



in Zusammenarbeit mit



Kurzgutachten zur Überarbeitung von Anforderungssystemen und Standards im Gebäudeenergiegesetz für Neubauten sowie Bestandsgebäude einschl. der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für Neubauten und Bestandsgebäude

Leistung gemäß Rahmenvertrag zur Beratung der Abteilung II des BMWi

Leistungsabruf: durch Referat II C 2 am 03.08.2021

BMWi-Projekt-Nr.: 115/21-3

Heidelberg, Berlin, Dresden, 2022

Impressum

Hauptbearbeitung

Dr. Ing. Martin Pehnt

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH

Wilckensstr. 3

69120 Heidelberg

Bearbeitende (in Klammern die Kapitelschwerpunkte)

Julia Lempik, ifeu

(Kapitel 1, 2, 3.1–3.4, 3.6, 3.7, 3.9, 4.2)

Peter Mellwig, ifeu

(Kapitel 1, 2, 3.1–3.4, 3.6, 3.7, 3.9, 4.2)

Prof. Dr.-Ing. Anton Maas, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH

(Kapitel 4.2, 5, 6)

Dr.-Ing. Stephan Schlitzberger, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH

(Kapitel 4.2, 5, 6)

Dipl.-Ing. Kirsten Höttges, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH

(Kapitel 4.2, 5, 6)

Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz, ITG Dresden

(Kapitel 3.8, 5.5, 6.1, 6.2)

Dr.-Ing. Bernadetta Winiewska, ITG Dresden

(Kapitel 3.8, 5.5, 6.1, 6.2)

Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm, FIW München e.V.

(Kapitel 5.1–5.4, 6.1, 6.2, 7.2)

Carolin Kokolsky, FIW München e.V.

(Kapitel 5.1–5.4, 7.2)

Sigrid Lindner, Guidehouse

(Kapitel 3.5, 4.1, 6.1)

Dr. Kjell Bettgenhäuser, Guidehouse

(Kapitel 3.5, 4.1, 6.1)

Carsten Petersdorff, Guidehouse

(Kapitel 3.5, 4.1, 6.1)

Nora Langreder, Prognos AG

(Kapitel 4.1)

Nils Thamling, Prognos AG

(Kapitel 4.1)

Dr. Sibylle Braungardt, Öko-Institut

(Kapitel 4.1)

Benjamin Köhler, Öko-Institut

(Kapitel 4.1)

Reviewer

Dr. Stephanie Veselá, Peter Pannier, Michael Müller, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)

Auftraggeber:

Dr. Martin Schöpe, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Referat II C 2

Inhalt

Inhalt	2
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	10
1 Zusammenfassung	13
2 Hintergrund	20
2.1 Einführung	20
2.2 Ziel des Projekts	20
3 Anforderungssystematik	22
3.1 Ausgangspunkt	22
3.2 Vorgehen	23
3.3 Zielbild der Anforderungsgröße	24
3.4 Definition von Kriterien der Bewertung neuer Anforderungsgrößen	28
3.5 Effizienzanforderungen	29
3.5.1 Spezifischer Transmissionswärmeverlust H_T'	30
3.5.2 Spezifischer, äquivalenter Transmissionswärme- Transferkoeffizient $H_{T,s}'$	32
3.5.3 Bauteilanforderungen: Gebäudehülle und Lüftungskomponenten (Tabellenverfahren)	34
3.5.4 Nutzwärmebedarf vor 1. Iteration $Q_{h,b,0}$	35
3.5.5 Nutzwärmebedarf $Q_{h,b}$	36
3.5.6 Wärme-/Kälteenergiebedarf Q_{outg}	37
3.5.7 Endenergiebedarf Q_f - ohne Umweltenergie	39
3.5.8 Endenergetische Anlagenaufwandszahl e_f	40
3.5.9 Endenergetische Anlagenaufwandszahl inkl. Umweltenergie $e_{f,Umwelt}$	41
3.5.10 Empfehlung für das GEG	42
3.6 Umweltgrößen	44
3.6.1 Nicht-erneuerbare Primärenergie Q_p	44

3.6.2	PER	47
3.6.3	THG (im Betrieb) ($m_{CO_2\ddot{a}q}$)	48
3.6.4	Bewertete Endenergie	51
3.6.5	Absehbar erneuerbare Versorgung bzw. „Zero carbon ready“	52
3.6.6	Empfehlung für das GEG	54
3.7	Empfehlung für eine Kombination von Anforderungsgrößen	55
3.8	Weitere Effizienzanforderungen	55
3.9	Ableitung konkreter THG-Faktoren	61
3.9.1	Strom	61
3.10	Bewertung von Wärmepumpen und Effizienzanforderungen an Wärmepumpen	65
3.10.1	Ausgangslage: Lastsituation von Wärmepumpen im deutschen Kraftwerkspark	65
3.10.2	Effizienzanforderungen an Wärmepumpen	66
3.10.3	Konkurrenz zu Wasserstoff und PtG	67
3.10.4	Empfehlungen für das GEG	72
3.10.5	Fernwärme	73
3.10.6	Sonstige Energieträger	76
3.10.7	Resultierende Tabelle für das GEG	76
4	Weitere Analysen und Festlegungen	78
4.1	Referenzgebäude	78
4.1.1	Referenzgebäude oder feste Anforderungswerte	78
4.1.2	Integration von Aspekten der Kompaktheit	80
4.1.3	Integration von Aspekten der Fensterflächen	82
4.1.4	Empfehlungen für das GEG	86
5	Definition des Neubaustandards für ein novelliertes GEG	87
5.1	Vorgehen und Festlegungen	87
5.2	„Baubarkeit“ der Gebäudehülle	87
5.3	Baupraxis von Effizienzhäusern	89
5.4	Parameterstudie zur Gebäudehülle	90
5.5	Anlagentechnische Anforderungen an das Referenzgebäude	94
5.6	Berechnungsergebnisse	95
5.6.1	Effizienzgrößen H_T^1 und $q_{h,b,0}$	97
5.6.2	Endenergiebedarf	99
5.6.3	Primärenergiebedarf	101
5.6.4	Treibhausgasemissionen	103

