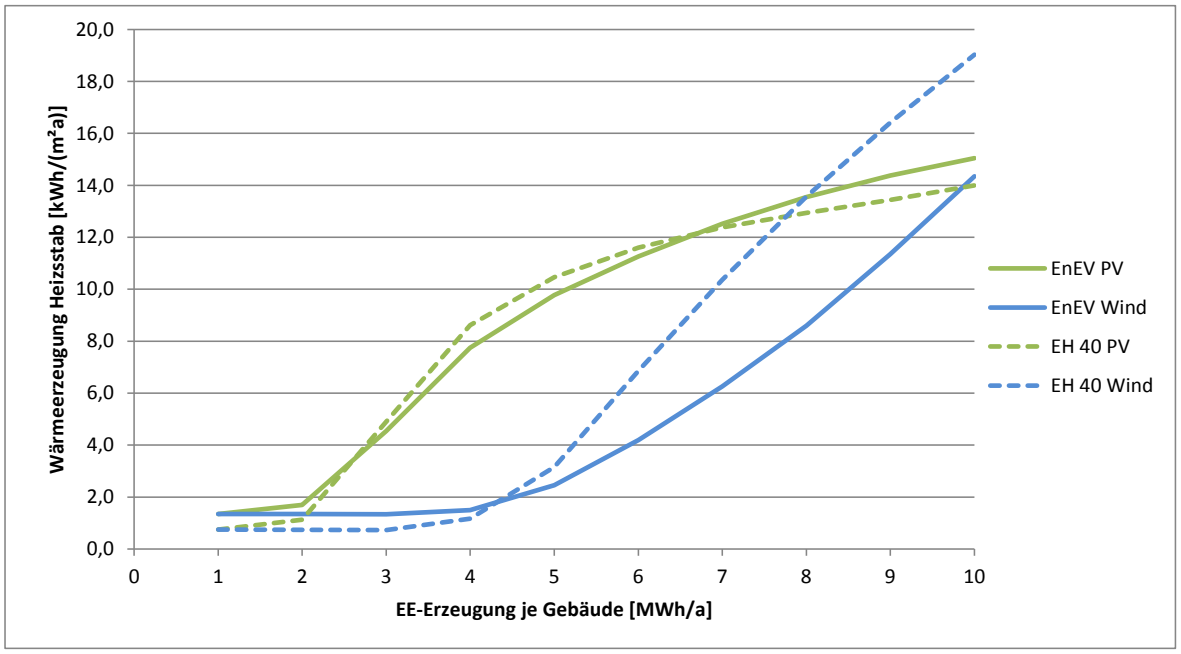


Abbildung 54: Wärmeerzeugung des Heizstabes für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Wind- und PV-Stromangebots

Da ein steigendes PV-Stromangebot weniger gut direkt genutzt werden kann und verstärkt im Wärmespeicher gepuffert wird, steigen die Verluste des Wärmespeichers schneller an als bei Windstrom (Abbildung 55). Da die Speicherkapazität begrenzt ist, steigen die Verluste nicht linear an, sondern der Anstieg flacht sich bei hohen PV-Anteilen ab. Da der Wärmebedarf im EH40 niedriger liegt, wird mehr erneuerbarer Strom in den Wärmespeicher gepuffert, so dass die Verluste beim niedrigeren Wärmeverbrauch höher ausfallen. Bei Windstrom beginnt der Anstieg langsamer, da anfangs mehr Windstrom direkt genutzt werden kann und nicht in den Speicher gelangt. Vergleicht man die Verluste mit der gesamten Wärmeerzeugung aus Abbildung 53, so liegt beim EH40 der Anteil der Speicherverluste zwischen 2,3 % und 6,8 % bei PV-Strom bzw. 0,3 % und 7,5 % bei Windstrom.

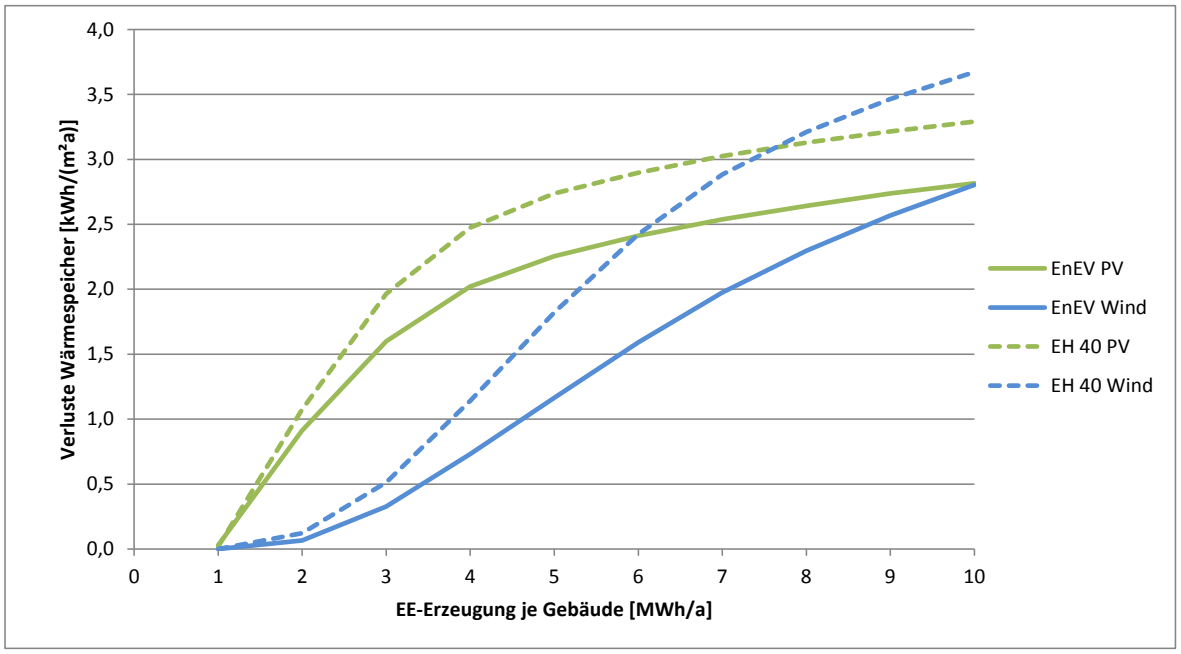


Abbildung 55: Zusätzliche Verluste des Wärmespeichers bei der Speicherung von Überschüssen für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Wind- und PV-Stromangebots

Abbildung 56 zeigt bei einer Steigerung der Wind- oder PV-Strom-Angebots den Überschussstrom, der nicht im Gebäude genutzt werden kann und ins Netz eingespeist wird. Überschüsse entstehen bei diesem Beispiel bei PV-Strom bereits ab 3 MWh/a Angebot und sie steigen danach steil an (Überschüsse entstehen meist im Sommer und immer tagsüber wenn nur geringer Wärmebedarf besteht und der Strom somit nicht genutzt werden kann). Bei Windstrom treten erst ab einer Erzeugung ca. 5 bzw. 6 MWh/a Überschüsse auf, die nicht genutzt werden können (die Windstromerzeugung ist gleichmäßiger über den Tag verteilt und es treten keine ausgeprägten Spitzen im Sommer bei geringem Verbrauch auf). Die Ausnutzung jeder zusätzlichen MWh Windstrom ist dann immer noch höher als bei PV, sodass die Kurven anfangs langsamer ansteigen. Die Überschüsse von erneuerbarem Strom sind beim EnEV-Standard geringer als beim EH40 mit WRG, da der Verbrauch bei letzteren insgesamt geringer ausfällt.

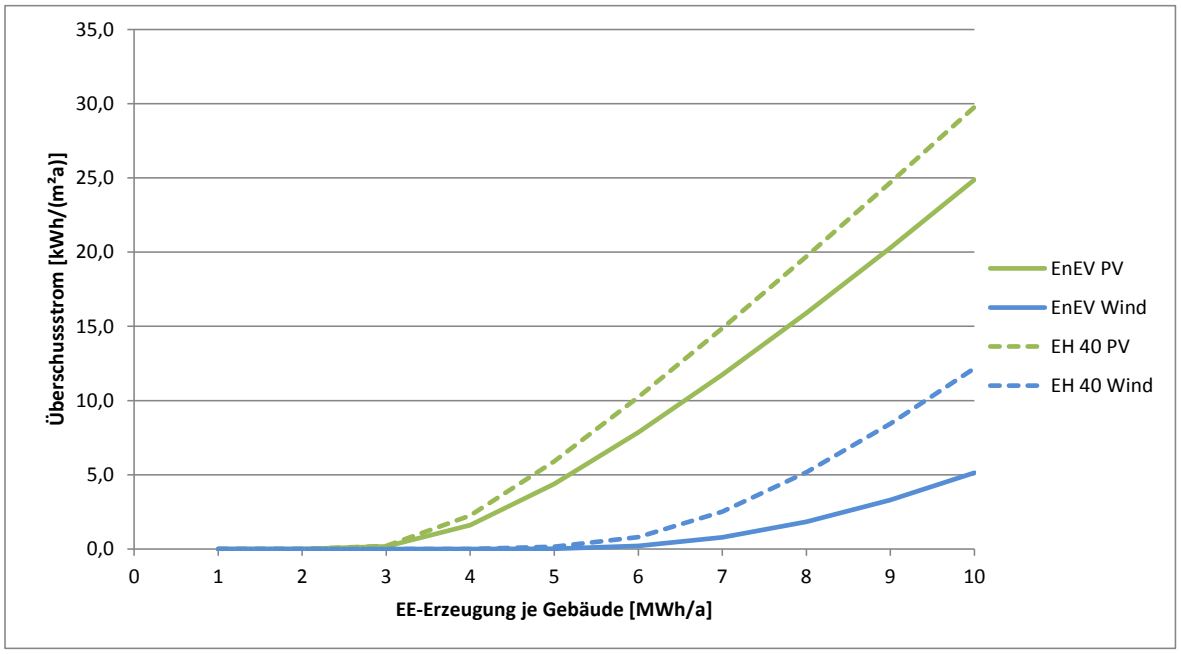


Abbildung 56: Überschussstrom für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Wind- und PV-Stroms

Trotz der höheren Speicherverluste sinken die Treibhausgasemissionen mit zunehmendem erneuerbarem Strom-Anteil für das Gebäude deutlich ab. Gleichzeitig sieht man in Abbildung 57, dass der energetische Standard der Gebäudehülle die Treibhausgasemissionen ganz wesentlich bestimmt und das EnEV-Gebäude 5 MWh/a Windstrom benötigt, um die gleichen Treibhausgasemissionen zu erreichen wie das EH40 mit WRG mit 1 MWh/a Windstrom. Bei PV-Strom erreicht das EnEV-Gebäude im hier dargestellten Ausschnitt nie die niedrigen Emissionen des EH40 mit WRG. Der Zielwert bei den THG-Emissionen (8,5 kg/(m²a) mit Haushaltsstrom) wird – bei dieser getrennten Betrachtung von PV- und Windstrom – nur vom EH40 mit mindestens 5 MWh/a Windstrom erreicht.

Als Konsequenz daraus kann man schlussfolgern, dass mit PV-Anlagen ein schlechterer Standard bei der Gebäudehülle (höherer Energieverbrauch) kaum kompensiert werden kann. Dies ist mit Windkraft besser möglich; wird Windkraft zur Deckung von Energieverbräuchen aus weniger ambitionierten Gebäudestandards eingesetzt, ist aber ein deutlich stärkerer Windkraftausbau erforderlich.

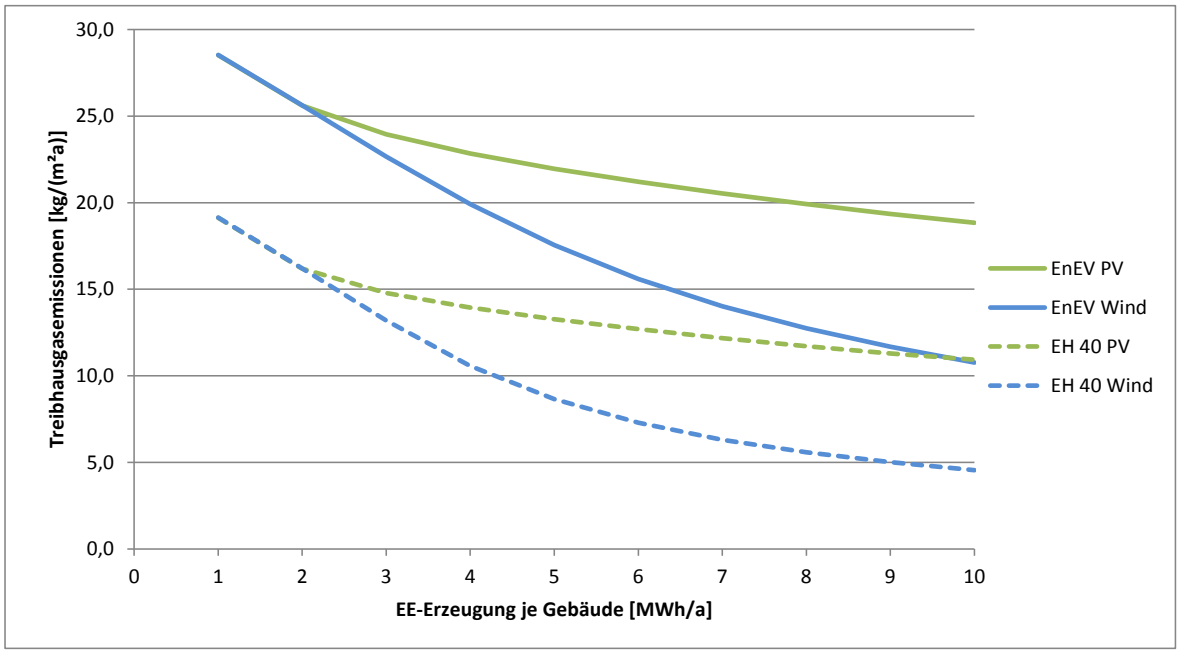


Abbildung 57: Treibhausgasemissionen für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Wind- und PV-Stroms

Gemeinsame Betrachtung von Wind- und PV-Strom

Ein Gebäude verhält sich mit der modellierten Regelung ggf. anders auf eine zusätzliche MWh/a erneuerbaren Strom (z. B. Windstrom), wenn bereits nennenswert Strom aus anderen Quellen (z. B. PV-Strom) zur Verfügung steht. Aus diesem Grund sind im Folgenden die Auswertungen in diesem Kapitel nochmals für Kombinationen von Wind- und PV-Strom dargestellt. In Abbildung 58 ist zu erkennen, dass sich für die gesamte Wärmeerzeugung keine nennenswerten Änderungen durch einen steigenden PV- oder Windstromanteil ergeben.

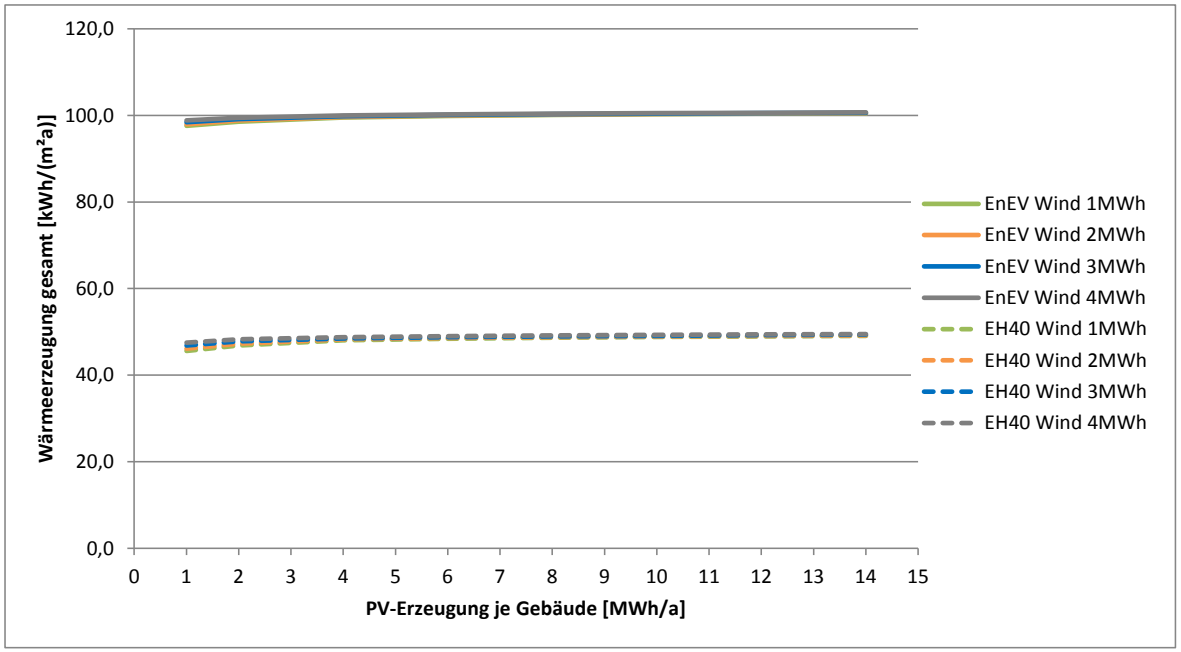


Abbildung 58: Gesamte Wärmeerzeugung für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG bei zunehmendem PV-Strom und unterschiedlichem Windstromanteil

Steht wie in Abbildung 59 dem Gebäude eine Mindestmenge an Windstrom zur Verfügung (hier variiert zwischen 1 und 4 MWh/a), so ist der Einsatz des Heizstabes im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG sehr ähnlich und der Kurvenverlauf ist vergleichbar mit dem für PV-Strom ab 2 MWh/a in Abbildung 54. Gleiches gilt für die Verluste des Wärmespeichers, die hier nicht gesondert dargestellt sind.

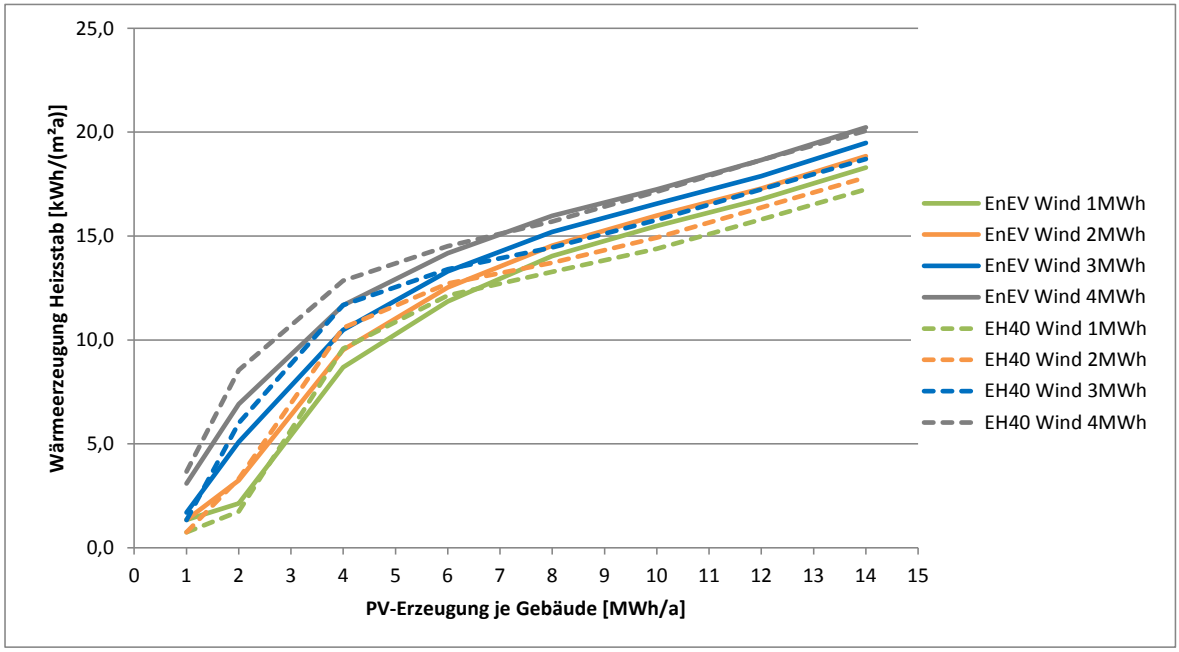


Abbildung 59: Wärmeerzeugung mit dem Heizstab für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG bei zunehmender PV-Stromerzeugung und unterschiedlichem Windstromangebot

Während bei reinem PV-Strom bereits ab 3 MWh/a und reinem bei Windstrom ab 5 MWh/a Überschüsse anfallen, die ins Netz eingespeist bzw. nicht genutzt werden können, entwickelt sich der Überschussstrom bei Kombination von Wind- und PV-Strom (Abbildung 60) ähnlich dem Windstrom in Abbildung 56 und Überschüsse werden ab ca. 4 MWh/a PV-Strom (d. h. 5 MWh/a erneuerbares Strom-Angebot gesamt) eingespeist. Je höher der Beitrag des Windstromes ausfällt, desto geringer sind die Überschusseinspeisungen bzw. die nicht genutzten Windstromanteile im Netz.

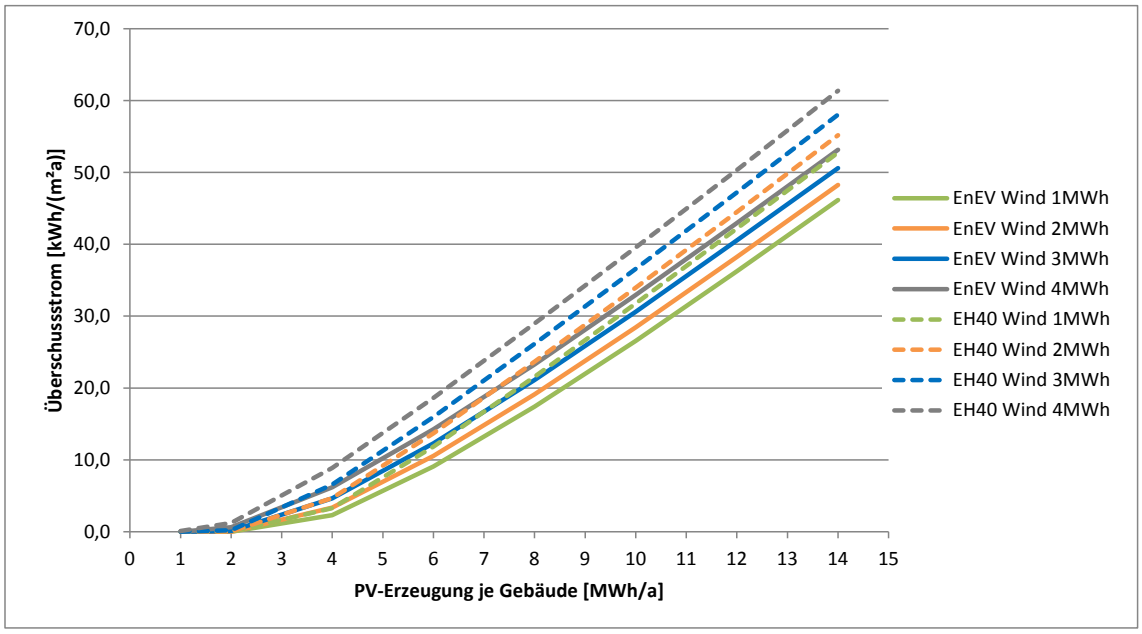


Abbildung 60: Überschussstrom für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG bei zunehmendem PV-Strom und unterschiedlichem Windstromanteil

Steht dem Gebäude bereits Windstrom in einem begrenzen Umfang zur Verfügung (hier zwischen 1 und 4 MWh/a variiert), so führt das zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen – allerdings um weniger als dem Windstromanteil entsprechen würde (Abbildung 61). Der Verlauf der Kurven liegt zwischen der PV- und der Windstromkurve aus Abbildung 57. Das EnEV-Gebäude verfehlt mit der beschriebenen Anlagentechnik auch mit 18 MWh/a erneuerbarem Strom (4 MWh/a Wind und 14 MWh/a PV) die THG-Ziele deutlich. Beim EH40 existieren mehrere Kombinationen aus PV- und Windstrom, mit denen der Zielwert von 8,5 kg/(m²a) unterschritten wird. Der Einfluss der Kombination von PV- und Windstrom wird im Teilbericht 1 in [Diefenbach et al. 2019] nochmals ausführlich für den gesamten Wohngebäudebestand erläutert.

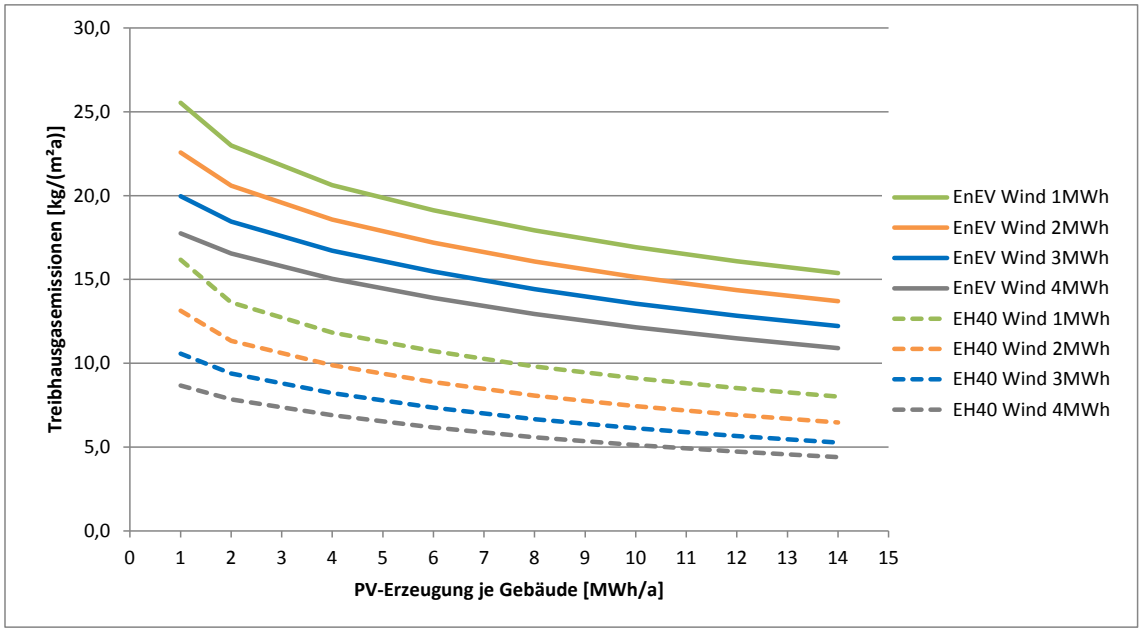


Abbildung 61: Treibhausgasemissionen für ein EFH im EnEV- und im EH40-Standard mit WRG bei zunehmendem PV-Strom und unterschiedlichem Windstromanteil

5 Bewertungsschema für zukunftsfähige Gebäude zur Berücksichtigung von Potenzialgrenzen bei unterschiedlichen Energiequellen

5.1 Ausgangslage und Lösungsansatz

Die Auswertungen in den vorigen Kapiteln haben gezeigt, dass insbesondere im Fall der Biomasse ein Bewertungsproblem auftritt: Bei Betrachtung der Treibhausgasemissionen führt der Biomasseeinsatz fast immer zur Einhaltung der Ziele, ein solches Ergebnis wird aber den begrenzten Potentialen nicht gerecht. Bei zusätzlicher Berücksichtigung einer Budgetgrenze für den Biomasseeinsatz ergibt sich dann aber das Problem, dass diese neue Grenze so eng gezogen ist, dass sie nur in den seltensten Fällen eingehalten werden kann, nämlich nur noch bei bivalenten Wärmepumpen mit ergänzendem Pelletkessel oder theoretisch auch noch bei Kombination von Erdgas- und Holzpelletkesseln.

Der letzte Fall – die Kombination von zwei verschiedenen Kesseltypen im selben Wohngebäude-Neubau – erscheint dabei als überhaupt nicht mehr realistisch oder praxisgerecht. Der zusätzliche Biomasse-Zielwert würde also dazu führen, dass in dem Konzept Biomasseheizungen (anders als Erdgasheizungen) kaum noch überhaupt realisiert werden könnten. Vor diesem Hintergrund ergibt sich aber eine weitergehende Überlegung, um diesen Widerspruch zwischen theoretischem Anspruch und praktischer Umsetzung wieder aufzulösen: In einem gedachten zukünftigen Neubau ließen sich die gleichzeitig gegebenen Zielwerte für die Minimierung der Treibhausgasemissionen und des Biomasseverbrauchs auch dadurch erreichen, dass diese nicht in jedem Einzelgebäude für sich, sondern in der Gesamtheit der Gebäude erreicht würden. Es wäre also möglich und insgesamt immer noch zielkonform, dass ein gewisser Teil der Gebäude den Emissionszielwert, ein anderer Teil den Biomassezielwert überschreitet.

Sinnvoll erscheint daher eine Erweiterung des bisherigen Bilanzansatzes, bei dem auch dem Einzelgebäude mehr Flexibilität bei der Erreichung der Zielwerte zugestanden wird. Bei einem solchen Konzept sollte es dann möglich sein, dass Gebäude, die selbst Biomasse verbrauchen, von der starken Unterschreitung der Treibhausgasziele profitieren und dadurch einen überdurchschnittlichen Biomasseverbrauch rechtfertigen können. Umgekehrt könnten Gebäude, die keine Biomasse in Anspruch nehmen, das allgemeine Treibhausgasziel noch etwas überschreiten.

Dieser Gedanke wird im Projekt aufgegriffen und weiterentwickelt. Neben Erdgas und Holz werden auch die Energieträger Sonne und Wind in die Überlegung mit einbezogen. Zusammen genommen handelt es sich also um diejenigen vier Energieträger, aus denen der Wärmebedarf der Gebäude zukünftig weitgehend gedeckt werden muss[30]. Gleichzeitig ist bei allen Energieträgern von begrenzten Potentialen im Gesamtsystem auszugehen: Bei der Biomasse ist eine Potentialgrenze im herkömmlichen Sinne, d.h. aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit, vorhanden. Beim Erdgas ist die Verwendung auf mittlere Sicht nicht durch die Ressourcenvorkommen, sondern vielmehr durch das Ziel der Treibhausgasminderung begrenzt. Das Treibhausgasziel kann aber ebenfalls als eine Potentialgrenze interpretiert werden. Im Fall von Wind und Sonne sind die Potentiale insbesondere durch die begrenzten Flächen zur Installation von Windkraft- bzw. Solaranlagen limitiert. Vor diesem Hintergrund lassen sich grundsätzlich ebenso wie für Biomasse und Erdgas auch für Wind- und Solarenergie Potentialgrenzen für die Wohngebäude-Wärmeversorgung definieren.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 62 bis Abbildung 64) zeigen den unterschiedlichen Umgang mit Potentialgrenzen bei verschiedenen Bewertungsmethoden, nämlich für den im Rahmen der Energieeinspar-

[30] Vergleiche hierzu auch die Analysen im Teil 1 des Endberichts [Diefenbach et al. 2019], insbesondere den Ansatz zum vereinfachten Modell in Kapitel 4. Die Beschränkung auf Erdgas als fossiler Brennstoff ist bei der Betrachtung des Neubaus noch einmal besonders gerechtfertigt, da Heizöl hier bereits jetzt kaum noch eine Rolle spielt (vgl. [Cischinsky/Diefenbach 2018]). Mögliche „Zukunftsenergien“ wie Tiefen-Geothermie oder aus Solar- bzw. Windkraft gewonnene synthetische Brennstoffe werden hier nicht berücksichtigt.

verordnung (EnEV) üblichen Bilanzansatz, für die übliche Bilanz von Nullenergie- bzw. Nullemissionshäusern und schließlich für das hier vorgestellten Verfahren. In der Darstellung wird zur besseren Vergleichbarkeit und in Anlehnung an das im Folgenden vorgestellte Konzept der Brennstoffverbrauch (und nicht der Primärenergiebedarf oder die Treibhausgasemissionen) betrachtet.

Abbildung 62 zeigt vor diesem Hintergrund den Bilanzierungsansatz nach Energieeinsparverordnung (EnEV). Durch die Primärenergieanforderung wird der Brennstoffeinsatz von fossilen Energieträgern eingeschränkt. Biomasse wird zwar im (nicht-fossilen) Primärenergiebedarf aufgrund des Aufwandes für die Gewinnung und Aufbereitung angerechnet, allerdings ist der Primärenergiefaktor so niedrig, dass der Brennstoffeinsatz der Biomasse in der Bewertung kaum von Belang ist ($Q_{B,Bio} \approx 0$). Gleichzeitig sind für die Biomassepotentiale keine Grenzen angenommen. Das Gleiche gilt für Wind- und Solarenergie, die ebenfalls nicht zum fossilen Brennstoffeinsatz beitragen und für die ebenfalls keine Potentialgrenzen berücksichtigt werden. PV-Stromerzeugung im Gebäude kann zu einem gewissen Anteil direkt im Haus angerechnet werden, es gibt aber keine Gutschriften für eingespeisten Strom.

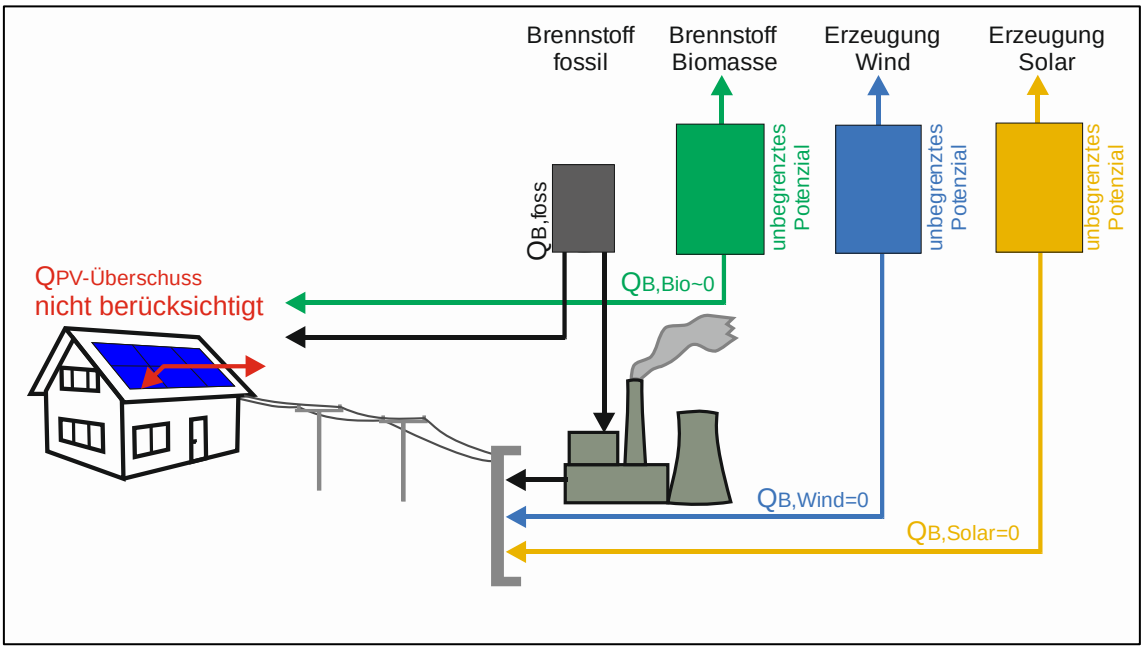


Abbildung 62: Grundsätzliche Bilanzierungssystematik nach EnEV

Bei der üblichen Bilanzierung von Nullenergie-/Nullemissions- bzw. Plusenergiehäusern nach Abbildung 63 ist der Ansatz nicht grundsätzlich anders. Der Einsatz fossiler Brennstoffe wird zunächst zugelassen, kann aber nun durch eine Gutschrift aufgrund von selbst produziertem Photovoltaikstrom egalisiert werden. Die Höhe der Gutschrift orientiert sich in der Regel am aktuellen Strommix.

Da unklar ist, wie Überschussstrom zukünftig tatsächlich in einem System mit sehr viel Solar- und Windenergie genutzt werden kann, stellt diese Gutschrift vermutlich zukünftig eine zu optimistische Betrachtungsweise dar. Außerdem werden Potentialgrenzen der emissionsfreien (oder -armen) Energieträger Biomasse und Windenergie in den Konzepten weiterhin zumeist nicht berücksichtigt.

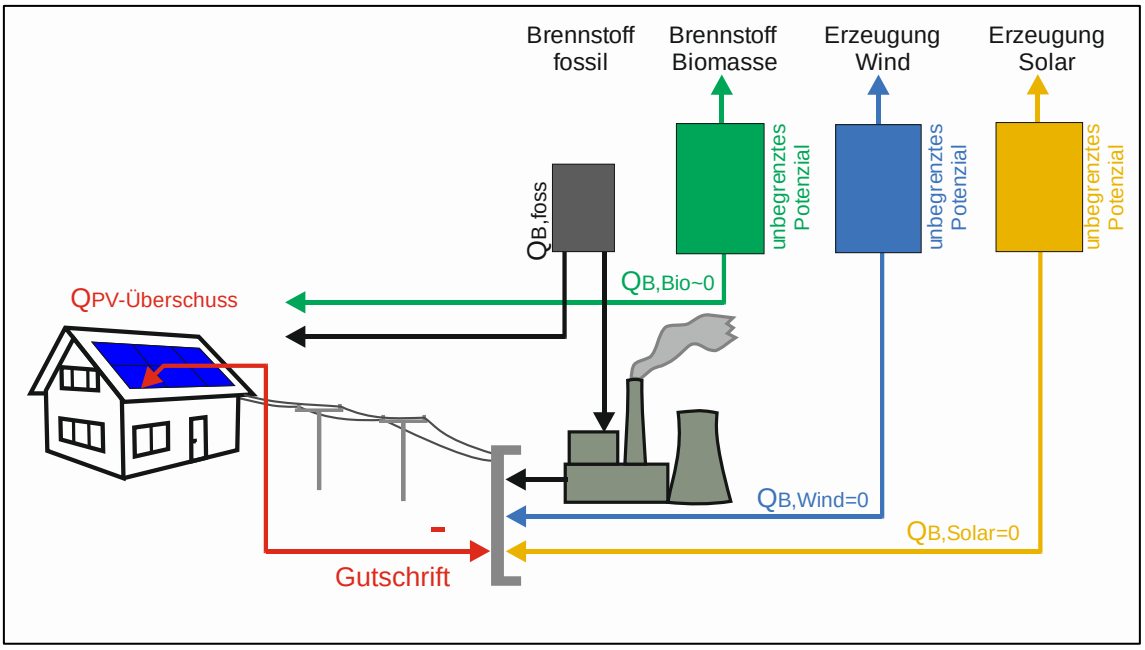


Abbildung 63: Bilanzierung von Nullemissions-, Nullenergie- oder Plusenergie-Gebäuden

Abbildung 64 zeigt nun durch begrenzte Balkenhöhen auch bei Biomasse, Wind- und Solarenergie die Annahme eingeschränkter Potentialgrenzen bei allen Energieträgern im vorgestellten Konzeptansatz. Eine Gutschrift für überschüssigen Solar- und Windstrom wird ebenfalls noch berücksichtigt, allerdings soll sich in deren Höhe der Umstand widerspiegeln, dass zukünftig in erheblichem Umfang Solar- und Windenergie schon im allgemeinen Stromnetz vorhanden sind und daher der zusätzlich eingespeiste Solarstrom nicht vollständig nutzbar ist.

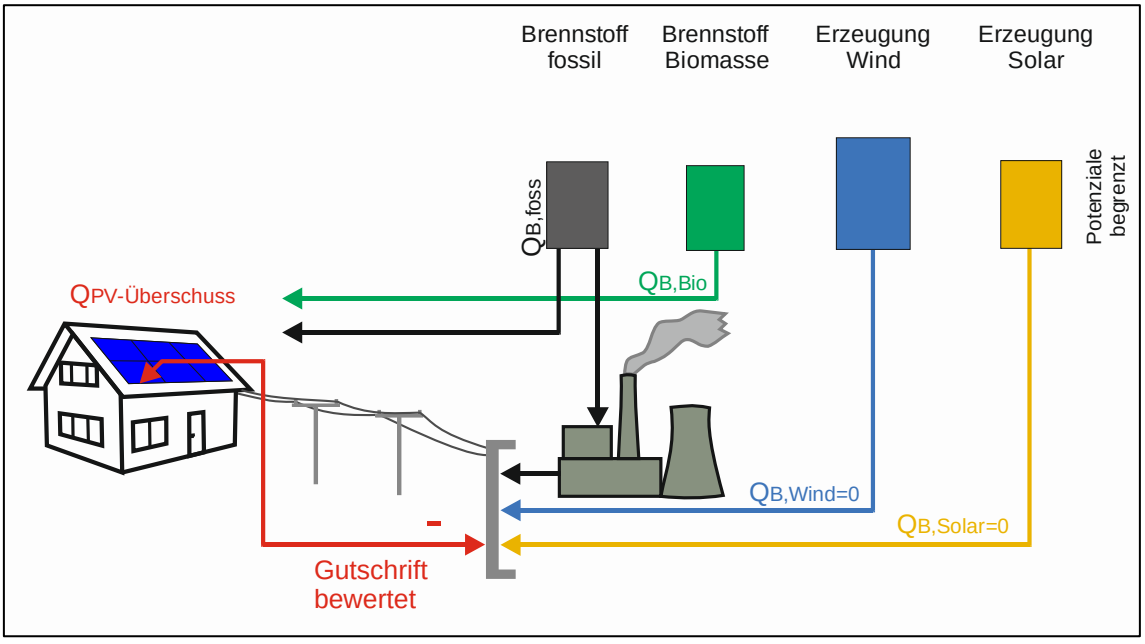


Abbildung 64: Berücksichtigung von Potentialgrenzen für alle Energieträger bei der Bilanzierung von zukunftsfähigen Gebäuden

Im neuen Konzept müssen nun die globalen Potentialgrenzen im Gesamtsystem in sinnvoller Weise mit der auf Einzelgebäude bezogenen Betrachtung des zukunftsfähigen Neubaus zusammengebracht werden. Insbesondere ist die oben für Erdgas und Biomasse beschriebene Situation aufzugreifen, die nun auf alle vier Potentiale gemeinsam zu trifft: Es ist nicht notwendig bzw. aus Sicht einer praxisgerechten Anlagentechnik auch nicht sinnvoll, dass jedes Gebäude alle vier Potentialgrenzen gleichzeitig einhält bzw. ausschöpft. Notwendig ist aber ein Mechanismus, der darauf hinwirkt, dass die Potentialgrenzen insgesamt (über alle Gebäude hinweg) möglichst eingehalten werden. Um einen solchen Mechanismus zu etablieren ist es weiterhin notwendig, dass die Verbräuche der verschiedenen Energieträger und damit die Inanspruchnahme der jeweiligen Potentiale ineinander umgerechnet werden können.

Zur Lösung dieser Aufgabenstellung wird folgender Ansatz gewählt: Zunächst werden für die einzelnen Energieträger generelle Potentialgrenzen im zukünftigen Wohngebäudebestand definiert und auf dieser Grundlage mittlere wohnflächenspezifische Zielwerte ermittelt[31]. Als Leitgröße dient dabei der Erdgasverbrauch, der stellvertretend für die Einhaltung der Treibhausgasziele steht, während mit dem Verbrauch von Holz, Sonne und Wind (fast) keine Treibhausgasemissionen verbunden sind. Ein Einzelgebäude kann nun mit seinem Verbrauch dieser verschiedenen Energieträger über oder unter den ihm zustehenden Potentialgrenzen liegen, die sich aus den wohnflächenspezifischen Zielwerten multipliziert mit der Gebäudewohnfläche ergeben. Wenn auf diese Weise individuelle Potentialgrenzen von Holzenergie, Sonne oder Windkraft überschritten werden, verringert sich das entsprechende Potential für den restlichen Wohngebäudebestand. Zum Ausgleich muss dann im restlichen Bestand mehr Erdgas verbraucht werden. Umgekehrt führt eine Nichtausschöpfung der Holz-, Wind- bzw. Solarpotentiale dazu, dass diese Energieträger im Gesamtbestand verstärkt zur Verfügung stehen, so dass dort der Erdgasverbrauch abgesenkt werden kann.

Durch diese „Systemantwort“ des gesamten zukünftigen Wohngebäudebestandes auf die unterschiedliche Inanspruchnahme der jeweiligen Energieträger im Einzelgebäude können also die Verbräuche der unterschiedlichen Energieträger in äquivalente („bewertete“) Erdgasverbräuche umgerechnet werden. Der auf diese Weise definierte äquivalente Erdgasverbrauch des Gebäudes ist damit der Bewertungsmaßstab für diesen neuen Bilanzansatz.

5.2 Bilanzierungsansatz für den zukunftsfähigen Neubau

Für die Berechnung der Höhe der Systemantwort, also der Höhe der Mehr- bzw. Minderverbräuche im Gesamtsystem müssen der zukünftige Wohngebäudebestand und seine Energieversorgungstechnik zumindest in Grundzügen bekannt sein. Diese Fragestellung wurde in Teil 1 des Projektendberichts untersucht [Diefenbach et al. 2019]. Um Anhaltswerte für die Reaktion des Gesamtsystems, d.h. für die Faktoren zur Umrechnung der verschiedenen Energieträger in Erdgasverbräuche zu erhalten, wurden Ergebnisse aus diesem Bericht herangezogen. Insbesondere wurden dabei Ergebnisse des „vereinfachten Modells“ in Kapitel 4 verwendet. Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass in den individuellen Gebäuden erzeugte Solarstromüberschüsse mit bereits bestehenden hohen Anteilen von Solar- und Windstrom im Gesamtsystem konkurrieren, so dass neuer Solarstrom im Gesamtsystem nur teilweise zur Verdrängung von Strom aus brennstoffbetriebenen (Erdgas-)Kraftwerken führt.

Generell ist hier also einerseits zu beachten, dass es sich bei den im Folgenden angegebenen Zahlenwerten und Faktoren um grobe Anhaltswerte handelt – je nach zugrunde liegendem Zukunftsszenario könnten hier auch andere Zahlenwerte begründet werden. Anderseits ist durch den Bezug zu den untersuchten Zukunftsvarianten in Teil 1 des Projektberichts das Ziel erreicht, dass sich zukunftsfähige Gebäude nicht aus Sicht eines heutigen (vorübergehenden) Zustands der Energieversorgung, sondern aus einer plausiblen zukünftigen Situation begründen lassen.

[31] In den folgenden Kapiteln 5.2 und 5.3 wird gezeigt, dass hier verschiedene Abstufungen möglich sind, indem nicht immer alle Potentiale gleichzeitig angerechnet werden können.

Die Überlegungen im vorherigen Abschnitt münden nun in einem Gesamtkonzept für die energetische Bilanzierung eines zukunftsfähigen Neubaus, durch welches einzelnen Gebäuden eine flexible Reaktion auf Potentialgrenzen im Gesamtbestand ermöglicht wird. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Bilanzierung auf Basis der folgenden Ansätze:

1. Der Erdgas- und Stromverbrauch wird durch Wärmeschutz, effiziente Anlagentechnik und den Einsatz von Solarenergie am Gebäude minimiert. Für den vom Gebäude bezogenen **elektrischen Strom** (als Hilfsstrom oder für die eigentliche Wärmeerzeugung) wird der entsprechende Erdgasverbrauch in den Kraftwerken angesetzt. Zukünftig wird vom Einsatz effizienter Erdgas-Kraftwerke ausgegangen, die im Mittel einen Jahreswirkungsgrad von ca. 54 % aufweisen[32]. Pro Kilowattstunde Strombezug sind also 1/0,54 = 1,85 kWh Erdgasverbrauch anzurechnen. Regenerative Energien im Stromnetz werden nicht hier, sondern in separaten Gutschriften berücksichtigt (siehe nächste Punkte).
2. Es wird davon ausgegangen, dass für den zukunftsfähigen Neubau kein Solarstrom im allgemeinen Netz zur Verfügung steht, sondern dass dieser vielmehr durch die neu entstehenden Dachflächen auf dem Gebäude selbst installiert werden muss[33]. Ein **Überschuss an Photovoltaikstrom** (über den selbst genutzten Anteil hinaus) wird dem Gebäude in Form einer Brennstoff-Gutschrift angerechnet, die in ihrer Höhe dem tatsächlichen Nutzen in einem zukünftigen Gesamtsystem „Wärmeversorgung Wohngebäude“ entspricht.

   Die Höhe dieser Gutschrift lässt sich auf Basis der im Projekt durchgeführten Parameterstudien ungefähr abschätzen: Die Ergebnisse in Teilbericht 1 (siehe [Diefenbach et al. 2019]) zeigen, dass in einem zukünftigen Wohngebäudebestand, in dem die Klimaziele (Ansatz 87,5 %-Reduktion) eingehalten werden und daher ohnehin schon hohe Anteile von Solar- und Windstrom genutzt werden, eine Kilowattstunde Solar- und Windstrom mit Hilfe von Wärmepumpen über weite Bereiche des regenerativen Energieeinsatzes in etwa zwei kWh Wärme umgewandelt werden kann. Bei weiter steigenden Deckungsgraden der Wind- und Solarenergie im Gesamtbestand sinkt die Effizienz der Umwandlung von Strom in Wärme allerdings deutlich ab[34]. Um hier für zukunftsweisende Gebäude eher strenge Anforderungen zu stellen, wird als vorsichtiger Ansatz von einer um ein Sechstel geringeren Effizienz der Umwandlung von ca. 1,66 ausgegangen. Eine Kilowattstunde Solar- oder Windstrom lässt sich also nach dieser Abschätzung in 1,66 kWh Wärme umwandeln. Damit kann die Wärmeerzeugung aus Erdgas im Gesamtsystem zurückgedrängt werden. Für den Nutzungsgrad der Wärmeerzeugung aus Erdgas wird im vereinfachten Modell gemäß Teil 1 des Endberichts ein Wert von ca. 125 % angenommen (unter Verwendung von Wärmepumpen und KWK-Anlagen, vgl. hierzu [Diefenbach et al 2019, Kap. 4.2]). Zur Erzeugung derselben Wärmemenge von 1,66 kWh werden demnach 1,66/1,25 = 1,33 Kilowattstunden Erdgas benötigt. Im Resultat verdrängt also

[32] Zusammengesetzt aus 90 % Erdgas-GuD mit 57 % Jahresnutzungsgrad (unter Berücksichtigung von Teillastbetrieb, sonst noch höhere Werte) und 10 % Gasturbinen-Spitzenlast-KW mit 37 % Jahresnutzungsgrad; die Aufwandszahlen werden gewichtet addiert, also die Kehrwerte der Wirkungsgrade, nicht die Wirkungsgrade selbst.

[33] Ein gelber Balken für ein externes Solarenergiepotential wie in Abbildung 64 wird hier also für den zukunftsfähigen Neubau nicht berücksichtigt.

[34] Vergleiche hierzu insbesondere [Diefenbach et al. 2019], Kapitel 4.3. Hier wird der Mittelwert im Gesamtbestand angesetzt, d.h. die insgesamt durch PV/Windstrom bereitgestellte Wärme dividiert durch die PV/Windstrommenge. Der Grenzertrag von Anlagen, die am Ende in einen schon voll mit Solar- und Windstrom ausgestatteten Bestand zugebaut werden, ist noch weitaus niedriger. Es erscheint aber nicht gerechtfertigt, für die zukunftsfähige Neubauten nur diesen Grenzertrag anzusetzen: Neue Gebäude entstehen über die gesamte Periode bis 2050 hinweg, die Anforderungen an den zukunftsfähigen Standard sollten also einen solchen „mittleren“ Effekt der Neubauten und ihrer Solarstromanlagen abbilden.

nach dieser Abschätzung eine Kilowattstunde Photovoltaikstrom aus dem betrachteten Gebäude ca. 1,33 Kilowattstunden Erdgas im restlichen Wohngebäudesektor[35].

3. Dem Gebäude wird auch ein bestimmtes **Windstrompotential** zugerechnet: Die Untersuchungen im Teilbericht 1 (siehe [Diefenbach et al. 2019]) für den gesamten Wohngebäudebestand haben gezeigt, dass ohne erheblichen Einsatz von Windenergie die Klimaschutzziele kaum zu erreichen sind. Es erscheint daher sinnvoll, das zukünftige Gesamtpotential an Windenergie anteilig auf alle Gebäude (bezogen auf die Wohnfläche) herunter zu brechen[36]. Überschlägige Potentialabschätzungen im Projekt liegen in einem Bereich von 50 – 100 TWh/a. Bei zukünftig rund 4 Mrd m² Wohnfläche[37] ergeben sich damit 12,5 – 25 kWh/(m²a) Windstrom. Als (vorläufiger) Ansatz werden, eher im unteren Bereich des Intervalls, 15 kWh/(m²a) festgelegt. Mit dieser Windstrommenge werden 1,33 Kilowattstunden x 15 kWh/(m²a) = 20 kWh/(m²a) Erdgas im Gesamtsystem ersetzt. Jeder zukunftsfähige Neubau kann sich also diesen Betrag als Gutschrift auf seinen Erdgasverbrauch anrechnen[38].
4. Auch ein **Biomassepotential** steht für den Wohngebäudesektor zur Verfügung, und zwar gemäß Standardannahme im Projekt in Höhe von 50 TWh/a (siehe Teilbericht 1 in [Diefenbach et al. 2019]). Heruntergebrochen auf die Wohnfläche sind dies 50 TWh/4 Mrd m² = 12,5 kWh/(m²a)[39]. Wenn in dem betrachteten Gebäude keine Biomasse eingesetzt wird, führt diese nicht genutzte Biomasse im restlichen Wohngebäudebestand zu der Möglichkeit, den Biomasseeinsatz auszuweiten und damit den Erdgaseinsatz und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Da Biomasse laut Systemanalyse im vereinfachten Modell vorrangig in Heizkesseln bzw. Öfen eingesetzt wird, also zum Lastausgleich bzw. zur Spitzenlastabdeckung, kann die eingesparte Biomasse den Erdgaseinsatz in konkurrierenden Heizkesseln ersetzen. Unter der Annahme, dass die Erdgaskessel einen rund 10 % höheren Jahresnutzungsgrad aufweisen, spart jede Kilowattstunde Biomasse rund 0,91 kWh Erdgas ein. Jedem zukunftsfähigen Gebäude, das selbst keine Biomasse verwendet, kann daher eine Erdgas-Gutschrift von 0,91 x 12,5 kWh/(m²a) = 11 kWh/(m²a) zugerechnet werden.
5. Biomasse (vorausgesetzt werden Holz bzw. Holzpellets) führt gemäß der hier getroffenen vereinfachten Annahmen nicht zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen (die allein durch Erdgas verursacht werden). Allerdings steht die im Gebäude selbst genutzte Biomasse nun nicht mehr für den restlichen Gebäudesektor zur Verfügung. Die Biomasse-Gutschrift reduziert sich also bei Verwendung von Biomasse entsprechend bzw. ändert im Fall einer Überschreitung des angenommenen Biomasse-Budgets von 12,5 kWh/(m²a) sogar das Vorzeichen: In diesem Fall wird nämlich Biomasse dem restlichen Gebäudesektor „entzogen“ und führt dazu, dass dort nun vermehrt Erdgas-

[35] Dieser Ansatz führt also aufgrund teilweiser nicht nutzbarer Solar- und Windstromüberschüsse zu einem anderen Ergebnis, als wenn man unterstellen würde, dass eine Kilowattstunde PV-Strom vollständig die Stromerzeugung in modernen Erdgas-Kraftwerken verdrängt und daher (gemäß Punkt 1) 1,85 kWh Erdgas einspart.

[36] Nicht sinnvoll erscheint dagegen die Forderung, den Windstrom am Gebäude selbst oder gebäudenah zu erzeugen.

[37] Ansatz im IWU-EPISCOPE-Szenario: 3,84 Mrd m² für 2050 [Diefenbach et al. 2015].

[38] Alternativ wäre es möglich, wie sonst üblich statt des Windpotentials beim Bezug von elektrischer Energie einen mittleren Anteil von erneuerbarer Energie (hier also Windenergie) im Strommix anzusetzen und damit den Brennstoff-Faktor für den Strombezug (1,85 laut Punkt 1) zu reduzieren. Ein solcher Ansatz würde aber die Gefahr einer Fehlsteuerung mit sich bringen, da durch den niedrigen Brennstofffaktor gegebenenfalls ein hoher Stromverbrauch angeregt würde, der im Gesamtsystem aber wegen begrenzter Windstrompotentiale womöglich an Grenzen stoßen würde. Auf diese Weise würde man dieselben Probleme erzeugen, die auch schon bei der Biomasse bei Annahme eines unbegrenzten Potentials als emissionsfreie Energiequelle zu verzeichnen sind.

[39] In dieser Betrachtung ergibt sich ein etwas weniger strenger Grenzwert als die in Kapitel 2 angenommenen 10 kWh/(m²a). Wie oben beschrieben sind die Zahlenwerte des Bilanzschemas exemplarisch zu verstehen und können je nach den Details der Bewertung und der zugrunde liegenden Zukunftsvariante für die Gesamtsituation im Wohngebäudesektor und bei der Energieversorgung auch anders ausfallen.

Heizkessel eingesetzt werden müssen. Jede zusätzlich genutzte Kilowattstunde Biomasse-Brennstoff führt dann also zu einem Mehrverbrauch von 0,91 kWh Erdgas (s.o., Punkt 4).

Vor diesem Hintergrund ergibt sich die allgemeine Bestimmungsgleichung für die Biomasse-Bilanz des Gebäudes (im Rahmen der im Folgenden betrachteten „bewerteten Erdgas-Bilanz“, also umgerechnet in eine äquivalente Menge von Erdgas):

(2) $$q_{Biomasse\text{-}Bilanz} = 0{,}91 \; x \; (q_{Bio,WV} - q_{Bio,WV,Budget})$$

mit:

$q_{Bio,WV}$: Biomasse-Verbrauch für die Wärmeversorgung im Gebäude

$q_{Bio,WV,Budget}$: Biomasse-Budget für die Gebäude-Wärmeversorgung = 12,5 kWh/m²a

Im Fall von $q_{Bio,WV}$ = 0 erhält man (gerundet) eine Wert von - 11 kWh/m²a. In dem Fall, dass das angenommene Biomasse-Potential gerade ausgeschöpft wird ($q_{Bio,WV}$ = 12,5 kWh/m²a) ist das Ergebnis Null, die Biomasse-Bilanz ist dann also ausgeglichen.

Der „bewertete“ Erdgas-Verbrauch des Neubaus $q_{Gas,WV,bewertet}$ für die Wärmeversorgung kann damit nach folgender Gleichung berechnet werden:

(3) $$q_{Gas,WV,bewertet} = q_{gas,WV} + q_{E,WV} \; x \; f_{BS,GasKW} - q_{E.PV\text{-}Überschuss} \; x \; f_{BS,PVWind} - q_{Wind\text{-}Gutschrift} + q_{Biomasse\text{-}Bilanz}$$

bzw.

(4) $$q_{Gas,WV,bewertet} = q_{gas,WV} + q_{E,WV} \; x \; f_{BS,GasKW} - q_{E.PV\text{-}Überschuss} \; x \; f_{BS,PVWind} - q_{Wind\text{-}Gutschrift} + 0{,}91 \; x \; (q_{Bio,WV} - q_{Bio,WV,Budget})$$

mit:

$q_{Gas,WV}$: jährlicher Erdgas-Verbrauch im Gebäude für die Wärmeversorgung [kWh/m²a]

$q_{E,WV}$: jährlicher Strombezug aus dem allg. Stromnetz für die Gebäude-Wärmeversorgung [kWh/m²a]

$f_{BS,GasKW}$: Brennstofffaktor für die allgemeine Stromerzeugung in Erdgas-Kraftwerken = 1,85

$q_{E,PV\text{-}Überschuss}$: Ins allgemeine Stromnetz gelieferter Überschuss der Gebäude-Photovoltaik [kWh/m²a]

$f_{BS,PVWind}$: Brennstofffaktor für Einsparung von Erdgas durch PV-/Windstrom im Gesamtsystem = 1,33

$q_{Wind\text{-}Gutschrift}$: Gutschrift für den dem Neubau zustehenden Anteil am Wind-Potential = 20 kWh/m²a

$q_{Biomasse\text{-}Bilanz}$: Gutschrift für die nicht erfolgte Nutzung des dem Gebäude zustehenden Biomasse-Potentials; vorläufiger Wert für Gebäude ohne Biomasse-Einsatz = - 11 kWh/m²a (vorläufig) bzw. Biomassebilanz, wenn Biomasse verbraucht wird

Um unter diesen Voraussetzungen den Standard eines klimaneutralen Neubaus („Null-Emissions-Haus“) zu erreichen, muss nun folgende Bedingung erfüllt sein:

(5) $$q_{Gas,WV,bewertet} \leq 0 \; (Definition \; für \; das \; Null\text{-}Emissions\text{-}Haus)$$

5.3 Varianten des zukunftsfähiger „Null-Emissions-Gebäude“

Die bis hierhin geschilderte Situation stellt einen Sonderfall dar: Einerseits wurde dem Gebäude, da es sich um einen zukunftsfähigen Neubau handeln soll, kein externes Solarenergiepotential zugewiesen, und es wird die Grenze „Null“ beim bewerteten Erdgasverbrauch gesetzt[40]. Andererseits wurden dem Gebäude noch relevante Potentiale für Biomasse und Windstrom zugewiesen. Durch abweichende Annahmen zu den jeweiligen Potentialen lassen sich hier aber auch unterschiedlich strenge Kriterien für zukunftsfähige „Null-Emissions-Gebäude“ festlegen und auf diese Weise unterschiedliche Abstufungen definieren:

- Null-Emissions-Haus Stufe 1 (mit Wind- und Biomassebudget):
  Diese Stufe stellt die minimale Stufe für zukunftsfähige Neubauten dar (wie in Kapitel 5.2 beschrieben), die unter Inanspruchnahme sowohl eines Windkraft- als auch eines Biomassebudgets erreicht wird.
- Null-Emissions-Haus Stufe 2a (ohne Biomassebudget):
  Alternativ könnte man verlangen, dass die „Null-Emissions-Bedingung“ auch ohne zusätzliche Belastung der knappen Biomassepotentiale erreicht wird. Biomasse-Einsatz in den Null-Emissions-Neubauten könnte dann weiterhin zugelassen werden, das Biomasse Budget von 12,5 kWh/m²a dürfte aber nicht mehr angerechnet werden (weder in Gebäuden mit Erdgas- noch mit Biomasseverbrauch). Die Größe $q_{Bio,WV,Budget}$ wäre nun also folglich auf null zu setzen, und in der Biomasse-Bilanz ergäbe sich bei Verwendung von Biomasse im Gebäude immer ein positiver, auf die bewertete Erdgas-Bilanz anzurechnender Wert von 0,91 x $q_{Bio,WV}$ bzw. bestenfalls der Wert null, wenn im Gebäude keine Biomasse eingesetzt wird. Eine solche Definition würde zu „brennstoffneutralen“ Gebäuden führen: Im Gesamtsystem könnte durch die zusätzlichen Neubauten nicht nur der Erdgaseinsatz (und damit der Treibhausgasausstoß), sondern gleichzeitig auch der Biomasseeinsatz auf dem ursprünglichen Niveau gehalten werden.
- Null-Emissions-Haus Stufe 2b (ohne Windbudget):
  Man könnte verlangen, dass Null-Emissions-Gebäude die (voraussichtlich knappen) Windstrompotentiale im restlichen Gebäudesektor nicht belasten dürfen. In diesem Fall wäre der Term $q_{Wind-Gutschrift}$ in der Definitionsgleichung von $q_{Gas,WV,bewertet}$ auf null zu setzen.
- Null-Emissionshaus Stufe 3 (ohne Wind- und Biomassebudget):
  Wenn man gleichzeitig die Windgutschrift und das Biomasse-Budget streicht, verbleibt zur Kompensation des Erdgas- bzw. Biomasseverbrauchs im Gebäude allein die Gutschrift aufgrund des selbst erzeugten Solarstrom-Überschusses. Ein solcher Ansatz würde also ein Gebäude definieren, das sich hinsichtlich aller drei Energieträger Erdgas, Biomasse und Windenergie, in denen enge Nutzungsgrenzen[41] zu beachten sind, neutral verhält und keines dieser Potentiale angreift. Mit einer gewissen Berechtigung kann man hier also von einem Null-Energie-Haus „im eigentlichen Sinne“ sprechen, da alle knappen Energieträger geschont werden[42].

[40] Dieser Ansatz wird auch im Folgenden für den zukunftsfähigen Neubau aufrechterhalten. In anderen Zusammenhängen (etwa bei der Bewertung von Bestandsgebäuden) ergäben sich durch Hinzunahme eines Erdgaspotentials (also einem Grenzwert größer als null in der Ungleichung) mögliche Ansätze für ein nicht mehr klimaneutrales, sondern (in einem verallgemeinerten Sinne) klimagerechtes Gebäude. Auch ließe sich in einem anderen Kontext (etwa bei Bestandsgebäuden ohne solar nutzbare Dachfläche) die Hinzunahme eines externen Solarenergiepotentials begründen.

[41] Bei Erdgas besteht die Nutzungsgrenze wegen der Klimaschutzziele, bei Biomasse und Wind gibt es tatsächliche (enge) Potentialgrenzen.

[42] Als Viertes ist hier auch die Solarenergie einzuschließen: Deren Potentiale (außerhalb des Gebäudes selbst) werden hier und auch in den anderen Null-Emissionshaus-Stufen ebenfalls nicht angegriffen, vielmehr wird ja angenommen, dass durch das Gebäude im Regelfall sogar ein PV-Überschuss bereitgestellt wird.

Tatsächlich handelt es sich hier auch quasi um den „klassischen“ Ansatz für das Null-Energie- bzw. Null-Emissions-Haus, allerdings mit dem wesentlichen Unterschied, dass der Photovoltaik-Strom nun rechnerisch nicht mehr die Stromerzeugung im heutigen Stromnetz kompensiert, sondern sich im zukünftigen Gesamtsystem einordnet und ihm daher eine deutlich geringere Brennstoff-Gutschrift (nur 1,33 x Überschussstrom) zukommt als in bisherigen Ansätzen üblich. Das Ziel, ein Null-Emission-Haus Stufe 3 bzw. Null-Energie-Haus unter diesen Voraussetzungen zu erreichen, ist damit sehr anspruchsvoll.

- Null-Emissionshaus Stufe 4:
  Der komplette Verzicht auf jedwede Gutschrift (auch durch die Gebäude-eigene PV-Anlage) würde dazu führen, dass im Gebäude keinerlei Brennstoffe verbraucht werden und auch kein Strom aus dem allgemeinen Netz für die Wärmeversorgung bezogen werden darf. Hier handelt es sich dann also um das „energieautarke Haus“. Dieser Ansatz wird als in der Breite nicht zielführend angesehen und wird aus diesem Grund im Folgenden nicht weiter diskutiert.

5.4 Anwendung des Berechnungsansatzes

Im Folgenden soll der Ansatz des bewerteten Erdgasverbrauchs exemplarisch angewendet und mit der Bewertung auf Basis von Treibhausgasemissionen verglichen werden. Abbildung 65 zeigt die THG-Emissionen für ein EFH als EH55 ohne WRG und als EH40 mit WRG mit jeweils den Anlagentechniken Luft-Wasser-Wärmepumpe, Erdreich-Wärmepumpe, Gas-Brennwertkessel, Gas-Brennwertkessel mit Mini-Wärmepumpe sowie Holz-Pelletkessel. Alle Gebäude besitzen eine PV-Anlage, die 2/3 der verfügbaren Dachfläche ausnutzt, der Haushaltsstrom ist nicht berücksichtigt, da die Betrachtung für den bewerteten Erdgasverbrauch die Wärmenutzung von Strom berücksichtigt und die Gewichtungsfaktoren für Brennstoff bestimmt sind.

Von den 5 Varianten des EH55 ohne WRG erreichen nur die Versorgung mit Erdreich-Wärmepumpe und mit Pellet-Kessel die angestrebten THG-Emissionen. Beim EH40 mit WRG liegen beide Wärmepumpenvarianten unter dem Zielwert, außerdem das mit Holz-Pellets versorgte Gebäude. Die beiden Varianten mit Gas-Brennwertkessel überschreiten beim EH40 mit WRG die THG-Ziele leicht.

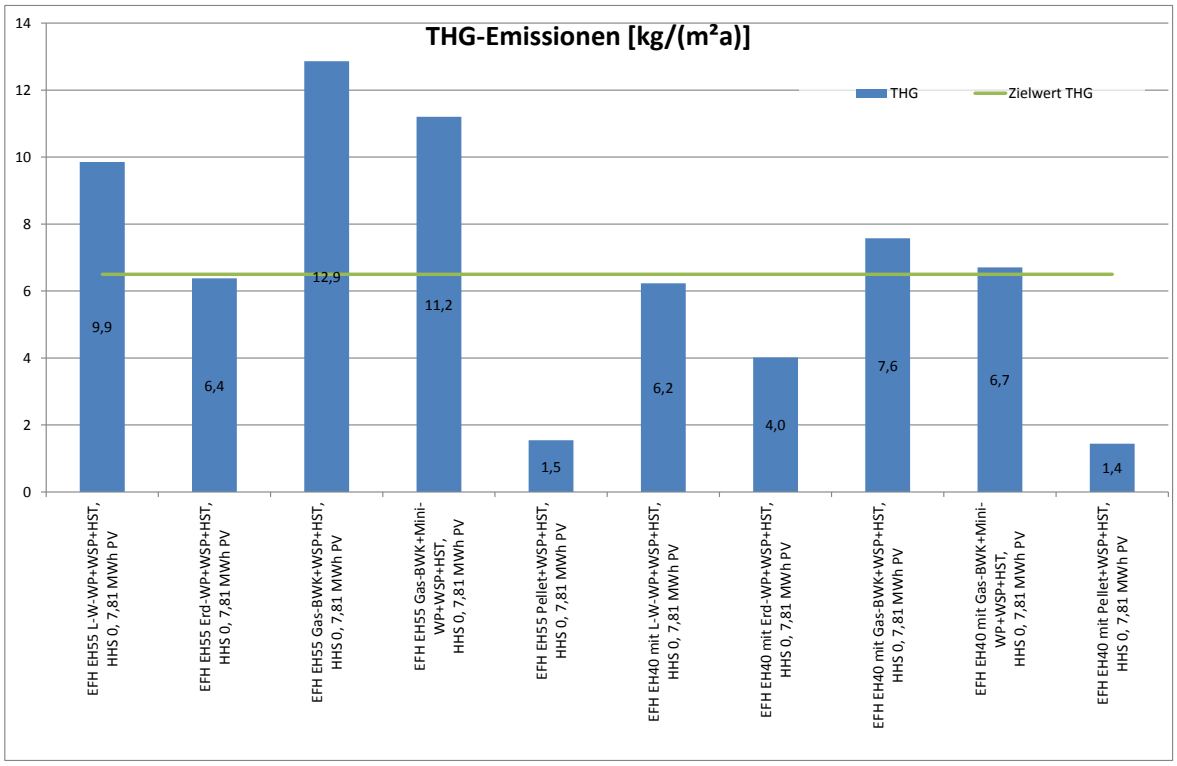


Abbildung 65: Treibhausgasemissionen eines EFH als EH55 und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Betrachtet man den Brennstoffverbrauch dieser Varianten (Abbildung 66), so verhalten sich sowohl beim EH55 als auch beim EH40 mit WRG die Varianten mit Wärmepumpe und Erdgasversorgung genauso wie bei den THG-Emissionen, da Strom und Erdgas auf Erdgas zurück geführt werden. Der Brennstoffverbrauch für Biomasse der mit Holz-Pellets versorgten Gebäude liegt jedoch teilweise um ein Mehrfaches über dem Zielwert für Biomasse[43]. Somit unterscheidet sich die Bewertung für ein Gebäude, je nachdem, ob die Treibhausgasemissionen oder die Einhaltung des Biomassebudgets betrachtet werden.

[43] Im Gegensatz zu Wärmepumpen, die nur anteilig ihrer Jahresarbeitszahl Strom einsetzen, müssen Kessel immer 100 % der benötigten Wärme erzeugen, zusätzlich sind die Umwandlungsverluste zu decken.

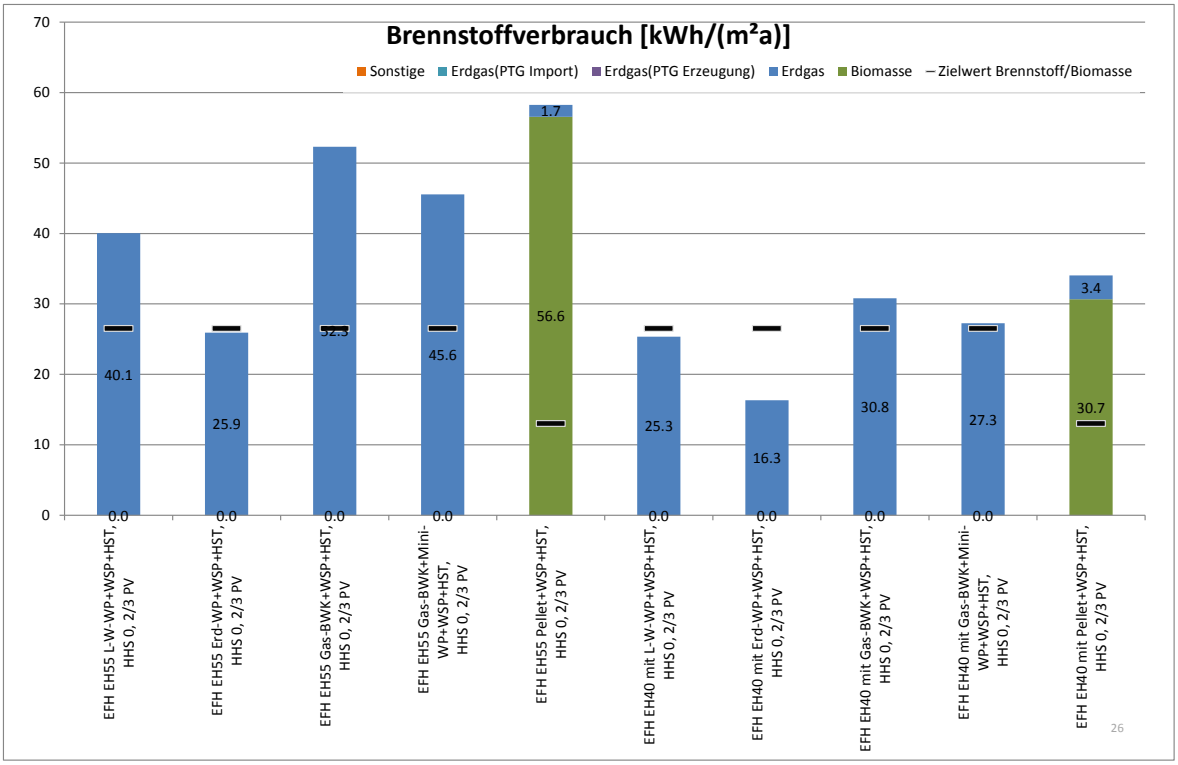


Abbildung 66: Brennstoffverbrauch eines EFH als EH55 und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Betrachtet man nun den bewerteten Erdgasverbrauch, wie er in Kapitel 5.2 bis 5.3 vorgestellt wurde, so ergibt sich je nach angestrebter Stufe ein sehr unterschiedliches Bild. In Abbildung 67 sind für die oben gezeigten Varianten die unterschiedlichen Stufen der Bewertung (1, 2a, 2b, 3) sowie der „klassische Plusenergie-Ansatz“ mit Gutschriften für eingespeisten Überschussstrom in Höhe des Strommixes (nicht mit den noch höheren Verdrängungsstrommix gerechnet) dargestellt.

Die Stufe 1 (Nutzung aller Budgets, jeweils erste Säule) wird sowohl beim EH55 ohne WRG als auch EH40 mit WRG mit allen Versorgungsvarianten erreicht und es ergeben sich negative bewertete Erdgasverbräuche. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Anforderung hier nicht besonders ambitioniert sind. Gleichzeitig erreichen beim EH55 ohne WRG drei und beim EH40 mit WRG zwei Varianten nicht die THG-Emissionsziele (siehe Abbildung 65).

Wird bei der Bilanzierung das Biomassebudget nicht angerechnet (Stufe 2a) – unabhängig davon, ob Biomasse im Gebäude eingesetzt wird oder nicht – erreichen beim EH55 ohne WRG nur noch die beiden Varianten mit Wärmepumpe einen negativen bewerteten Erdgasverbrauch, die Kombination von Gas-Brennwertkessel und Mini-Wärmepumpe ist ausgeglichen und Gas-Brennwertkessel monovalent und Pelletkessel erreichen die Stufe 2a nicht mehr. Beim EH40 mit WRG wird die Stufe 2a von allen Varianten erreicht, auch mit Pelletkessel.

Wird auf die Windgutschrift – die höher liegt als die Biomassegutschrift – verzichtet (Stufe 2b), erreicht beim EH55 ohne WRG nur noch die Variante mit Erdreichwärmepumpe einen negativen bewerteten Erdgasverbrauch, beim EH40 mit WRG erreichen alle Varianten noch dieses Ziel.

Wenn keines der Budgets (Biomasse und Wind) für das Gebäude genutzt werden darf (Stufe 3), kann beim EH55 ohne WRG nur das Gebäude mit Erdreich-Wärmepumpe noch einen negativen bewerteten Brennstoffverbrauch erreichen, beim EH40 mit WRG schaffen das nur die Ausführung mit Erdgas-Brennwert- oder Holz-Pelletkessel nicht.

Zum Vergleich ist auch noch die „klassische“ Primärenergiebilanz mit Gutschriften für eingespeisten Überschussstrom in Abbildung 67 dargestellt. Die Ergebnisse liegen meist zwischen Stufe 2b und Stufe 3, beim Einsatz von Biomasse ergibt sich mit Primärenergiegutschriften aber grundlegend bessere Bewertung, die die begrenzte Verfügbarkeit von Biomasse nicht berücksichtigt.

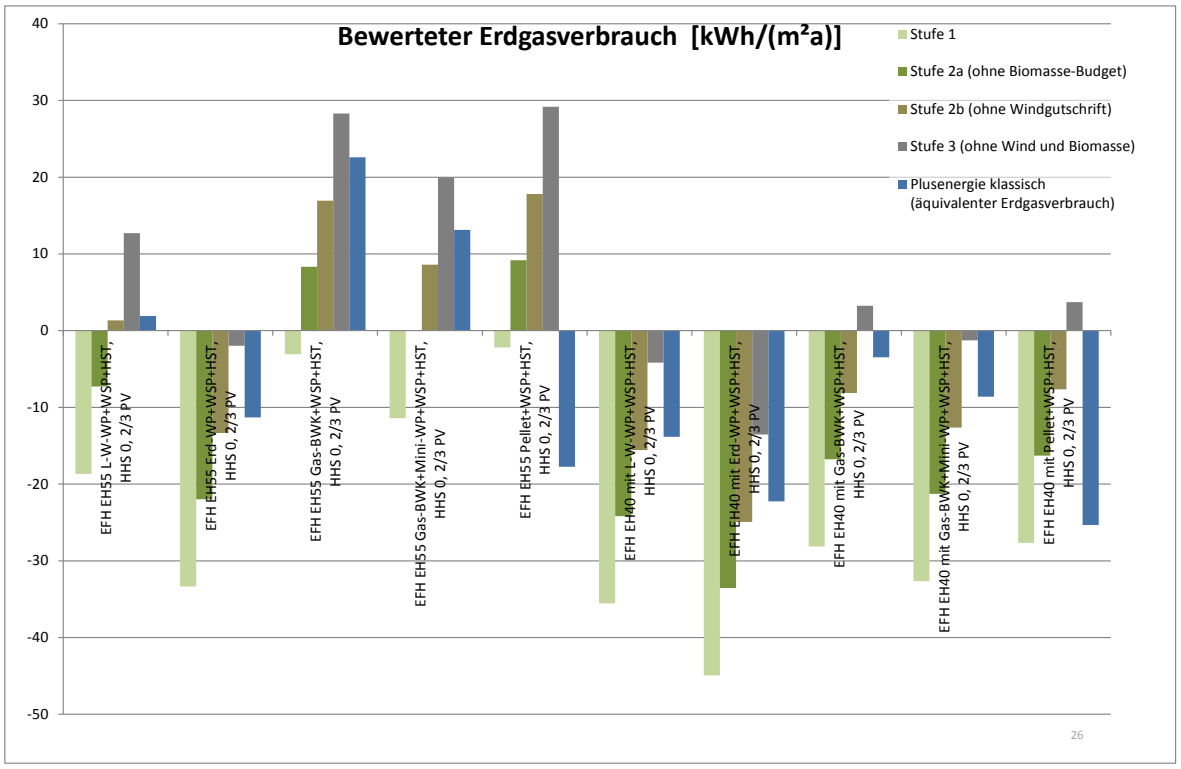


Abbildung 67: Bewerteter Brennstoffverbrauch eines EFH als EH55 und als EH40 mit WRG mit je fünf unterschiedlichen Techniken zur Wärmeversorgung sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Analysiert man in Kapitel 4.2 die Varianten, die entweder das THG-Ziel oder das Brennstoff- bzw. Biomasseziel im Gebäudestandard EH55 ohne WRG knapp verfehlen, so zeigt sich, dass von allen Varianten die Stufen 1 sowie 2a eingehalten werden (Abbildung 68). Wird die PV-Fläche bei einem Gebäude mit bivalenter Wärmepumpe und Erdgas-Spitzenlastkessel maximiert, so erfüllt dieses Gebäude sogar die höchste Stufe 3.

Vergleicht man das Spektrum der Standards für die Gebäudehülle bei Neubauten (Abbildung 69), so zeigt sich, dass das Einfamilienhaus mit maximaler PV-Fläche keine der Stufen des bewerteten Brennstoffverbrauchs erreicht (Werte alle positiv), das EH55 ohne WRG erreicht nur mit maximaler PV-Fläche die Stufen 1 und 2a. Das EH55 mit WRG erreicht mit 100 % Dachflächenausnutzung für PV die Stufen 1, 2a und 2b und das EH40 mit WRG bei 2/3 der Dachfläche Stufe 1 und bei 100 % sogar die Stufe 3.

Fazit

Für zukunftsfähige Gebäude ist die Erreichung der Stufe 3 anzustreben, da damit keines der Budgets ausgenutzt wird und – zusammen mit der Gebäude-eigenen PV-Anlage – eine Verbesserung der Klimaneutralität des gesamten (Wohn-)Gebäudebestandes erzielt werden kann. Wie die Variante mit EH55 ohne WRG und mit Erdreichwärmepumpe zeigt, kann diese auch mit weniger ambitioniertem Wärmeschutz und einer guten Anlagentechnik erreicht werden.