5.6.5	Diskussion	106
6	Wirtschaftlichkeitsanalyse	107
6.1	Grundsätzliche Vorbemerkungen zur Wirtschaftlichkeit	108
6.2	Ökonomische Berechnungen und Randbedingungen	108
6.2.1	Investitionskosten	108
6.2.2	Kapitalkosten	111
6.2.3	Honorare für Planungsleistungen und Nebenkosten	112
6.2.4	Mehrwertsteuer	112
6.2.5	Betriebs- und Instandhaltungskosten	112
6.2.6	Energiekosten und CO ₂ -Preise	112
6.2.7	Jahresgesamtkosten/Annuitäten	114
6.2.8	Umgang mit variablen Einflussparametern	114
6.3	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse Wohngebäude für den Effizienzhaus-55-Standard	117
6.3.1	Zusammenfassung der annuitätischen Bewertung	117
6.3.2	Vorbemerkungen zu Parametrisierung und Randbedingungen	118
6.3.3	Auswertungen der Grundfälle	119
6.3.4	Sensitivitätsbetrachtung CO ₂ -Bepreisung	128
6.3.5	Sensitivitätsbetrachtung Kapitalzins	130
6.4	Ergebnisse der Abschätzung zur Wirtschaftlichkeit Nichtwohngebäude für den EG-55-Standard	133
6.4.1	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	133
6.4.2	Vorbemerkungen zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit für Nichtwohngebäude	134
6.4.3	Investitionskosten	135
6.4.4	Annuität kapitalgebundener Kosten	138
6.4.5	Annuität bedarfsgebundener Kosten	139
6.4.6	Gesamtannuität	141
7	Einführung des Anforderungsniveaus EH/EG 55 in einer kleinen Novelle	144
7.1	Beschreibung	144
7.2	Wirkungsabschätzung durch Anhebung des Anforderungsniveaus auf EH 55	144
7.2.1	THG-Emissionen	145
7.2.2	Endenergieverbrauch	146
7.2.3	Fazit	147
8	Ausblick auf das Folgeprojekt	148

9 Anhang	149
9.1 Durchgeführte Veranstaltungen	149
9.2 Literaturverzeichnis	149
9.3 Abkürzungsverzeichnis	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vorgeschlagene Anforderungsgrößen für ein neues GEG	14
Abbildung 2:	Empfohlene Werte (farbig hinterlegt) für ein künftiges Referenzgebäude im Vergleich zum derzeitigen Stand	16
Abbildung 3:	Gegenstandsbereich des Projektes	21
Abbildung 4:	Überblicksabbildung für die Einordnung der unterschiedlichen Kenngrößen am Beispiel von Wohngebäuden	24
Abbildung 5:	Zusammenspiel der Haupt- und Nebenanforderung der aktuellen Anforderungssystematik im GEG. Beispiel EFH, Niveau Hülle GEG-Referenz. Quelle: Berechnungen ibh	31
Abbildung 6:	Ableitung der drei bzw. vier Anforderungsgrößen für ein neues GEG	55
Abbildung 7:	Anteile der jeweiligen Bilanzteile an der gesamten Endenergie (inkl. Hilfsenergie und Umweltenergie) am Beispiel eines EFH mit Fensterlüftung (V1)	57
Abbildung 8:	Anteile der jeweiligen Bilanzteile an der gesamten Endenergie (incl. Hilfsenergie und Umweltenergie) am Beispiel eines EFH mit einer zentralen Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (V2)	57
Abbildung 9:	Ergebnisse der Berechnung des ifeu-Strommasters auf Basis des Prognos 80 % EE-Szenarios (Quelle: eigene Berechnungen ifeu)	64
Abbildung 10:	Angebot von klimaneutralem Wasserstoff – Inländische Erzeugung und Import in TWh/a. Vergleich aktueller Szenarien zur Klimaneutralität	67
Abbildung 11:	Vergleich durchschnittlicher Nutzungsgrade von Wärmepumpen, E-Heizern und PtG-Technologien unter typischen Bedingungen. H ₂ : Wasserstoff	69
Abbildung 12:	Wasserstoffbedarf für eine Kilowattstunde Wärme aus Wärmepumpen und Wasserstoff-Heizkessel bei unterschiedlichen EE-Stromangeboten und Temperaturen	71
Abbildung 13:	Grundprinzip des Öko-Wärmetarifs (Quelle: ifeu et al. 2018)	75
Abbildung 14:	Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Kompaktheit im Anforderungsverfahren	82
Abbildung 15:	Beispielgebäude zur Berechnung des Effektes von Fensterflächen	83

Abbildung 16: Mindestanforderungen und tatsächlich umgesetztes energetisches Niveau (Mittelwert) bei Inanspruchnahme einer Förderung	89
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Parameterstudie Gebäudehülle.	90
Abbildung 18: Variation der Kosten je m ² Wohnfläche in Abhängigkeit des gewählten baulichen Wärmeschutzes. Dargestellt sind exemplarisch die Ergebnisse für 6 Wohngebäude. Untersucht wurden alle Wohngebäude der ZUB Datenbank. (EFH: Einfamilienhaus, RMH: Reihenmittelhaus, DHH: Doppelhaushälfte, MFH: Mehrfamilienhaus, WE: Wohnungseinheit)	92
Abbildung 19: Empfohlene Orientierungswerte für H_T' und q_p für einen künftiges Referenzgebäude sowie die parallele Entwicklung der Förderstandards, wobei in Zukunft nicht mehr H_T' und q_p , sondern $q_{h,b,0}$ und THG verwendet werden.	93
Abbildung 20: Empfohlene Werte (farbig hinterlegt) für ein künftiges Referenzgebäude im Vergleich zum derzeitigen Stand	93
Abbildung 21: Ausführung Gebäudehülle - U-Werte und H_T' – EFH	97
Abbildung 22: Ausführung Gebäudehülle - Nutzenergiebedarf Heizen $q_{h,b,0}$ – EFH	98
Abbildung 23: Ausführung Gebäudehülle - U-Werte und H_T' – MFH	98
Abbildung 24: Ausführung Gebäudehülle - Nutzenergiebedarf Heizen $q_{h,b,0}$ – MFH	99
Abbildung 25: Endenergiebedarf Referenzen und Varianten – EFH	100
Abbildung 26: Endenergiebedarf Referenzen und Varianten – MFH	100
Abbildung 27: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – EFH	101
Abbildung 28: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig– EFH	102
Abbildung 29: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – MFH	102
Abbildung 30: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig – MFH	103
Abbildung 31: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – EFH	104
Abbildung 32: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig – EFH	104
Abbildung 33: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – MFH	105
Abbildung 34: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig – MFH	105