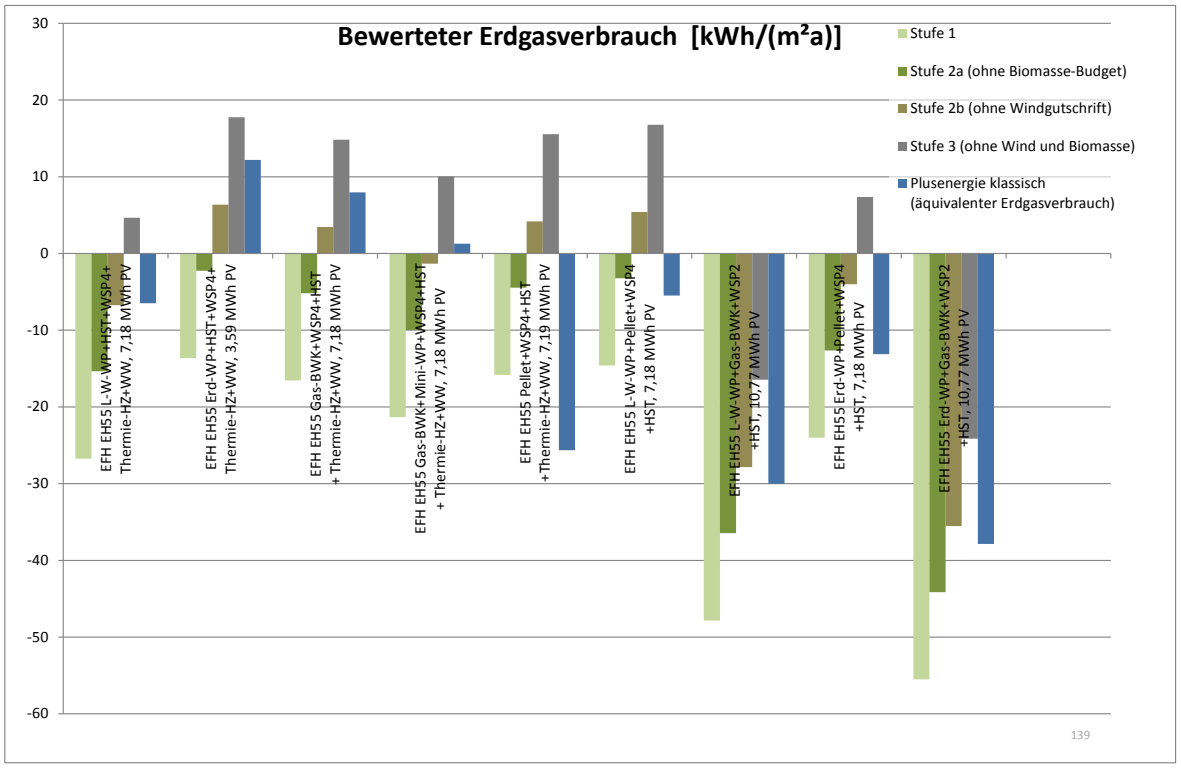


Abbildung 68: Bewerteter Brennstoffverbrauch eines EFH als EH55 mit unterschiedlicher Anlagentechnik, die entweder das THG- oder das Brennstoff-/Biomasseziel nicht einhalten; ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

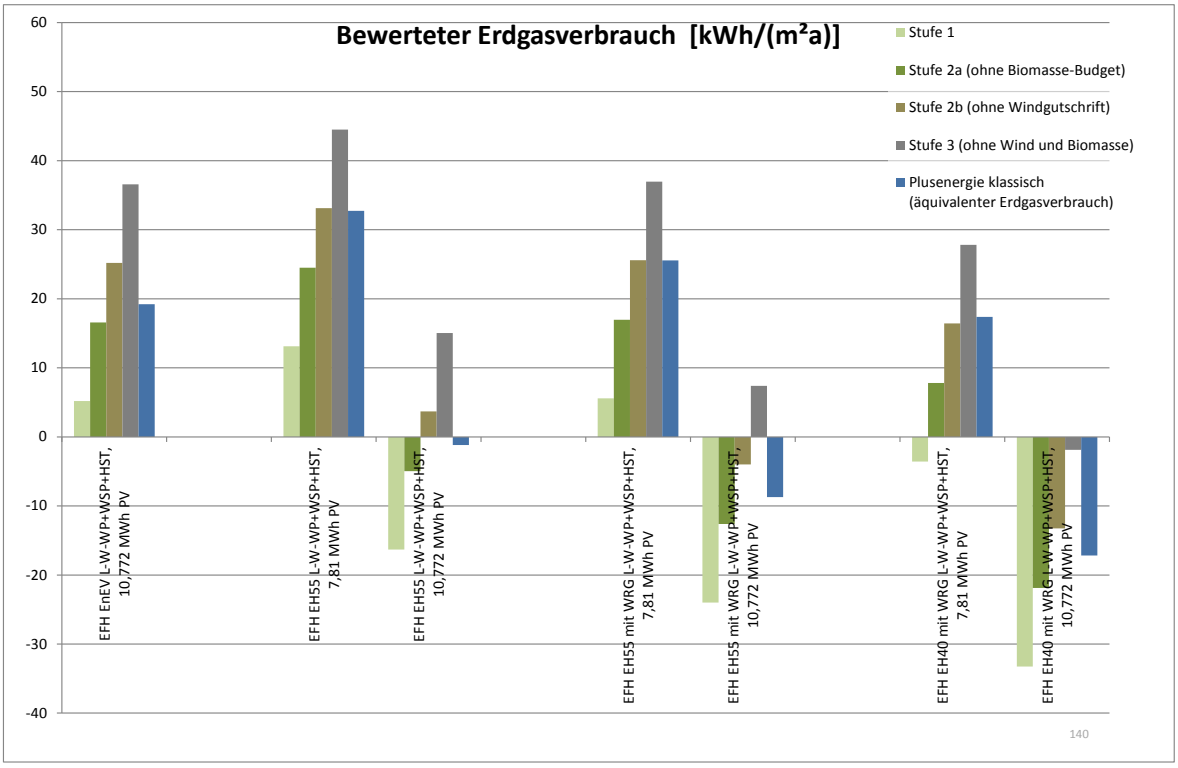


Abbildung 69: Bewerteter Brennstoffverbrauch eines EFH in vier unterschiedlichen Standards der Gebäudehülle; ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

6 Vergleich unterschiedlicher Gebäudekonzepte mit Energiegewinn

Etwa seit 20 Jahren werden Gebäudekonzepte entwickelt und gebaut, die einen bilanziellen Ausgleich zwischen Verbrauch und Erzeugung in der Jahresbilanz anstreben, und damit besonders zukunftsweisende Gebäude realisieren wollen. Wie bereits in Kapitel 1.2 beschrieben, stellen Label wie „Plusenergie“ oder Null-Emission“ einen Anreiz an Bauherren dar, bei der Gebäudeplanung über die gesetzlichen Anforderungen hinauszugehen und besonders klimaschonende Häuser zu errichten. Dabei stellt sich die Frage, wie solche Gebäudekonzepte im Licht der vorliegenden Untersuchung mit hoher zeitlicher Auflösung bei der Bilanzierung und in einem zukünftigen Energieversorgungssystem einzuordnen sind. In diesem Kapitel werden verschiedene eingeführte Gebäudekonzepte für Null- oder Plusenergie-Häuser[44] bzw. Gebäude mit Energiegewinn zusammen mit zukunftsfähigen Gebäudekonzepten betrachtet, die in dieser Untersuchung beschrieben wurden.

Folgende Konzepte wurden dabei miteinander verglichen:

- KfW Effizienzhaus-40 Plus (EH40+)
- Effizienzhaus Plus (EHP) in drei unterschiedlichen Ausführungen
- Sonnenhaus (SON)
- Passivhaus Plus (PH+)
- Plusenergie-Gebäude (Plus)

Sowie abgeleitet aus den Untersuchungen in diesem Bericht

- Zukunftsfähiges Gebäude 1 (KlimN1) (Mindeststandard Hülle)
- Zukunftsfähiges Gebäude 2 (KlimN2) (Zielwerte Hülle)

Das KfW Effizienzhaus-40 Plus ist ein von der KfW eingeführter Gebäudestandard, der seit 2016 gefördert wird. Neben der Gebäudehülle des KfW-Effizienzhauses-40 müssen solche Gebäude eine Mindeststromerzeugung aus Photovoltaik oder anderen erneuerbaren Energien aufweisen, die in Abhängigkeit von der Anzahl der Wohneinheiten und der Wohnfläche bestimmt wird. Außerdem ist ein Elektrospeicher erforderlich, dessen Kapazität für die Ladung in einer Stunde aus der PV-Anlage (Nennleistung) ausgelegt ist. Bezüglich der Anlagentechnik für die Wärmeerzeugung gibt dieser Standard außer dem verpflichtenden Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung keine Vorgaben, nur die primärenergetischen Anforderungen müssen eingehalten werden. Das Effizienzhaus-40 Plus ist nicht als Gebäude mit Energiegewinn definiert, wurde zum Vergleich dennoch in diese Untersuchung mit aufgenommen, das es als Förderstandard klar beschrieben ist und finanziell unterstützt wird. Außerdem kann durch eine Vergrößerung der PV-Anlage auch ein bilanzieller Ausgleich erreicht werden (siehe auch Kapitel 6.2).

Das Effizienzhaus Plus wurde 2011 vom damaligen Bundesbauministerium als Pilotprojekt gestartet und in den Folgejahren in einem Feldversuch in ca. 40 Ein- und Mehrfamilienhäusern erprobt. Diese Gebäude müssen in der Jahresbilanz einen negativen End- und Primärenergiebedarf aufweisen ([BMIBH 2018]), dabei werden keine über die gesetzlichen Mindeststandards hinausgehenden Anforderungen an die Gebäudehülle gestellt. Der Haushaltsstrom wird über einen pauschalen Aufschlag mit berücksichtigt. Aufgrund der erforderlichen negativen Endenergiebilanz sind „nur Strom-Konzepte“ z.B. mit Wärmepumpen prädestiniert für den Einsatz in solchen Gebäuden. Während die Gebäude im Feldversuch meist mit sehr guter Gebäudehülle umgesetzt wurden[45], entwickelt sich nach dem Feldversuch die Tendenz beim Wärmeschutz eher das KfW-Effizienzhaus-55 als Standard bei der Gebäudehülle anzustreben [Schmid 2019]. Dabei stellt sich die Frage, ob Gebäude mit höherem Heizwärmebedarf und gleichzeitig größerer Stromerzeugung im

[44] in der Jahresbilanz

[45] Der bezogenen Transmissionswärmeverlust lag bei kleinen Gebäuden im Mittel 48 % und bei großen Gebäuden 50 % unter den EnEV-Anforderungen und damit im Bereich zwischen KfW EH40 und EH55 [Erhorn, Bergmann 2015]

zeitlich hoch aufgelösten Berechnungsmodell ähnlich abschneiden wie Gebäude mit sehr gutem Wärmeschutzstandard. Für die folgenden Berechnungen wurde der Standard der Gebäudehülle auf Basis der Gebäude im Feldversuch zum Effizienzhaus Plus [Erhorn, Bergmann 2015] zwischen EH55 und EH40 eingegrenzt.

Das Sonnenhaus verfolgt einen anderen Ansatz, indem hier die Wärmeerzeugung überwiegend durch eine solarthermische Anlage in Verbindung mit einem sehr großen (saisonalen) Pufferspeicher gewährleistet werden soll. Die Restwärme wird meist durch einen Pelletkessel oder -ofen bereitgestellt. Das Sonnenhaus soll einen sehr niedrigen Primärenergieverbrauch von maximal 15 kWh/(m²a) sowie eine solare Deckung des Wärmebedarfs von mindestens 50 % besitzen [SHI 2019] – eine Nullenergiebilanz ist erst beim Sonnenhaus Plus angestrebt, das auch den Haushaltsstrom mit bilanziert. Der spezifische Transmissionswärmeverlust H'_T der Gebäudehülle muss mindestens 15 % unter demjenigen des Referenzgebäudes nach EnEV liegt. Das ausgewählte Beispielgebäude ergänzt die Anforderungen des Sonnenhauses um eine kleine PV-Anlage mit einer Dimensionierung wie beim KfW-Effizienzhaus-40 Plus, um die Anforderungen an die Solarstromnutzung zu erfüllen (siehe Kapitel 2.2), ohne das Sonnenhaus Plus zu erreichen, da die Dachflächen des Beispielgebäudes begrenzt sind.

Das Passivhaus Plus[46] vereint die Anforderungen an ein Passivhaus mit regenerativer Energieerzeugung. Der Heizwärmebedarf ist wie bei allen Passivhäusern auf 15 kWh/(m²a) begrenzt, weiterhin muss der Primärenergiebedarf inklusive Haushaltsstrom unter 120 kWh/(m²a) liegen. Beim Passivhaus Plus[47] wird die Stromerzeugung am Gebäude getrennt vom Energieverbrauch/-bedarf bilanziert und mit einem Bewertungsfaktor für einen zukünftigen, ausschließlich auf regenerativen Energien basierenden Strommix (PER) bewertet. Der Ansatz der Berücksichtigung einer zukünftigen Energieversorgungsinfrastruktur weist somit Parallelen zu den Untersuchungen in diesem Bericht auf, ohne dass die Ansätze zwischen der Bewertungsgröße PER und dem hier untersuchten regenativen Energieversorgung identisch wären. Für die Gebäudehülle des Beispielgebäudes wird die Hülle des EH40 als äquivalent zum Passivhausstandard betrachtet.

Als Plusenergie-Gebäude wurde in dieser Untersuchung in Anlehnung an [Disch] ein Gebäude bezeichnet, das vollständig regenerativ versorgt wird und in der Jahresbilanz durch Gutschriften für Netzeinspeisungen einen Primärenergieüberschuss aufweist. Dieser wird in der Regel über sehr große PV-Anlagen erzielt. In Anlehnung an umgesetzte Beispielgebäude wurde für die Wärmeversorgung ein Pellet-Kessel angesetzt, für die Gebäudehülle der Standard des EH55.

Die Konfiguration der Gebäude ist in Tabelle 14 zu finden und soll eine Möglichkeit widerspiegeln, den entsprechenden Standard einzuhalten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die „Dimensionierung“ der Gebäude nicht mit den hierzu normalerweise eingesetzten Berechnungstools (z.B. EnEV, PHPP) durchgeführt wurde, sondern übliche Konstruktionen und Anlagentechniken (zum Teil auf Basis von [Wöhrle et al. 2017] ausgewählt) zu Modellgebäuden zusammengefügt wurden, die vergleichbare Kennwerte wie der jeweilige Standard aufweisen.

[46] Darüber hinausgehend gibt es noch den Standard des „Passivhaus Premium“, für das eine noch höhere Effizienz und größere Energieerzeugung gefordert werden. Ein Passivhaus Premium erreicht immer den Standard des „Passivhaus Plus“.

[47] Eine Unterscheidung zwischen Passivhaus Plus und Passivhaus Premium wird im Folgenden nicht vorgenommen

Tabelle 14: Untersuchte Gebäude mit Energiegewinn und deren Kenndaten

	KfW EH40 Plus	Effizienzhaus Plus (BMIBH)	Effizienzhaus Plus (BMIBH)	Effizienzhaus Plus (BMIBH)	Sonnenhaus	Passivhaus Plus	Plusenergie-haus	zukunftsf. Gebäude 1	zukunftsf. Gebäude 2
Kürzel	EH40+	EHP	EHP	EHP	SON	PH+	Plus	KlimN1	KlimN2
Standard Gebäudehülle	EH40	EH55	EH55	EH40	EH55	EH40	EH55	EH55	EH40
Hauptwärme-erzeuger	L-W-WP	L-W-WP	L-W-WP	L-W-WP	Solarthermie	L-L-WP	Pelletkessel	Erdreich-WP	L-W-WP
Spitenlast-wärmeerzeuger	Heizstab	Heizstab	Heizstab	Heizstab	Pelletkessel	Heizstab		Pelletofen	Heizstab
Lüftungsanlage	WRG	WRG	WRG	WRG	-	WRG	-	-	WRG
Wärmespeicher	15 kWh	15 kWh	15 kWh	15 kWh	1500 kWh	15 kWh	30 kWh	30 kWh	30 kWh
PV-Anlage [m² bzw. % der Dachfläche]	12,85 m²	100%	67%	67%	12,85 m²	100%	100%	100%	67%
Elektrospeicher	2,10 kWh	-	-	-	-	-	-	-	-
Solarthermie [% der Dachfläche]	-	-	-	-	75%	-	-	-	-
Haushaltsstrom	20 / 0	20 / 0	20 / 0	20 / 0	20 / 0	20 / 0	20 / 0	20 / 0	20 / 0

Große saisonale Speicher können mit dem Untersuchungsmodell nur grob beschrieben werden, da der Speicher nur mit drei Zonen abgebildet wird. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse für das Sonnenhaus nur als ungefähre Einordnung des Systems innerhalb der Systematik des Modells zu interpretieren.

Die Berechnungen wurden für ein Einfamilienhaus durchgeführt. Da für das Effizienzhaus Plus (EHP) ein Ansatz von 20 kWh/(m²a) an Haushaltsstrom unterstellt wird, werden die Ergebnisse einmal ohne und einmal mit 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom dargestellt.

Beim EH40+ ist zu beachten, dass die Photovoltaikanlage in der dargestellten Grundvariante im Vergleich zu den anderen Gebäuden nur im Hinblick auf die Mindestanforderungen und damit sehr klein ausgelegt wurde. Sie nimmt nur etwa 21 % der Dachfläche ein, während der Prozentsatz bei den anderen Gebäuden bei 67-100 % liegt[48].

6.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Abbildung 70 zeigt zuerst die Gebäude mit einer „traditionellen“ Jahresbilanz für End-[49] und Primärenergie sowie Treibhausgase inklusive der Anrechnung von Gutschriften. Dazu wurden aus dem Berechnungsmodell Endenergiebedarf sowie PV-Stromerzeugung und -überschuss am Gebäude mit Primärenergie- und Treibhausgasfaktoren nach [DIN V 18599-1] verrechnet.

Das KfW-EH40+ erreicht – wenn nur die geforderte Mindest-PV-Fläche installiert wird – Treibhausgas-Emissionen von 9,8 kg/(m²a) und liegt damit über dem Zielwert von 6,5 kg/(m²a). Bei End- und Primärenergie wird in der Jahresbilanz kein Überschuss erzielt[50], was bei diesem Standard jedoch auch nicht gefordert ist. Bei den Effizienzhaus Plus-Varianten werden dann negative Werte (Überschüsse) erzielt, wenn beim EH55 die maximale Dachfläche mit PV bestückt wird oder ein EH40 bei der Gebäudehülle umgesetzt wird und PV nur auf 2/3 der Dachfläche vorhanden ist. Beim EH55 mit 2/3 der möglichen PV-Fläche wird kein Überschuss erzielt, die Werte der Jahresbilanz liegen aber alle sehr nahe bei null. Das Sonnenhaus besitzt

[48] Vor diesem Hintergrund wird die Größe der Photovoltaikanlage in späteren Untersuchungen noch variiert. Beim Sonnenhaus liegt zwar ebenfalls nur eine kleine PV-Anlage vor, in diesem Fall aber parallel zu einer sehr groß dimensionierten Solarthermieanlage.

[49] Der Endenergiebedarf wird hauptsächlich beim Effizienzhaus Plus als Bewertungsgröße verwendet

[50] Ein Überschuss in der Jahresbilanz bzw. ein negativer End- oder Primärenergiebedarf sind die Kriterien für die Einhaltung der verschiedenen Standards von Gebäuden mit Energiegewinn

mit 2 MWh/a PV-Ertrag einen positiven Endenergie- und negativen Primärenergiebedarf sowie negative (Netto-) THG-Emissionen. Beim Passivhaus Plus mit 100 % PV auf dem Dach liegen alle Kennwerte im negativen Bereich, genauso wie beim Plusenergie-Gebäude mit Pelletheizung und 100 % Dachflächennutzung für PV. Bei letzterem fällt die extreme Primärenergiegutschrift für eingespeisten PV-Strom bei gleichzeitigem Biomassebezug für die Heizung auf. Die beiden klimaneutralen Gebäude erreichen bei dieser Betrachtungsweise ebenfalls negative Kennwerte und somit Überschüsse.

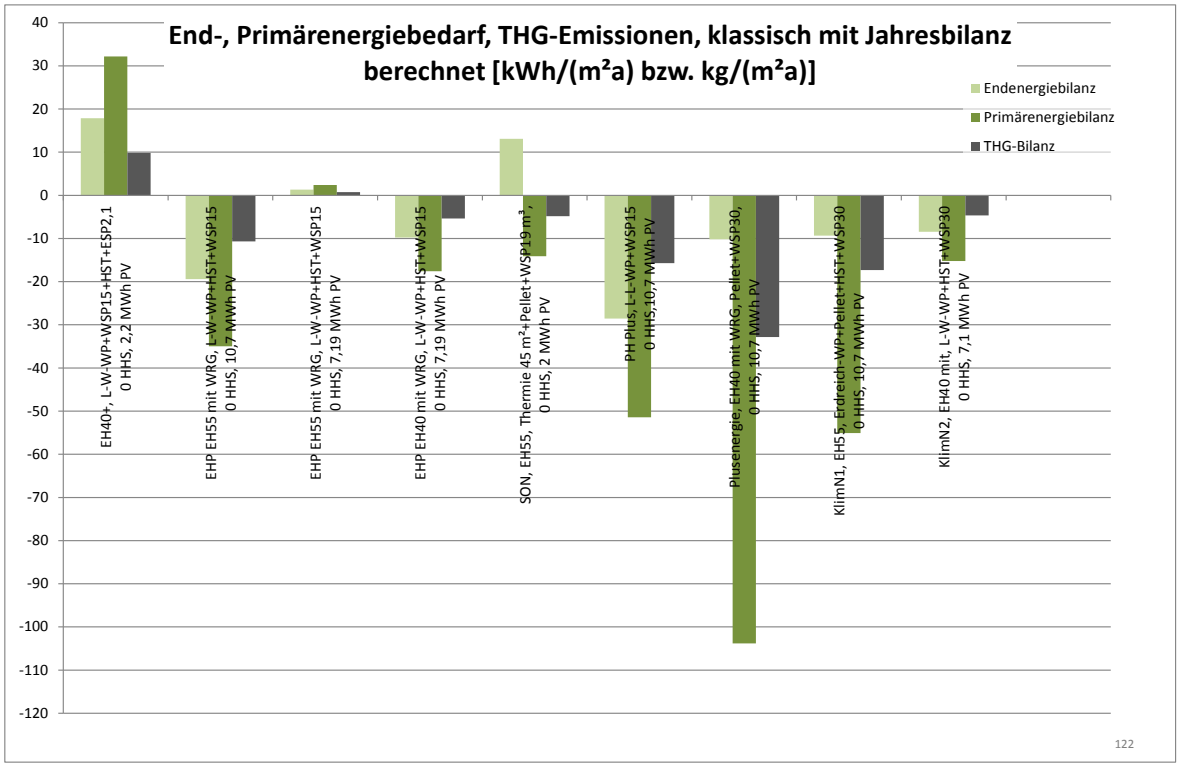


Abbildung 70: End-, Primärenergie- und Treibhausgasbilanz (jeweils als Jahresbilanz) der Gebäude mit Energiegewinn als Einfamilienhaus ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Betrachtet man nun im Vergleich die THG-Emissionen aus dem zeitlich hoch aufgelösten Simulationsmodell (Abbildung 71) ohne Anrechnung von Gutschriften, so ergeben sich für das KfW-EH40+ in Summe 8,4 kg/(m²a) an THG-Emissionen. Unter den drei Effizienzhaus Plus-Varianten unterschreitet nur die Ausführung als EH40 mit WRG mit 6,4 kg/(m²a) die THG-Zielwerte, die Ausführung als EH55 mit WRG liegen bei beiden PV-Anlagengrößen mit 9,7 bzw. 10,8 kg/(m²a) darüber. Das Sonnenhaus erreicht mit 0,9 kg/(m²a) die niedrigsten Treibhausgasemissionen. Das Passivhaus Plus mit Luft-Luft-Wärmepumpe erreicht mit 6,4 kg/(m²a) ebenso die THG-Ziele, wie auch das Plusenergiehaus mit Pelletheizung und PV-Anlage (1,9 kg/(m²a)). Die beiden klimaneutralen Gebäude erfüllen ebenfalls die THG-Ziele, wobei das EH55 2,7 kg/(m²a) an Treibhausgasen emittiert (mit Erdreich-Wärmepumpe und 100 % PV auf der Dachfläche) und das EH40 mit WRG 6,2 kg/(m²a) (mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und 2/3 der Dachfläche für PV genutzt).

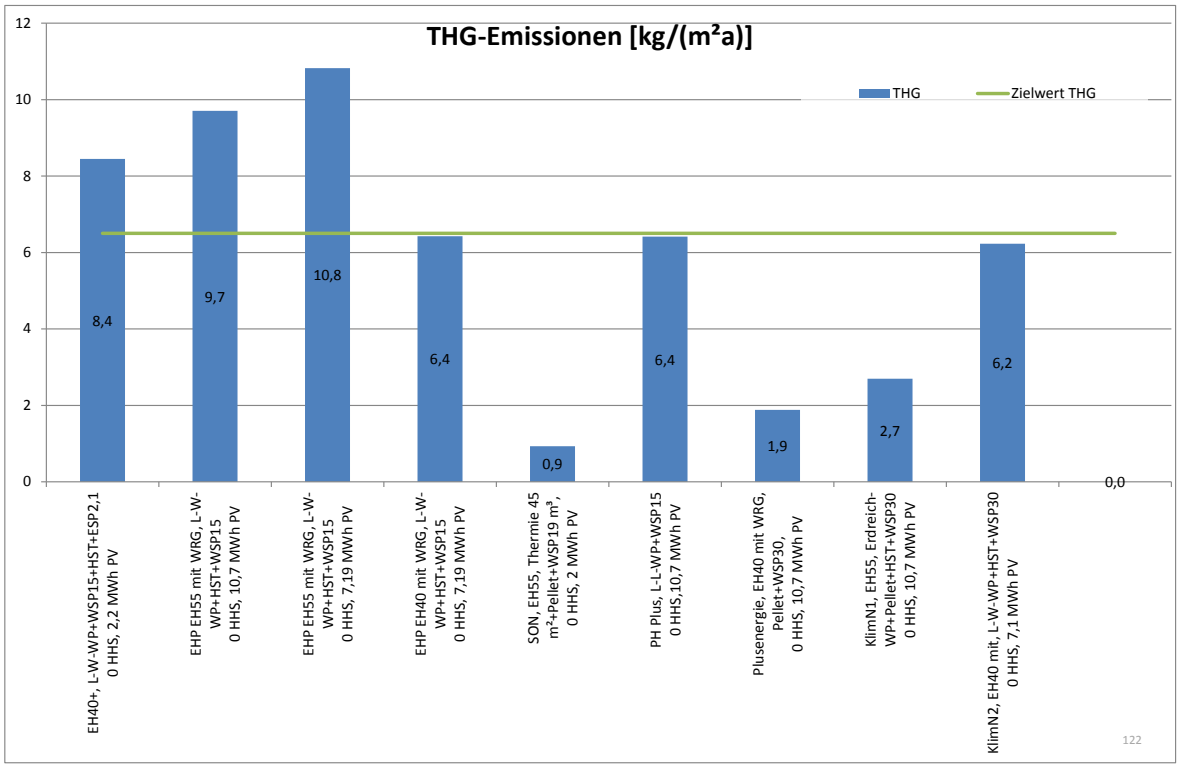


Abbildung 71: Treibhausgasemissionen der Gebäude mit Energiegewinn als Einfamilienhaus ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Analysiert man den Brennstoffverbrauch der ausgewählten Gebäude (Abbildung 72), so erreichen das EH40+ und das EHP als EH55 nicht die Brennstoffziele, nur das EHP als EH40 hält diese noch knapp ein. Beim Sonnenhaus liegt der Brennstoffverbrauch etwa doppelt so hoch, wie das Biomassebudget erlauben würde. Passivhaus Plus und das klimaneutrale Gebäude als EH40 mit WRG (KlimN2) halten ebenfalls die Brennstoffzielwerte ein. Das Plusenergiehaus mit 53,4 kWh/(m²a) Pelletverbrauch überscheitet dagegen das Biomassebudget von 10 kWh/(m²a) um das Fünffache. Auch das klimaneutrale Gebäude 1 (KlimN1) mit Pelletofen als Spitzenlastkessel überschreitet mit 23,9 kWh/(m²a) Pelletverbrauch das Biomassebudget um mehr als das Doppelt. Zusätzlich werden noch 9 kWh/(m²a) Erdgas für den Betrieb der Wärmepumpe benötigt.

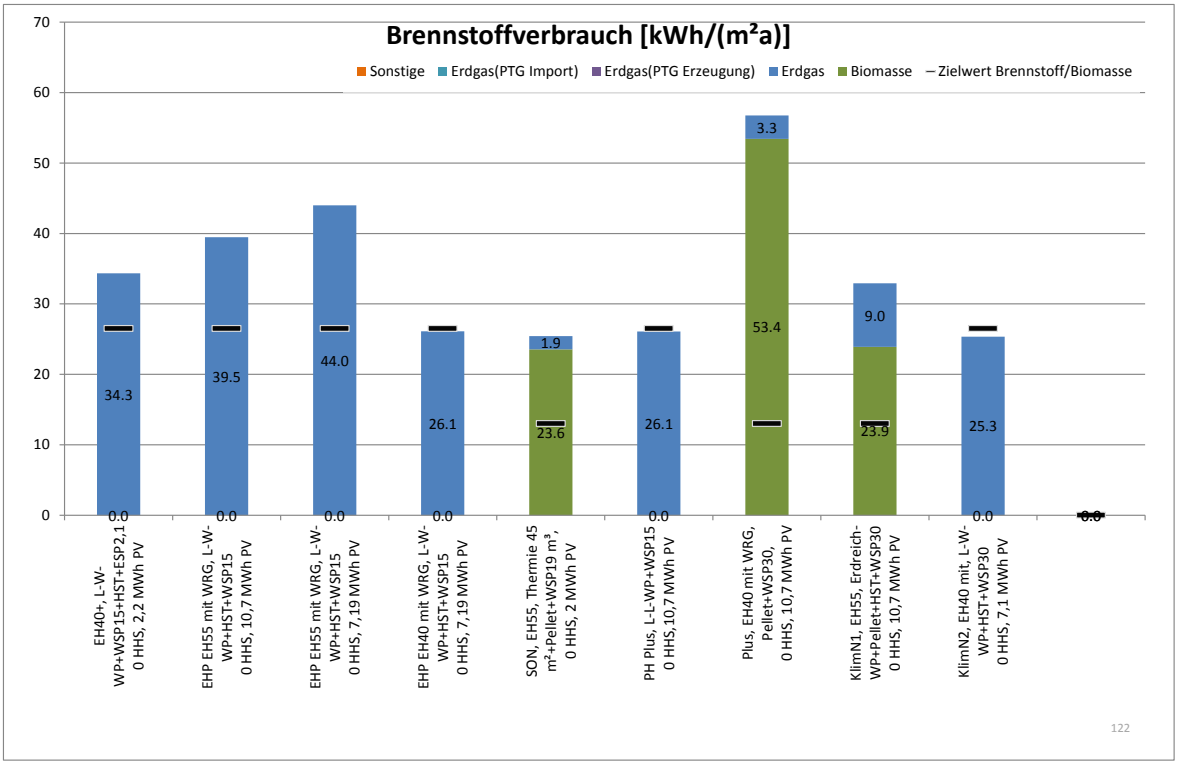


Abbildung 72: Brennstoffverbrauch der Gebäude mit Energiegewinn als Einfamilienhaus ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Diese Auswertungen zeigen, dass die Bewertung über Treibhausgasemissionen oder Brennstoffverbrauch nicht zu eindeutigen Ergebnissen führt. Das aus vorherigen Auswertungen bekannte Problem, dass Biomasseheizungen bezüglich der Treibhausgasemissionen immer sehr gut abschneiden, aber das gesetzte Ziel für den Brennstoffverbrauch nicht erreichen können, tritt auch hier wieder auf. Aus diesem Grund ist in Abbildung 73 der bewertete Brennstoffverbrauch (siehe Kapitel 5) der Gebäude dargestellt. Das EH40+ erreicht mit seiner klein dimensionierten PV-Anlage keine der vier Stufen des bewerteten Brennstoffverbrauchs. Das EHP als EH55 mit WRG und PV auf 100 % der verfügbaren Dachfläche liegt in allen Stufen im negativen Bereich und erreicht damit das Brennstoffziel. Wird bei diesem Gebäude die PV-Anlage auf 2/3 der Dachfläche reduziert, werden nur noch die Stufen 1 und 2a (ohne Biomassebudget) erreicht. Dies zeigt, dass die Bewertung sehr sensitiv auf die installierte PV-Leistung reagiert (siehe weiter unten). Das EHP als EH40 mit WRG und 2/3 der maximalen PV-Anlagegröße erreicht ebenfalls alle vier Stufen des bewerteten Brennstoffverbrauchs. Beim Sonnenhaus mit einer vergleichsweise kleinen PV-Anlage, da die restliche Dachfläche überwiegend von der solarthermischen Anlage belegt ist, werden die Stufen 1, 2a und 2b erreicht, nicht jedoch die Stufe 3. Die übrigen Gebäude (Passivhaus Plus, Plusenergiehaus und klimaneutrales Gebäude 1 und 2) besitzen bei allen Stufen einen bewerteten Erdgasverbrauch kleiner Null.

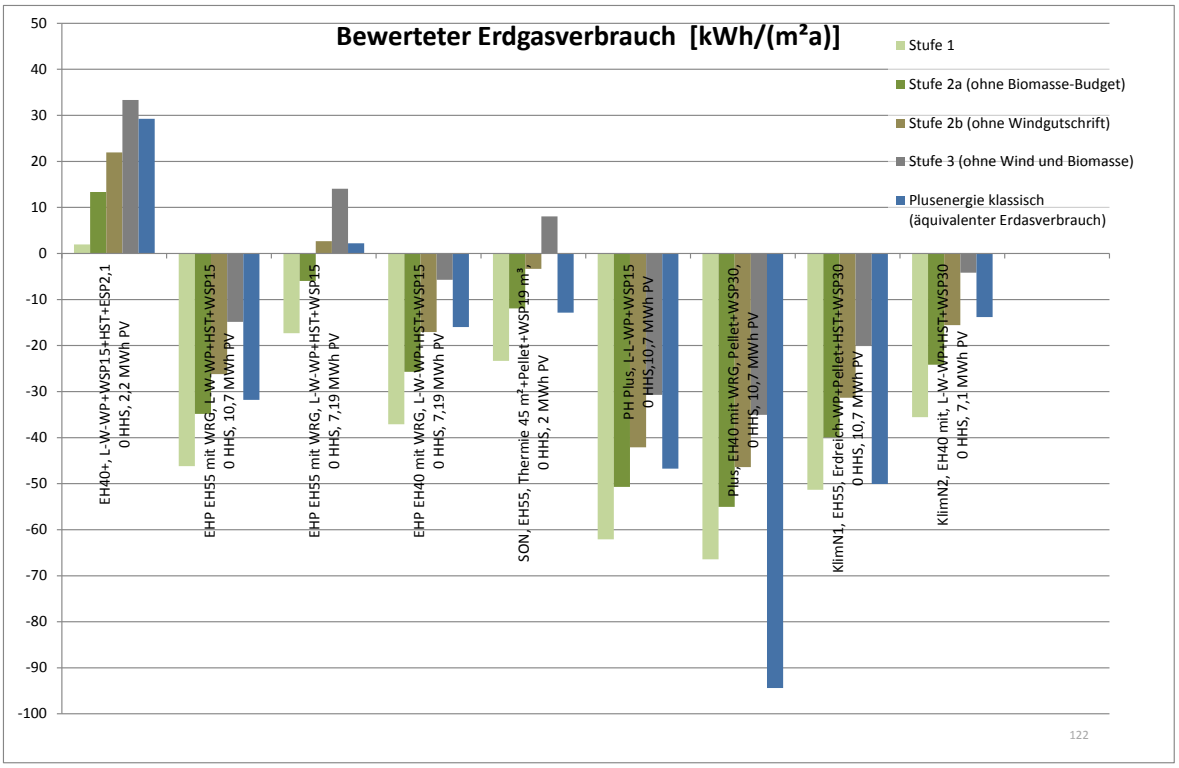


Abbildung 73: Bewerteter Brennstoffverbrauch der Gebäude mit Energiegewinn als Einfamilienhaus ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

6.2 Einfluss der PV-Stromerzeugung auf die Energiebilanz

Untersucht man für die unterschiedlichen Standards den Einfluss der Größe der PV-Anlage, so zeigt sich für das Effizienzhaus-40 Plus (EH40+), dass sich mit einer vergrößerten PV-Anlage – bei gleicher Größe des Batteriespeichers müsste diese ca. 2,5 Mal so groß sein wie in der Standardausführung und würde damit 53 % der nutzbaren Dachfläche belegen – nun auch die THG-Emissionen für klimaneutrale Gebäude 2050 unterschreiten lassen. In Abbildung 74 ist zum Vergleich die Vergrößerung der PV-Anlage in den Varianten 1-, 2-, 3- und 4-mal der Größe der Mindestanforderung nach EH40+ Standard dargestellt. Beim Passivhaus Plus wurde die PV Anlagengröße in den Varianten 100 %, 67 % und 50 % der Dachfläche des Gebäudes dargestellt.

Beim Passivhaus Plus mit der Luft-Luft-Wärmepumpe (Kompaktaggregat) muss die gesamte Dachfläche für PV genutzt werden, um den THG-Zielwert zu erreichen, da die Jahresarbeitszahlen in den Berechnungen analog [PHI 2009] mit einer JAZ von 1,9 vergleichsweise niedrig liegen. Werden höhere Jahresarbeitszahlen erreicht, so reichen auch kleinere PV-Flächen zur Erfüllung der THG-Ziele aus.

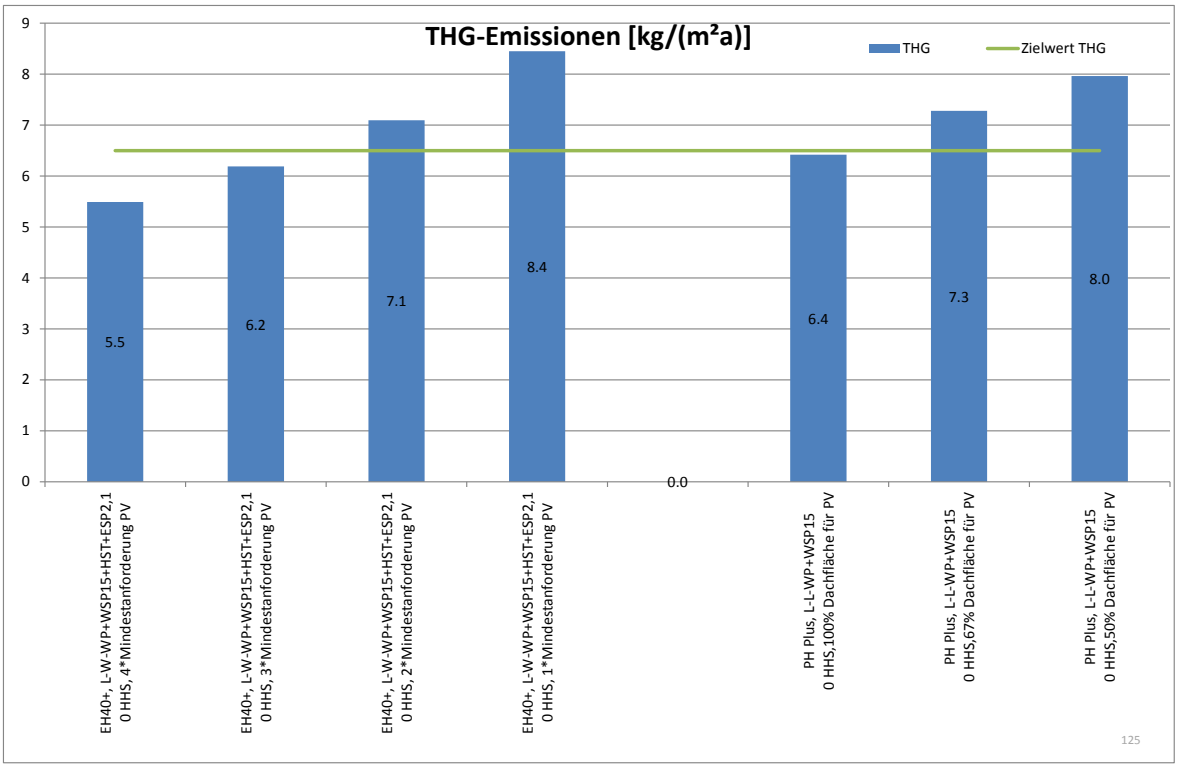


Abbildung 74: Treibhausgasemissionen des Effizienzhaus-40 Plus (EH40+) und des Passivhaus Plus bei unterschiedlicher Größe der PV-Anlage, ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Vergleicht man beim Effizienzhaus Plus (EHP) die beiden Varianten der Gebäudehülle als EH55 und als EH40 (beide mit WRG) (Abbildung 75), so erreicht das EHP EH55 mit WRG und Luft-Wasser-Wärmepumpe auch bei vollständiger Belegung der verfügbaren Dachfläche mit PV-Modulen nicht die Zielwerte für die THG-Emissionen, das EHP EH40 mit WRG dagegen unterschreitet diese sowohl mit 100 % als auch mit 67 % Dachflächennutzung. Wird weniger PV installiert, so überschreiten beide Ausführungen den Zielwert.

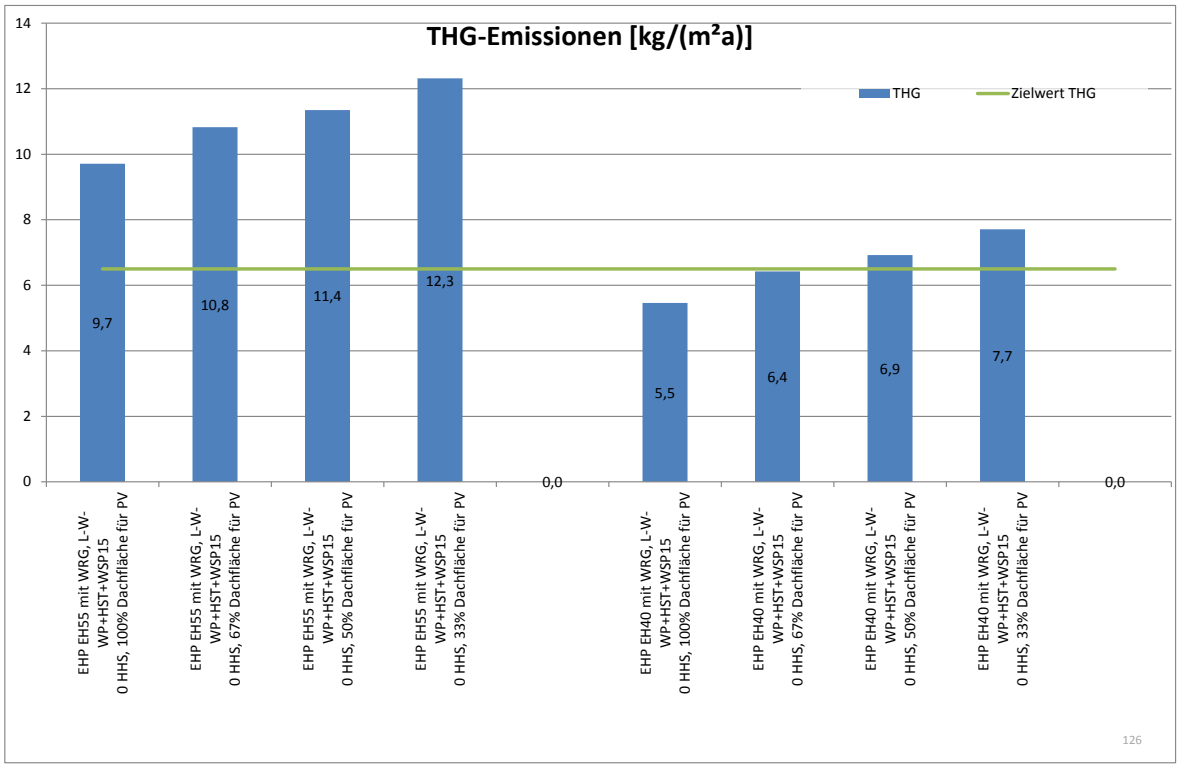


Abbildung 75: Treibhausgasemissionen des Effizienzhaus Plus (EHP) als EH55 und als EH40 (beide mit WRG) bei unterschiedlicher Größe der PV-Anlage, ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Betrachtet man das Plusenergie-Haus mit Pelletkessel und unterschiedlich großer PV-Anlage (Abbildung 76 links), so unterscheiden sich die Treibhausgasemissionen nur im Bereich der 2. Nachkommastelle, da der Haushaltsstrom hier nicht mitbilanziert wurde und für die Wärmeversorgung emissionsfreie Biomasse eingesetzt wird. Erst wenn der bewertete Erdgasverbrauch betrachtet wird (Abbildung 77 links), werden die Unterschiede sichtbar: nur wenn mindestens 50 % der Dachfläche für PV genutzt werden, können die Stufen 1 bis 2 des bewerteten Erdgasverbrauchs erreicht werden. Die Stufe 3 (keine Anrechnung von Gutschriften) wird erst bei 67 % PV-Stromerzeugung auf dem Dach erreicht, da der Brennstoffverbrauch bei der Pelletheizung mit 53,4 kWh/(m²a) vergleichsweise hoch ausfällt (alle Varianten dieses Gebäudetyps als EH40 mit WRG gerechnet).

Auch die Treibhausgasemissionen des klimaneutralen Gebäudes 1 (EH55, Erdreich-WP und Pellet-Spitzenlastkessel) liegen alle unter dem THG-Zielwert (Abbildung 76 rechts). Auch hier lohnt sich ein Blick auf den bewerteten Erdgasverbrauch (Abbildung 77 rechts). Nur mit 100 % bzw. 67 % PV-Dachflächennutzung werden die Stufen 1 bis 2 beim bewerteten Erdgasverbrauch erreicht und nur mit 100 % Dachfläche auch die Stufe 3.

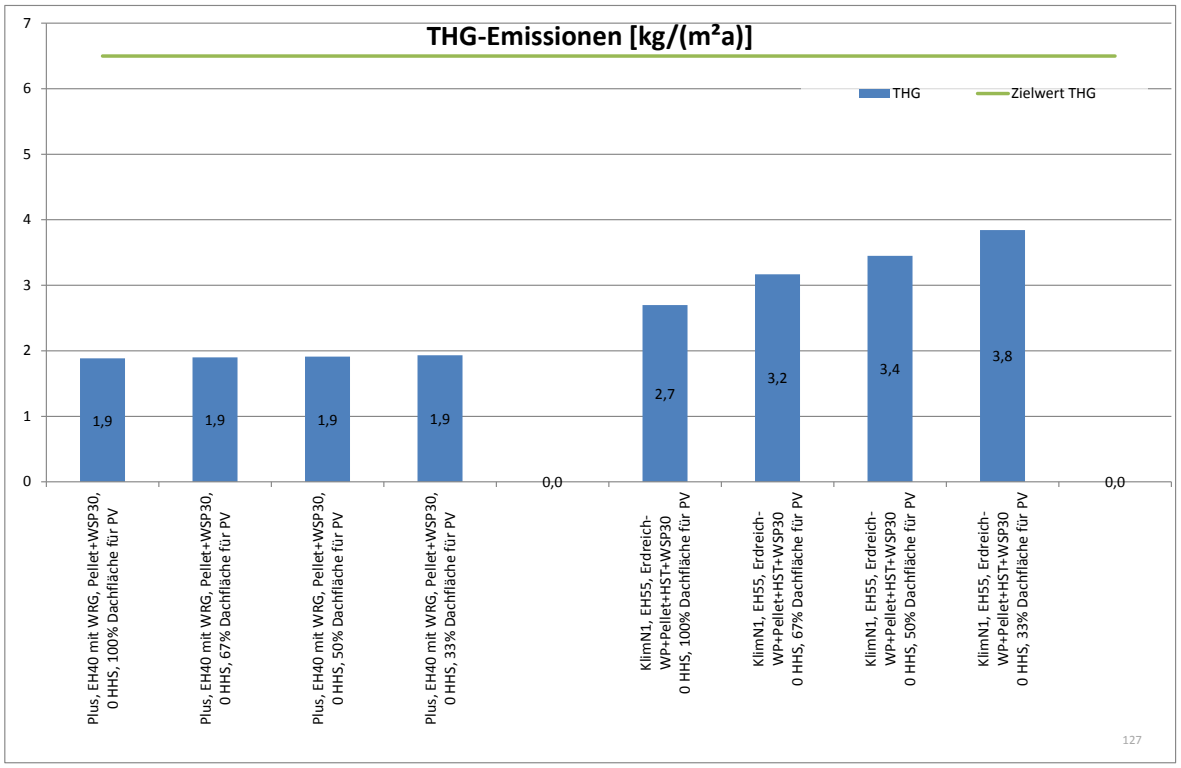


Abbildung 76: Treibhausgasemissionen des Plusenergie-Hauses und des klimaneutralen Gebäudes 1 bei unterschiedlicher Größe der PV-Anlage, ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

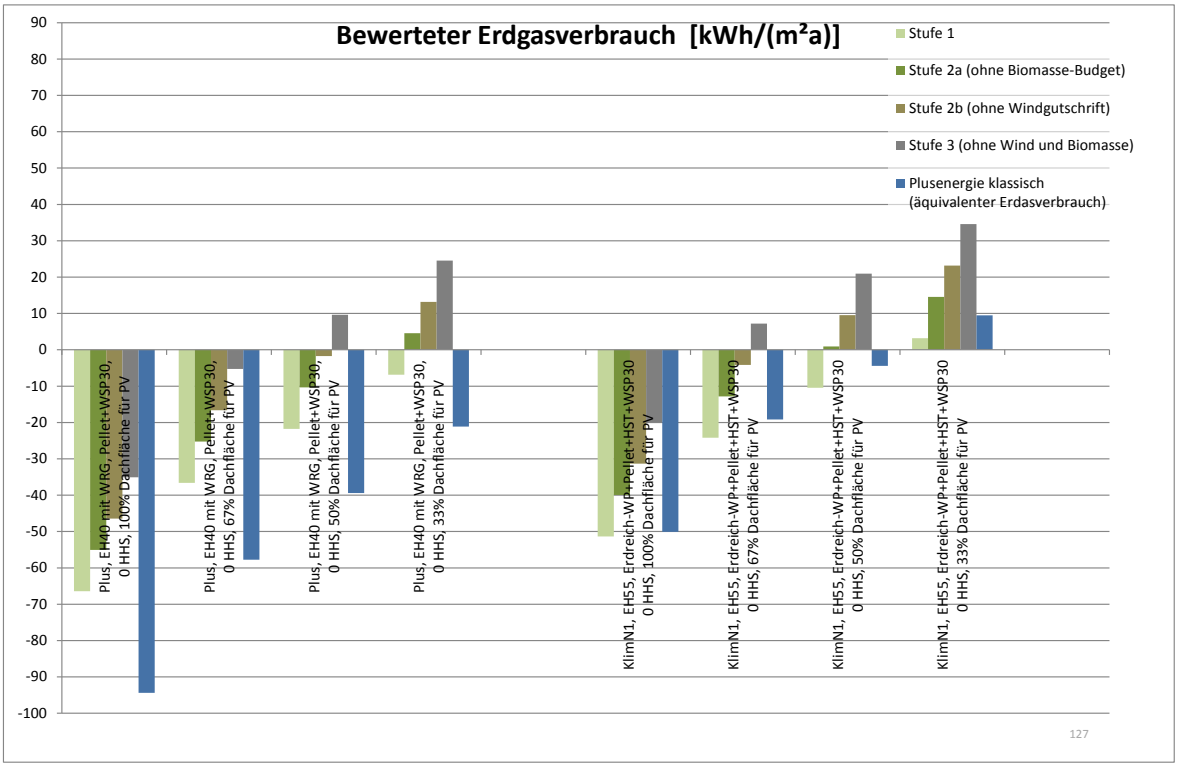


Abbildung 77: Bewerteter Brennstoffverbrauch des Plusenergie-Hauses und des klimaneutralen Gebäudes 1 bei unterschiedlicher Größe der PV-Anlage, ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms

6.3 Ergebnisse mit Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Wird bei den Gebäuden der Haushaltsstrom in Höhe von 20 kWh/(m²a) mit berücksichtigt, so steigen der End- und der Primärenergieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen bei der klassischen Jahresbilanz deutlich an (Abbildung 78). Das EH40+ erreicht bei keiner der drei Größen einen negativen Wert (Überschuss). Bei den EHP-Varianten erreicht nur die Ausführung als EH55 mit WRG und 100 % der Dachfläche mit PV-Anlage die Kriterien des Effizienzhauses Plus, eine Verkleinerung der PV-Anlagen führt dazu, dass die Zielwerte nicht eingehalten werden. Somit muss die PV-Anlage maximal dimensioniert werden, um die Anforderungen des Standards zu erfüllen, eine Reduktion des Energiebedarfs (EH40) reicht nicht aus. Auch das Sonnenhaus und das klimaneutrale Gebäude 2 mit reduzierter PV-Anlage erreichen in der Jahresbilanz weder bei End- noch bei Primärenergie bzw. bei den THG-Emissionen einen Überschuss. Das Passivhaus Plus erreicht dagegen bei allen drei Kriterien negative Verbräuche. Das Plusenergiegebäude und das klimaneutrale Gebäude 1 besitzen zwar keinen negativen Endenergiebedarf, aufgrund der Gutschriften für PV-Strom aber deutliche Überschüsse bei der Primärenergie und es treten in der Jahresbilanz netto keine THG-Emissionen auf.

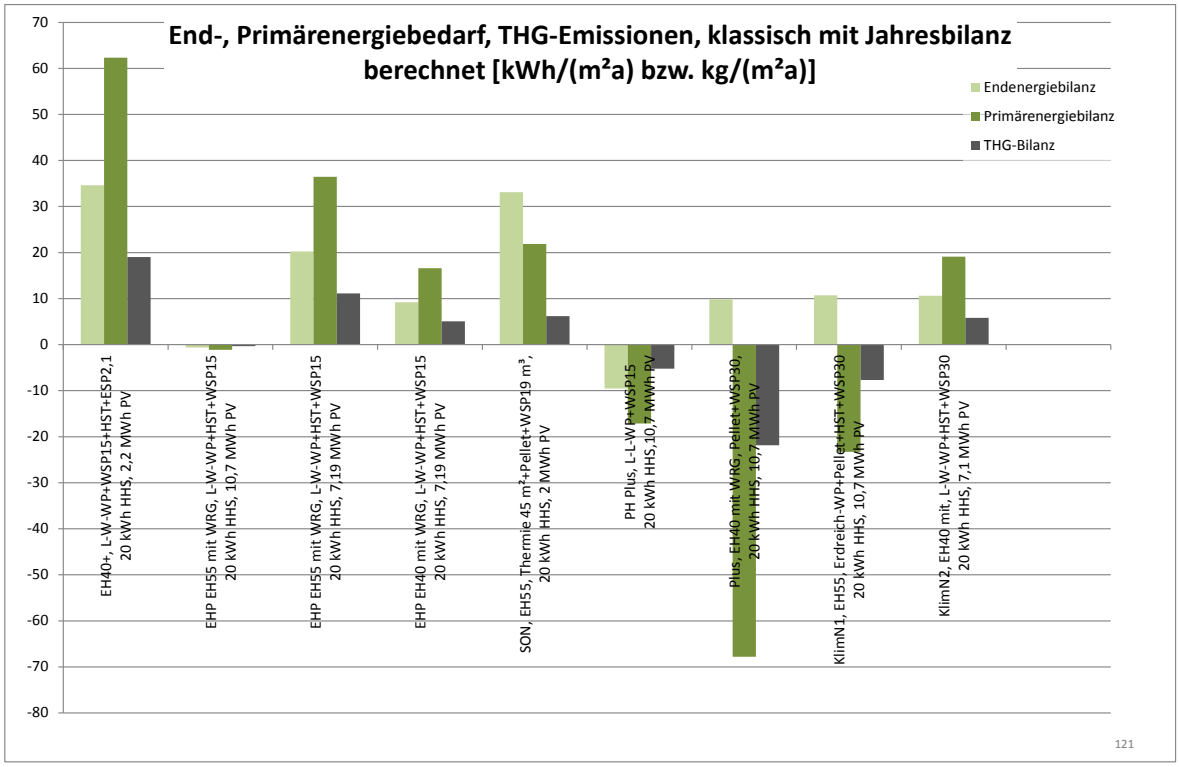


Abbildung 78: End-, Primärenergie- und Treibhausgasbilanz (jeweils als Jahresbilanz) der Gebäude mit Energiegewinn als Einfamilienhaus mit Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Bei den Treibhausgasemissionen, die sich aus dem zeitlich hoch aufgelösten Berechnungsmodell ergeben (Abbildung 79), erfüllen das EH40+, die drei EHP-Varianten, das PH Plus und das klimaneutrale Gebäude 2 nicht den (erhöhten) Zielwert von 8,5 kg/(m²a), wenn das Gebäude inklusive Haushaltsstrom betrachtet wird. Das Sonnenhaus, das Plusenergiegebäude und das klimaneutrale Gebäude 1 (alle mit Pelletheizung) erreichen die Zielwerte bei den THG-Emissionen.

Beim Brennstoffverbrauch (Abbildung 80) liegen alle Gebäude deutlich über den Zielwerten sowohl bei Erdgas als auch bei Biomasse. Dies zeigt, dass spätestens bei Einbeziehung des Haushaltsstroms zur Erreichung der Klimaneutralität die Windkraft, die hier ausgeklammert wurde, da sie in der Regel nicht direkt

am Gebäude genutzt werden kann, einen entscheidenden Beitrag leisten muss. Gleichzeitig ist aber auch zu erkennen, dass die klassische Jahresbilanz mit Gutschriften für eingespeisten Überschussstrom die Verhältnisse in der Energieversorgung nicht in geeigneter Weise abbildet.

Mehrfamilienhäuser besitzen einen höheren absoluten Stromverbrauch, die Dachfläche ist nur begrenzt größer, so dass bei großen Gebäuden das Erreichen der Treibhausgasziele noch schwieriger ist und diese Gebäude in einem klimaneutralen Gebäudebestand fast immer auf Windkraft zur Deckung des Energiebedarfs angewiesen sind.

Eine Betrachtung des bewerteten Erdgasverbrauchs ist an dieser Stelle nicht möglich, da die Bewertung des eingespeisten Überschussstroms auf Basis der Wärmeerzeugung erfolgt und eine Aufteilung der Nutzung des Stroms auf Haushaltsanwendungen und Wärme bisher nicht geeignet ist.

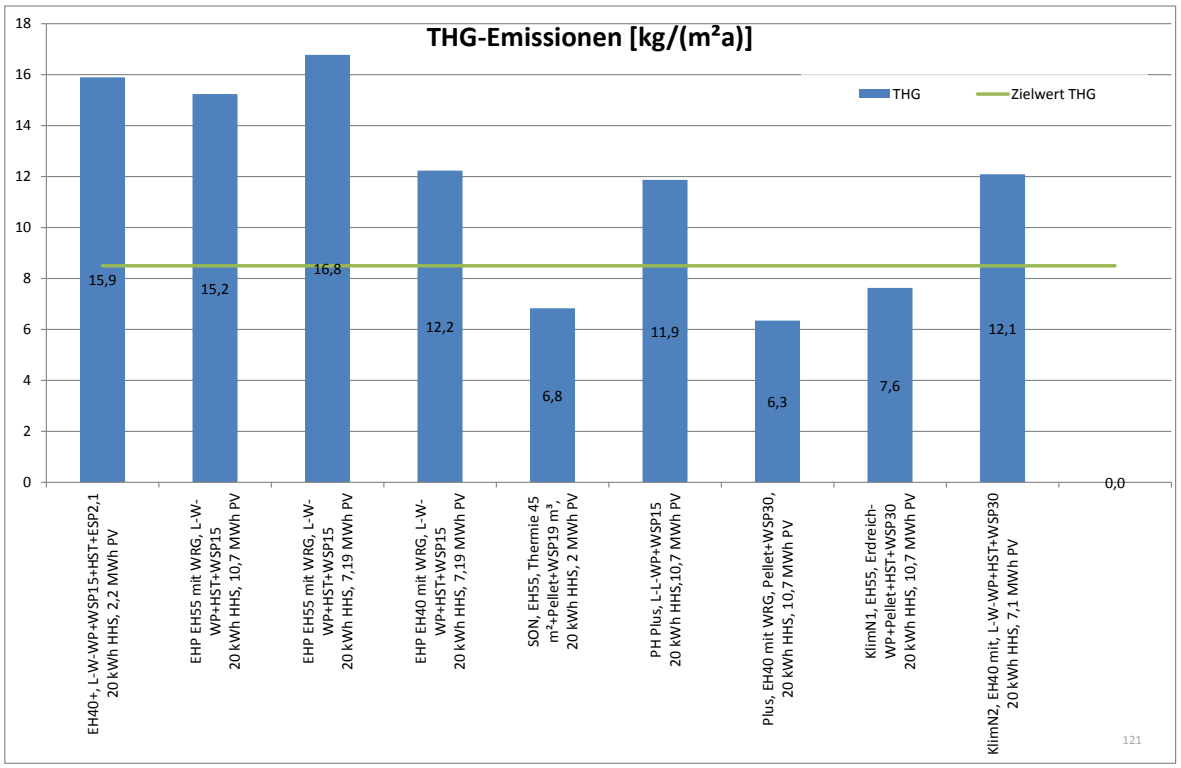


Abbildung 79: Treibhausgasemissionen der Gebäude mit Energiegewinn als Einfamilienhaus mit Berücksichtigung des Haushaltsstroms

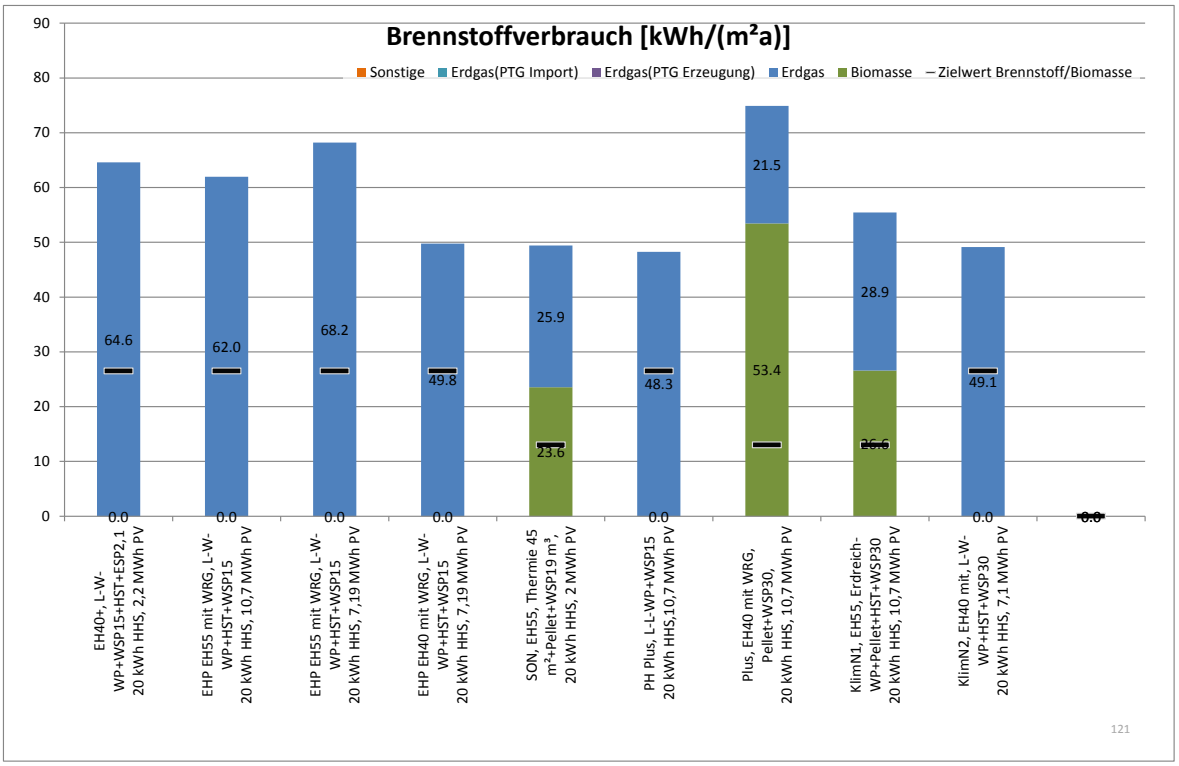


Abbildung 80: Brennstoffverbrauch der Gebäude mit Energiegewinn als Einfamilienhaus mit Berücksichtigung des Haushaltsstroms

6.4 Auswertungen zum dynamischen Verhalten von Gebäuden mit Energiegewinn

Im Folgenden soll das dynamische Verhalten zweier untersuchter Gebäudestandards dargestellt werden, um Veränderungen der Energiebilanzen im Tages- und Wochenverlauf zu analysieren.

Dynamische Lastgänge ohne Haushaltsstrom

In Abbildung 81 sind für einen Zeitraum Anfang Januar Ergebnisse für 10 Effizienzhäuser Plus (EH40+) dargestellt, wobei das Vierfache der für EH40+ benötigten Dachfläche mit PV belegt ist. Die Wärmeerzeugung (oberes Diagramm) erfolgt mit der Wärmepumpe (rote Linie, hier weitgehend identisch mit dem Gesamtwärmeverbrauch in hellblau), die den Tagesverlauf des Wärmebedarfs bereitstellt. Nur in wenigen Stunden ab Stunde 232 erzeugt die Wärmepumpe mehr Wärme, als aktuell benötigt wird.

Im darunter liegenden Diagramm ist die Stromerzeugung aus PV (blaue Linie) und aus dem fossilen Kraftwerk (gelbe Linie) dargestellt. Im abgebildeten Zeitraum liefert die PV nur in den Mittagsstunden Strom an die Gebäude. Die Differenz zum Gesamtstromverbrauch (hier ohne Haushaltsstrom gerechnet) wird aus dem Netz bezogen und in fossilen Kraftwerken erzeugt. Wenn die PV-Stromerzeugung den Bedarf deckt, sinkt der Netzbezug auf null.

Darunter ist der Ladezustand von Wärme- und Stromspeicher dargestellt. Die PV-Stromerzeugung liefert nur wenige Überschüsse im dargestellten Zeitraum. Sind Überschüsse vorhanden, wird dann zuerst der Stromspeicher (blaue Linie) geladen und die Ladung nach Absinken der PV-Erzeugung gleich wieder entnommen. Ab Stunde 232 ist der Stromspeicher vollständig geladen und es sind immer noch Überschüsse vorhanden, so dass der Wärmespeicher (rote Linie) von der Wärmepumpe geladen wird.

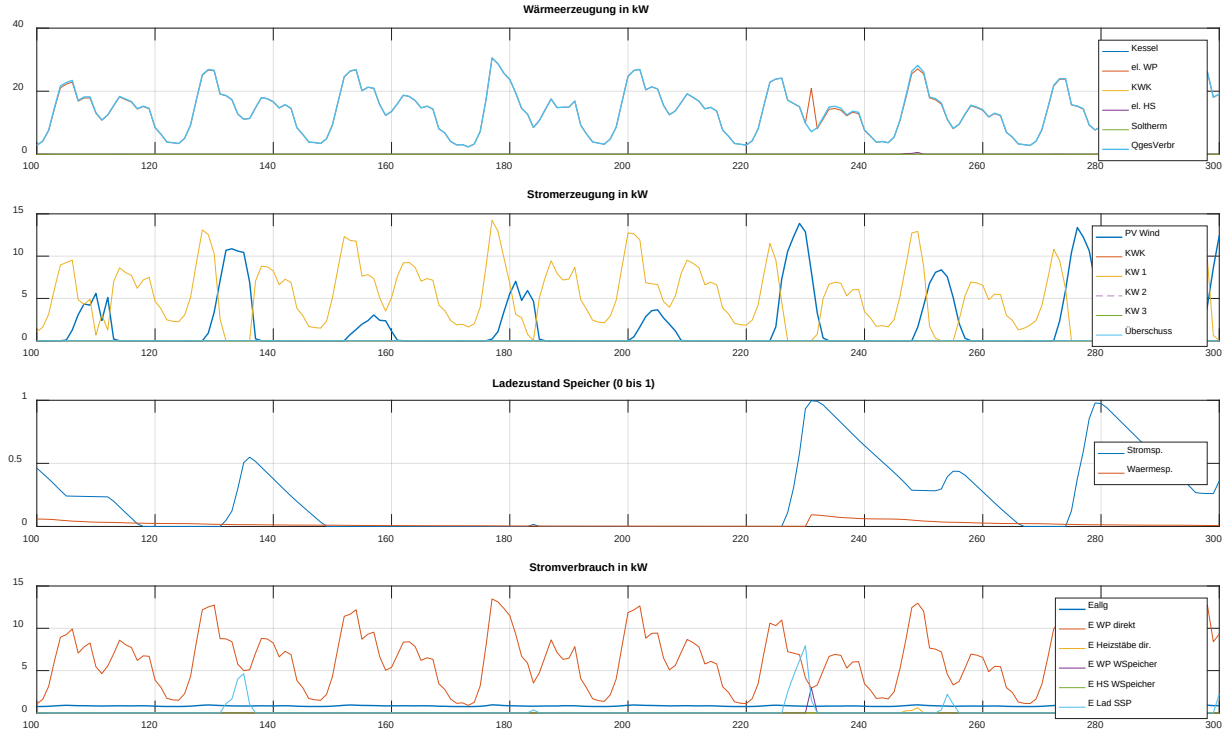


Abbildung 81: Stundenwerte Anfang Januar der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus mit Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung.

Im letzten Diagramm ist der Stromverbrauch dargestellt (ohne Haushaltsstrom). Nur ein kleiner aber relativ konstanter Anteil wird für Hilfsstrom (Eallg, dunkelblau) benötigt, dominierend ist der Strombedarf für die Wärmepumpe (rote Linie). In hellblau ist die Ladung des Stromspeichers dargestellt, die nur zu drei kurzen Zeitpunkten im dargestellten Ausschnitt des Jahres stattfindet. In der Stunde 232 springt außerdem kurz der Elektroheizstab an (violette Linie).

Abbildung 82 zeigt die gleichen Gebäude Anfang Februar. Der Wärmebedarf ist höher (Außentemperatur ist niedriger), gleichzeitig steht wegen höherer Solarstrahlung ein größeres PV-Stromangebot zur Verfügung. Die Wärmepumpe erzeugt in diesem Zeitraum häufig mehr Wärme, als zu diesem Zeitpunkt von den Gebäuden benötigt wird. Außerdem geht der Elektroheizstab in den Mittagsstunden in Betrieb (oberes Diagramm). Durch das gute PV-Stromangebot wird im dargestellten Zeitraum in den Mittagsstunden nie Strom aus dem Netz bezogen (gelbe Linie im 2. Diagramm).

Wird der PV-Strom nicht vollständig direkt in den Gebäuden benötigt, so wird der Stromspeicher mit dem Überschuss geladen. Wenn der Stromspeicher vollständig geladen ist, erfolgt die Ladung des Wärmespeichers mit der Wärmepumpe und dem Heizstab (3. Diagramm). Die Kombination beider Speicher reicht hier aus, damit beide in der dargestellten Woche nie vollständig entladen werden müssen. Allerdings werden nicht die gesamten Gebäude aus den Speichern versorgt, da die Kapazität des Stromspeichers nicht ausreicht und außerdem die Regelung die Nutzung gespeicherter elektrischer Energie für Wärme begrenzt.

Der Stromverbrauch der Gebäude (4. Diagramm) setzt sich nun aus Verbrauch der Wärmepumpe für Wärme direkt in die Gebäude (rote Linie) und in den Speicher (violette Linie), Heizstab direkt (gelbe Linie) und in den Speicher (grüne Linie) sowie Allgemein/Hilfsstrom (dunkelblaue Linie) zusammen.

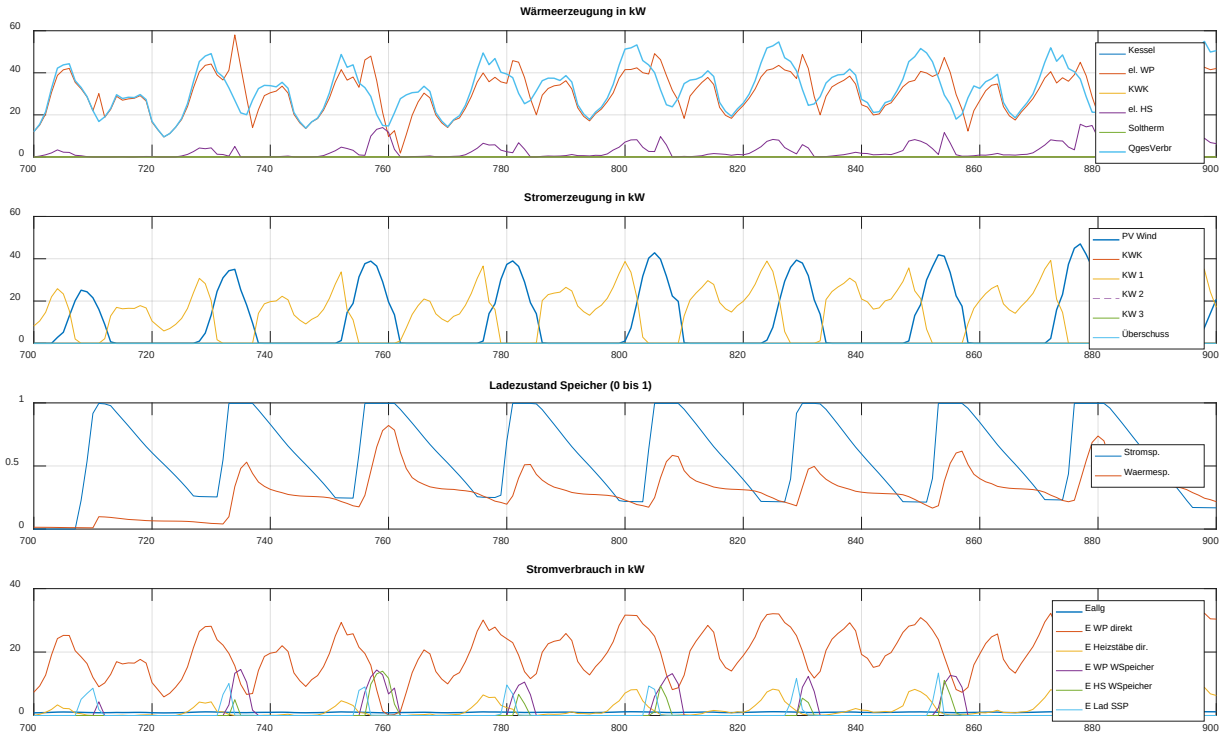


Abbildung 82: Stundenwerte Anfang Februar der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung.

Ende März ist der Wärmebedarf deutlich gesunken und wird von der Wärmepumpe und dem Heizstab gedeckt (Abbildung 83, 1. Diagramm). Die PV-Stromerzeugung kann den Bedarf der Gebäude (ohne Haushaltsstrom) vollständig decken, gleichzeitig entstehen tagsüber Überschüsse, die ins Netz eingespeist werden (2. Diagramm, hellblaue Linie). Der Stromspeicher wird über Nacht teilweise entladen, maximal aber nur bis zur Hälfte. Gleichzeitig ist der Wärmespeicher tagsüber komplett gefüllt und deckt den nächtlichen Wärmeverbrauch (3. Diagramm). Der Stromverbrauch der Gebäude (4. Diagramm) setzt sich zusammen aus dem Verbrauch der Wärmepumpe zu Beladung des Speichers, dem Heizstab, wenn er den Wärmespeicher belädt und der Ladung des Stromspeichers. Die Gebäude werden zu dieser Zeit somit vollständig aus der PV-Stromerzeugung mit Hilfe der Strom- und Wärmespeicher versorgt und es liefert gleichzeitig noch Strom für andere Gebäude ins Netz.

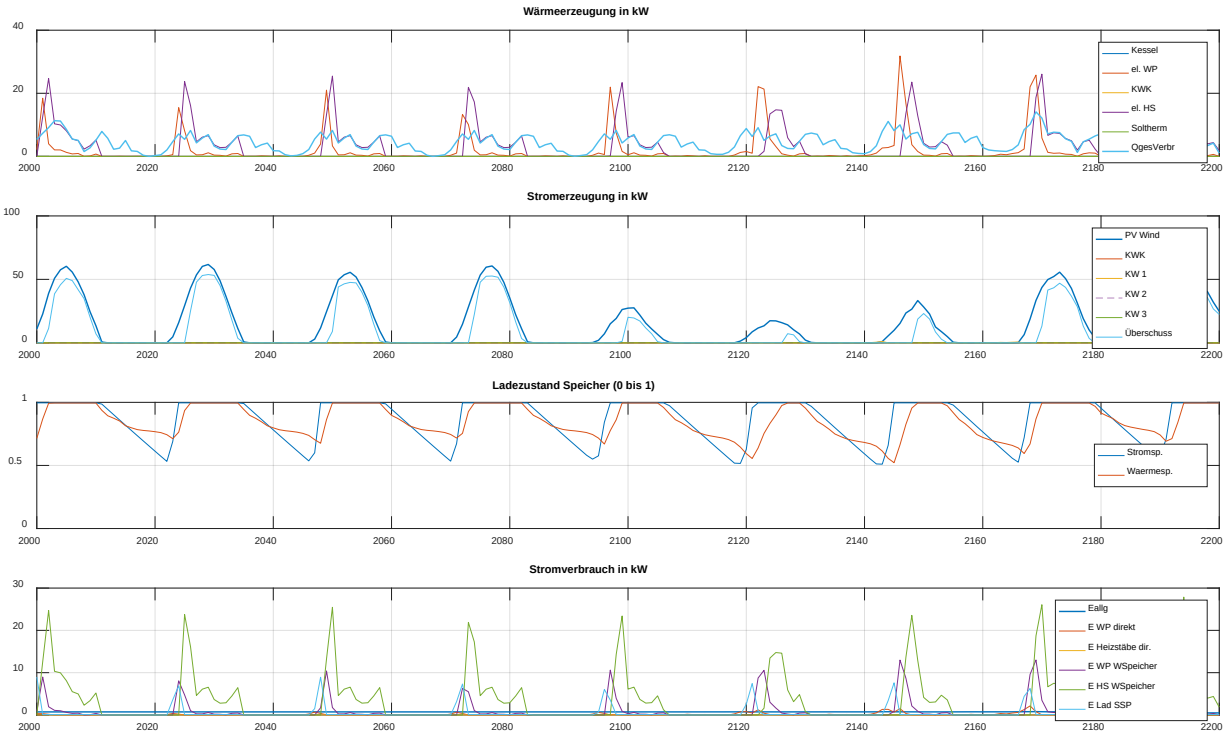


Abbildung 83: Stundenwerte Ende März der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung.

Im Sommer steigt die PV-Stromerzeugung weiter an, der Wärmeverbrauch ist auf die Warmwasserbereitung reduziert, so dass die Gebäude weiter vollständig mit Hilfe der PV-Anlage versorgt werden (hier nicht als Abbildung dargestellt).

Mitte Dezember (Weihnachten), wenn die Solarstrahlung bereits reduziert ist und sehr schwankend ausfällt, treten Phasen mit komplett entleerten Speichern auf, an sonnigen Tagen kann zumindest der Elektrospeicher kurzzeitig geladen werden (Abbildung 84). Für den Wärmespeicher stehen nur um die Stunde 8700 genügend Überschüsse zur Verfügung, um eine nennenswerte Ladung zu erreichen. Danach beziehen die Gebäude auch im Dezember über 24 h praktisch keinen Strom aus Kraftwerken.

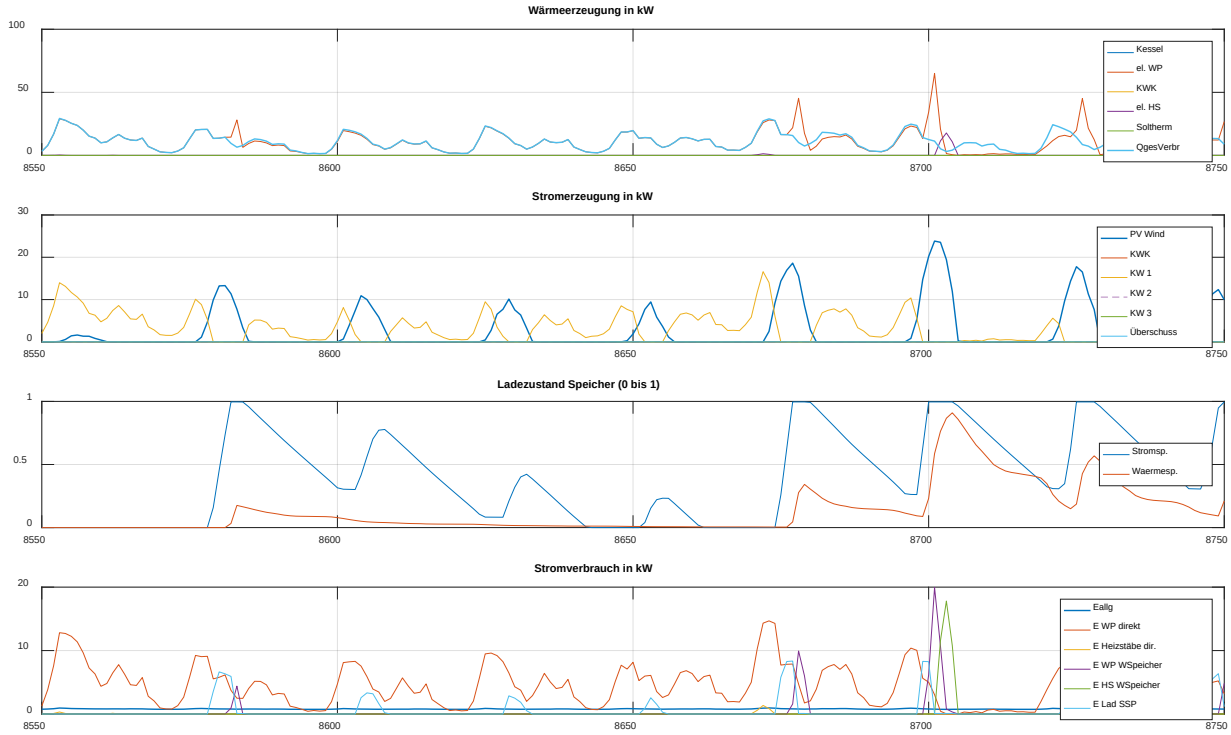


Abbildung 84: Stundenwerte Mitte Dezember der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung.