Abbildung 35: Zahlenbeispiel EFH zur Aufteilung der Gebäudekosten auf energetisch relevante Komponenten und verbleibenden, nicht energiebedingten Kostenanteil	110
Abbildung 36: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer energetischen Maßnahme	115
Abbildung 37: Beispielhafte Darstellung der Unschärfen aller Parameter bei der Ermittlung der spezifischen Jahresgesamtkosten für den Neubau eines typischen Einfamilienhauses in zwei unterschiedlichen energetischen Ausführungen. Die schraffierten Bereiche stellen das Konfidenzintervall der Monte-Carlo-Analyse dar. Die durchgezogenen Linien zeigen den mittleren Verlauf.	117
Abbildung 38: Ergebnisse EFH, Varianten Gas-Brennwertkessel mit Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung	119
Abbildung 39: Ergebnisse EFH, Varianten Gas-Brennwert-Kessel mit Solarthermie Heizung	120
Abbildung 40: Ergebnisse EFH, Varianten Luft/Wasser-Wärmepumpe	121
Abbildung 41: Ergebnisse EFH, Varianten Sole/Wasser-Wärmepumpe	121
Abbildung 42: Ergebnisse EFH, Varianten Biomasse-Kessel	122
Abbildung 43: Ergebnisse EFH, Varianten Fernwärme	122
Abbildung 44: Ergebnisse MFH, Varianten Gas-Brennwert-Kessel mit Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung	124
Abbildung 45: Ergebnisse MFH, Varianten Gas-Brennwert-Kessel mit Solarthermie Heizung	125
Abbildung 46: Ergebnisse MFH, Varianten Luft/Wasser-Wärmepumpe	125
Abbildung 47: Ergebnisse MFH, Varianten Sole/Wasser-Wärmepumpe	126
Abbildung 48: Ergebnisse MFH, Varianten Biomasse-Kessel	126
Abbildung 49: Ergebnisse MFH, Varianten Fernwärme	127
Abbildung 50: Ergebnisse Sensitivität CO ₂ -Bepreisung EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: inklusive CO ₂ -Preisanteil, rechts ohne CO ₂ -Preisanteil	129
Abbildung 51: Ergebnisse Sensitivität CO ₂ -Bepreisung EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: inklusive CO ₂ -Preisanteil, rechts ohne CO ₂ -Preisanteil	129
Abbildung 52: Ergebnisse Sensitivität CO ₂ -Bepreisung MFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: inklusive CO ₂ -Preisanteil, rechts ohne CO ₂ -Preisanteil	130

Abbildung 53: Ergebnisse Sensitivität CO ₂ -Bepreisung EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: inklusive CO ₂ -Preisanteil, rechts ohne CO ₂ -Preisanteil	130
Abbildung 54: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %	131
Abbildung 55: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %	131
Abbildung 56: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins MFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %	132
Abbildung 57: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %	132
Abbildung 58: Differenz der jährlichen THG-Emissionen aufgrund der Einführung des EH55 Niveaus ab 1.1.2023 in den Sektoren Gebäude und Energie	145
Abbildung 59: Differenz der kumulierten THG-Emissionen in den Sektoren Gebäude und Energie seit 2022 im Vergleich zum Weiter-So.	146
Abbildung 60: Differenz des Endenergieverbrauchs nach Energieträger im Vergleich zum Weiter-So-Szenario.	146
Abbildung 61: Differenz der kumulierten Endenergieeinsparung für den Energieträger Gas seit 2022 im Vergleich zum Weiter-So.	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Ergebnisse des Projektes	19
Tabelle 2:	Bewertung von Energieträgern und Umwandlungstechnologien in strategischen Studien/Dokumenten	25
Tabelle 3:	Betrachtete Effizienz-Anforderungsgrößen	30
Tabelle 4:	Bewertung der Effizienzgröße „Spezifischer Transmissionswärmeverlust“	31
Tabelle 5:	Bewertung der Effizienzgröße „Spezifischer äquivalenter Transmissionswärme-Transferkoeffizient“	33
Tabelle 6:	Bewertung der Effizienzgröße „Bauteilanforderungen“	34
Tabelle 7:	Bewertung der Effizienzgröße „Nutzwärmebedarf vor 1. Iteration“	35
Tabelle 8:	Bewertung der Effizienzgröße „Nutzwärmebedarf“	36
Tabelle 9:	Bewertung der Effizienzgröße „Wärme-/Kälteenergiebedarf“	38
Tabelle 10:	Bewertung der Effizienzgröße „Endenergie“	39
Tabelle 11:	Bewertung der Effizienzgröße „endenergetische Anlagenaufwandszahl“	40
Tabelle 12:	Bewertung der Effizienzgröße „endenergetische Anlagenaufwandszahl inkl. Umweltenergie“	42
Tabelle 13:	Vergleich der Bewertungen der Effizienzgröße	43
Tabelle 14:	Betrachtete Umwelt-Anforderungsgrößen	44
Tabelle 15:	Bewertung der Umweltgröße „nicht-erneuerbare Primärenergie“	46
Tabelle 16:	Bewertung der Umweltgröße „Primary Renewable Energy“	47
Tabelle 17:	Bewertung der Umweltgröße „THG im Betrieb“	50
Tabelle 18:	Beispiele für bewertete Endenergie	51
Tabelle 19:	Bewertung der Umweltgröße „Bewertete Endenergie“	52
Tabelle 20:	Bewertung der Umweltaforderung „absehbar erneuerbar“	53
Tabelle 21:	Übersicht über die Bewertungen der Umweltkenngrößen	54
Tabelle 22:	Bewertung des Erfordernisses zusätzlicher Effizienzanforderungen	58
Tabelle 23:	Energieträgeranteil der Modellierung des Strommixes in einem 80 %-EE-Szenario 2030 (Quelle: eigene Berechnungen Prognos)	62