Dynamische Lastgänge mit Haushaltsstrom

Betrachtet man die gleichen Gebäude mit Haushaltsstrom (Abbildung 85), so bleiben die Wärmeerzeugung und auch deren Zusammensetzung Anfang Januar identisch (1. Diagramm). Die Stromerzeugung im Kraftwerk muss ansteigen, um den Haushaltsstrom zu liefern, da die PV-Erzeugung fast nie ausreicht (2. Diagramm). Aus diesem Grund stehen auch keine nennenswerten Überschüsse mehr zur Ladung des Stromspeichers (Vorrang vor Wärmespeicher) zur Verfügung (3. Diagramm). Beim Gesamtstromverbrauch der Gebäude fällt nun neben dem Verbrauch der Wärmepumpe auch derjenige für den Allgemeinstrom auf, der in diesem Fall auch den Haushaltsstrom enthält.

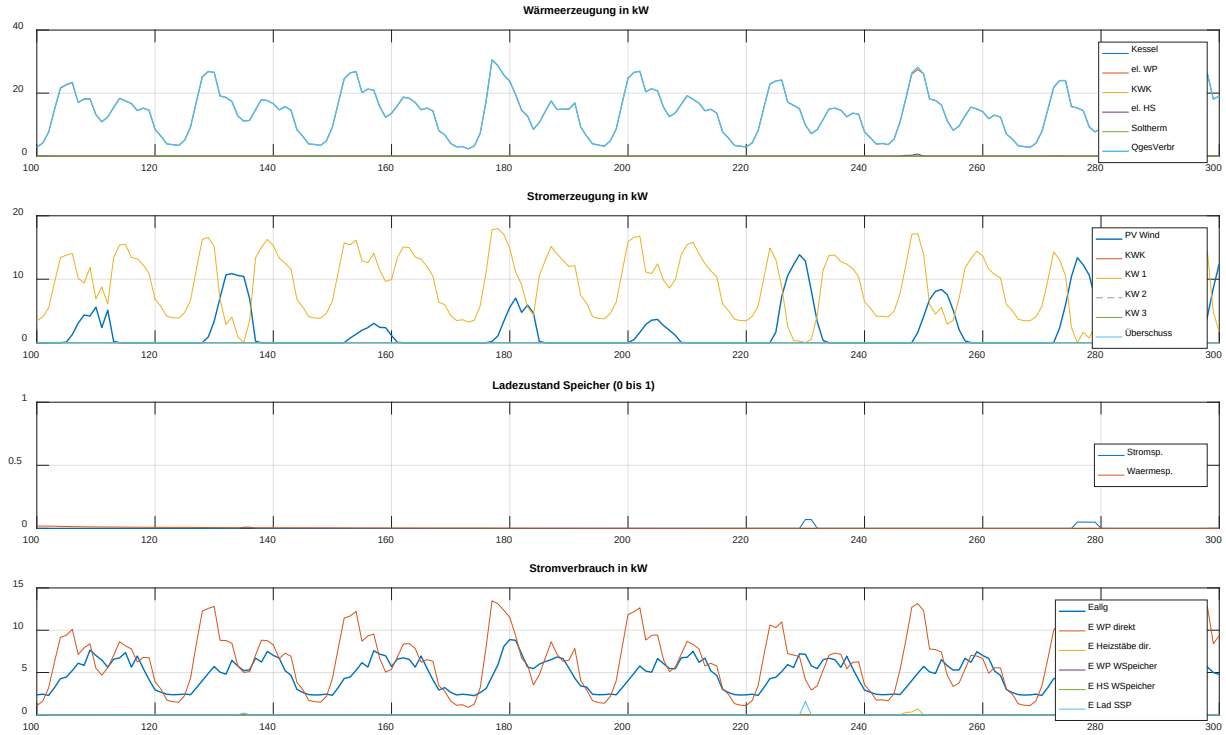


Abbildung 85: Stundenwerte Anfang Januar der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung; Betrachtung mit Haushaltsstrom

Anfang Februar (Abbildung 86) können unter Berücksichtigung des Haushaltsstroms mit der PV-Stromerzeugung weniger Überschüsse zur Ladung der Speicher erzielt werden, als in Abbildung 82 ohne den Haushaltsstrom. In der Folge ist der Stromspeicher weniger lang geladen und auch der Ladezustand des Wärmespeichers liegt im Mittel niedriger.

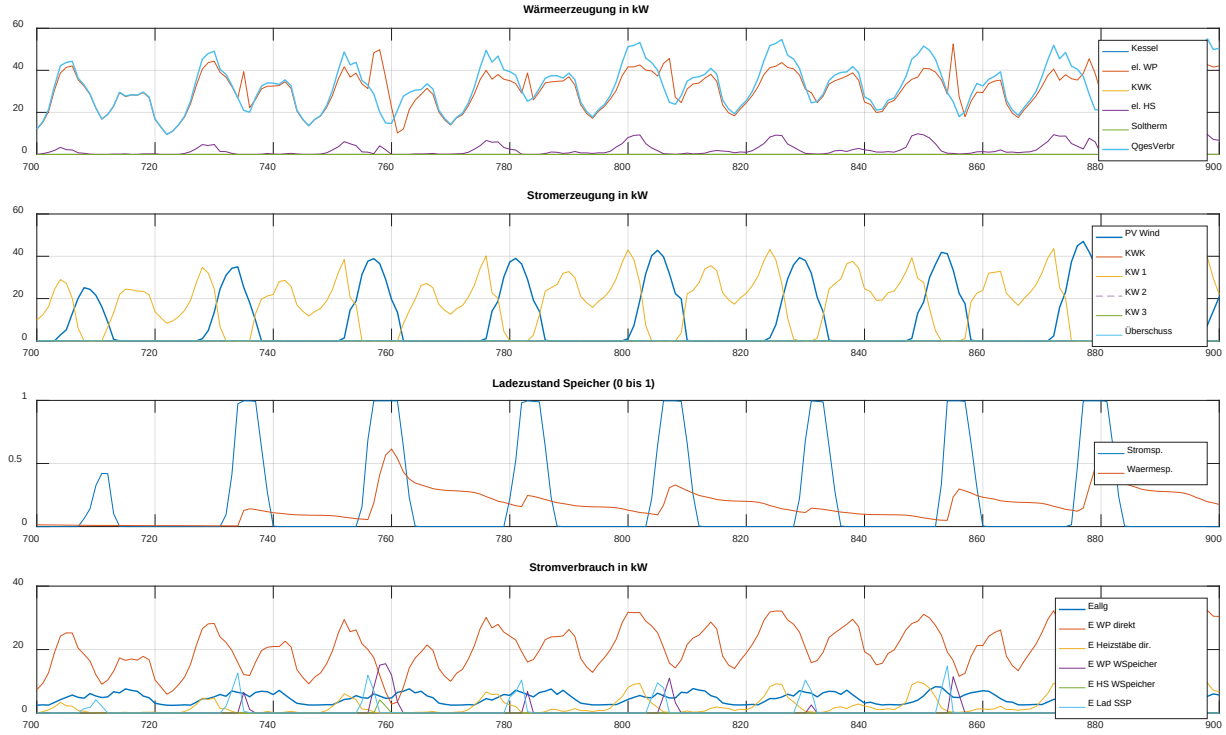


Abbildung 86: Stundenwerte Anfang Februar der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung; Betrachtung mit Haushaltsstrom

Ende März (Abbildung 87) werden die Gebäude auch mit Berücksichtigung des Haushaltsstrom überwiegend über die PV-Anlage mit Strom und Wärme versorgt, allerdings muss in geringem Umfang in den Nachtstunden Strom aus dem Netz entnommen werden und die Einspeisung fällt etwas niedriger aus. In der Folge wird auch der Elektrospeicher nachts vollständig entladen. Beim Stromverbrauch fallen die Spitzen (grüne Linie) auf, die durch die Ladung des Wärmespeichers durch den Heizstab hervorgerufen werden.

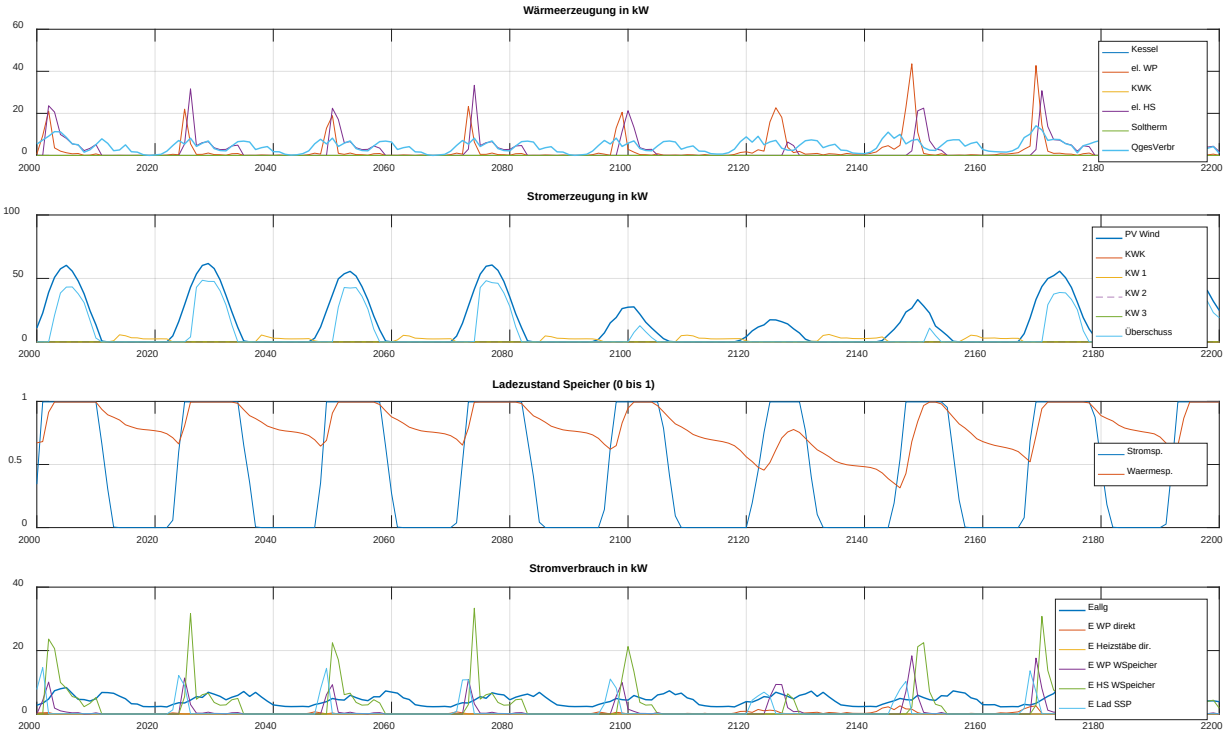


Abbildung 87: Stundenwerte Ende März der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung; Betrachtung mit Haushaltsstrom

Während des Sommers ändern sich die Tagesprofile kaum gegenüber Abbildung 87, die PV-Stromproduktion steigt an sonnigen Tagen noch ein wenig weiter an und die Zeiten mit Netzbezug in der Nacht – hervorgerufen durch die sehr geringe Speichergröße von 2,1 kWh – reduzieren sich weiter.

In der Weihnachtswoche im Dezember liegt der Stromverbrauch höher als im restlichen Jahr, so dass nur noch wenige Überschüsse in den Elektrospeicher fließen. Am Ende des dargestellten Zeitraums mit einem sehr sonnigen Tag kann auch der Wärmespeicher von der Wärmepumpe und dem Heizstab etwa zu Hälfte geladen werden. Anschließend werden die Gebäude Ende Dezember fast vollständig aus dem Speicher mit Wärme versorgt. Der Stromspeicher ist aufgrund der begrenzten angesetzten Kapazität dagegen bereits nach wenigen Stunden wieder entladen.

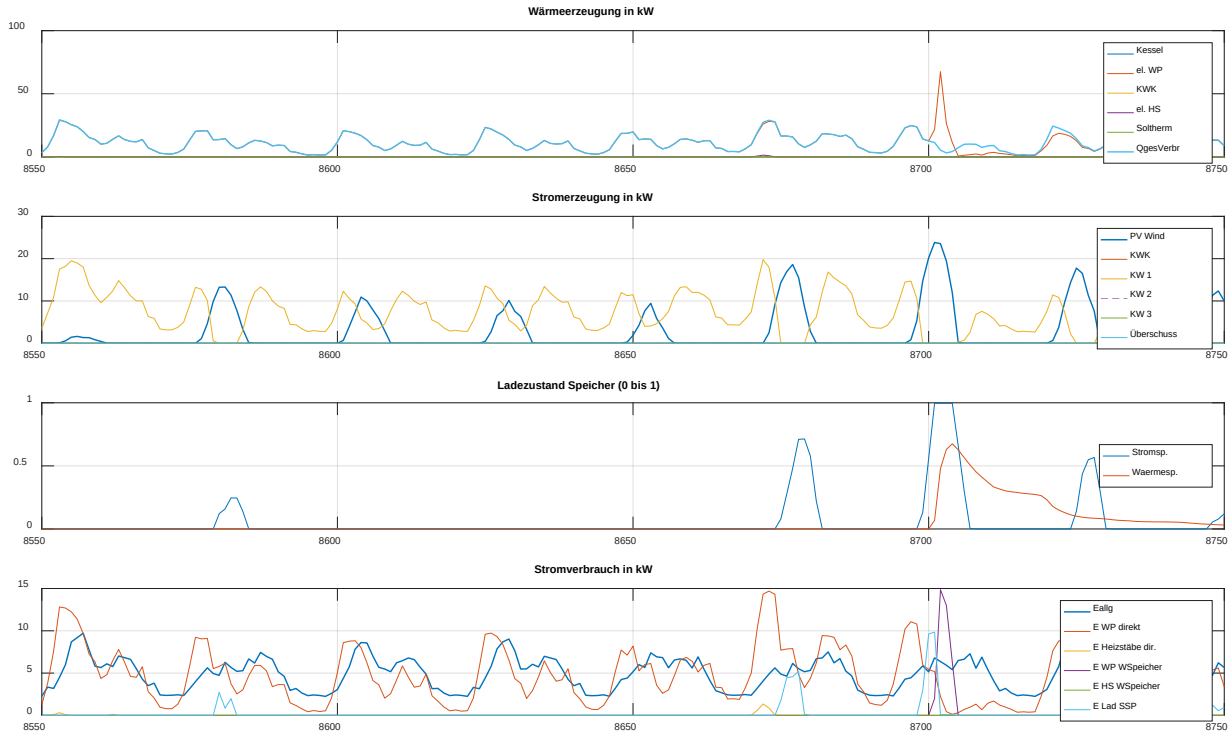


Abbildung 88: Stundenwerte Mitte Dezember der Wärme- und Stromerzeugung, des Ladezustands der Speicher (Strom und Wärme) und des Stromverbrauchs im Gebäude (Summe für 10 Gebäude an 5 Standorten) für das Effizienzhaus-40 Plus Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 15 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie dem 4-fachen der erforderlichen PV-Erzeugung; Betrachtung mit Haushaltsstrom

6.5 Fazit

Bei den Auswertungen der verschiedenen Konzepte für Gebäude mit Energiegewinn zeigt sich, dass die Gebäude die in diesem Bericht entwickelten Anforderungen an THG-Emissionen und Brennstoffverbrauch unterschiedlich gut einhalten. Zwar muss berücksichtigt werden, dass die verschiedenen Standards meist unterschiedlich ausgeführt werden können und auch die Dimensionierung kann anders ausfallen kann, als bei den hier untersuchten Beispielausführungen. Dennoch erkennt man – wie bereits in Kapitel 4 – das für Neubauten mit einem Wärmeschutz im Bereich der Ziel-U-Werte beim Wärmeschutz sowie einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung das Erreichen der THG-Ziele leichter möglich ist als mit weniger ambitionierten Standards. Allerdings hat auch die Größe der PV-Anlage einen großen Einfluss auf die Ergebnisse und mit entsprechend groß dimensionierten Anlagen kann auch mit einer Gebäudehülle als EH55 der THG-Zielwert eingehalten werden bzw. wird nur wenig PV installiert, so ist auch die bessere Gebäudehülle nicht ausreichend. Zum Sonnenhaus ist festzuhalten, dass es für sich niedrige THG-Emissionen erreicht, in einem Gesamtbestand nur dann Vorteile bringt, wenn es über eine PV-Anlage auch Strom ins Netz liefert.

Die Auswertungen haben auch gezeigt, dass selbst die hier untersuchten ambitioniertesten Gebäudestandards alleine keinen Überschuss erreichen, wenn man den Haushaltsstrom mit bilanziert und Erzeugung und Verbrauch auf Stundenbasis betrachtet. Auch hier wird die Bedeutung der Windkraft für die regenerative Versorgung der Gebäude im Winter deutlich.

7 Auswirkungen von klimaneutralen Neubauten im Wohngebäudebestand 2050

Bisher wurden in dieser Untersuchung Einzelgebäude oder Gruppen von Häusern betrachtet. Es wurde herausgearbeitet, welche Randbedingungen erfüllt sein müssen, damit die Gebäude zukunftsfähig sind und sich in den Gesamtbestand 2050 gut integrieren. Ziel der Untersuchung war, Neubauten so planen zu können, dass die Treibhausgasemissionen trotz der zusätzlichen Wohnflächen und zusätzlicher Verbräuche zumindest nicht ansteigen, da die Neubauten andere Bestandsgebäude teilweise mit versorgen können.

Im vorliegenden Kapitel soll nun anhand von Beispielrechnungen demonstriert werden, dass es tatsächlich möglich ist, einen klimaneutralen Neubau zu erreichen, d.h. einem zukünftigen Wohngebäudebestand neue Gebäude in relevantem Umfang hinzuzufügen, ohne dass zusätzliche Treibhausgasemissionen entstehen. Betrachtet wird der Bereich der Wärmeversorgung ohne Haushaltsstrom.

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe des Simulationsmodells durchgeführt, indem dieses nun mit seinen Berechnungsansätzen gemäß Teil 1 des Projektendberichts [Diefenbach et al. 2019] auf den gesamten deutschen Wohngebäudebestand angewendet wurde. Es wird zunächst ein zukünftiger energetisch modernisierter Wohngebäudebestand mit bereits hohen Anteilen von Wind-/Solarenergie- und Biomassenutzung betrachtet. Zu diesem werden dann Neubauten mit hohem Dämmstandard und darauf installierten neuen Photovoltaikanlagen zugebaut. Außerdem wird angenommen, dass mit den Neubauten anteilig auch deren Windkraft- und Biomassepotentiale aktiviert werden, d.h. es wird ein entsprechender Zubau von Windkraftanlagen im neuen (erweiterten) Gesamtbestand sowie ein entsprechend höheres Biomassepotential angenommen. Unter diesen Randbedingungen wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen untersucht.

Wenn man diese Ansätze mit den verschiedenen Stufen des klimaneutralen Gebäudes aus Kapitel 5 vergleicht, so kommt man auf den ersten Blick zu dem Schluss, dass die Untersuchungskonfiguration auf den ersten Blick der schwächsten Stufe 1 (mit Anrechnung von wohnflächenbezogenen Windstrom und Biomassepotentialen) entspricht. Allerdings ist zu beachten, dass die Untersuchungsbedingungen für die zusätzlichen Neubauten hier besonders ungünstig sind und nicht dem allgemeinen Bewertungsansatz in Kapitel 5 entsprechen: In der hier durchgeführten Analyse werden die Neubauten – anders als in der Realität – nicht kontinuierlich zugebaut, sondern kommen erst am Ende zu einem bereits fertig modernisierten Gebäudebestand mit einem entsprechend bereits installierten Anlagenpark aus Photovoltaik- und Windkraft hinzu. Dies bedeutet, dass in der Simulation die Solarstromüberschüsse der Neubauten sowie die zusätzlich (entsprechend ihrem wohnflächenbezogenen Potential) zugebauten Windkraftanlagen, lediglich in Form ihres Grenznutzens wirksam werden können. Die Bewertungsansätze aus Kapitel 5 gehen dagegen davon aus, dass die Anlagen entsprechend einem mittleren Nutzen im gesamten Bestand bewertet werden. Insofern sind die Untersuchungskonfiguration und die Stufenbewertung nicht direkt miteinander vergleichbar.

Konkret basiert die folgende Analyse auf der Basisvariante 9 (Var 9), die im Berichtsteil 1 in Kapitel 3 eingeführt wird. Es liegt ein energetisch modernisierter Wohngebäudebestand mit einem Gesamt-Wärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser in Höhe von 350 TWh/a vor. Die Wärmeversorgung erfolgt teils über Wärmenetze (mit Kraft-Wärme-Kopplung und elektrischen Wärmepumpen (für 30 % des Bestandes), teils über bivalente elektrische Wärmepumpen kombiniert mit Erdgas- bzw. Holzpelletkesseln (70 % des Bestandes) vorliegt. Photovoltaik- und Windstrom werden in Höhe von (brutto, vor Verteilnetzverlusten) 40 und 80 TWh/a eingesetzt, der Biomasseverbrauch ist auf die angenommenen Potentialgrenze von 50 TWh/a beschränkt. Es werden fünf Untersuchungsfälle betrachtet:

- Bestand ohne Neubau („Var 9 ohne Neubau“)
  Aus der ursprünglichen Basisvariante werden Teile des Neubaus entfernt (ca. 450 Mio m² Wohnfläche bzw. ca. 12 % des Gesamtbestands). Die Nutzung von Biomasse und Wind reduziert sich entsprechend (proportional zur Wohnflächenabnahme) auf 44 bzw. 70,4 TWh/a. Für die Photovoltaik wird eine überproportionale Abnahme gegenüber dem Ursprungszustand auf 26,5 TWh/a angenommen. Dies beruht auf der Annahme, dass die (hier fehlenden) Neubauten in den weiteren Varianten überproportional zur Bereitstellung der Solarstrompotentiale beitragen.
- Bestand mit Neubau („Var 9 mit Neubau“):
  Der Neubau (450 Mio m² Wohnfläche) wird nun wieder im Gesamtbestand berücksichtigt. Es wird ein sehr hoher Wärmeschutzstandard angesetzt (Effizienzhaus-40-Niveau gemäß den verwendeten Gebäudetypen, vgl. [Diefenbach et al 2017, Kap. 6.2]). Die Verteilung der verschiedenen Wärmeversorgungssysteme entspricht dem Gesamtbestand. Mit dem Zubau erreichen auch die Solar-/Windstrom- und Biomassenutzung wieder ihr ursprüngliches Niveau von 40, 80 bzw. 50 TWh/a. Der Photovoltaikzubau um 13,5 TWh/a, also von 26,5 auf 40 TWh/a, entspricht einem mittleren Jahresertrag von 30 kWh/m²a bezogen auf die Neubauwohnfläche[51].
- Bestand mit Neubau und bivalenten Wärmepumpen („Var 9 mit Neubau (biv. WP + Gas/Holz-K.)“)
  Diese Untersuchungsvariante entspricht der vorherigen, allerdings wird hier angenommen, dass im Neubau keine Nahwärmenetze, sondern ausschließliche Einzelhausheizungen (bivalente Wärmepumpen mit Erdgas- oder Holzkessel) eingesetzt werden.
- Bestand mit Neubau und bivalenten Wärmepumpen nur mit Erdgaskesseln („Var 9 mit Neubau (biv. WP + Gas-K.)“)
  Wie die vorherige Variante, in den Neubauten werden aber nur noch Erdgaskessel und keine Holzkessel mehr eingesetzt
- Bestand mit Neubau und monovalenten Wärmepumpen („Var 9 mit Neubau (monov. WP)“)
  Wie die vorherige Variante, in den Neubauten werden nur monovalente Wärmepumpen verwendet.

Die Ergebnisse für die resultierenden Treibhausgasemissionen im Wohngebäudebestand sind in Abbildung 89 dargestellt. Das Treibhausgasreduktionsziel von 25 Mt/a (entsprechend einer Emissionsminderung von 87,5 % gegenüber 1990, vgl. [Diefenbach et al. 2019]), ist gesondert markiert.

[51] Zum Vergleich: Die in Kapitel 3 eingeführten Beispielgebäude weisen im Maximum (bei voller Ausschöpfung der verfügbaren Dachfläche, ohne Anrechnung von Fassadenflächen) eine Solarstromerzeugung zwischen rund 32 kWh/(m²a) (Mehrfamilienhaus-Neubau) und 67 kWh/(m²a) (Einfamilienhaus) auf – dies ergibt sich aus den Wohnflächen und Solarerträgen in Tabelle 5 und in Tabelle 7.

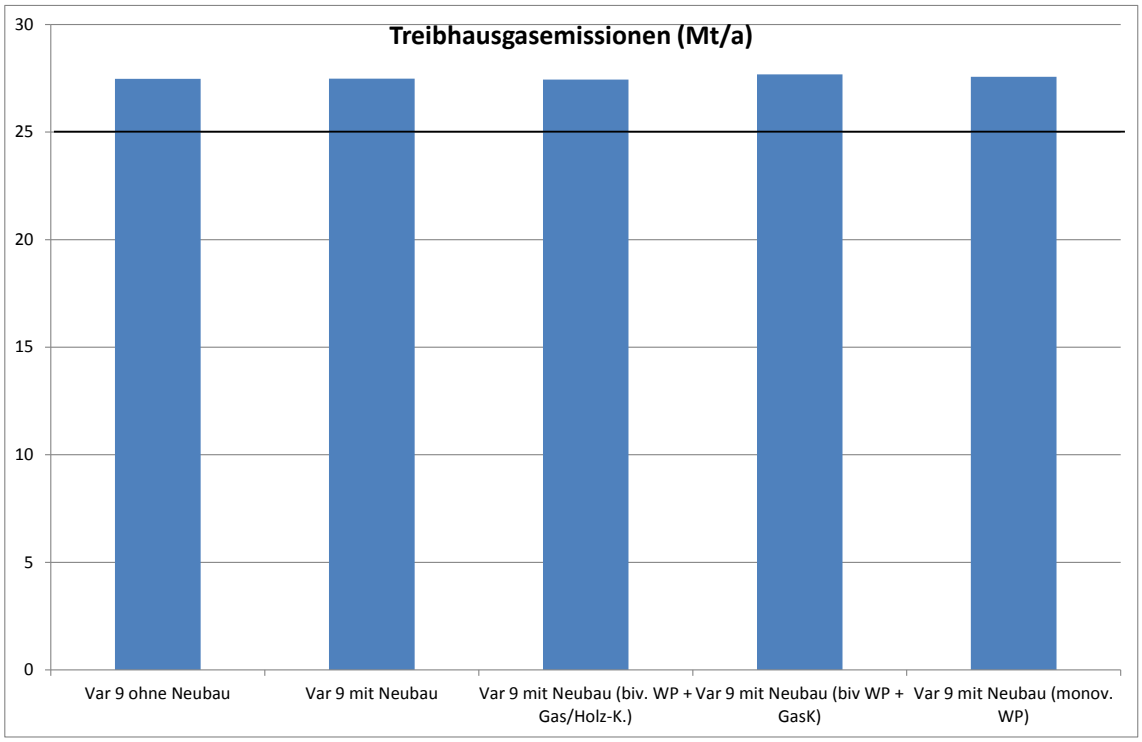


Abbildung 89: Treibhausgasemissionen für einen Wohngebäudebestand ohne und mit Neubau

Es zeigt sich, dass das Treibhausgasziel zwar knapp verfehlt wird. Entscheidend für die vorliegende Untersuchung ist aber das Ergebnis, dass trotz der Hinzunahme des Neubaus in der zweiten bis fünften Untersuchungsvariante die Höhe der Treibhausgasemissionen gegenüber der ersten Variante (ohne Neubau) praktisch gleich bleibt. In diesem Sinne ist also die Möglichkeit eines klimaneutralen Zubaus von Gebäuden im Rahmen der Simulation für den Wohngebäudebestand erfolgreich demonstriert.

Darüber hinaus ist das Ergebnis weitgehend unabhängig von der eingesetzten Wärmeversorgungstechnologie. Dies gilt auch in der vierten und fünften Variante, obwohl hier in den Neubauten gar keine Biomasse mehr verwendet wird. Gleichwohl wurde der der Biomasseverbrauch im gesamten betrachteten Wohngebäudebestand mit Neubau immer auf eine Höhe von 50 TWh/a einjustiert, das verfügbare Gesamtpotential ist also in allen Varianten mit Neubau gleich. Vor diesem Hintergrund zeigt die Untersuchung, dass sich der im Bewertungsmodell in Kapitel 5 postulierte Ausgleich zwischen Einzelgebäuden (hier: der betrachtete Neubau) und dem Restbestand bezüglich der Inanspruchnahme der einzelnen Energieträgerpotentiale in einer Simulation des Gesamtsystems tatsächlich nachweisen lässt.

8 Ausblick

In dem vorliegenden Bericht wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Konzepte für Neubauten in einem zukünftigen klimaneutralen Gebäudebestand verhalten und ob sie in der Lage sind Bestandsgebäude auf dem Weg zur Klimaneutralität zu unterstützen und die Treibhausgasemissionen insgesamt zu senken, obwohl zusätzliche Wohnfläche zugebaut wird. Wie in Kapitel 7 gezeigt, ist dies möglich. Die angesetzten Zielwerte wurden aus einem 87,5 % Reduktionsziel für die Treibhausgasemissionen im Wohngebäudesektor abgeleitet. Es ist jedoch nicht sicher, dass eine Reduktion in diesen Größenordnung ausreicht, um die Klimaschutzziele insgesamt zu erreichen und es stellt sich auch die Frage, ob Neubauten nicht einen noch höheren Beitrag liefern müssen, da bei vielen Bestandsgebäuden Klimaschutzmaßnahmen aufwändiger, teurer und teilweise auch nicht so weitgehend möglich sind; dies hat bei den Beispielgebäuden das sanierte Mehrfamilienhaus im höchsten Standard gezeigt. Werden für Neubauten Reduktionen der Treibhausgasemissionen um 95 % erwartet, um die genannten Nachteile des Bestandes zu kompensieren, so dürfen nur noch die in Tabelle 1 gezeigten sehr niedrigen Emissionen verursacht werden. Wie die verschiedenen Analysen in diesem Bericht gezeigt haben, ist dies mit Maßnahmen am Gebäude kaum noch möglich und neben einem umfassenden Ausbau der Windenergie werden auch neue Techniken wie Power-to-Gas relevant, um die sehr weitgehenden Emissionsreduktionen zu erreichen. Da es sich bei um eine noch nicht etablierte Technik handelt, wurde sie in dem Vorhaben EEGebaeudeZukunft nicht detailliert untersucht. Einige grundsätzliche Überlegungen zu Power-to-Gas finden sich jedoch in Teilbericht 1 [Diefenbach et al. 2019].

Wie in Kapitel A.4 gezeigt, beeinflusst der Standort nicht unwesentlich die Treibhausgasemissionen eines Gebäudes. Bisher stellt die Energieeinsparverordnung deutschlandweit aufgrund des einheitlichen Referenzklimas Potsdam überall gleiche Anforderungen an Wärmeschutz und Anlagentechnik. Es ist aber zu überlegen, ob für zukunftsfähige Neubauten die Treibhausgasemissionen am Standort begrenzt werden sollten. Das führt dann ggf. auch zu regional unterschiedlichen bevorzugten Lösungen bei der Planung. Gleichzeitig können die resultierenden Emissionen auf der übergeordneten Ebene präziser abgeschätzt werden, wenn realistische Randbedingungen zugrunde gelegt werden. Wie sich in Kapitel 4 gezeigt hat, können Einfamilien- und Reihenhäuser die Emissionsziele einfacher erreichen als Mehrfamilienhäuser, insbesondere dann, wenn der Haushaltsstrom mit betrachtet wird. Hier ist zu prüfen, ob die Anforderungen an zukunftsfähige Neubauten nicht differenziert nach Gebäudegröße formuliert werden sollten. Da das Gesamtziel feststeht, müssten kleinere Gebäude (EFH, RH), die Mehrfamilienhäuser mit deren oft ungünstigeren Voraussetzungen für die Einhaltung der Treibhausgasziele unterstützen, indem sie z. B. anteilig mehr Elektrizität mit Hilfe von Photovoltaik erzeugen.

Weithin muss berücksichtigt werden, dass Literaturauswertungen in Teilbericht 1 [Diefenbach et al. 2019] gezeigt haben, dass auch die Kältemittel von Wärmepumpen, die gegenwärtig eingesetzt werden, aufgrund von Leckagen und bei Wartungsarbeiten insgesamt ein nicht unerhebliches Treibhausgaspotenzial besitzen, was die Treibhausgasemissionen des Hauses erhöht. Auch wenn dieses Problem mittelfristig technisch durch andere Kältemittel reduziert werden kann, so spricht dies dafür, die THG-Zielwerte, die auf Basis des Brennstoffverbrauchs berechnet wurden, noch zu unterschreiten, um in Summe die Zielwerte einhalten zu können.

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union haben mit der EU-Richtlinie über die Gesamteffizienz von Gebäuden [EU 2010/31/27/EU] und deren Novellierung im Jahr 2018 [EU 2018/844] die Mitgliedsstaat verpflichtet „nearly zero energy“ Gebäude ab dem Jahr 2021 bei Neubauten von Wohngebäuden vorzuschreiben. Die Ausgestaltung, was unter einem solchen Gebäude zu verstehen ist, unterliegt im Rahmen von EU-Anforderungen aber den nationalen Regierungen. Die bisherigen Veröffentlichungen in Deutschland sowie der Referentenentwurf zum Gebäudeenergiegesetz [GEG 2019], der die Richtlinie umsetzen soll, lassen nicht darauf schließen, dass die in diesem Bericht herausgearbeiteten Konzepte für zukunftsfähige Neubauten mit der Umsetzung der EPBD in Deutschland umgesetzt werden. Da im Bausektor neue Entwicklungen bis zur Umsetzung in die Praxis Zeit benötigen, sind hier – unabhängig davon, dass die

großen Herausforderungen beim Gebäudebestand liegen – weitergehende Anstrengungen erforderlich, um Neubauten zukunftsfähig umzusetzen (vgl. [Loga et al. 2018]).

Die untersuchten Beispielgebäude und Ausführungsvarianten bilden nicht das vielfältige Spektrum von Gebäuden und Konstruktionen ab, die architektonisch und technisch möglich sind. Somit bilden die Untersuchungen nur einen Ausschnitt aus den Möglichkeiten ab, mit denen zukunftsfähige Neubauten realisiert werden können. Hier sollten sich weitere Untersuchungen anschließen, um Planungsoptionen für Bauherren und Planer transparenter herausarbeiten zu können. Insbesondere durch eine optimierte Gebäudeplanung, z. B. in Bereich von Dachflächen für PV-Anlagen und Ausnutzung lokaler Besonderheiten, können die Treibhausgasemissionen auch weiter reduziert werden.

Berechnungen für zukünftige Entwicklungen basieren immer auch auf Annahmen. Bei den Untersuchungen in diesem Bericht wurden u.a. Annahmen zum Wohnflächenzuwachs zugrunde gelegt. Steigt die Wohnfläche bis zum Jahr 2050 stärker an, so resultieren daraus geringere flächenbezogene Kennwerte für Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen und die Anstrengungen bei der Emissionsminderung müssen noch weiter zunehmen. Umgekehrt reduzieren sich die Anforderungen, wenn der Wohnflächenverbrauch insgesamt reduziert würde oder der Zuwachs geringer ausfällt. Hier ergeben sich somit zusätzliche nichttechnische Handlungsoptionen beim Klimaschutz, die im Projekt jedoch nicht untersucht wurden, von Politik und Gesellschaft zur Erreichung des Gesamtziels aber nicht außer Acht gelassen werden sollten.

In Kapitel 5 wurde der „bewertete Erdgasverbrauch“ als Bewertungsgröße für die Ausnutzung der Potenziale bei Treibhausgasemissionen, Biomasse, Windkraft sowie Solarenergie vorgestellt. Damit muss kein Gebäude alle Budgetgrenzen einzeln einhalten, da in der Regel nicht alle Budgets gleichzeitig genutzt werden und sich eine Kompensation zwischen Gebäuden mit unterschiedlicher Energieversorgung ergibt. Gleichzeitig müsste nur generell festgelegt werden, z.B. wieviel Biomasse insgesamt im Wohngebäudesektor verbraucht werden darf, es muss aber nicht zwingend auf der Ebene einzelner Gebäude eingegriffen werden. Wird dieser Ansatz weiterverfolgt, so sollte eine Einbeziehung des Haushaltsstroms entwickelt werden, da die Bereiche Wärme und Strom aufgrund des erforderlichen Ausbaus bei den Wärmepumpen ohnehin zusammenwachsen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss außerdem berücksichtigt werden, dass im verwendeten Berechnungsmodell der Betrieb der Anlagentechnik für die Wärmeversorgung und der Einsatz der thermischen und elektrischen Speicher so modelliert wurden, dass sie für das Gesamtsystem des Gebäudebestandes und einer zukünftigen regenerativen Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft in optimaler Weise betrieben wird. Somit gelten die Aussagen nur, wenn eine solche Regelung in den Neubauten in der Fläche eingesetzt wird, andernfalls liegen die Treibhausgasemissionen wahrscheinlich höher. Allerdings ist diese Technik gegenwärtig auf dem Markt noch nicht verfügbar – sie stellt aber auch keine zu hohen Hürden für eine Markteinführung dar.

Für Wärmepumpen wurde das Label „Smart Grid Ready“ entwickelt [BWP 2019], das für Geräte vergeben wird, die in der Lage sind ihren Betrieb in vier unterschiedlichen Modi zu variieren. Dabei kann auch die verstärkte Befüllung von Wärmespeichern oder das aktive Einschalten der Wärmepumpe gesteuert werden. Vorgesehen ist diese Steuerungsfunktion entweder als Eingriffsmöglichkeit vom Netzbetreiben – an Stelle der statischen Rundsteuerempfänger – oder zur Verknüpfung mit einem hauseigenen Energiemanagement, z. B. von einer PV-Anlage. Somit verfügen Wärmepumpen mit diesem Label zumindest über Grundfunktionen, um eine zukunftsfähige Regelung umzusetzen.

Bisher stehen der Wärmepumpe jedoch noch keine direkten Informationen über das Angebot an erneuerbaren Energie im Netz zur Verfügung. Dies könnte als aktueller Preis an der Strombörse an das Gebäude übertragen werden. Langfristig muss aber die Frage gestellt werden, ob in den nächsten Jahrzehnten die Preisgestaltung an der Strombörse immer noch nach den gleichen Mechanismen wie heute erfolgen wird, da dann ein sehr hoher Anteil an Wind- und PV-Strom im Netz vorhanden sein soll und die Vergütung für

die Anlagenbetreiber für Wind- und Solarenergie nach Auslaufen der EEG-Förderung nicht zu geringsein darf, wenn die Ziele des Ausbaus erneuerbarer Energien erreicht werden sollen. Aus diesem Grund wäre die Schaffung eines weiteren Steuersignals, das den Anteil erneuerbarer Energien im Netz beschreibt, u.U. geeigneter als ein im Hinblick auf das Zusammenspiel mit dem Wärmesektor nicht optimal konzipierter Börsenstrompreis. Diese zusätzliche Information kann aus dem Wissen über den Kraftwerkseinsatz im Netz berechnet und dann an die einzelnen Gebäude und ihre Wärmeversorgungssysteme übermittelt werden, wobei die Frage der genauen Einbindung eines solchen Konzepts in den Strom- und Wärmemarkt (gegebenenfalls wieder in Form eines entsprechend ausgestalteten Preissignals) noch zu klären wäre.

Für die Erstellung von „Einsatzplänen“ für unterschiedliche Wärmeerzeuger im Gebäude muss es somit Weiterentwicklungen bei Energiemanagementsoft- und Hardware geben, wobei auf bereits vorhandene Technik aufgebaut werden kann. Der Schritt die Regelung für zukunftsfähige Gebäude tatsächlich in den nächsten Jahren am Markt einführen zu können, erscheint aus heutiger Sicht als nicht zu groß und mit zusätzlichem Forschungs- und Entwicklungsaufwand leistbar.

Ansätze für Smart Grid müssen in Richtung einer Informationsverarbeitung im Gebäude weiterentwickelt werden. Intelligente Stromnetze in bisherigen Ansätzen sind vor allem auf den Lastausgleich und die Integration erneuerbarer Energien im Übertragungs- und Verteilnetz ausgerichtet und werden zentral hierarchisch gesteuert. Das im Berechnungsmodell umgesetzte Konzept setzt auf eine weitgehend autarke Steuerung des Strombezugs (und der Erzeugung) der Gebäude unter Berücksichtigung des aktuellen Angebots. Für beide Ansätze sind intelligente Zähler zur Erfassung von aktuellem Verbrauch und Erzeugung erforderlich (Smart Meter).

Die Frage ist, mit welchen Instrumenten die geeignete Regelung in den Gebäuden eingeführt werden kann. Rein über mögliche Kosteneinsparungen beim Hausbesitzer scheint mit der heutigen Preisstruktur von Netzbezug eher unwahrscheinlich, d.h. die Variabilität des Endkundestrompreises müsste deutlich erhöht werden, was gegenwärtig aufgrund der Netzentgelte und weiterer Abgaben kaum realistisch ist. Allerdings ist in den nächsten Jahren ohnehin eine Reform der Netzentgelte zu erwarten, so dass dieser Aspekt dabei berücksichtigt werden kann. Weiterhin ist es denkbar, dass die Nutzung einer geeigneten Anlagensteuerung in den nächsten Jahrzehnten generell vorgeschrieben wird– analog zum Roll-out / Pflichteinbau der ersten Generation von intelligenten Messeinrichtungen (Smart Meter) [52] Für die Einführung in die Gebäude sind somit mehrere mögliche Wege denkbar.

[52] Vergleiche:
https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Verbraucher/NetzanschlussUndMessung/SmartMetering/SmartMeter_node.html, Abruf Sommer 2019

9 Literaturverzeichnis

[Agora Energiewende 2018]	Agora Energiewende: Daten zum Agorameter. Berlin, 2018
[Berlin 2014]	Senatsverwaltung Berlin: Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050, Potsdam und Berlin, 2014
[BMIBH 2018]	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat [Hrsg.]: Wege zum Effizienzhaus Plus – Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude. 6. Aktualisierte Auflage (BMI 18003), Berlin, 2018
[BWP 2019]	Bundesverband Wärmepumpe: Informationen zum SG Ready-Label. URL: https://www.waermepumpe.de/sg-ready/, zugegriffen am 06.08.2019
[dena 2018]	Deutsche Energie-Agentur: dena-Gebäudereport Kompakt 2018. Berlin, 2018
[Diefenbach et al. 2013]	N. Diefenbach, v. Malottki, C.; Enseling, A.; Loga, T.; Cischinsky, H.; Stein, B.; Hörner, M.; Grafe, M.: Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich – Zielerreichungsszenario -. BMVBS-Online-Publikation Nr. 03/2013. URL: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ministerien/BMVBS/Online/2013/DL_ON032013.pdf;jsessionid=E014C8EB60B70B82C7FC24F6F7EC8E74.live21304?__blob=publicationFile&v=5
[Diefenbach et al. 2015]	Diefenbach, N.; Loga, T.; Stein, B.: Szenarienanalysen und Monitoringkonzepte im Hinblick auf die langfristigen Klimaschutzziele im deutschen Wohngebäudebestand Bericht im Rahmen des europäischen Projekts EPISCOPE. IWU, Darmstadt, 2015. URL: http://episcope.eu/fileadmin/episcope/public/docs/pilot_actions/DE_EPISCOPE_NationalCase_Study_IWU.pdf
[Diefenbach et al. 2017]	Diefenbach, N.; Großklos, M.; Grafe, M.; Müller, A.; Born, R. (IWU), Ruppert, H.; Graf, K.-M. (h_da), Krzikalla, N. (BET): Modellentwicklung zur Analyse des zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und – nachfrage im Wohngebäudesektor; Zwischenbericht im Vorhaben EE-GebaeudeZukunft. IWU, Darmstadt, 29.03.2017. URL: https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/EEGebaeudeZukunft/Zwischenbericht_EEGebaeudeZukunft.pdf
[Diefenbach et al. 2019]	Diefenbach, N.; Großklos, M.; Grafe, M.; Müller, A.; Born, R. (IWU), Ruppert, H.; Graf, K.-M. (h_da), Krzikalla, N. (BET): Analyse der Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäudesektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050; Endbericht Teil 1 im Vorhaben EE-GebaeudeZukunft. IWU, Darmstadt, 2019.
[DIN V 18599-1]	Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 09-2018
[Disch]	Disch, R.: Häuser als Kraftwerke. Rolf Disch Solararchitektur, Freiburg, ohne Jahr. URL: http://www.rolfdisch.de/wp-content/uploads/BROSCHUERE_HA%CC%88USER_ALS_KRAFTWERKEEINZELSEITENSEITEN-1.pdf, zugegriffen am 19.07.2019
[Effizienzstrategie 2015]	Prognos, ifeu, IWU: Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Im Auftrag der Bundesstelle für Energieeffizienz. Berlin, Heidelberg, Darmstadt, 2015
[EU 2010/31/EU]	RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Amtsblatt der Europäischen Union L153/13 vom 18.6.2010
[EU 2018/844]	RICHTLINIE (EU) 2018/844 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz. Amtsblatt der Europäischen Union L156/75 vom 19.6.2018

[Erhorn, Bergmann 2015]	Erhorn, H.; Bergmann, A.: Energieeffizienter Neubau von Wohngebäuden - Begleitforschung und Querauswertung von Modellvorhaben (Phase 2). IBP-Bericht WB 175/2015, Stuttgart, 2015
[GEG 2019]	Gesetzentwurf der Bundesregierung zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude (Referentenentwurf zum Gebäudeenergiegesetz), Stand 28.05.2019. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/gesetz-zur-vereinheitlichung-des-energieeinsparrechts-fuer-gebaeude.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zugegriffen am 06.08.2019
[Großklos 2014]	Großklos, M.: Kumulierter Energieaufwand und CO2-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und -versorgungen. IWU, Darmstadt, 2014. URL: https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf
[Großklos et al. 2016]	Großklos, M.; Schaede, M.:, Hinz, E.: Mehrfamilienhäuser mit Energiegewinn Cordierstraße 4, Frankfurt am Main. Endbericht der Messphase. IWU, Darmstadt, 2016
[Großklos, Frank 2013]	Großklos, M.; Frank, M.: Monatlicher Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63. Jg. (2013), Heft 9, S. 32 - 35.
[Großklos, Schaede 2016]	Großklos, M.; Schaede, M.: Gebäude mit Energiegewinn – Schritte zum Energieüberschuss in Neubau und Bestand. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2016
[IWU 2003]	Ebel, W.; Großklos, M.; Knissel, J.; Loga, T.; Müller, K.: Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern. Eine vergleichende Analyse der Nutzerfaktoren am Beispiel der 'Gartenhofsiedlung Lummerlund' in Wiesbaden-Dotzheim. Energieteil des Endberichts; Bauprojekt, messtechnische Auswertung. IWU, Darmstadt, 2003. URL: https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/neh_ph/endbericht_ph-wiesbaden.pdf
[IWU 2015]	Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R.: Deutsche Wohngebäudetypologie - zweite erweiterte Auflage. IWU, Darmstadt, 2015
[KfW-Monitoring 2017]	Diefenbach, N.; Stein, B.; Loga, T.; Rodenfels, M.; Jahn, K.: Monitoring der KfW-Programme "Energieeffizient Sanieren" und "Energieeffizient Bauen" 2017. Institut Wohnen und Umwelt / Fraunhofer IFAM, Darmstadt/Bremen, 2018
[KlimAktiv 2018]	Klimaneutral leben: Die CO2-Bilanz im Blick; CO2-Rechner von KlimAktiv, ifeu und UBA. URL: http://www.uba.co2-rechner.de/de_DE/, abgerufen am 07.05.2018
[Loga, Imkeller-Benjes 1997]	Loga, T.; Imkeller-Benjes, U.: Energie-Pass Heizung/Warmwasser, energetische Qualität von Baukörper, und Heizungssystem. IWU, Darmstadt, 1997
[Loga et al. 2018]	T. Loga, M. Hörner, A. Müller: Wärmewende jetzt – Der Weg zu einer drastischen Senkung der CO2-Emissionen im Gebäudesektor. IWU-Schlaglicht 2/2018, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2018
[Pariser Abkommen 2015]	BMU: Die Klimakonferenz in Paris. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. URL: https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/, zugegriffen 02.07.2019
[PHI 2009]	Peper, S.; Grove-Smith, J.; Feist, W.: Sanierung mit Passivhauskomponenten - Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009
[Renner 2016]	Renner, Alexander: Die Gebäudestrategie der Bundesregierung: Effektivität und Wirtschaftlichkeit, Energieeffizienz und Erneuerbare, Sanierungsrate und –qualität. Vortrag an der ev. Akademie Loccum, am 19.09.2016. URL: http://www.loccum.de/material/arbeit/energie-gebaeude/renner.pdf, zugegriffen am 30.01.2019

[Schmid 2019]	Schmid, W.: Ergebnisse sprechen für KfW55+. In: Gebäude Energieberater. Heft 3/2019, Gentner Verlag, Stuttgart, 2019, S. 34 – 37
[Schöndube et al. 2018]	Schöndube, T.; Carrigan, S.; Kornadt, O.; Schoch, T.; Hartner, M.; Schilly, T.; Weber, D.; Wilhelm, J.: Niedrigstenergiegebäude – Entwicklung eines Standards und einer Berechnungsmethode für die Gebäudeenergieeffizienz. Zukunft Bau Forschungsbericht F3056, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2018
[SHI 2019]	Sonnenhaus-Institut: Energiestandards und Kriterien des Sonnenhauses. URL: https://www.sonnenhaus-institut.de/das-sonnenhaus/solarmodul-komponenten.html, zugegriffen am 18.07.2019
[WBGU 2009]	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Der WBGU-Budgetansatz; WBGU Factsheet 3/2009. Berlin, 2009
[Weniger et al. 2013]	Weniger, J.; Quaschning, V.; Tjaden, T.: Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen. pv magazine 1/2013
[Wöhrle et al. 2017]	Wöhrle, H.; Hutter, C.; Wenig, K.: Gutachten über Umweltpotenziale von Effizienzhaus Plus Gebäuden. Ingenieurbüro Hausladen / Zukunft Bau, Kirchheim, 2017
[Wörner et al. 2019]	Wörner, P.; Müller, A.; Sauerwein, D.: Dynamische CO2-Emissionsfaktoren für den deutschen Strom-Mix. In: Bauphysik, Band 41(1), 17-29, 2019

Anhang A : Randbedingungen bei der Modellierung

A.1 Einfluss der Modellierung auf das Berechnungsergebnis

Mit dem Modell können sowohl Einzelgebäude als auch große Ensembles von Gebäuden betrachtet werden. Die Modellierung einer Anzahl N von baugleichen Gebäuden kann folgendermaßen erfolgen:

1. Berechnung mit einem mittleren (typischen) Gebäude (siehe A.2) mit anschließender Multiplikation mit der gewünschten Anzahl N an Gebäuden;
   diese Vorgehensweise kann keinen Austausch zwischen den betrachteten Gebäuden berücksichtigen, wenn z. B. durch unterschiedliches Nutzerverhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt Gebäude A einen Energiebedarf besitzt, Gebäude B aber nicht die gesamte Energieerzeugung (Strom) verbraucht.
2. N Berechnungen mit einem Einzelgebäude aber N unterschiedlichen (zufälligen) Nutzungsprofilen. Die Berechnungsergebnisse werden anschließend aufsummiert. Ein Austausch zwischen den Gebäuden kann hier auch nicht berechnet werden.
3. Eine Berechnung mit einem Gebäude an einem Standort mit der N-fachen Fläche und Verwendung von N Nutzungsprofilen. Diese Variante bietet die Möglichkeit Energieflüsse innerhalb eines Zeitschrittes zu berücksichtigen.
4. Eine Berechnung mit der N-fachen Fläche und Verwendung von N Nutzungsprofilen, wobei die Teilflächen über Deutschland verteilt sind; hiermit können regionale Einflüsse auf Gebäudeenergiebedarf und PV-Stromerzeugung mit untersucht werden.

Für verschiedene Kenngrößen sind die Differenzen der berechneten Varianten für ein EFH-EH55 ohne WRG am Standort Würzburg mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und PV-Stromerzeugung auf 100 % der Dachfläche in Abbildung 90 und Abbildung 91 dargestellt. Es werden im Folgenden nicht alle Werte diskutiert sondern lediglich die Schlussfolgerungen dargestellt.

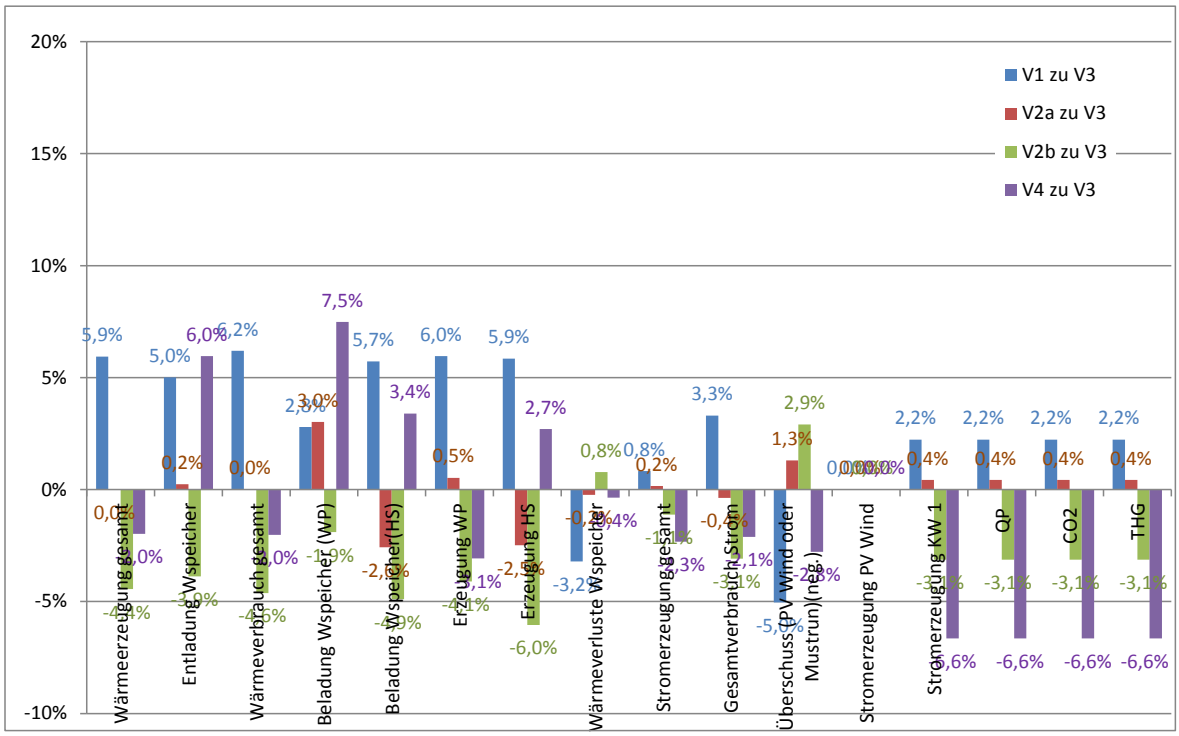


Abbildung 90: Abweichung der Berechnungsergebnisse bei vier verschiedenen Vorgehensweisen zur Berücksichtigung des Nutzerverhaltens – Teil 1 der Ergebnisse für ein EFH-EH55

Wird unterstellt, dass Variante 3 die reale Situation in einem regionalen Verbund von Gebäuden mit Energiebezug und -einspeisung am besten abbildet, so sind die Differenzen zu Variante 2a (ein Set von 20 Nutzungsprofilen) sehr gering, Variante V2b (ein Set von 20 anderen Nutzungsprofilen) dagegen liefert tendenziell niedrigere Werte, was darauf hindeutet, dass die Anzahl von 20 Profilen noch zu gering ist. Variante 1 weicht im Vergleich zu Variante 3 geringfügig ab.

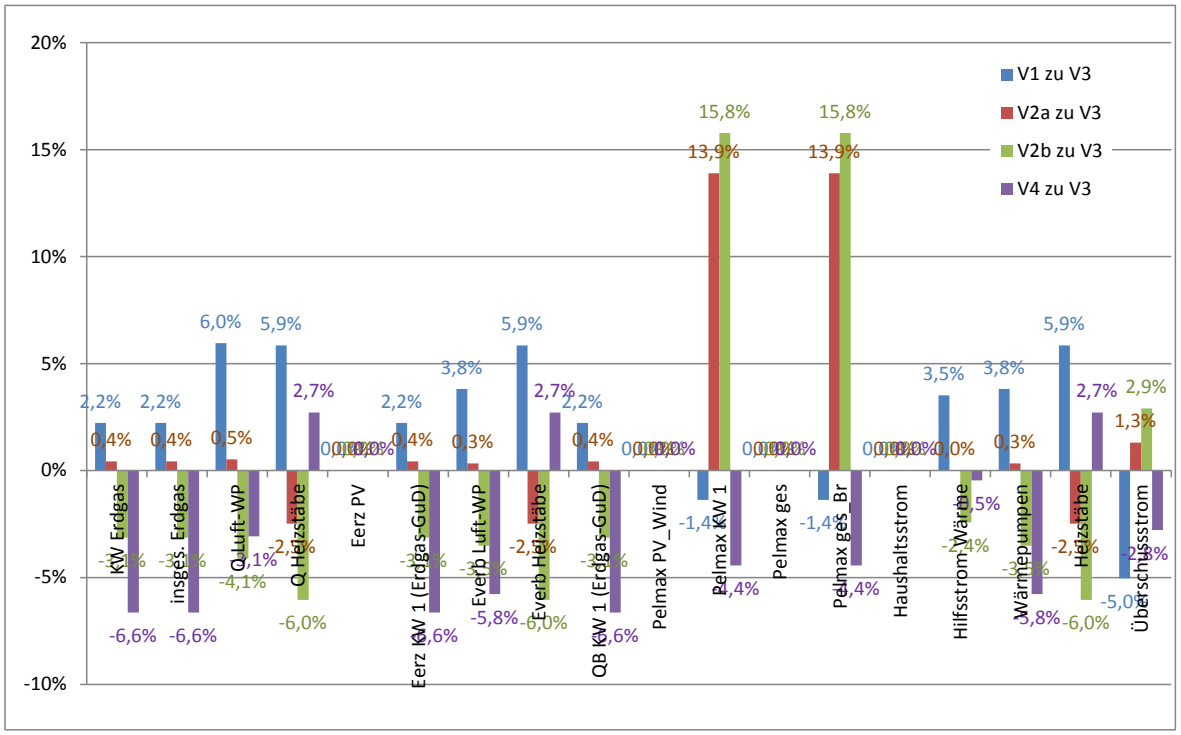


Abbildung 91: Abweichung der Berechnungsergebnisse bei vier verschiedenen Vorgehensweisen zur Berücksichtigung des Nutzerverhaltens – Teil 2 der Ergebnisse für EFH-EH55

Zwischen Variante 2a und 3 gibt es bei der Wärmeversorgung kaum Unterschiede, jedoch werden bei V2a die Beladung der Speicher und die Nutzung des Heizstabes unterschiedlich abgebildet. Deutliche Unterschiede zeigen sich auch bei den elektrischen Spitzenlasten der fossilen Kraftwerke. Bei Variante V2b liegt die Wärmeerzeugung niedriger, die Differenz bei der Spitzenlast fällt jedoch noch höher aus als bei V2a.

Variante 1 unterscheidet sich von Variante 3 vor allem bei der Wärmeerzeugung (höherer Bedarf) und beim PV-Überschuss (fällt kleiner aus). Bei der PV-Erzeugung und beim Haushaltsstrom zeigen sich keine Unterschiede, da diese Größen im Modell gesetzt werden.

Variante 4 ergibt eine um ca. 2 % niedrigere Wärmeerzeugung im Vergleich mit V3, dagegen werden die Speicher mehr be- und entladen, was zu ca. 6 % geringeren THG-Emissionen führt.

Bei den folgenden Berechnungen variiert zusätzlich die Höhe des Haushaltsstromverbrauches aufgrund des zufällig gezogenen Profils, außerdem wurden mehrere Standorte in Deutschland untersucht (Hamburg, Düsseldorf, Dresden, Stuttgart und Freiburg). Es wurden folgende Varianten betrachtet:

- 20 EFH EH55 gemeinsam an 5 Standorten, 5 Profile, HH-Strom 5 Profile (V4_S5_P5)
- 20 EFH EH55 gemeinsam an 5 Standorten, 10 Profile, HH-Strom 10 Profile (V4_S5_P10)
- 20 EFH EH55 gemeinsam an 5 Standorten, 20 Profile, HH-Strom 20 Profile (V4_S5_P20)
- 20 EFH EH55 gemeinsam an 5 Standorten, 30 Profile, HH-Strom 30 Profile (V4_S5_P30)
- 20 EFH EH55 gemeinsam an 5 Standorten, 35 Profile, HH-Strom 35 Profile (V4_S5_P35) (Referenz)
- 1 EFH EH55 mit der 20-fachen Fläche, 1 Standort, mittleres Profil (V1_S1_P1)
- 20 x 1 EFH EH55, 1 Standort (Würzburg), 20 Profile (V2_S1_P20)

In Abbildung 92 wurde V4_S5_P35 als Vergleichsvariante verwendet und die prozentuale Abweichung für die einzelnen Kenngrößen berechnet.

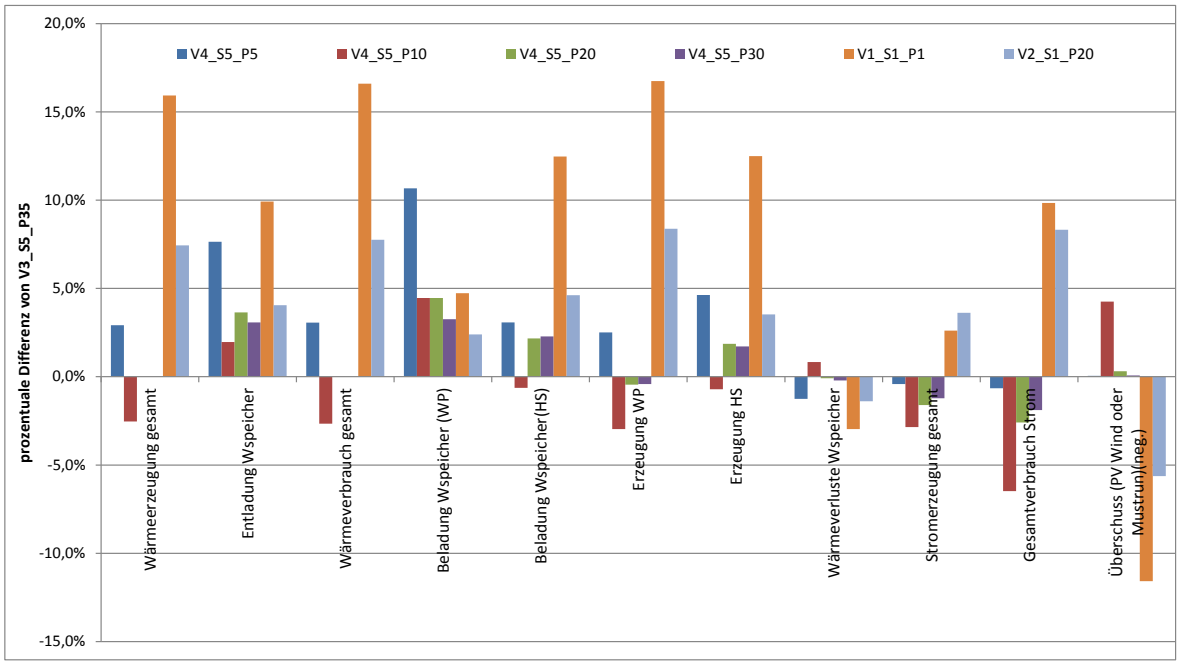


Abbildung 92: Prozentuale Abweichungen der Ergebnisse bei der Variation der Anzahl der Berechnungen zur Berücksichtigung des Nutzerverhaltens für EFH-EH55 – Teil 1 (Referenz V4_S5_P35)

Die Varianten V4_S5_P5 zeigt gegenüber V4_S5_P35 bei der Wärmeversorgung ca. 3 % höhere Werte, bei der Be- und Entladung der Speicher liegen die Abweichungen zwischen 8 % und 11 %. Bei V4_S5_P10 wird der Wärmebedarf um bis zu 3 % unterschätzt. V4_S5_P20 und V4_S5_P30 weisen nur noch sehr geringe Unterschiede bei der Wärmeversorgung auf. V1_S1_P1 liegt dagegen bei der Wärmeerzeugung ca. 16 % höher, V2_S1_P20 ca. 7 bis 8 % höher.

Die folgende Abbildung 93 zeigt die Situation bei den Treibhausgasen und beim Stromverbrauch. V4_S5_P5 bis V4_S5_P20 liegen hier zwischen 1 % und 8 % unter der Vergleichsvariante, V1_S1_P1 und V2_S1_P20 zwischen 8 % und 11 % darüber. Beim Haushaltsstrom liegen alle V4-Varianten z. T. deutlich unter der Vergleichsvariante, bei V1 ergibt sich kaum eine Abweichung und V2 liegt 13 % darüber.

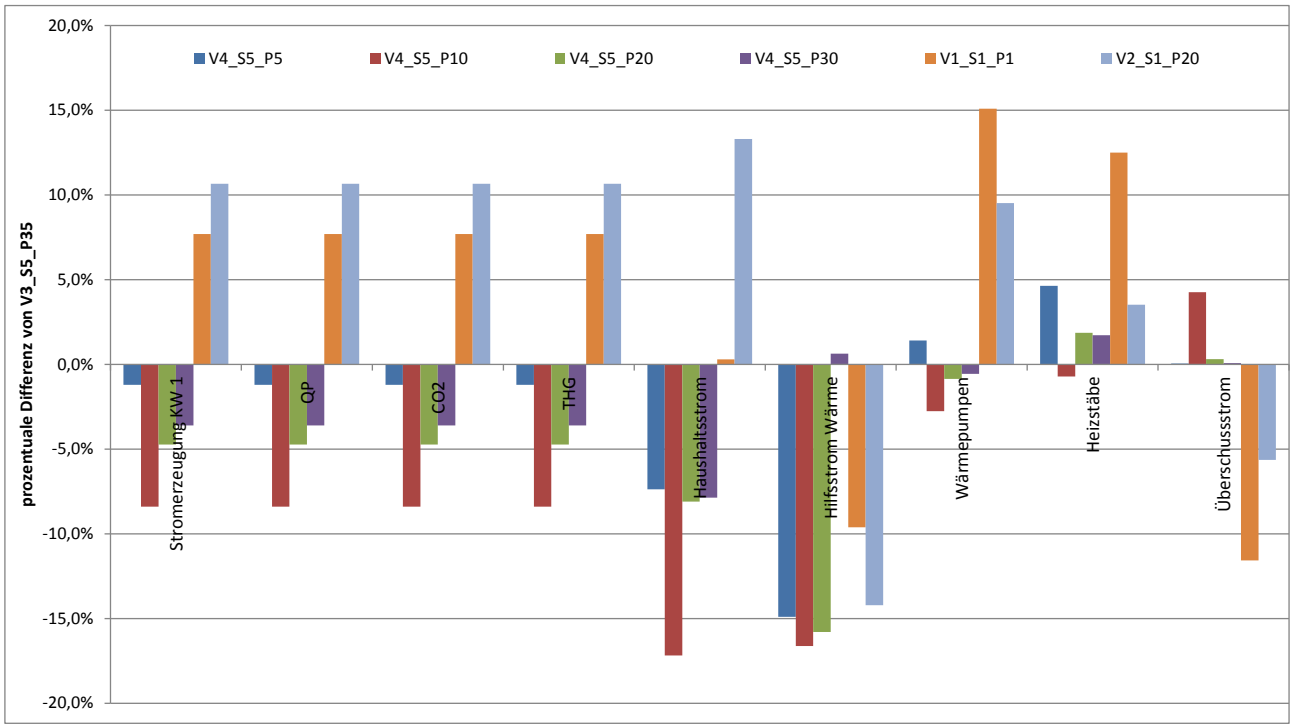


Abbildung 93: Prozentuale Abweichungen der Ergebnisse bei der Variation der Anzahl der Berechnungen zur Berücksichtigung des Nutzerverhaltens für EFH-EH55 – Teil 2 (Referenz V4_S5_P35)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anzahl der Profile nicht zu niedrig gewählt werden darf, um zufällige Schwankungen der Ergebnisse zu minimieren. Für Berechnungen in diesem Bericht wurden in der Regel 10 Gebäude an 5 Standorten (2 Gebäude je Standort) mit insgesamt 50 Profilen berechnet.

A.2 Vorgehen zur Ermittlung von mittleren Profilen

Mit dem Nutzermodell (siehe [Diefenbach et al. 2017]) wird in der Regel eine große Anzahl (hier: 1000) unterschiedlicher, stochastisch verteilter Nutzerprofile erstellt (mehr als notwendig), die in das Gebäudemodell entsprechend der angeforderten Anzahl eingespeist werden. Die unterschiedlichen Nutzungen werden im Gesamtmodell durch die Vielzahl der untersuchten Gebäude, denen ein Nutzerprofil zufällig zugeordnet wird, aus Sicht des elektrischen Energieverbrauchs, der im Modell gedanklich in einem Punkt zusammengeführt ist, deutlich geglättet. Sollen viele Gebäude in unterschiedlichen Varianten berechnet werden, so ist zur Reduktion der Rechenzeit die Nutzung eines mittleren (typischen) Profils sinnvoll.

Die unterschiedlichen Einflussgrößen der Nutzerprofile wurden in ihrer Größe aufsteigend sortiert und anschließend für „sehr niedrig“ (15 % Quantil), „mittel“ (Median) und „sehr hoch“ (85 % Quantil) die Profile herausgesucht, bei denen alle Eingangsgrößen innerhalb einer festgelegten Breite vom Zielwert liegen. „Sehr niedrig“ bezeichnet dabei Einflussgrößen, die auf einen niedrigen Energieverbrauch hinwirken. Die Bandbreite wurde so angepasst, dass möglichst nur noch ein Profil die Kriterien erfüllt. Folgende Profile wurden auf diese Weise ausgesucht (Tabelle 15):

Tabelle 15: Auswahl verschiedener Nutzerprofile für die Beschreibung unterschiedlichen Nutzerverhaltens – mit Berücksichtigung der inneren Wärmequellen

Beschreibung Profil	**Zielwert**	**EZFH** Profil-Nr. (Spanne)	**MFH** Profil-Nr. / Spanne
Sehr niedrig	15 % - Quantil	245 (+/- 9 %)	253 (+/- 15 %)
Mittel	Median (50 %-Quantil)	378 (+/- 12 %)	690 (+/- 13 %)
Sehr hoch	85 % - Quantil	829 (+/- 10 %)	521 (+/- 11 %)

Die Auswahl der Profile und der Aufbau der Tabelle sei hier am Beispiel von Profil Nr. 245 erklärt: Wenn man für alle Profile die Höhe aller Einflussgrößen mit einer Spanne (Bandbreite) von +/- 9 % um den Mittelwert des jeweiligen Wertes im Einzelprofil variiert, so stellt sich heraus, dass lediglich im Fall des Profils Nr. 245 die Spanne aller Einflussgrößen den jeweiligen Wert für das jeweilige 15 %-Quantil einschließt. Das Profil ist also so ausgesucht, dass alle Einflussgrößen (Raumlufttemperatur, Luftwechsel, Warmwasserverbrauch, Haushaltsstromverbrauch und innere Wärmequellen) in einem Bereich liegen, die auf einen sehr niedrigen Energieverbrauch hinwirken. Würde man die Grenze der Spanne zu weniger als 9 % festlegen, so würde auch das Profil Nr. 245 die Bedingung nicht mehr erfüllen. Wäre die Spanne deutlich mehr als 9 % definiert, so würden auch andere Profile mit hineinfallen. Allerdings ist ja nur die Auswahl eines einzigen, möglichst typischen Profils angestrebt.

Werden bei der Bewertung die inneren Wärmequellen nicht berücksichtigt, da diese teilweise mit dem Stromverbrauch korrelieren und sich gegenläufig auf den Energieverbrauch des Hauses auswirken, ergeben sich die Profile in Tabelle 16.

Tabelle 16: Auswahl verschiedener Nutzerprofile für die Beschreibung unterschiedlichen Nutzerverhaltens – ohne Berücksichtigung der inneren Wärmequellen

Beschreibung Profil	**Zielwert**	**EZFH** Profil-Nr. (Spanne)	**MFH** Profil-Nr. / Spanne
Sehr niedrig	15 % - Quantil	**245** (+/- 9 %)	176 (+/- 10 %) **253** (+/- 15 %)
Mittel	Median (50 %-Quantil)	91 (+/- 8 %) **378** (+/- 12 %)	992 (+/- 8 %) **690** (+/- 12 %)
Sehr hoch	85 % - Quantil	**829** (+/- 10 %)	**521** (+/- 10 %)

Es zeigt sich, dass ohne Berücksichtigung der inneren Wärmequellen sich teilweise Profile mit einer noch geringeren Streubreite ergeben würden – die ausgewählten Profile (fett markiert) inklusive innere Wärmequellen aber mit vergleichbarer Streubreite ebenfalls geeignet sind, als typische Profile verwendet zu werden.

Dabei ist es hier noch einmal zu betonen, dass es sich bei den ausgewählten Fällen um jeweils typische Profile handelt, die auf realen Nutzungsdaten beruhen – typisch für niedrige, mittlere bzw. hohe Energieverbräuche (bei sonst gleicher Gebäude- und Anlagenausstattung). Auf die Berechnung von Mittelwerten über viele Nutzungsdaten zur Ermittlung durchschnittlicher (entsprechend geglätteter) Profile wurde hier verzichtet, da diese nicht mehr einer realen Gebäudenutzung entsprechen würden (z. B. indem dann während des gesamten Tages ein Warmwasserverbrauch auftritt).

A.3 Unterschiede des dynamischen Verhaltens in Abhängigkeit der Anzahl der modellierten Gebäude

Im Folgenden soll exemplarisch für ein Modellgebäude der zeitliche Verlauf der Energieflüsse in Abhängigkeit von der Anzahl der modellierten Gebäude mit und ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms diskutiert werden. Es handelt sich um ein Einfamilienhaus als EH40 mit WRG, Luft-Wasser-Wärmepumpe und Heizstab, 30 kWh Wärmespeicher, 2,1 kWh Stromspeicher und einer PV-Erzeugung auf 2/3 der verfügbaren Dachfläche.

Abbildung 94 zeigt die sich ergebenden Verläufe, wenn nur ein einzelnes Gebäude ohne Berücksichtigung des Haushaltsstromes modelliert wird. Die benötigte Wärme wird vollständig von der Wärmepumpe bereitgestellt (rote Linie im 1. Diagramm). Der Verlauf der Wärmeerzeugung variiert abhängig von Temperatursollwert im Gebäude (Nachtabschaltung) und den äußeren Wetterbedingungen (Außentemperatur und Solarstrahlung) sehr stark. Die Stromerzeugung aus der PV-Anlage (blaue Linie in 2. Diagramm) kann nur einen Teil der benötigten elektrischen Energie bereitstellen, so dass in größerem Umfang und mit großen kurzzeitigen Schwankungen Strom aus dem Netz entnommen werden muss (gelbe Linie). An sonnigen Tagen kann der Stromspeicher vollständig geladen werden (blaue Linie in 3. Diagramm) und anschließend werden verbleibende Überschüsse in begrenztem Umfang in den Wärmespeicher gepuffert (rote Linie). Da die Kapazität des Wärmespeichers deutlich höher gewählt wurde als beim Stromspeicher, sind die Differenzen zwischen den Ladekurven schwerer zu interpretieren. Im Gebäude wird in diesem Zeitraum im Wesentlichen Strom für die Wärmepumpe verbraucht (Haushaltsstrom hier noch nicht berücksichtigt), zusätzlich wird in geringem Umfang Allgemein- und Hilfsstrom verbraucht.

Zum Vergleich sind in Abbildung 95 die Verläufe gezeigt, wenn an Stelle von einem Gebäude an einem Standort 10 Gebäude an 5 Standorten (2 Gebäude je Standort) über Deutschland verteilt berechnet werden. Der Verlauf der Wärmeerzeugung ist deutlicher geglättet – es treten keine plötzlichen Lastanstiege durch eine Sollwertänderung in einem einzelnen Gebäude mehr auf (1. Diagramm). Die PV-Stromerzeugung (blaue Linie im 2. Diagramm) ist in ihrem Profil nahezu unverändert, aber um etwa den Faktor 10 höher, da jedes der Gebäude über eine identische PV-Anlage verfügt. Der Netzbezug (gelbe Linie) ist deutlich geglättet und die Lastspitzen weniger stark ausgeprägt. Deutlich sind die Unterschiede bei der Beladung der Speicher (3. Diagramm). PV-Erzeugung, die in den Gebäuden insgesamt nicht direkt benötigt wurde, tritt hier kaum noch auf, so dass nur noch an drei Tagen der Stromspeicher in begrenztem Umfang geladen werden kann, der Wärmespeicher wird in diesem Zeitraum in der Summe der 10 Gebäude nicht geladen. Auch beim Stromverbrauch (4. Diagramm) fällt die deutliche Glättung des Stromverbrauchs für die Wärmepumpe auf.

Betrachtet man das Einzelgebäude mit Haushaltsstrom (Abbildung 96), so wird von der Wärmepumpe im gezeigten zeitlichen Ausschnitt genau die gleiche Wärme für das Gebäude bereitgestellt, jedoch kein Wärmespeicher geladen, da kaum nennenswerte PV-Überschüsse vorhanden sind. In der Folge ist der Ladezustand des Elektrospeichers deutlich niedriger. Beim Stromverbrauch tritt nun neben der Wärmepumpe auch der Haushaltsstrom als Bestandteil des Allgemeinstroms (blaue Linie) auf. Abbildung 97 zeigt den Verlauf von 10 Gebäuden an 5 Standorten mit Haushaltstrom. Neben der Glättung der Verbräuche stehen nun keinerlei Überschüsse für die Speicherladung mehr zur Verfügung.

Der Vergleich zeigt, dass sich in einem Einzelgebäude aufgrund von Sollwertvorgaben und Nutzereinfluss u. U. besonders günstige oder besonders ungünstige Situationen bei der Versorgung mit PV-Strom ergeben können. Durch die Berücksichtigung von 10 über Deutschland verteilten Gebäuden wird dagegen eher das charakteristische Verhalten beschrieben.