Tabelle 24:	THG-Faktoren für sehr gute („best“) und mittlere („konservativ“) THG-Faktoren für ein Wärmenetz mit Wärme aus dem angegebenen Energieträger (inkl. Hilfsstrom und Netzverluste) (Quelle: AGFW 2022)	74
Tabelle 25:	Aktualisierte Faktoren für die Bewertung von Energieträgern (<i>in Klammern die aktuellen Werte</i>)	76
Tabelle 26:	Exemplarische Eingangsmatrix für ein monolithisches Mauerwerk aus Ziegel mit handelsüblichen Mauerwerksstärken und deklarierten Wärmeleitfähigkeiten, für ein Mauerwerk mit WDVS und für zweischaliges Mauerwerk mit Ziegeln. PUR: Polyurethan. EPS: expandiertes Polystyrol. MW: Mineralwolle	88
Tabelle 27:	Variation der U-Werte im Rahmen dieser Studie. Die derzeitigen Referenzwerte sind fett gekennzeichnet.	91
Tabelle 28:	Vorschlag für ein aktualisiertes Referenzgebäude für Ein- und Zweifamilienhaus (EZFH) und MFH (Spalten „Referenz“) und Vergleich mit dem in einer ersten Projektphase definierten Niveau I (entsprechend der Anforderungen an das vereinfachte Verfahren gemäß KfW/GEG 2022) und einem Niveau II (angelehnt an das GEG 2.0 ifeu et al. (2022))	94
Tabelle 29:	Zusammenstellung der zugrunde gelegten Primärenergiefaktoren	95
Tabelle 30:	Zusammenstellung der zugrunde gelegten Emissionsfaktoren	96
Tabelle 31:	Grenzübergangspreise für Erdgas, Erdöl und Strom (reale Preise 2020)	113
Tabelle 32:	Entwicklung des BEHG und EU-ETS Preises	113
Tabelle 33:	Endkundenpreise, inkl. Steuer, ohne CO ₂ -Preis (reale Preise 2020)	114
Tabelle 34:	Änderung Gesamtannuität gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse EFH und MFH für das Niveau EH 55 (qP55/HT70), Angaben in Prozent	117
Tabelle 35:	Investitionskostenänderung gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse EFH, Angaben in Prozent	123
Tabelle 36:	Änderung Gesamtannuität gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse EFH, Angaben in Prozent	123
Tabelle 37:	Investitionskostenänderung gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse MFH, Angaben in Prozent	127
Tabelle 38:	Änderung Gesamtannuität gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse MFH, Angaben in Prozent	128
Tabelle 39:	Netto-Investitionskosten in €/m ² Nettogrundfläche, nicht energiebedingter Investitionskostenanteil sowie Kosten energetisch relevanter Komponenten für die Niveaus 75 % q _{p,Ref} / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] und 55 % q _{p,Ref} / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55]	135

Tabelle 40:	Netto-Investitionskosten gesamt in €/m ² Nettogrundfläche für die Niveaus 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] und 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55]	136
Tabelle 41:	Mehrkosten bei 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m ² A _{NGF}]; rechts in [%]	136
Tabelle 42:	Annuität kapitalgebundener Kosten energetisch relevanter Elemente in €/(m ² a) für die Niveaus 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] und 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55]	138
Tabelle 43:	Veränderung Annuität kapitalgebundener Kosten energetisch relevanter Elemente bei 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m ² A _{NGF}]; rechts in [%]	139
Tabelle 44:	Annuität bedarfsgebundener Kosten in €/(m ² a) für die Niveaus 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] und 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55]	140
Tabelle 45:	Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m ² A _{NGF}]; rechts in [%]	140
Tabelle 46:	Gesamtannuität in €/(m ² a) für die Niveaus 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] und 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55]	142
Tabelle 47:	Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m ² A _{NGF}]; rechts in [%]	142
Tabelle 48:	Übersicht über die Erörterungstermine im Rahmen dieses Projektes	149

Anmerkung: Kenngrößen wie $Q_{h,b,0}$, Q_p usw. werden in dieser Studie groß geschrieben, wenn es sich um absolute Werte handelt, und klein, wenn es spezifische Werte sind (also beispielsweise in kWh/m²).

1 Zusammenfassung

Dieses Gutachten schafft, basierend auf einer Analyse der Anforderungsgrößen für den Neubau, die Grundlagen für die Ableitung einer Novelle des Gebäudeenergiegesetzes (GEG). Außerdem werden erforderliche Nebenanforderungen für Komponenten oder Teilsegmente des Gebäudes abgeleitet, weitere methodische Veränderungen etwa zur Bestimmung der Primärenergiefaktoren, des Referenzgebäudeverfahrens und der Berechnungslogik durchgeführt, das Verfahren zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit überarbeitet und Vorschläge zur Weiterentwicklung des GEG erarbeitet.

Ableitung neuer Anforderungsgrößen für den Neubau. Im ersten Schritt werden Effizienz- und Umweltgrößen analysiert und multikriteriell bewertet (Abbildung 1). Eine Effizienzgröße ist nicht nur aus Sicht des Klimaschutzes erforderlich, sondern auch, um einen volkswirtschaftlich sparsamen Umgang mit erneuerbaren Energieträgern (EE) zu gewährleisten, sich von Energieimporten unabhängig zu machen, Gebäudeeigentümer vor Preisschwankungen und -steigerungen der Energieträger zu schützen und im Fall von elektrisch betriebenen Heizungen die Lastanforderungen an das Stromnetz zu optimieren. Allerdings stößt die derzeit verwendete Effizienzgröße des Transmissionswärmeverlustes H_T' an Grenzen, da weder Wärmegewinne aus der Wärmerückgewinnung in Lüftungsanlagen noch solare Gewinne berücksichtigt werden. Daher wird als ganzheitlichere Effizienzgröße für die langlebigen Gebäudekomponenten der **Heizwärmebedarf $Q_{h,b,0}$** vorgeschlagen, der diese Begrenzung überwindet und damit zusätzliche Flexibilität in der Sicherstellung eines effizienten Konzeptes zulässt.