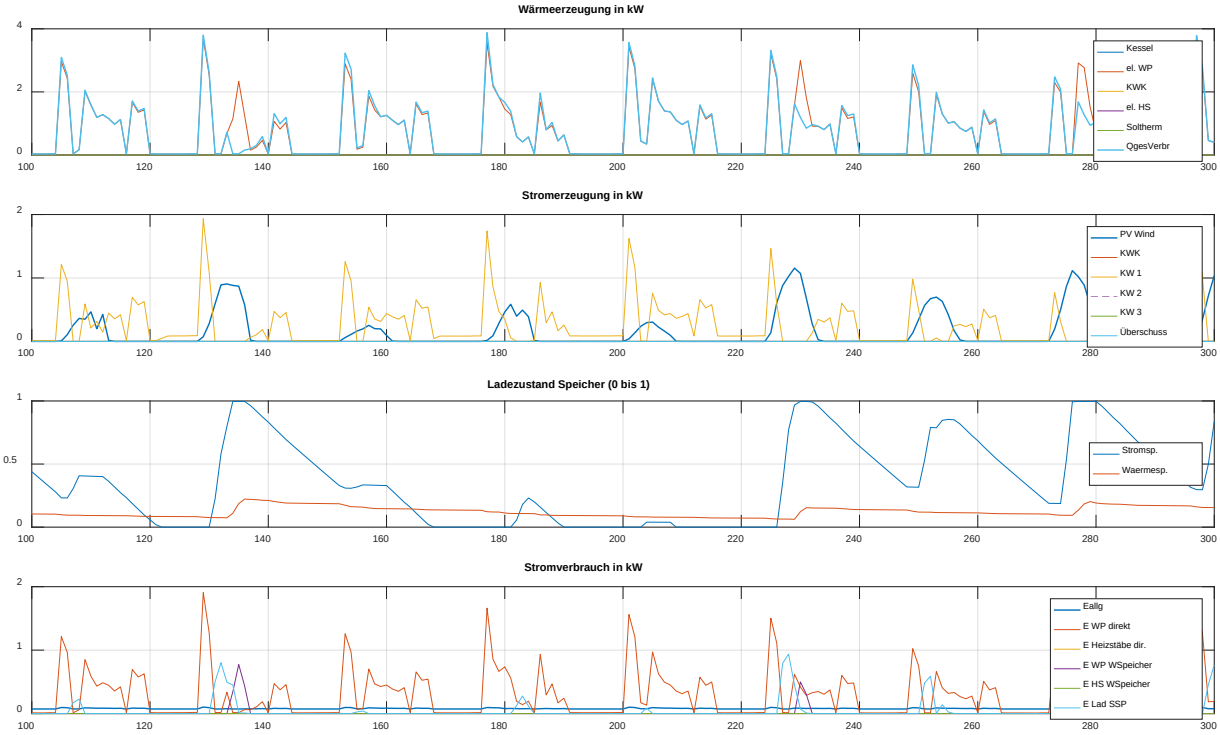


Abbildung 94: Dynamischer Lastverlauf Anfang Januar für ein Gebäude an einem Standort, Gebäudehülle EH40, WRG, Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 30 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie PV-Erzeugung auf 2/3 der Dachfläche, Betrachtung ohne Haushaltsstrom

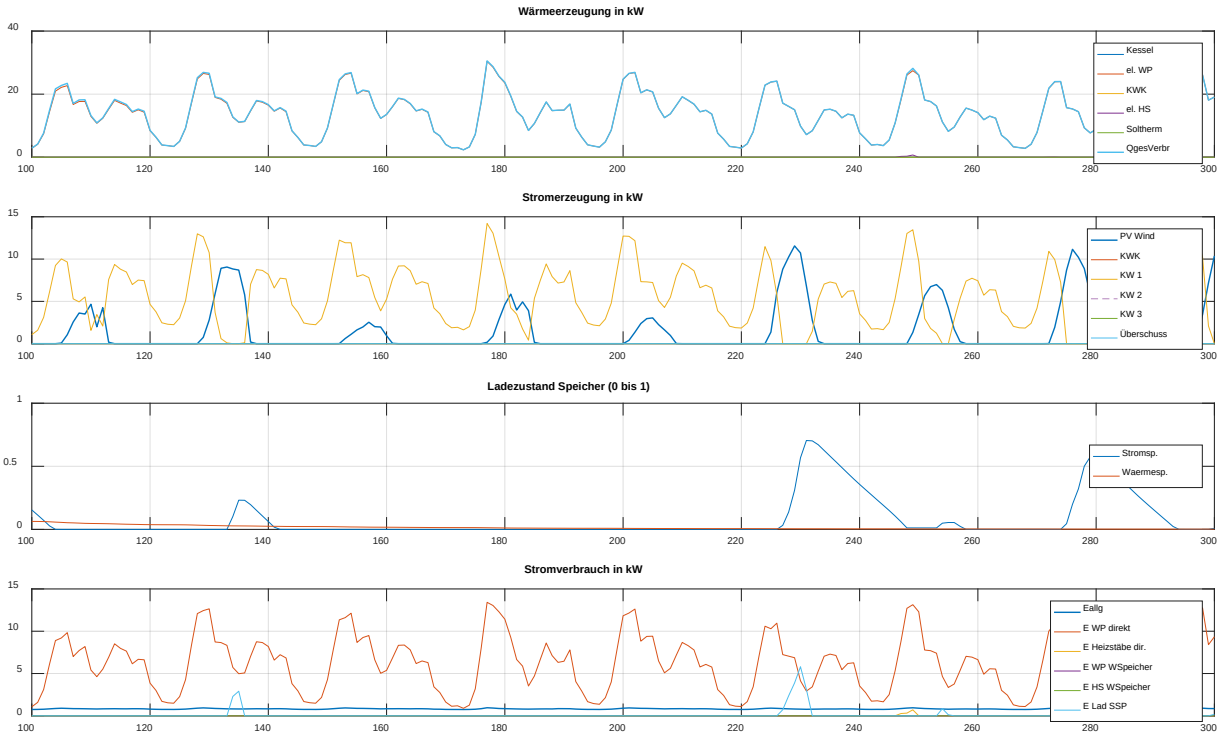


Abbildung 95: Dynamischer Lastverlauf Anfang Januar für 10 Gebäude an 5 Standorten, Gebäudehülle EH40, WRG, Luft-Wasser-WP, je Gebäude Wärmespeicher 30 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie PV-Erzeugung auf 2/3 der Dachfläche, Betrachtung ohne Haushaltsstrom

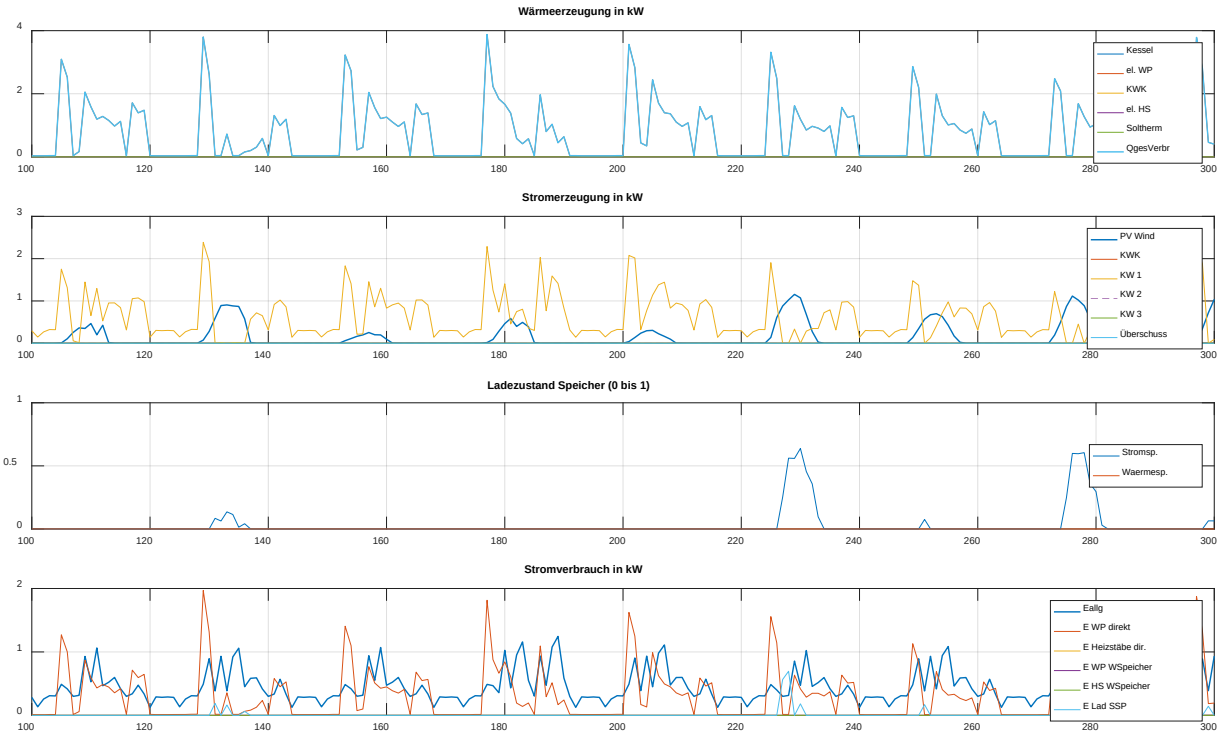


Abbildung 96: Dynamischer Lastverlauf Anfang Januar für ein Gebäude an einem Standort, Gebäudehülle EH40, WRG, Luft-Wasser-WP, Wärmespeicher 30 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie PV-Erzeugung auf 2/3 der Dachfläche, Betrachtung mit Haushaltsstrom

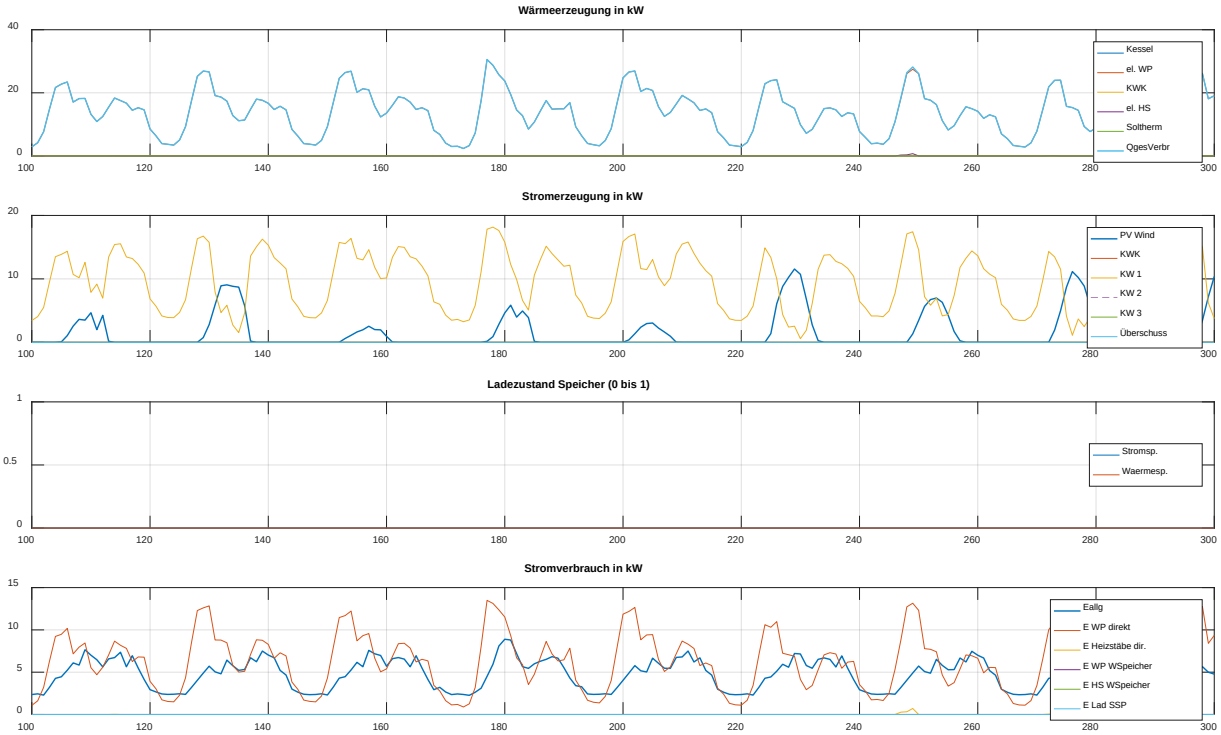


Abbildung 97: Dynamischer Lastverlauf Anfang Januar für ein Gebäude an einem Standort, Gebäudehülle EH40, WRG, Luft-Wasser-WP, je Gebäude Wärmespeicher 30 kWh und 2,1 kWh Stromspeicher sowie PV-Erzeugung auf 2/3 der Dachfläche, Betrachtung mit Haushaltsstrom

A.4 Einfluss des Standorts und des Untersuchungsjahres

In Abbildung 98 sind für ein Einfamilienhaus als EH55 ohne WRG mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Heizstab, einem Wärmespeicher und einer PV-Anlage, die die komplette nutzbare Dachfläche ausnutzt, die Treibhausgasemissionen an den Standorten Hamburg, Düsseldorf, Dresden, Stuttgart und Freiburg für die fünf Untersuchungsjahre dargestellt. Man erkennt eine große Streuung zwischen den Standorten und den Untersuchungsjahren. Während in Hamburg und Stuttgart für die ausgewählte Anlagentechnik die Zielwerte für die Treibhausgasemissionen in allen Jahren überschritten werden, ist das in Düsseldorf nur ein zwei Jahren der Fall (2012 knapp, 2013 deutlich). In Dresden und Freiburg werden die Zielwerte nur in den milden Jahren 2014 und 2015 eingehalten.

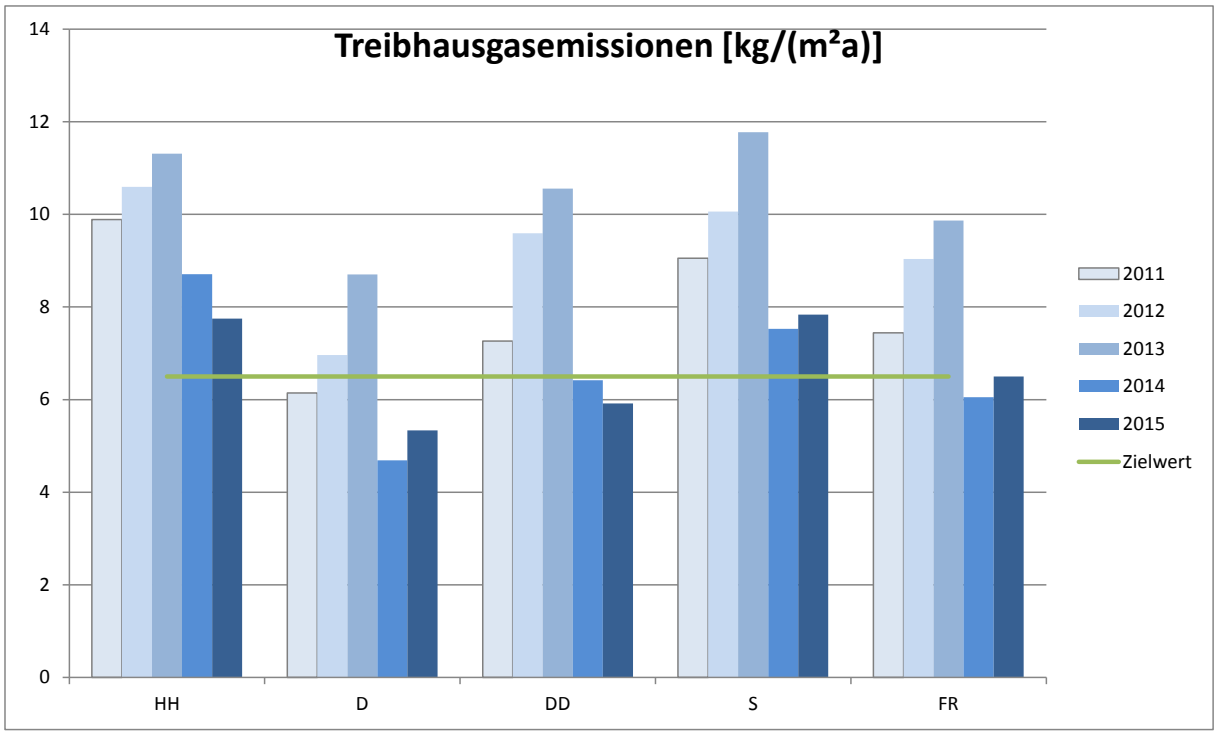


Abbildung 98: Treibhausgasemissionen eines EFH als EH55 mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab und Wärmespeicher sowie PV auf 100 % der Dachfläche für 5 Standorte und 5 Untersuchungsjahre

Betrachtet man das Mehrfamilienhaus (MFH-NB) als EH40 mit WRG und der maximalen PV-Produktion (37,9 MWh ≅ 100 % Dachfläche), so liegen bei den Treibhausgasemissionen für alle Untersuchungsjahre die Standorte Düsseldorf und Stuttgart unter dem Zielniveau und auch bei übrigen Standorten überschreiten die Jahre 2012 und 2013 den Zielwert lediglich geringfügig (Abbildung 99).

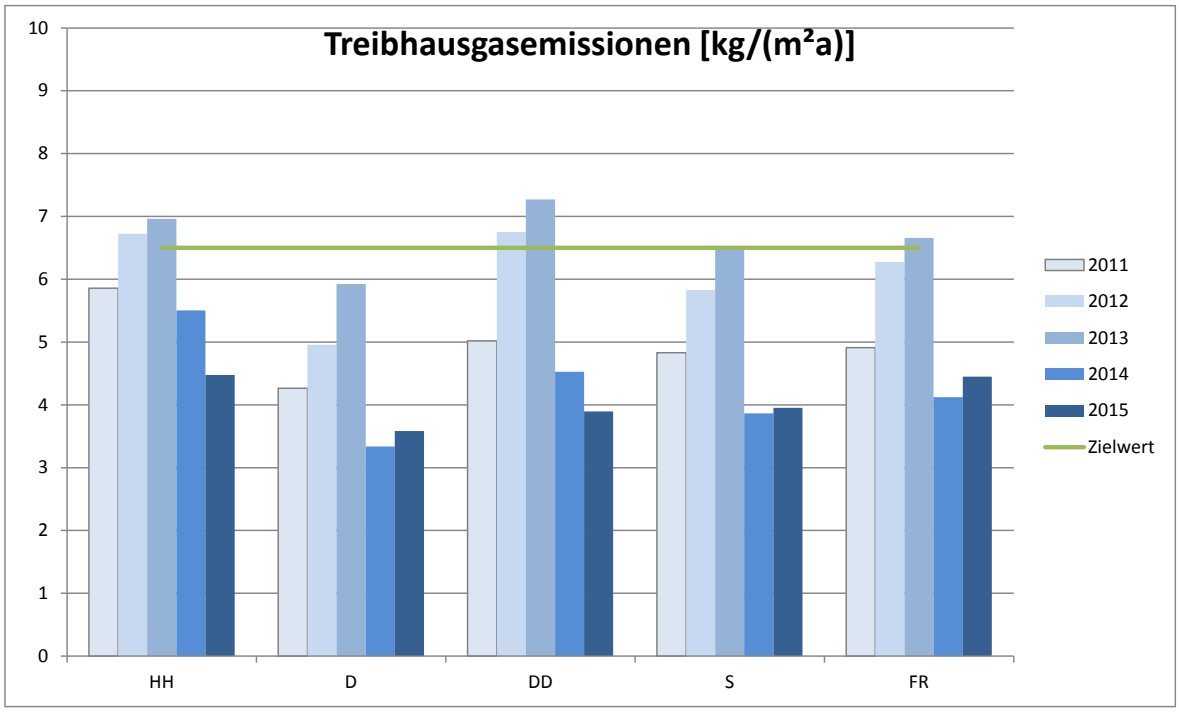


Abbildung 99: Treibhausgasemissionen eines MFH-NB als EH40 mit WRG mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizstab und Wärmespeicher sowie PV auf 100 % der Dachfläche für 5 Standorte und 5 Untersuchungsjahre

Sind an Stelle der gesamten Dachfläche nur 50 % mit PV belegt (hier nicht dargestellt), so erhöhen sich die Werte zwar um ca. 0,66 kg/(m²a), die Grundaussagen zu den Unterschieden zwischen den Standorten und Untersuchungsjahren bleiben aber weiterhin gültig. Das bedeutet, dass die Außentemperatur einer stärkeren regionalen Schwankungsbreite unterworfen ist als die Solarstrahlung. Eine hochwertige Gebäudehülle mit niedrigem Energieverbrauch sollte daher einen gewissen Schutz gegen klimabedingte Schwankungen der THG-Emissionen darstellt.

A.5 Einfluss des Bewertungsfaktors für Biomasse für Systeme mit Biomasse als Brennstoff

Die Frage, wie die eingesetzte Biomasse im Optimierungssystem bewertet wird (siehe Kapitel 4.2.7), führt zu deutlichen Verschiebungen bei den Resultaten. Abbildung 100 zeigt das Einfamilienhaus als EH40 mit WRG mit bivalenter Erdreichwärmepumpe und Pelletofen als Spitzenlast-Wärmeerzeuger, ohne Berücksichtigung des Haushaltsstroms. Der Bewertungsfaktor für die Optimierung im Berechnungsmodell, für den üblicherweise der Primärenergiefaktor verwendet wurde, ist hier zwischen 0,2 und 1,2 variiert. Es zeigt sich, dass bei niedrigen Bewertungsfaktoren von 0,2 oder 0,4 der Brennstoffverbrauch mit 22,1 kWh/(m²a) sehr hoch ist und nur wenig Wärme mit der Wärmepumpe erzeugt wird. Bei einem Bewertungsfaktor von 0,62, der üblicherweise bei den Berechnungen im vorliegenden Bericht verwendet wurde[53], reduziert sich der Brennstoffverbrauch auf 17 kWh/(m²a) bei gleichzeitigem Anstieg des Erdgaseinsatzes in Kraftwerken für den bezogenen Strom für die Wärmepumpe. Mit Bewertungsfaktoren von 0,8 oder höher liegt der Biomasseeinsatz nur noch bei ca. 6 kWh/(m²a), der Erdgasverbrauch steigt gleichzeitig auf ca. 11 kWh/(m²a). Weiterhin sind die zugehörigen Treibhausgasemissionen dargestellt (Kreuze in orange in der Abbildung 100).

Grundsätzlich schneidet dieses bivalente Wärmeerzeugungssystem im EH40 mit allen Bewertungsfaktoren recht gut ab, aber erst ab einem Bewertungsfaktor von über 0,62 wird der Zielwert von 10 kWh/(m²a) für das Biomassebudget erreicht bzw. unterschritten. Gleichzeitig steigen die Treibhausgasemissionen durch die Veränderung des Bewertungsfaktors von 0,8 auf 2,9 kg/(m²a), dennoch unterschreiten alle Varianten die Obergrenze bei den Treibhausgasemissionen von 6,5 kg/(m²a). Berücksichtigt man zusätzlich, dass die Möglichkeiten der Windenergienutzung in den Modellberechnungen hier noch nicht berücksichtigt sind, so erreicht das Gebäude auch mit vergleichsweise hohen Bewertungsfaktoren für die Biomasse die Treibhausgasziele sicher.

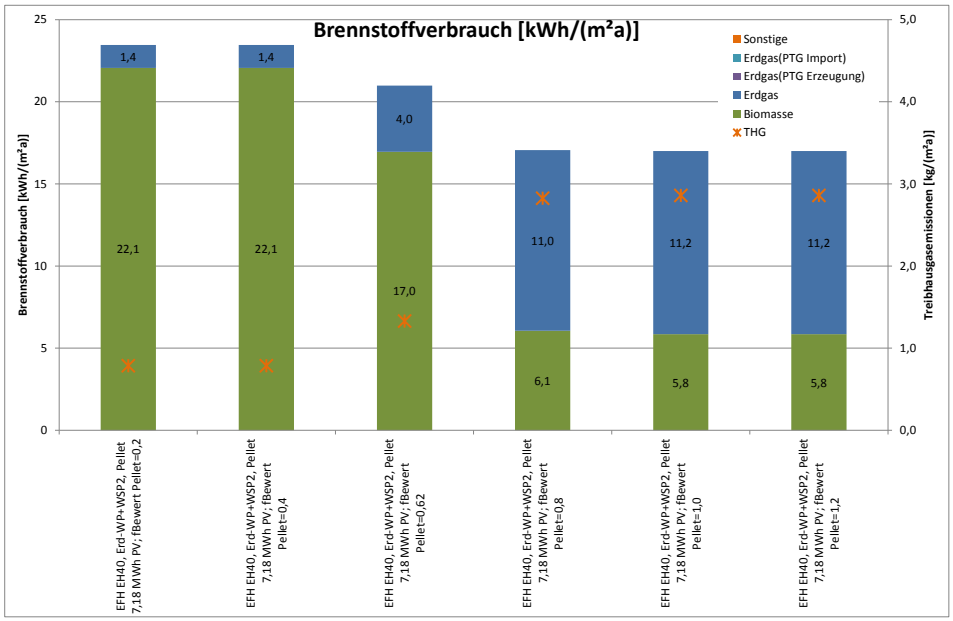


Abbildung 100: Brennstoffverbrauch eines EFH als EH40 mit WRG mit Erdreich-Wärmepumpe und Pellet-Spitzenlastkessel sowie einer PV-Anlage auf 2/3 der nutzbaren Dachfläche bei unterschiedlichen Vorgaben für den Bewertungsfaktor f_{Bewert} für Biomasse

[53] Der Wert lehnt sich an die Basisvariante 6 aus Teilbericht 1 an [Diefenbach et al. 2019], die eine Wärmeversorgung mit monovalenten Wärmepumpen abbildet.

A.6 Einfluss des Nutzerverhaltens

Bei den Untersuchungen wurden meist 50 Nutzerprofile zufällig gezogenen und auf fünf Standorte über Deutschland verteilt. Dies führt zu einer Glättung der Ergebnisse, die sinnvoll ist, sollen die Aussagen bei einer Variation z. B. der Anlagentechnik nicht vom zufällig gewählten Nutzerverhalten abhängen. Um zu untersuchen, ob die durch die Ziehung von Nutzerprofilen erreichte Streuung der Ergebnisse mit den in der Praxis beobachteten Streuung der Energieverbräuche zusammenpasst, wurde für den Standort Hamburg für ein einzelnes EH55 ohne WRG und ein einzelnes EH40 mit WRG Berechnungen mit 50 unterschiedlichen Nutzerprofilen durchgeführt. Bei dem EH40 mit WRG wurde daraufhin eine erneute Berechnung mit einem Satz von 50 weiteren Nutzerprofilen durchgeführt.

Abbildung 101 zeigt den Gesamtwärmeverbrauch der insgesamt 150 berechneten Varianten. Der Gesamtwärmeverbrauch der EH55 streut zwischen 8.000 und 22.900 kWh/a, der Mittelwert liegt bei 14.541 kWh/a, die Standardabweichung beträgt 2.878 kWh/a. Man erkennt deutlich die große Streuung der Ergebnisse. Das Verhältnis zwischen minimalem und maximalem Wärmeverbrauch liegt bei 2,83 – in der Praxis sind sogar noch etwas höhere Streuungen zu finden [IWU 2003].

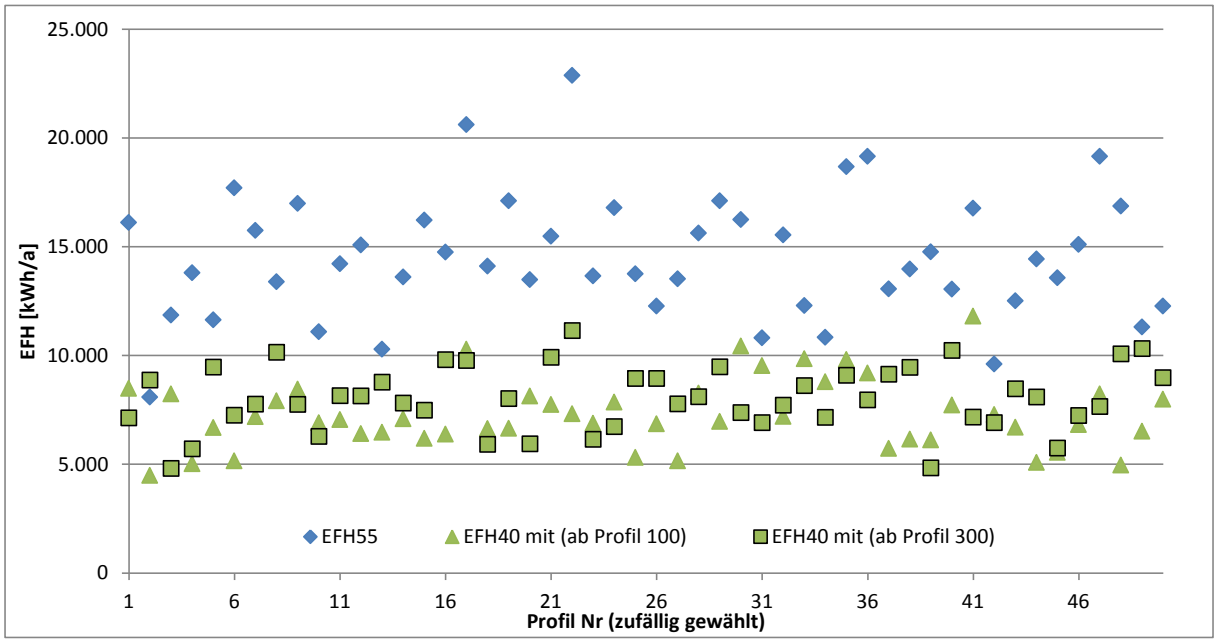


Abbildung 101: Gesamtwärmeverbrauch von einem EFH EH55 ohne WRG und zwei EH40 mit WRG bei 50 Berechnungen mit zufällig gewählten Nutzerprofilen am Standort Hamburg

Beim EH40 mit WRG lag beim ersten Berechnungslauf der kleinste Wärmeverbrauch bei ca. 4.500 kWh/a und der höchste Gesamtwärmeverbrauch bei ca. 11.800 kWh/a, das Verhältnis zwischen niedrigstem und höchstem Verbrauch beträgt 2,63, der Mittelwert liegt bei 7.275 kWh/a (siehe Tabelle 17). Im zweiten Berechnungslauf für dieses Gebäude ergab sich eine etwas geringere Streuung der Einzelergebnisse und der Mittelwert lag mit 8.022 kWh/a etwas höher.

Tabelle 17: Kenndaten zum Wärmeverbrauch der drei Gebäudestandards, die mit 50 unterschiedlichen Nutzungsprofilen berechnet wurden

	Mittelwert	Standardab-weichung	Standardab-weichung	Min	Max	Verhältnis Max zu Min
	[kWh/a]	[kWh/a]	[%]	[kWh/a]	[kWh/a]	[-]
EFH55	14.541	2.878	19,8%	8.082	22.874	2,83
EFH40 mit (ab Profil 100)	7.275	1.578	21,7%	4.493	11.811	2,63
EFH40 mit (ab Profil 300)	8.022	1.476	18,4%	4.803	11.145	2,32

Beim Mehrfamilienhaus (hier nicht dargestellt), bei dem in den Nutzerprofilen bereits gemittelte Profile für das Gesamtgebäude in die Berechnung einfließen, liegt das Verhältnis von minimalem und maximalem Wert (nutzerbedingte Schwankungsbreite) zwischen 50 gleichen Gebäuden nur bei 1,15 (im Mittel für 100 berechnete EFH EH40 mit WRG mit WRG 2,63), die Standardabweichung beträgt zum Vergleich nur 3,2 % (Mittelwert der Standardabweichungen beim EFH EH40: 20,5 %).

Bildet man für die Berechnungsergebnisse Klassen von Verbrauchswerten, wobei der Median genau dem rechten Rand der fünften von 10 Klassen entspricht, so erhält man eine Häufigkeitsverteilung der Verbrauchsklassen, die man mit gemessenen Verbräuchen gleichartiger Gebäude vergleichen kann. Als Vergleich wurden die Messergebnisse der Passivhaus-Siedlung in Wiesbaden-Dotzheim herangezogen [IWU 2003], bei der 22 nahezu baugleiche Passivhäuser ausgewertet werden konnten. Die Gebäude unterscheiden sich lediglich bezüglich der Hausbreite und damit auch der Wohnfläche, weshalb die Auswertungen flächenbezogen durchgeführt wurden. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass es sich um 17 Reihenmittelhäuser sowie 5 Reihenendhäuser handelt, bei denen nominell der Heizwärmebedarf höher liegt.

Abbildung 102 zeigt die Häufigkeitsverteilung für 100 Berechnungen mit dem Modell für das EFH EH40 mit WRG und die Messergebnisse von 22 Gebäuden aus der Passivhaussiedlung. Die mittleren Klassen sind im Modell deutlich häufiger vertreten als in der Passivhaussiedlung und die Schwankungsbreite ist kleiner.

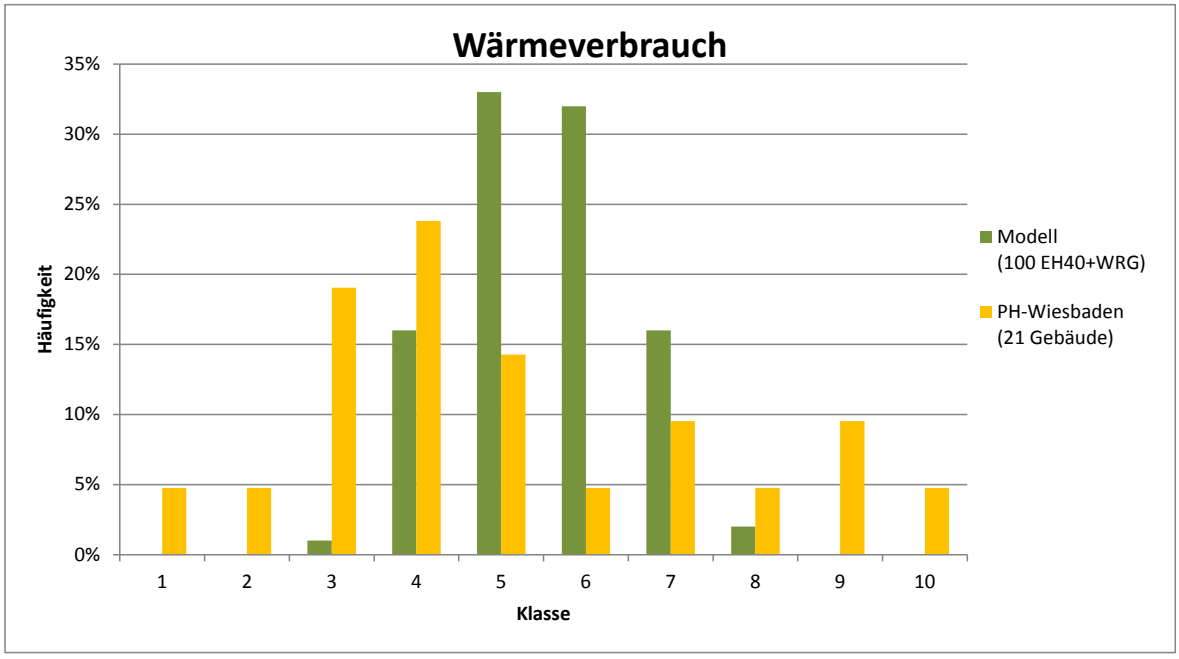


Abbildung 102: Häufigkeitsverteilung des Gesamtwärmeverbrauchs eines EFH EH40 mit WRG bei 100 Berechnungen mit zufällig gewählten Nutzerprofilen und Messdaten von 22 nahezu baugleichen Passivhäusern aus Wiesbaden-Dotzheim

Berücksichtigt man nur die Reihenmittelhäuser bei den Messdaten, so gleicht sich die Häufigkeitsverteilung von Modell und reale Situation an (Abbildung 103). Verbräuche oberhalb des Median kamen in der gemessenen Siedlung zwar häufiger vor als im Modell, allerdings muss auch die geringe Anzahl an ausgewerteten Gebäuden berücksichtigt werden. Generell scheint das Modell eine Nutzerstreuung zwischen Gebäuden ansatzweise realistisch beschreiben zu können.

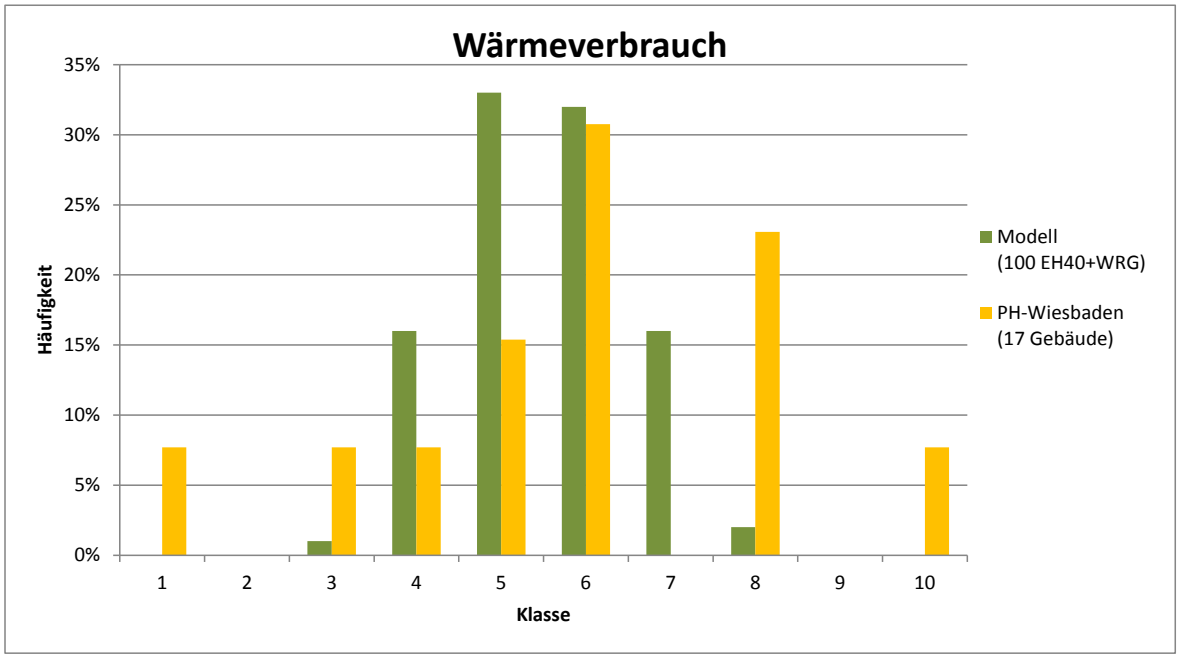


Abbildung 103: Häufigkeitsverteilung des Gesamtwärmeverbrauchs eines EFH EH40 mit WRG bei 100 Berechnungen mit zufällig gewählten Nutzerprofilen und Messdaten von 17 Reihenmittelhäusern der Passivhäuser aus Wiesbaden-Dotzheim

Wertet man die Haushaltsstromverbräuche aus dem Modell mit 2 x 50 EFH EH40 mit WRG im Vergleich zu 30 gemessenen Niedrigenergie- und Passivhäuser in Wiesbaden-Dotzheim aus [IWU 2003], so ergibt sich eine vergleichbare Breite der Streuung bei den Verbräuchen, allerdings sind im Modell die mittleren Klassen nicht so häufig vertreten wie in den Messdaten und die Verteilung ist symmetrisch (Abbildung 104).

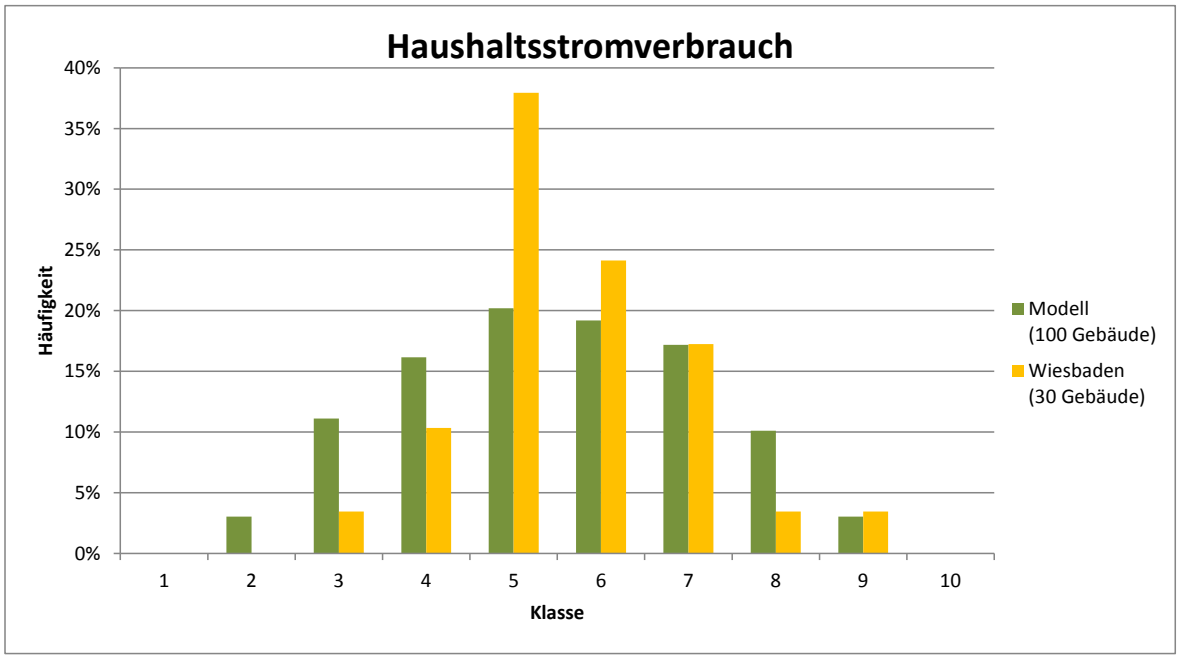


Abbildung 104: Häufigkeitsverteilung des Haushaltsstromverbrauchs eines EFH EH40 mit WRG bei 100 Berechnungen mit zufällig gewählten Nutzerprofilen und Messdaten von 30 Niedrigenerige- und Passivhäusern aus Wiesbaden-Dotzheim

Für Haushaltsstrom ergibt sich somit eine noch bessere Abbildung der nutzerbedingten Schwankungsbreite bei den Verbrauchswerten.

A.7 Zusammenhang von Speichervolumen und -kapazität

In Abbildung 105 ist zur Erläuterung der Angaben zu den Kapazitäten der Wärmespeicher der Zusammenhang zwischen Speichervolumen und Wärmekapazität bei einer nutzbaren Temperaturspreizung von 50 K dargestellt.

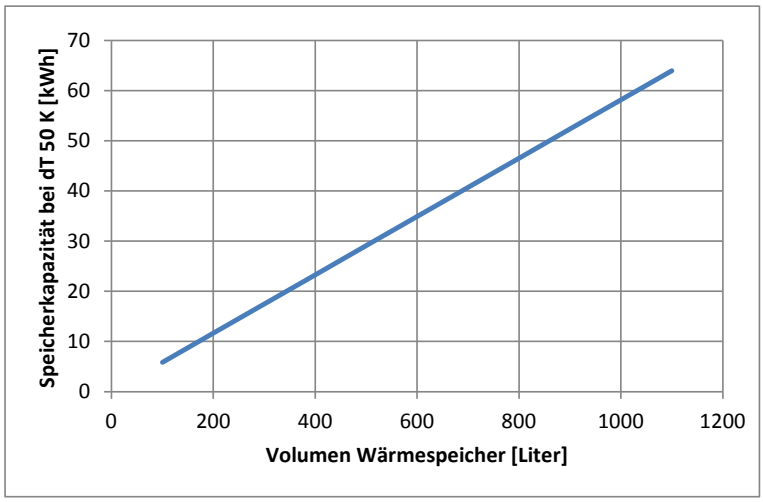


Abbildung 105: Zusammenhang von Speichervolumen und Speicherkapazität (bei einer nutzbaren Temperaturdifferenz von 50 K)

Anhang B : Ergebnistabellen

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse der wichtigsten Varianten der Kapitel 4 und 6. Die Berechnungen wurden jeweils mit 10 Gebäuden an 5 Standorten (2 Gebäude je Standort) mit insgesamt 50 Nutzungsprofilen für das Jahr 2012 durchgeführt.