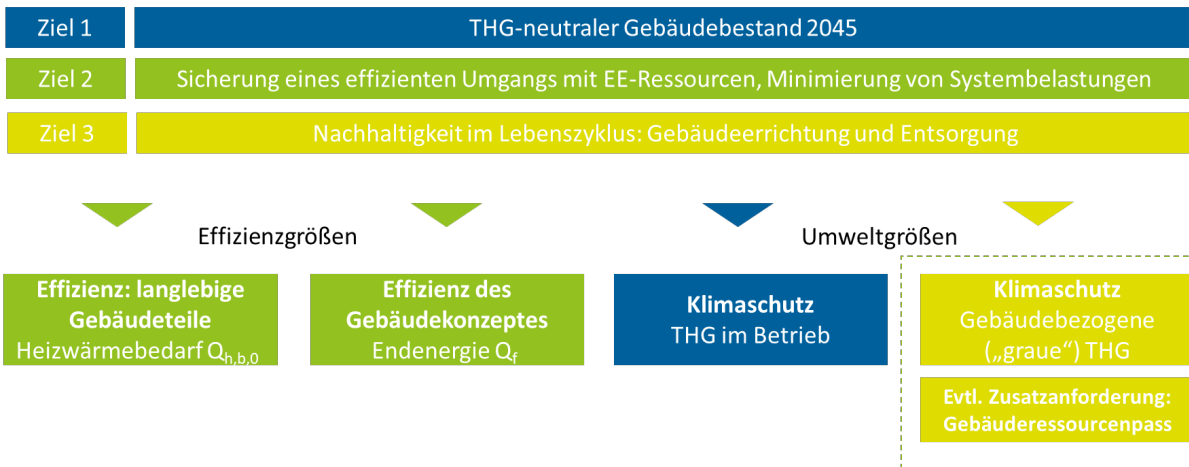
Die Umweltgröße, die das Schutzgut Klima unmittelbar abbildet, sind die aus dem Endenergiebedarf durch Multiplikation mit spezifischen Treibhausgas (THG)-Faktoren ermittelten **THG-Emissionen im Betrieb**. Sie bildet die mit dem Betrieb des Gebäudes zusammenhängende Klimawirkung deutlich besser ab als der Primärenergiebedarf, der die unterschiedliche THG-Intensität nicht ausreichend abbildet. Sie ist zudem im GEG und in der DIN V 18599 eingeführt, bildet auch andere Klimawirkungen von Energieträgern (beispielsweise die THG-Emissionen der landwirtschaftlichen Vorkette von biogenen Energieträgern) angemessen ab und ist als Bewertungsmaßstab auch im Gebäudebestand gut einsetzbar.

Beide Größen werden um die Effizienzgröße **Endenergie Q_f** ergänzt, die das gesamte Gebäudekonzept betrachtet, den von außen bezogenen Energieeinkauf charakterisiert und das Anforderungssystem zukunftsfest macht, da es auch in Zeiten stark dekarbonisierter Energieträger (und damit niedriger THG-Faktoren) ein Mindestniveau an Effizienz sicherstellt. Mit dieser Anforderung wird auch ein effizienter Einsatz von Biomasse angereizt.

Mit diesen drei Anforderungsgrößen kann somit ein langjährig wirksames Anforderungsgrößenset definiert werden, das auch kompatibel mit den zu erwartenden Grundanforderungen der EPBD (EU-Gebäuderichtlinie) – gemäß Entwurfsstand Mai 2022 – ist.

Abbildung 1: Vorgeschlagene Anforderungsgrößen für ein neues GEG

Weitere Effizienzanforderungen. Ausgehend von der Hypothese, dass als Hauptanfor-



derungsgrößen $Q_{h,b,0}$, Endenergie und Treibhausgasemissionen definiert werden, stellt sich die Frage, inwieweit weitere, technologie- oder komponentenspezifische Effizienzanforderungen Eingang in das GEG finden müssen. Grundsätzlich gilt, dass bei sinnvoll festgelegten Anforderungsgrößen und -höhen auf einige zusätzliche Einzelanforderungen, etwa an die Effizienz der Warmwasserbereitung oder der Beleuchtung, verzichtet werden kann und bei Effizienzbereichen, die über die Anforderungsgrößen nicht ausreichend adressiert werden, zusätzliche Anforderungen notwendig sind. Das Gutachten schlägt, wie auch im gegenwärtigen GEG verankert, einzelne Effizienzanforderungen an Komponenten vor, beispielsweise Anforderungen an die Heizungssystemtemperatur, um ein niedriges Temperaturniveau (NT) sicherzustellen (NT ready).

Effizienzanforderungen an Wärmepumpen. Zudem sollten Effizienzanforderungen an den Einsatz von Wärmepumpen den allgemeinen Anforderungskatalog ergänzen, da die Anlageneffizienz der Wärmepumpe durch die endenergetische Bewertung nicht ausreichend sichtbar wird. Hierbei könnte durch konkrete Vorgaben an die Effizienz oder Systemtemperatur sowie durch umfangreiche Qualitätsabnahmen des Wärmepumpensystems mit Prüfung relevanter Aspekte (Luxemburger Modell) eine zusätzliche Absicherung der Anlagen-Effizienz erfolgen.

Referenzgebäude. Das Referenzgebäudeverfahren sollte zur Anforderungsgestaltung beibehalten werden. Es ist seit vielen Jahren bekannt und bewährt. Es bestehen gewisse Nachteile, die Vorteile des Verfahrens überwiegen jedoch deutlich. Die Elemente der technischen Referenzbeschreibung werden gegenüber dem GEG 2020 mit neuen Kennwerten bzw. Komponenten versehen, sodass ein neues, grundsätzlich direkt umsetzbares Referenzgebäude entsteht.

Kompakte Gebäude, die eine im Vergleich zum Volumen (V) geringe Oberfläche (A) aufweisen, sollen im Referenzgebäudeverfahren mit einem Anreiz versehen werden. Hierzu bieten sich folgende Ansatzpunkte an:

- Die Belohnung von kompaktem Bauen erfolgt auf den einzelnen Entwurf bezogen. Der Ansatz ist dabei, für kompakte Gebäude den Anforderungswert (Effizienzkenngrößen und Umweltkenngröße) um einen Faktor, der abhängig vom A/V-Verhältnis ist, anzuheben.
- Alternativ kann die Anerkennung von kompakteren Gebäudekonzepten insgesamt erfolgen. Ein- und Zweifamilienhäuser haben ein deutlich höheres A/V-Verhältnis als Mehrfamilienhäuser und könnten in der Referenzbeschreibung mit einem erhöhten Wärmeschutzniveau versehen werden.

Wir empfehlen, auch vor dem Hintergrund der gesonderten Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, Gebäudeorientierung und Fensterflächenanteile nicht zusätzlich zu regulieren. Dies wurde anhand von Modellrechnungen validiert. Betrachtungen zum Einfluss der Fensterflächenanteile bei Nichtwohngebäuden werden im Folgeprojekt angestellt.

Ableitung von THG-Faktoren. Für die Verwendung im GEG werden die THG-Faktoren überprüft und aktualisiert. Für den besonders dynamischen Stromfaktor wird eine Kraftwerksparksimulation durchgeführt und basierend auf dieser vorgeschlagen, mit einem vorsichtigen Blick in die Zukunft einen Wert von 350 g/kWh anzusetzen. Für Fernwärme wird vorgeschlagen, das Carnot-Verfahren zur KWK-Allokation einzuführen. Damit einhergehend muss ein Verfahren gefunden werden, das in der Übergangsphase der Dekarbonisierung die Wettbewerbsfähigkeit der Fernwärme sicherstellt. Hier bieten sich zwei Varianten an. In Variante 1 erfolgt eine Deckelung des THG-Faktors auf einen Maximalwert. Diese Variante ist aus Sicht der Gutachter dann akzeptabel, wenn in einem separaten Rechtswerk Betreiber von Wärmenetzen Dekarbonisierungsfahrpläne erstellen und Dekarbonisierungsziele (bis 2030 indikativ, danach verbindlich) einhalten müssen. Ansonsten würden Wärmenetze und dezentrale Systeme zu asymmetrisch behandelt. Variante 2 erlaubt die Bildung eines zweiten Bilanzkreises, einer produktbezogenen Kennzahl („Grüner Wärme-Tarif“), in der (neue) EE-Erzeuger separat bilanziert werden dürfen. Mit der neuen Richtlinie FW 309-9 steht hierfür ein Verfahren zur Verfügung. Dies erhöht die Nachfrage nach neuer grüner Wärme im Wärmenetz und stellt gleichzeitig sicher, dass Neubauten auch weiterhin an Wärmenetze angeschlossen werden können, selbst wenn diese (noch) einen hohen Anteil fossiler Energieträger aufweisen und erst schrittweise dekarbonisiert werden.

Ableitung eines aktualisierten Referenzgebäudes: Hülle. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Anforderungen an das Referenzgebäude aus einer Analyse der baupraktischen Umsetzungen, der Umsetzung in der Bundesförderung effiziente Gebäude und einer Parameterstudie von Kosten und erreichbaren U-Werten abgeleitet. Im Ergebnis ist eine weitere Verschärfung der Anforderungen an den Primärenergieverbrauch (analog: THG) gut umsetzbar. Auch leichte Verschärfungen der Anforderung an die Transmissionswärmeverluste sind denkbar und technisch möglich.

Zur Absicherung der Höhe der in das Referenzgebäude eingehenden U-Werte wird eine Parameterstudie durchgeführt. Diese Analyse zeigt: Durch eine Variation der U-Werte der einzelnen Bauteile lassen sich bei gleichen Investitionskosten unterschiedliche spezifische Transmissionswärmeverluste erreichen. Das bedeutet, dass durch sinnvolle

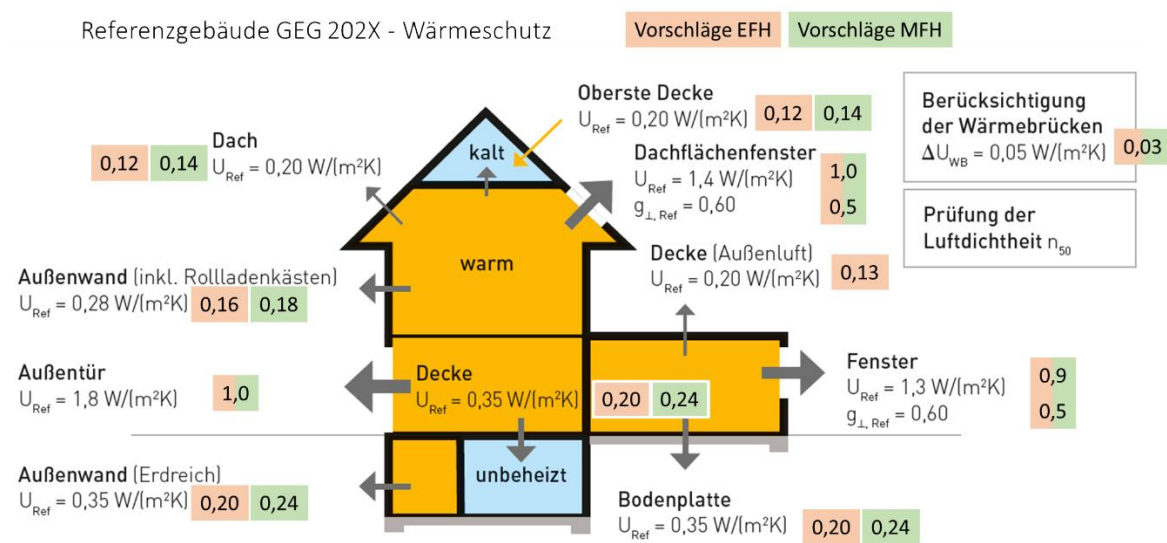
Kombination von Bauteilen Kosten gegenüber bauteilbezogenen und obligatorischen Mindestwerten eingespart werden können.

Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass hinsichtlich der thermischen Qualität der Gebäudehülle ein technischer Grenznutzen erreicht wird. Unter den hier gewählten Randbedingungen ist für niedrige spezifische Transmissionswärmeverluste die Anzahl möglicher Kombinationen limitiert. Mit einer technologisch praktikierbaren Erhöhung des derzeitigen Effizienzhaus (EH) 55-Standards ($H'_T \leq 0,7 * H'_{T,Ref}$) auf $H'_T \leq 0,65 * H'_{T,Ref}$ entstehen lediglich investive Mehrkosten für die Hülle in Höhe von durchschnittlich 0,5 %, die durch Energiekosteneinsparungen i.w. kompensiert werden.

Im Ergebnis dieser wie auch der baupraktischen Analyse zeigt sich, dass eine lineare Verschärfung der U-Werte nicht zu empfehlen ist. Die in Abbildung 2 dargestellten Vorschläge für U-Werte im Referenzgebäude führen zu einem H'_T in einer Höhe von rund 65 % des vorherigen Referenzgebäudes.

Dabei ist zu beachten, dass diese U-Werte nicht komponentenscharf eingehalten werden müssen, sondern in die Berechnung des Referenzwertes für $Q_{h,b,0}$ einfließen.

Abbildung 2: Empfohlene Werte (farbig hinterlegt) für ein künftiges Referenzgebäude im Vergleich zum derzeitigen Stand



Quelle des Bildes: xella

Ableitung eines aktualisierten Referenzgebäudes: Anlagentechnik. Als Referenzausführung der Anlagentechnik für Wohngebäude wird ein System vorgeschlagen, das eine zielorientierte Formulierung der Anforderungshöhe sowohl des Endenergiebedarfs als auch der Umweltgröße – Treibhausgasemissionen – ermöglicht, eine prinzipiell ausführbare Versorgungsvariante darstellt und im Berechnungsverfahren der DIN V 18599 abbildbar ist. Es enthält im Kern eine **Referenzheizung**, die wie ein Fern- und Nahwärmenetz mit einem vorgegebenen THG-Faktor von 130 g/kWh berechnet wird (Wert ist vorläufig). Weitere Festlegung im Referenzgebäude:

- Auslegungstemperatur 55/45 °C,
- zentrales Verteilsystem innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche,

- Wärmeübergabe mit freien Heizflächen,
- zentrale Warmwasserbereitung,
- gemeinsame Wärmebereitung mit Heizungsanlage,
- Verteilsystem mit Zirkulation innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche und
- eine zentrale Abluftanlage, bedarfsgeführt mit geregelter DC (Direct Current)-Ventilator.