B.1 Zu Kapitel 4.2 - Ergebnisse der Berechnung von Kombinationen unterschiedlicher Anlagentechniken

Luft-Wasser-Wärmepumpe

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 L-W-WP+HST, 0 PV	EFH EH55 L-W-WP+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+HST+WSP2, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+HST+WSP2, 10,77 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+HST+WSP4 +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 0 PV	EFH EH55 L-W-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	71,3	71,3	74,3	74,6	74,7	74,5	71,3	71,3	74,2	74,6
Stromverbrauch gesamt	37,0	37,0	45,9	47,6	40,8	47,5	38,8	41,5	27,3	36,7
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	44,8	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	37,0	26,2	21,5	18,7	19,1	21,4	25,4	25,4	27,3	21,8
Überschussstrom	0,0	34,0	20,3	38,2	23,0	19,5	32,2	29,5	0,0	7,5
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	29%	53%	61%	53%	55%	34%	39%	0%	40%
Eigenverbrauch elektrisch		24%	55%	43%	49%	57%	28%	34%		66%
Brennstoffverbrauch fossil	**69,0**	**48,9**	**40,1**	**34,9**	**35,6**	**40,0**	**47,5**	**47,4**	**50,9**	**40,8**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	75,9	53,7	44,1	38,3	39,1	44,0	52,2	52,2	56,0	44,9
Treibhausgas-Emissionen	**17,0**	**12,0**	**9,9**	**8,6**	**8,8**	**9,8**	**11,7**	**11,7**	**12,5**	**10,0**

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit L-W-WP+HST, 0 PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST+WSP2, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST+WSP2, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST+WSP4 +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 0 PV	EFH EH40 mit L-W-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	45,4	45,4	48,8	49,1	49,2	49,0	45,4	45,4	48,6	49,0
Stromverbrauch gesamt	26,0	26,0	34,5	36,0	31,0	36,1	27,8	30,7	17,0	27,3
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	44,8	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	26,0	16,5	12,2	10,1	10,6	12,3	15,8	15,8	17,0	12,7
Überschussstrom	0,0	35,3	22,5	41,3	24,4	21,6	33,5	30,5	0,0	7,8
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	36%	65%	72%	66%	66%	43%	49%	0%	54%
Eigenverbrauch elektrisch		21%	50%	38%	46%	52%	25%	32%		65%
Brennstoffverbrauch fossil	**48,5**	**30,8**	**22,8**	**18,9**	**19,7**	**23,0**	**29,5**	**29,5**	**31,8**	**23,6**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	53,3	33,9	25,1	20,8	21,7	25,3	32,5	32,4	35,0	26,0
Treibhausgas-Emissionen	**11,9**	**7,6**	**5,6**	**4,6**	**4,9**	**5,6**	**7,3**	**7,3**	**7,8**	**5,8**

Erdreich-Wärmepumpe

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 Erd-WP+HST, 0 PV	EFH EH55 Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+HST+WSP2, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+HST+WSP2, 10,77 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+HST+WSP4 +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 0 PV	EFH EH55 Erd-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	71,3	71,3	74,5	74,7	74,8	74,6	71,3	71,3	74,2	74,6
Stromverbrauch gesamt	27,6	27,6	37,9	40,2	34,3	39,4	29,4	32,3	20,2	29,8
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	44,8	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	27,6	18,1	13,9	11,9	12,8	13,8	17,4	17,3	20,2	15,1
Überschussstrom	0,0	35,3	20,8	38,8	23,3	19,9	33,4	30,5	0,0	7,6
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	34%	63%	70%	63%	65%	41%	46%	0%	49%
Eigenverbrauch elektrisch		21%	54%	42%	48%	56%	25%	32%		66%
Brennstoffverbrauch fossil	**51,4**	**33,8**	**25,9**	**22,2**	**23,9**	**25,8**	**32,4**	**32,3**	**37,7**	**28,1**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	56,6	37,2	28,5	24,4	26,3	28,4	35,6	35,6	41,4	30,9
Treibhausgas-Emissionen	**12,7**	**8,3**	**6,4**	**5,5**	**5,9**	**6,3**	**8,0**	**8,0**	**9,3**	**6,9**

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit Erd-WP+HST, 0 PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST+WSP2, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST+WSP2, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST+WSP4 +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 0 PV	EFH EH40 mit Erd-WP+HST+WSP4+ Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	45,4	45,4	48,9	49,2	49,3	49,0	45,4	45,4	48,6	49,1
Stromverbrauch gesamt	19,3	19,3	29,3	31,4	27,0	31,0	21,2	24,2	12,5	23,0
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	44,8	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	19,3	11,2	7,4	6,0	6,8	7,4	10,5	10,5	12,5	8,4
Überschussstrom	0,0	36,7	22,9	41,7	24,5	21,9	34,8	31,7	0,0	7,8
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	42%	75%	81%	75%	76%	50%	57%	0%	63%
Eigenverbrauch elektrisch		18%	49%	38%	45%	51%	22%	29%		65%
Brennstoffverbrauch fossil	**36,0**	**20,9**	**13,9**	**11,2**	**12,7**	**13,9**	**19,6**	**19,6**	**23,4**	**15,7**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	39,6	23,0	15,3	12,3	13,9	15,3	21,5	21,5	25,7	17,3
Treibhausgas-Emissionen	**8,9**	**5,1**	**3,4**	**2,8**	**3,1**	**3,4**	**4,8**	**4,8**	**5,8**	**3,9**

Gas-Brennwertkessel

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 Gas-BWK, 0 PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP2, 0 PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP2+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP2+HST, 10,77 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP4+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 0 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	71,3	71,3	73,9	74,2	74,5	73,8	71,3	71,3	74,0	74,3
Stromverbrauch gesamt	1,8	1,8	27,6	32,8	23,9	28,5	19,3	21,6	2,3	16,4
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	0,0	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	1,8	1,8	0,9	0,9	0,9	0,4	0,4	0,4	2,3	0,9
Überschussstrom	0,0	0,0	18,0	35,2	21,8	17,2	26,4	24,1	0,0	6,9
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	0%	97%	97%	96%	99%	98%	98%	0%	94%
Eigenverbrauch elektrisch			60%	48%	51%	62%	41%	46%		69%
Brennstoffverbrauch fossil	**78,5**	**78,5**	**52,3**	**47,2**	**43,8**	**51,8**	**58,9**	**58,8**	**56,2**	**48,1**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	86,4	86,4	57,5	51,9	48,2	57,0	64,8	64,7	61,8	52,9
Treibhausgas-Emissionen	**19,3**	**19,3**	**12,9**	**11,6**	**10,8**	**12,7**	**14,5**	**14,5**	**13,8**	**11,8**

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit Gas-BWK, 0 PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP2, 0 PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP2+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP2+HST, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP4+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 0 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	45,4	45,4	48,4	48,7	48,9	48,3	45,4	45,4	48,4	48,7
Stromverbrauch gesamt	1,6	1,6	24,3	28,0	21,9	25,3	17,4	20,0	2,0	15,8
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	0,0	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	1,6	1,6	0,8	0,7	0,8	0,2	0,2	0,2	2,0	0,8
Überschussstrom	0,0	0,0	21,2	39,9	23,7	20,2	28,1	25,6	0,0	7,3
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	0%	97%	97%	97%	99%	99%	99%	0%	95%
Eigenverbrauch elektrisch			53%	41%	47%	55%	37%	43%		67%
Brennstoffverbrauch fossil	**50,8**	**50,8**	**28,4**	**24,8**	**22,5**	**27,9**	**33,2**	**33,1**	**31,7**	**25,5**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	55,8	55,8	31,3	27,3	24,7	30,7	36,5	36,4	34,8	28,0
Treibhausgas-Emissionen	**12,5**	**12,5**	**7,0**	**6,1**	**5,5**	**6,9**	**8,2**	**8,1**	**7,8**	**6,3**

Gas-Brennwertkessel mit Mini-Wärmepumpe

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP, 0 PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP2, 0 PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP2+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP2+HST, 10,77 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 0 MWh PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	71,3	71,3	74,1	74,4	74,9	74,6	71,3	71,3	74,5	74,8
Stromverbrauch gesamt	14,2	14,2	31,3	35,7	31,0	36,2	22,3	24,8	14,8	25,1
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	0,0	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	14,2	14,2	6,0	5,4	8,7	9,4	7,1	7,1	14,8	10,0
Überschussstrom	0,0	0,0	19,5	36,8	22,5	18,6	30,2	27,7	0,0	7,3
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	0%	81%	85%	72%	74%	68%	71%	0%	60%
Eigenverbrauch elektrisch			56%	45%	50%	59%	32%	38%		67%
Brennstoffverbrauch fossil	**70,1**	**70,1**	**43,3**	**39,0**	**40,1**	**44,8**	**49,6**	**49,5**	**55,2**	**44,7**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	77,1	77,1	47,7	42,9	44,1	49,3	54,5	54,5	60,7	49,1
Treibhausgas-Emissionen	**17,2**	**17,2**	**10,7**	**9,6**	**9,9**	**11,0**	**12,2**	**12,2**	**13,6**	**11,0**

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP, 0 PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP2, 0 PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP2+HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP2+HST, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+HST +ESP5, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+HST +ESP20, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 0 MWh PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP4+HST + Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	45,4	45,4	48,6	48,8	49,3	49,1	45,4	45,4	48,8	49,2
Stromverbrauch gesamt	9,4	9,4	25,9	29,2	26,2	30,4	17,7	20,5	10,3	21,3
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	0,0	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	9,4	9,4	3,2	2,8	5,5	6,1	3,8	3,8	10,3	6,5
Überschussstrom	0,0	0,0	22,1	40,7	24,1	21,1	31,5	28,8	0,0	7,6
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	0%	88%	90%	79%	80%	78%	81%	0%	69%
Eigenverbrauch elektrisch			51%	39%	46%	53%	30%	36%		66%
Brennstoffverbrauch fossil	**46,8**	**46,8**	**23,7**	**20,5**	**21,3**	**24,7**	**28,8**	**28,7**	**32,8**	**24,6**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	51,5	51,5	26,1	22,5	23,4	27,2	31,6	31,6	36,1	27,0
Treibhausgas-Emissionen	**11,5**	**11,5**	**5,8**	**5,0**	**5,2**	**6,1**	**7,1**	**7,1**	**8,1**	**6,0**

Pellet-Kessel

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 Pellet+WSP2 0 PV	EFH EH55 Pellet+WSP2+HST 7,19 MWh PV	EFH EH55 Pellet+WSP2+HST 10,77 MWh PV	EFH EH55 Pellet+WSP4+HST +Thermie-HZ+WW, 7,19 MWh PV	EFH EH55 Pellet+HST+ESP5 7,19 MWh PV	EFH EH55 Pellet+HST+ESP2 0 7,19 MWh PV	EFH EH55 Pellet+WSP4+HST +Thermie-HZ+WW, 0 PV	EFH EH55 Pellet+WSP4+HST +Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	71,3	73,9	74,2	74,5	71,3	71,3	74,0	74,3
Stromverbrauch gesamt	1,8	27,6	32,8	23,9	19,3	21,6	2,3	16,4
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	1,8	0,9	0,9	0,9	0,4	0,4	2,3	0,9
Überschussstrom	0,0	18,0	35,2	21,8	26,4	24,1	0,0	6,9
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	97%	97%	96%	98%	98%	0%	94%
Eigenverbrauch elektrisch		60%	48%	51%	41%	46%		69%
Brennstoffverbrauch fossil	**3,4**	**1,7**	**1,6**	**1,7**	**0,7**	**0,7**	**4,4**	**1,8**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**83,9**	**56,6**	**50,9**	**47,1**	**65,0**	**65,0**	**57,9**	**51,8**
Primärenergie	20,6	13,2	12,0	11,3	13,8	13,8	16,4	12,3
Treibhausgas-Emissionen	**2,5**	**1,5**	**1,4**	**1,4**	**1,5**	**1,5**	**2,2**	**1,5**

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit Pellet+WSP2 0 PV	EFH EH40 mit Pellet+WSP2+HST 7,19 MWh PV	EFH EH40 mit Pellet+WSP2+HST 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit Pellet+WSP4+HST +Thermie-HZ+WW, 7,19 MWh PV	EFH EH40 mit Pellet+HST+ESP5 7,19 MWh PV	EFH EH40 mit Pellet+HST+ESP2 0 7,19 MWh PV	EFH EH40 mit Pellet+WSP4+HST +Thermie-HZ+WW, 0 PV	EFH EH40 mit Pellet+WSP4+HST +Thermie-HZ+WW, 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	45,4	48,4	48,7	48,9	45,4	45,4	48,4	48,7
Stromverbrauch gesamt	1,6	24,3	28,0	21,9	17,4	20,0	2,0	15,8
Stromerzeugung PV/Wind	0,0	44,8	67,2	44,8	44,8	44,8	0,0	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	1,6	0,8	0,7	0,8	0,2	0,2	2,0	0,8
Überschussstrom	0,0	21,2	39,9	23,7	28,1	25,6	0,0	7,3
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	0%	97%	97%	97%	99%	99%	0%	95%
Eigenverbrauch elektrisch		53%	41%	47%	37%	43%		67%
Brennstoffverbrauch fossil	**2,9**	**1,4**	**1,4**	**1,4**	**0,3**	**0,3**	**3,8**	**1,5**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**53,4**	**30,2**	**26,2**	**23,5**	**36,7**	**36,7**	**31,2**	**26,9**
Primärenergie	13,9	7,6	6,8	6,3	7,7	7,7	10,4	7,0
Treibhausgas-Emissionen	**1,8**	**0,9**	**0,9**	**0,8**	**0,8**	**0,8**	**1,5**	**0,9**

Direktelektrische Wärmeversorgung

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH-EH40 mit, Direktelektrisch (HST), 10,77 MWh_PV	EFH-EH40 mit, Direktelektrisch (HST)+WSP, 10,77 MWh_PV	EFH-EH40 mit, Direktelektrisch (HST)+ESP 10 kWh, 10,77 MWh_PV	EFH-EH40 mit, Direktelektrisch (HST)+ESP 5 kWh, 10,77 MWh_PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	45,4	48,7	45,4	45,4
Stromverbrauch gesamt	47,0	50,2	97,0	97,0
Stromerzeugung PV/Wind	67,2	67,2	67,2	67,2
Stromerzeugung Kraftwerke	29,8	23,0	29,1	29,1
Überschussstrom	50,0	39,9	0,0	0,0
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	37%	54%	70%	70%
Eigenverbrauch elektrisch	26%	41%	100%	100%
Brennstoffverbrauch fossil	**55,7**	**42,9**	**54,4**	**54,4**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	61,2	47,2	59,8	59,8
Treibhausgas-Emissionen	**13,7**	**10,6**	**13,4**	**13,4**

Bivalente Systeme mit Luft-Wasser-Wärmepumpe

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 L-W-WP+Pellet+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+Pellet+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+Pellet+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+Pellet+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV	0	EFH EH55 L-W-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+Gas-BWK+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 L-W-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3		71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	74,3	74,5	74,9	74,5		74,3	74,5	74,9	74,5
Stromverbrauch gesamt	26,4	30,9	39,5	27,5		35,4	38,7	40,2	32,5
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	67,2	44,8	44,8		44,8	67,2	44,8	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	1,7	1,5	14,8	5,3		10,7	9,3	15,6	10,1
Überschussstrom	20,1	37,8	20,1	22,6		20,1	37,8	20,1	22,4
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	94%	95%	63%	81%	0%	70%	76%	61%	69%
Eigenverbrauch elektrisch	55%	44%	55%	50%	0%	55%	44%	55%	50%
Brennstoffverbrauch fossil	**3,2**	**2,8**	**27,6**	**9,9**		**38,4**	**33,9**	**43,3**	**36,0**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**43,5**	**38,3**	**17,7**	**25,2**		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	12,2	10,7	33,9	15,9		42,2	37,3	47,6	39,6
Treibhausgas-Emissionen	**1,6**	**1,4**	**7,1**	**2,9**		**9,4**	**8,3**	**10,6**	**8,8**

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit L-W-WP+Pellet+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+Pellet+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+Pellet+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+Pellet+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV	0	EFH EH40 mit L-W-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+Gas-BWK+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit L-W-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4		45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	48,7	49,0	49,2	48,9		48,7	49,0	49,2	48,9
Stromverbrauch gesamt	23,3	26,9	30,6	21,6		27,1	29,9	30,9	25,1
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	67,2	44,8	44,8		44,8	67,2	44,8	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	1,0	0,9	8,3	0,9		4,7	3,9	8,5	4,4
Überschussstrom	22,4	41,1	22,4	24,1		22,4	41,1	22,4	24,1
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	96%	97%	73%	96%	0%	83%	87%	72%	82%
Eigenverbrauch elektrisch	50%	39%	50%	46%	0%	50%	39%	50%	46%
Brennstoffverbrauch fossil	**1,8**	**1,6**	**15,5**	**1,8**		**21,3**	**18,0**	**24,4**	**19,4**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**23,1**	**19,3**	**9,9**	**21,0**		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	6,6	5,7	19,1	6,1		23,4	19,8	26,8	21,4
Treibhausgas-Emissionen	**0,9**	**0,8**	**4,0**	**0,9**		**5,2**	**4,4**	**6,0**	**4,8**

Bivalente Systeme mit Erdreich -Wärmepumpe

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 Erd-WP+Pellet+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+Pellet+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+Pellet+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+Pellet+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV	0	EFH EH55 Erd-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+Gas-BWK+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH55 Erd-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3		71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	74,3	74,6	74,9	74,5		74,3	74,6	74,9	74,5
Stromverbrauch gesamt	29,9	33,9	40,2	32,5		35,2	38,6	36,8	32,5
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	67,2	44,8	44,8		44,8	67,2	44,8	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	5,5	4,8	15,6	10,1		10,8	9,5	12,5	10,2
Überschussstrom	20,4	38,1	20,1	22,4		20,4	38,1	20,4	22,6
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	82%	86%	61%	69%	0%	69%	75%	66%	68%
Eigenverbrauch elektrisch	55%	43%	55%	50%	0%	55%	43%	54%	50%
Brennstoffverbrauch fossil	**10,3**	**9,0**	**43,3**	**36,0**		**30,3**	**26,7**	**33,2**	**28,4**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**27,1**	**23,9**	**0,0**	**0,0**		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	16,8	14,7	47,6	39,6		33,4	29,3	36,5	31,3
Treibhausgas-Emissionen	**3,1**	**2,7**	**10,6**	**8,8**		**7,5**	**6,6**	**8,2**	**7,0**

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit Erd-WP+Pellet+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+Pellet+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+Pellet+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+Pellet+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV	0	EFH EH40 mit Erd-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST, 10,77 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+Gas-BWK+WSP4 +HST, 7,18 MWh PV	EFH EH40 mit Erd-WP+Gas-BWK+WSP2 +HST+Thermie-WW, 7,18 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4		45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	48,8	49,0	49,3	49,0		48,8	49,0	49,3	49,0
Stromverbrauch gesamt	24,3	27,7	27,8	22,6		28,1	30,9	29,1	26,1
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	67,2	44,8	44,8		44,8	67,2	44,8	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	2,2	1,9	5,7	2,1		6,0	5,1	7,0	5,5
Überschussstrom	22,7	41,4	22,7	24,2		22,7	41,4	22,7	24,2
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	91%	93%	79%	91%	0%	79%	84%	76%	79%
Eigenverbrauch elektrisch	49%	38%	49%	46%	0%	49%	38%	49%	46%
Brennstoffverbrauch fossil	**4,0**	**3,5**	**10,7**	**3,8**		**16,4**	**13,7**	**18,1**	**15,0**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**17,0**	**14,1**	**9,2**	**15,3**		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	7,8	6,6	13,6	7,3		18,0	15,1	19,9	16,5
Treibhausgas-Emissionen	**1,3**	**1,1**	**2,8**	**1,3**		**4,0**	**3,4**	**4,5**	**3,7**

B.2 Zu Kapitel 4.3 – Unterschiedliche Gebäudetypen

Einfamilienhaus

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55 L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH55 Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH55 Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH55 Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH40 mit L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH40 mit Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	EFH EH40 mit Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	74,3	74,5	73,9	74,1	73,9	48,8	48,9	48,4	48,5	48,4
Stromverbrauch gesamt	45,9	37,9	27,6	30,1	27,6	36,3	31,2	25,9	27,1	25,9
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	21,5	13,9	0,9	4,5	0,9	13,6	8,7	1,8	3,7	1,8
Überschussstrom	20,3	20,8	18,0	19,2	18,0	22,0	22,3	20,7	21,4	20,7
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	53%	63%	97%	85%	97%	63%	72%	93%	86%	93%
Eigenverbrauch elektrisch	55%	54%	60%	57%	60%	51%	50%	54%	52%	54%
Brennstoffverbrauch fossil	**40,1**	**25,9**	**52,3**	**45,6**	**1,7**	**25,3**	**16,3**	**30,8**	**27,3**	**3,4**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**56,6**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**30,7**
Primärenergie	44,1	28,5	57,5	50,1	13,2	27,9	18,0	33,9	30,0	9,8
Treibhausgas-Emissionen	**9,9**	**6,4**	**12,9**	**11,2**	**1,5**	**6,2**	**4,0**	**7,6**	**6,7**	**1,4**

Reihenhaus

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	RH EH55 L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH55 Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH55 Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH55 Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH40 mit L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH40 mit Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH40 mit Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	RH EH40 mit Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV
Wärmeverbrauch gesamt	61,7	61,7	61,7	61,7	61,7	38,9	38,9	38,9	38,9	38,9
Wärmeerzeugung gesamt	65,0	65,2	64,4	64,8	64,4	42,7	42,8	42,2	42,4	42,2
Stromverbrauch gesamt	40,3	33,3	23,0	25,4	23,0	32,9	28,1	22,8	23,8	22,8
Stromerzeugung PV/Wind	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3	28,3
Stromerzeugung Kraftwerke	19,7	12,9	0,9	4,2	0,9	13,0	8,4	1,8	3,5	1,8
Überschussstrom	7,6	7,9	6,1	7,1	6,1	8,4	8,6	7,3	8,0	7,3
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	51%	61%	96%	83%	96%	60%	70%	92%	85%	92%
Eigenverbrauch elektrisch	73%	72%	78%	75%	78%	70%	69%	74%	72%	74%
Brennstoffverbrauch fossil	**36,7**	**24,1**	**47,0**	**40,4**	**1,6**	**24,3**	**15,8**	**27,5**	**24,5**	**3,4**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**50,8**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**26,9**
Primärenergie	40,4	26,5	51,7	44,5	11,9	26,7	17,3	30,2	26,9	9,1
Treibhausgas-Emissionen	**9,0**	**5,9**	**11,6**	**9,9**	**1,4**	**6,0**	**3,9**	**6,8**	**6,0**	**1,4**

Großes Mehrfamilienhaus Neubau

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	MFH-NB EH55 L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH55 Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH55 Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH55 Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH40 mit L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH40 mit Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH40 mit Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-NB EH40 mit Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV
Wärmeverbrauch gesamt	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4
Wärmeerzeugung gesamt	61,5	61,5	61,4	61,4	61,4	37,7	37,8	37,6	37,7	37,6
Stromverbrauch gesamt	35,2	27,8	17,5	19,1	17,5	26,9	22,3	18,9	18,4	18,9
Stromerzeugung PV/Wind	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
Stromerzeugung Kraftwerke	22,0	15,0	0,8	4,7	0,8	13,3	9,1	1,8	3,5	1,8
Überschussstrom	8,4	8,7	5,0	7,2	5,0	8,1	8,4	4,6	6,7	4,6
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	37%	46%	95%	75%	95%	50%	59%	90%	81%	90%
Eigenverbrauch elektrisch	61%	60%	77%	67%	77%	63%	61%	79%	69%	79%
Brennstoffverbrauch fossil	**41,1**	**27,9**	**49,6**	**44,0**	**1,6**	**24,9**	**16,9**	**26,8**	**24,2**	**3,4**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**53,6**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**26,2**
Primärenergie	45,3	30,7	54,5	48,4	12,5	27,4	18,6	29,5	26,7	9,0
Treibhausgas-Emissionen	**10,1**	**6,9**	**12,2**	**10,8**	**1,5**	**6,1**	**4,2**	**6,6**	**6,0**	**1,4**

Saniertes Mehrfamilienhaus

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	MFH-San EH55 L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH55 Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH55 Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH55 Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH55 Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH40 mit L-W-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH40 mit Erd-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH40 mit Gas-BWK+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH40 mit Gas-BWK+Mini-WP+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV	MFH-San EH40 mit Pellet+WSP+HST, HHS 0, 2/3 PV
Wärmeverbrauch gesamt	64,4	64,4	64,4	64,4	64,4	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2
Wärmeerzeugung gesamt	65,1	65,1	65,0	65,0	65,0	47,0	47,0	46,8	46,9	46,8
Stromverbrauch gesamt	38,5	31,1	21,9	23,7	21,9	33,3	27,6	22,4	22,9	22,4
Stromerzeugung PV/Wind	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9
Stromerzeugung Kraftwerke	20,7	13,8	0,8	4,5	0,8	15,5	10,3	1,8	3,9	1,8
Überschussstrom	12,2	12,6	8,9	10,7	8,9	12,2	12,6	9,4	11,0	9,4
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	46%	56%	96%	81%	96%	53%	63%	92%	83%	92%
Eigenverbrauch elektrisch	59%	58%	70%	64%	70%	59%	58%	69%	63%	69%
Brennstoffverbrauch fossil	**38,7**	**25,7**	**48,7**	**42,8**	**1,6**	**29,0**	**19,2**	**32,9**	**29,7**	**3,4**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**52,7**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**32,9**
Primärenergie	42,6	28,3	53,6	47,1	12,3	31,9	21,1	36,2	32,7	10,3
Treibhausgas-Emissionen	**9,5**	**6,3**	**12,0**	**10,5**	**1,4**	**7,1**	**4,7**	**8,1**	**7,3**	**1,5**

B.3 Zu Kapitel 4.5 – Berücksichtigung des Haushaltsstroms

Einfamilienhaus mit 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH 55, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 55, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 55, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 55, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 55, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 40 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 40 mit WRG, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 40 mit WRG, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 40 mit WRG, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	EFH EH 40 mit WRG, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	74,1	74,2	73,7	73,9	73,7	48,5	48,6	48,2	48,3	48,2
Stromverbrauch gesamt	64,8	56,4	43,6	46,8	43,6	55,4	49,8	42,7	44,4	42,7
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	34,4	26,5	11,0	15,5	11,0	26,3	21,1	12,1	14,6	12,1
Überschussstrom	14,4	14,8	12,2	13,4	12,2	15,7	16,0	14,2	15,0	14,2
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	47%	53%	75%	67%	75%	52%	58%	72%	67%	72%
Eigenverbrauch elektrisch	68%	67%	73%	70%	73%	65%	64%	68%	66%	68%
Brennstoffverbrauch fossil	**64,2**	**49,4**	**75,2**	**68,8**	**20,5**	**49,1**	**39,4**	**53,2**	**50,0**	**22,6**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**61,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**34,2**
Primärenergie	70,6	54,4	82,7	75,7	34,8	54,1	43,3	58,5	55,0	31,7
Treibhausgas-Emissionen	**15,8**	**12,2**	**18,5**	**16,9**	**6,3**	**12,1**	**9,7**	**13,1**	**12,3**	**6,2**

Reihenhaus mit 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	RH EH 55, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 55, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 55, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 55, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 55, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 40 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 40 mit WRG, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 40 mit WRG, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 40 mit WRG, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	RH EH 40 mit WRG, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche
Wärmeverbrauch gesamt	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
Wärmeerzeugung gesamt	63,2	63,3	62,4	62,9	62,4	41,2	41,3	40,6	41,0	40,6
Stromverbrauch gesamt	57,2	50,1	37,3	40,7	37,3	50,1	45,2	38,0	39,6	38,0
Stromerzeugung PV/Wind	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
Stromerzeugung Kraftwerke	32,7	25,8	11,4	15,8	11,4	25,9	21,3	12,6	14,9	12,6
Überschussstrom	3,2	3,4	1,8	2,7	1,8	3,5	3,7	2,3	3,0	2,3
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	43%	48%	69%	61%	69%	48%	53%	67%	62%	67%
Eigenverbrauch elektrisch	89%	88%	94%	90%	94%	87%	87%	92%	89%	92%
Brennstoffverbrauch fossil	**61,0**	**48,2**	**70,2**	**63,8**	**21,3**	**48,4**	**39,7**	**50,5**	**47,8**	**23,6**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**54,6**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**30,1**
Primärenergie	67,1	53,0	77,2	70,2	34,4	53,2	43,6	55,6	52,6	32,0
Treibhausgas-Emissionen	**15,0**	**11,9**	**17,3**	**15,7**	**6,3**	**11,9**	**9,8**	**12,4**	**11,8**	**6,4**

Großes Mehrfamilienhaus Neubau mit 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	MFH-NB EH 55, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 55, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 55, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 55, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 55, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 40 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 40 mit WRG, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 40 mit WRG, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 40 mit WRG, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-NB EH 40 mit WRG, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche
Wärmeverbrauch gesamt	61,2	61,2	61,2	61,2	61,2	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4
Wärmeerzeugung gesamt	61,4	61,4	61,3	61,4	61,3	37,6	37,7	37,6	37,6	37,6
Stromverbrauch gesamt	54,1	46,5	32,3	36,1	32,3	45,7	40,7	33,9	35,2	33,9
Stromerzeugung PV/Wind	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
Stromerzeugung Kraftwerke	36,5	29,1	12,1	17,6	12,1	27,7	23,0	13,4	16,2	13,4
Überschussstrom	4,0	4,2	1,5	3,1	1,5	3,7	3,9	1,2	2,6	1,2
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	33%	37%	62%	51%	62%	39%	44%	60%	54%	60%
Eigenverbrauch elektrisch	81%	81%	93%	86%	93%	83%	82%	95%	88%	95%
Brennstoffverbrauch fossil	**68,2**	**54,3**	**76,0**	**70,4**	**22,6**	**51,8**	**42,9**	**53,6**	**50,6**	**25,0**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**59,7**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**31,9**
Primärenergie	75,0	59,8	83,6	77,4	36,8	56,9	47,2	59,0	55,7	33,9
Treibhausgas-Emissionen	**16,8**	**13,4**	**18,7**	**17,3**	**6,8**	**12,7**	**10,5**	**13,2**	**12,5**	**6,8**

Saniertes Mehrfamilienhaus mit 20 kWh/(m²a) Haushaltsstrom

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	MFH-San EH 55, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 55, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 55, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 55, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 55, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 40 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 40 mit WRG, Erd-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 40 mit WRG, Gas-BWK+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 40 mit WRG, Gas-BWK+Mini-WP+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche	MFH-San EH 40 mit WRG, Pellet+HST+WSP, 20 kWh HHS, PV 2/3 Dachfläche
Wärmeverbrauch gesamt	64,4	64,4	64,4	64,4	64,4	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2
Wärmeerzeugung gesamt	65,0	65,0	64,8	64,9	64,8	46,8	46,9	46,7	46,8	46,7
Stromverbrauch gesamt	57,2	49,6	37,2	40,4	37,2	51,9	46,0	38,5	40,0	38,5
Stromerzeugung PV/Wind	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9
Stromerzeugung Kraftwerke	34,5	27,1	11,5	16,4	11,5	29,0	23,4	12,8	15,8	12,8
Überschussstrom	7,2	7,5	4,2	5,9	4,2	7,0	7,3	4,2	5,8	4,2
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	40%	45%	69%	59%	69%	44%	49%	67%	60%	67%
Eigenverbrauch elektrisch	76%	75%	86%	80%	86%	77%	76%	86%	81%	86%
Brennstoffverbrauch fossil	**64,3**	**50,6**	**73,4**	**67,6**	**21,4**	**54,1**	**43,7**	**57,2**	**54,2**	**23,9**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**58,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**37,3**
Primärenergie	70,7	55,7	80,7	74,4	35,2	59,6	48,1	63,0	59,6	33,7
Treibhausgas-Emissionen	**15,8**	**12,5**	**18,1**	**16,6**	**6,4**	**13,3**	**10,8**	**14,1**	**13,3**	**6,6**

B.4 Zu Kapitel 4.4.1 – Einfluss der Größe des Wärmespeichers

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 15 kWh ohne Vorrang	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 30 kWh ohne Vorrang	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 45 kWh ohne Vorrang	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 15 kWh mit 50% Reser. WP	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 30 kWh mit 50% Reser. WP	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 45 kWh mit 50% Reser. WP	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 60 kWh mit 25% Reser. WP	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 60 kWh mit 50% Reser. WP	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 60 kWh mit 75% Reser. WP	EFH EH55, Erd-WP+HST, 7,18 MWh PV, WSP 60 kWh mit 50% Reser. WP, doppelte Verluste
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	74,3	74,5	74,5	74,3	74,7	74,9	74,6	75,1	75,5	78,6
Stromverbrauch gesamt	36,4	37,9	38,6	36,4	38,0	39,8	39,1	41,2	44,4	43,8
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	14,7	13,9	13,6	14,7	14,1	14,8	13,5	15,7	18,9	16,0
Überschussstrom	23,0	20,8	19,8	23,0	20,8	19,8	19,2	19,2	19,3	16,9
Autarkiegrad elektrisch	60%	63%	65%	60%	63%	63%	65%	62%	57%	63%
Eigenverbrauch elektrisch	49%	54%	56%	49%	54%	56%	57%	57%	57%	62%
Brennstoffverbrauch fossil	**27,4**	**25,9**	**25,4**	**27,4**	**26,2**	**27,6**	**25,3**	**29,3**	**35,3**	**29,9**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	30,1	28,5	28,0	30,1	28,9	30,4	27,8	32,2	38,9	32,9
Treibhausgas-Emissionen	**6,7**	**6,4**	**6,3**	**6,7**	**6,5**	**6,8**	**6,2**	**7,2**	**8,7**	**7,4**

B.5 Zu Kapitel 4.4.3 – Einfluss des Hilfsenergieverbrauchs

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+7,81 MWh PV, HE sehr sparsam	EFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+7,81 MWh PV, HE Pumpen sparsam	EFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+7,81 MWh PV, HE Standard	EFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+7,81 MWh PV, HE hoch	EFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+7,81 MWh PV, HE sehr hoch	MFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+26,91 MWh PV, HE sehr sparsam	MFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+26,91 MWh PV, HE Pumpen sparsam	MFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+26,91 MWh PV, HE Standard	MFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+26,91 MWh PV, HE hoch	MFH EH40 mit WRG, L-W-WP+Thermie+WSP(15)+HST+26,91 MWh PV, HE sehr hoch
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4
Wärmeerzeugung gesamt	49,1	49,0	49,0	49,0	49,0	37,8	37,8	37,8	37,7	37,7
Stromverbrauch gesamt	31,3	31,9	32,3	35,2	37,8	24,6	25,1	25,5	28,3	30,7
Stromerzeugung PV/Wind	44,8	44,8	44,8	44,8	44,8	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6
Stromerzeugung Kraftwerke	10,7	11,1	11,3	13,5	15,3	12,0	12,4	12,7	14,9	16,6
Überschussstrom	24,2	24,0	23,8	23,1	22,2	9,1	8,9	8,8	8,2	7,5
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	66%	65%	65%	62%	60%	51%	51%	50%	47%	46%
Eigenverbrauch elektrisch	46%	46%	47%	48%	50%	58%	59%	59%	62%	65%
Brennstoffverbrauch fossil	**20,0**	**20,6**	**21,2**	**25,3**	**28,5**	**22,5**	**23,1**	**23,7**	**27,7**	**31,0**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	22,1	22,7	23,3	27,8	31,4	24,7	25,5	26,1	30,5	34,1
Treibhausgas-Emissionen	**4,9**	**5,1**	**5,2**	**6,2**	**7,0**	**5,5**	**5,7**	**5,8**	**6,8**	**7,6**

B.6 Zu Kapitel 4.4.4 – Einfluss der thermischen Solaranlage

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EFH EH55, Gas-BWK, 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(30), Thermie 6,4 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(30), Thermie 16 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(30)+HST Thermie 16 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(60), Thermie 16 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(60)+HST Thermie 16 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(120), Thermie 16 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(60), Thermie 48 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(120), Thermie 48 m², 3,59 MWh PV	EFH EH55, Gas-BWK+WSP(240), Thermie 48 m², 3,59 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3	71,3
Wärmeerzeugung gesamt	71,3	73,7	74,0	74,3	74,3	74,5	74,4	74,5	75,0	75,2
Stromverbrauch gesamt	1,8	2,2	2,3	16,4	2,4	16,6	2,5	2,5	2,7	2,8
Stromerzeugung PV/Wind	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4
Stromerzeugung Kraftwerke	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
Überschussstrom	21,5	21,1	21,0	6,9	20,9	6,7	20,8	20,8	20,6	20,5
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	49%	58%	60%	94%	61%	94%	62%	62%	65%	66%
Eigenverbrauch elektrisch	4%	6%	6%	69%	7%	70%	7%	7%	8%	8%
Brennstoffverbrauch fossil	**76,8**	**58,8**	**53,6**	**48,1**	**48,8**	**44,2**	**46,5**	**45,2**	**35,0**	**29,8**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Primärenergie	84,5	64,7	58,9	52,9	53,7	48,7	51,2	49,7	38,5	32,7
Treibhausgas-Emissionen	**18,9**	**14,5**	**13,2**	**11,8**	**12,0**	**10,9**	**11,4**	**11,1**	**8,6**	**7,3**

B.7 Zu Kapitel 6 – Gebäudekonzepte mit Energiegewinn

Ohne Haushaltsstrom

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EH40+, L-W-WP+WSP15+HST+ESP2,1 0 HHS, 2,2 MWh PV	EHP EH55 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP15 0 HHS, 10,7 MWh PV	EHP EH55 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP15 0 HHS, 7,19 MWh PV	EHP EH40 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP15 0 HHS, 7,19 MWh PV	SON, EH55, Thermie 45 m²+Pellet+WSP1 9 m³, 0 HHS, 2 MWh PV	PH Plus, L-L-WP+WSP15 0 HHS,10,7 MWh PV	Plus, EH40 mit WRG, Pellet+WSP30, 0 HHS, 10,7 MWh PV	KlimN1, EH55, Erdreich-WP+Pellet+HST+WSP30 0 HHS, 10,7 MWh PV	KlimN2, EH40 mit, L-W-WP+HST+WSP30 0 HHS, 7,1 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	71,3	71,3	45,4	71,3	45,4	45,4	71,3	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	47,2	74,1	73,9	48,3	76,3	48,4	45,4	74,6	48,8
Stromverbrauch gesamt	32,2	47,7	46,1	35,0	3,0	38,6	3,5	33,9	36,3
Stromerzeugung PV/Wind	13,4	67,2	44,8	44,8	13,4	67,2	67,2	67,2	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	18,4	21,1	23,6	14,0	1,0	14,0	1,8	4,8	13,6
Überschussstrom	0,5	40,6	22,2	23,8	11,5	42,5	65,4	38,1	22,0
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	43%	56%	49%	60%	66%	64%	50%	86%	63%
Eigenverbrauch elektrisch	96%	40%	50%	47%	15%	37%	3%	43%	51%
Brennstoffverbrauch fossil	**34,3**	**39,5**	**44,0**	**26,1**	**1,9**	**26,1**	**3,3**	**9,0**	**25,3**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**23,6**	**0,0**	**53,4**	**23,9**	**0,0**
Primärenergie	37,8	43,4	48,4	28,7	6,8	28,7	14,3	14,7	27,9
Treibhausgas-Emissionen	**8,4**	**9,7**	**10,8**	**6,4**	**0,9**	**6,4**	**1,9**	**2,7**	**6,2**

Mit Haushaltsstrom

kWh/(m²a) bzw. kg/(m²a) bzw. %	EH40+, L-W-WP+WSP15+HST+ESP2,1 20 kWh HHS, 2,2 MWh PV	EHP EH55 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP15 20 kWh HHS, 10,7 MWh PV	EHP EH55 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP15 20 kWh HHS, 7,19 MWh PV	EHP EH40 mit WRG, L-W-WP+HST+WSP15 20 kWh HHS, 7,19 MWh PV	SON, EH55, Thermie 45 m²+Pellet+WSP1 9 m³, 20 kWh HHS, 2 MWh PV	PH Plus, L-L-WP+WSP15 20 kWh HHS,10,7 MWh PV	Plus, EH40 mit WRG, Pellet+WSP30, 20 kWh HHS, 10,7 MWh PV	KlimN1, EH55, Erdreich-WP+Pellet+HST+WSP30 20 kWh HHS, 10,7 MWh PV	KlimN2, EH40 mit, L-W-WP+HST+WSP30 20 kWh HHS, 7,1 MWh PV
Wärmeverbrauch gesamt	45,4	71,3	71,3	45,4	71,3	45,4	45,4	71,3	45,4
Wärmeerzeugung gesamt	45,8	73,9	73,6	48,0	76,3	48,2	45,4	74,4	48,5
Stromverbrauch gesamt	49,6	66,5	65,0	54,0	23,0	57,6	23,5	51,3	55,4
Stromerzeugung PV/Wind	13,4	67,2	44,8	44,8	13,4	67,2	67,2	67,2	44,8
Stromerzeugung Kraftwerke	34,6	33,2	36,5	26,7	13,9	25,9	11,5	15,5	26,3
Überschussstrom	0,0	33,8	16,3	17,4	4,3	35,4	55,1	31,4	15,7
Eigenversorgungs-anteil elektrisch	30%	50%	44%	51%	40%	55%	51%	70%	52%
Eigenverbrauch elektrisch	100%	50%	64%	61%	68%	47%	18%	53%	65%
Brennstoffverbrauch fossil	**64,6**	**62,0**	**68,2**	**49,8**	**25,9**	**48,3**	**21,5**	**28,9**	**49,1**
Brennstoffverbrauch Biomasse	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**23,6**	**0,0**	**53,4**	**26,6**	**0,0**
Primärenergie	71,1	68,2	75,0	54,7	33,2	53,1	34,3	37,1	54,1
Treibhausgas-Emissionen	**15,9**	**15,2**	**16,8**	**12,2**	**6,8**	**11,9**	**6,3**	**7,6**	**12,1**