Beispielhafte Berechnungen der neuen Referenzvorgaben zeigen, dass die Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes, umgesetzt durch die Vorgabe der hergeleiteten U-Werte beim Referenzgebäude 2024, zu Absenkungen der Effizienzgröße $Q_{h,b,0}$ gegenüber dem Referenzgebäude nach GEG 2020 um rund 35 % führt. Die Anforderungswerte des Endenergiebedarfs werden bei den meisten künftig zum Einsatz kommenden anlagentechnischen Systemen ohne zusätzliche Maßnahmen eingehalten. Endenergetisch weniger günstige Techniken (z. B. Pelletheizungen) müssen zusätzliche Verbesserungen aufweisen, wie z. B. erhöhter Wärmeschutz der Gebäudehülle oder Einsatz einer Solarthermie-Anlage. Auch das Anforderungsniveau der Umweltgröße Treibhausgasemissionen wird bei den meisten künftig zum Einsatz kommenden Versorgungsvarianten direkt eingehalten. Fallweise (z. B. Elektro-Direktheizung) sind umfassende Verbesserungen, z. B. des baulichen Wärmeschutzes, des Einsatzes einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sowie Integration einer PV-Anlage erforderlich. Insgesamt wird die zielführende Tauglichkeit der Anforderungsgrößen, das Funktionieren der Methode des Referenzgebäudes zur Anforderungsformulierung sowie die Erreichung eines ambitionierten Anforderungsniveaus mit der vorgeschlagenen Ausgestaltung des Referenzgebäudes mit baulichen und anlagentechnischen Komponenten dokumentiert.

Wirtschaftlichkeit. Im Rahmen dieses Projektes erfolgten die ökonomischen Berechnungen in Anlehnung an die VDI 2067 Blatt 1 (September 2012) nach der Annuitätsmethode. Das Annuitätsverfahren gestattet es, einmalige Zahlungen/Investitionen mithilfe des Annuitätsfaktors über einen Betrachtungszeitraum und laufende jährliche Zahlungen zu Jahresgesamtkosten zusammenzufassen. Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen gilt es, sowohl die zu erwartenden Investitionen als jährliche Kapitalkosten als auch die laufenden Kosten für Energie sowie Wartung und Instandhaltung zu betrachten.

Auf der Basis verschiedener Quellen wurden die vorgefundenen Ansätze für Bau- und Anlagenkosten mit entsprechenden Baupreisentwicklungen abgeglichen, validiert und bei Bedarf angepasst. Im Rahmen dieser Studie werden die Investitionskosten mit der statistischen Baupreissteigerung auf das Investitionsjahr 2022 angepasst. Um das aktuelle Hochpreisniveau abzubilden, wird dabei als Kostensteigerung von 2021 nach 2022 eine Preissteigerungsrate von 20 Prozent unterstellt. Zur Berechnung der Energiekosten werden die Endenergiebedarfe für alle verwendeten Energieträger ermittelt und mit den jeweiligen Energiepreisen multipliziert. Allerdings ist die Entwicklung der Energiepreise aktuell sehr hohen Unsicherheiten und einer starken Dynamik unterworfen. Deshalb wurden die Grenzübergangspreise am aktuellen Rand auf Basis von Rohstoff Fu-

tures (Erdgas und Erdöl) angepasst, welche bis Mitte des Jahrzehnts die aktuellen Unsicherheiten des Marktes abbilden. In den kommenden Jahren wird von einem starken Anstieg der Grenzübergangspreise ausgegangen. Spätestens ab 2030 folgen die Preise dann wieder den bisherigen Pfaden des World Energy Outlook. Aus den Grenzübergangspreisen wurden die Endkundenpreise für die Abnahmefälle private Haushalte und kleinere Abnehmer im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen generiert.

In der Gesamtschau der berechneten Versorgungsvarianten ergibt sich für das **Einfamilienhaus** (EFH) für das Niveau qP55/HT70 eine im Mittel um 3,0 Prozent verbesserte Annuität. Dies bedeutet, dass die für dieses Niveau um im Mittel 4,9 Prozent erhöhten Investitionskosten in der annuitätischen Bewertung durch infolge der Investitionen reduzierte bedarfsgebundene Kosten über den Betrachtungszeitraum mehr als kompensiert werden. Somit kann das mit dem Referentenentwurf für die GEG-Novelle anvisierte Niveau qP55/HT70 insgesamt als wirtschaftlich umsetzbares neues Anforderungsniveau für das EFH bewertet werden. Diese Aussage gilt für die bei den Berechnungen zugrunde gelegten Randbedingungen mit Verweis auf die beschriebenen Unsicherheiten.

Diese Aussage gilt auch für **Mehrfamilienhäuser** (MFH). Über alle anlagentechnischen Varianten hinweg ergibt sich für das Niveau qP55/HT70 eine gegenüber dem Vergleichsfall im Mittel um 7,7 Prozent verbesserte Annuität. Die Wärmepumpenlösungen und die Fernwärmeversorgung weisen sogar um über 10 Prozent verbesserte Gesamtannuitäten auf. Lediglich die Variante mit Gas-Brennwertkessel und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung stellt sich für das Niveau unwirtschaftlich dar.

Nichtwohngebäude werden im Rahmen dieser Kurzstudie auf Grundlage der energetischen Bilanzierungen für das „Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie Flexibilisierungsoptionen“ (IBH, ITG, Ecofys, dena 2018) bewertet. Damit einhergehend ist die Einschränkung, dass in dieser Studie nicht für alle Versorgungsobjekte Wärmepumpen modelliert wurden, sondern Hybridsysteme mit einem hohen Gasanteil. Eine Anpassung der Modellierung erfolgt im Folgeprojekt. Zusammenfassend führen die für den Anwendungsfall Nichtwohngebäude durchgeführten Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit zu folgenden Aussagen:

- Die Investitionskosten erhöhen sich durch das Niveau EG 55 im Vergleich zum Anforderungsniveau nach GEG 2020 im Mittel über die betrachteten Erfüllungsoptionen um 4,3 Prozent.
- Die höhere Annuität der kapitalgebundenen Kosten wird durch die niedrigere Annuität der bedarfsgebundenen Kosten beim Effizienzgebäude (EG) 55 weitgehend kompensiert, die Gesamtannuität erhöht sich im Mittel über alle betrachteten Erfüllungsoptionen um 2,7 Prozent.
- Dieses Ergebnis dürfte noch positiver ausfallen, wenn anstelle des in dieser Berechnung angesetzten Gas-Brennwertkessels als Spitzenlastkessel (der die Hälfte des Wärmebedarfs deckt) und zu vergleichsweise hohen Annuitäten der bedarfsgebundenen Kosten führt, ein monovalenter Erzeuger eingesetzt wird. Dies wird im Folgeprojekt untersucht.

- Das Nicht-Erreichen der primärenergetischen Anforderung 55 % $Q_{p,Ref}$ ist auf die unterstellten bivalenten Wärmeerzeugungsvarianten in Vorgängerprojekt zurückzuführen.

Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die **neue Gebäudesystematik** werden im Folgeprojekt durchgeführt.

Die Ergebnisse in einer kompakten Gesamtschau sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die Ergebnisse des Projektes

Anforderungsgrößen im Neubau	Methodik	Wirtschaftlichkeit
Empfohlen werden folgende drei Anforderungsgrößen :	Methodische Empfehlungen:	<ul style="list-style-type: none"> • Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit wird die Methodik weiterentwickelt. Dargestellt werden annuitätische Gesamtkosten.
Effizienz: langlebige Gebäudeteile	1. Das Referenzgebäudeverfahren wird weiterhin verwendet.	<ul style="list-style-type: none"> • Die Kostensätze für Energiepreise und bauliche/anlagentechnische Komponenten werden fortgeschrieben.
Heizwärmebedarf $Q_{h,b,0}$	2. Gebäude mit besserer Kompaktheit bzw. MFH erhalten einen Anreiz.	<ul style="list-style-type: none"> • Die Methodik wird angewendet auf die Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer Verschärfung des Neubaustandards auf EH 55:
Effizienz des Gebäudekonzeptes	3. Es wird eine technologieneutrale Referenzheizung eingeführt.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Investitionsmehrkosten ggü. GEG 2020: <ol style="list-style-type: none"> a) EFH i.M. + 4,9 % b) MFH i.M. + 2,8 %
Endenergie Q_f	Faktoren	<ol style="list-style-type: none"> 2. Veränderung Annuität ggü. GEG 2020 <ol style="list-style-type: none"> a) EFH i.M. - 3,0 % b) MFH i.M. - 7,7 %
Klimaschutz im Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Neue THG-Faktoren für einige Energieträger werden vorgeschlagen. • Die dynamische Entwicklung des Stromsystems wird durch eine vorsichtige Zukunftsvorschau abgebildet. • Für Fernwärme wird ein Ökowärme-Verfahren vorgeschlagen. • Für neue Energieträger (H_2, synthetische Gase) müssen ggf. im Folgeprojekt Faktoren abgeleitet werden. 	
THG im Betrieb		
Sowie eine weitere Kenngröße für Klimaschutz und Nachhaltigkeit in der Herstellung und Entsorgung.		
Die abgeleiteten Anforderungsgrößen können auch für eine Bewertung auch von Bestandsgebäuden herangezogen werden.		

2 Hintergrund

2.1 Einführung

Seit der Anpassung des Klimaschutzgesetzes (KSG) verfolgt Deutschland das Ziel, bereits bis zum Jahr 2045 einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Darüber hinaus darf der Gebäudesektor nach der Novelle des KSG als Zwischenziel im Jahr 2030 nicht mehr als 67 Mio. t CO_{2eq} emittieren. Dies bedeutet, dass eine weitere Senkung der CO₂-Emissionen sowohl im Neubau, aber insbesondere im Gebäudebestand erforderlich sein wird. Gleichzeitig sind aber auch das Bauen und das Wohnen immer teurer geworden, so dass neben den verschärften Klimazielen auch die Bezahlbarkeit des Bauens und Wohnens als wichtige Rahmenbedingungen zu beachten sind. Mit dem Ukraine-Krieg steht zugleich die Substitution von Erdgas als Energieträger im Mittelpunkt der gebäudepolitischen Diskussion. Die Energiepreise haben sich innerhalb kurzer Zeit deutlich erhöht.

Seit Einführung des GEG 2020 haben sich somit die Rahmenbedingungen maßgeblich geändert. Das Bundeskabinett hat mit dem Klimaschutzsofortprogramm 2022 am 23.6.2021 beschlossen, dass die Überprüfung des GEG auf das Jahr 2022 vorgezogen und die Neubaustandards angehoben werden sollen. So sollen auf Basis bisheriger Studien die Anforderungssysteme und Standards für Neubau und Bestand sowie die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung geprüft und aktualisiert werden.

2.2 Ziel des Projekts

Ziel ist es, die Rahmenbedingungen für die Entwicklung adäquater Anforderungskriterien für die energetische Gebäudebewertung und die wirtschaftliche Betrachtung von Maßnahmen zu prüfen und weiterzuentwickeln. Insbesondere ist die Grundsatzfrage einer Ergänzung oder Umstellung des Anforderungssystems von einer primärenergetischen Betrachtung der Energiebereitstellung auf eine Betrachtung von THG-Emissionen oder anderer Energiekenngrößen einschließlich des Anteils erneuerbarer Energien oder Ersatzerfüllung sowie ein Anforderungssystem für die Effizienz des Gebäudes (z.B. Heizwärmebedarf, baulicher Wärmeschutz etc.) zu analysieren, ebenso wie die Möglichkeiten einer Umstellung sowie deren Vor- und Nachteile, auch unter Einbeziehung von geltendem und absehbarem EU-Recht (insbesondere EPBD).

Die im GEG festgeschriebenen Anforderungskriterien und die mit dieser verknüpften Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beruhen auf Untersuchungen, die an geänderte Rahmenbedingungen (z. B. CO₂-Bepreisung) angepasst werden müssen, um auf der Grundlage eines gegebenenfalls angepassten Anforderungssystems Vorschläge für neue Stan-

dards für Wohn- und Nichtwohngebäude sowohl im Neubau als auch in der Gebäudesanierung zu entwickeln und zu bewerten. Dabei sollte davon ausgegangen werden, dass es aufgrund der politischen Dynamik Rückkopplungen zwischen der grundsätzlichen Frage der Anforderungssystematik und der spezifischeren Frage der Standards geben wird und einzelne Berechnungen im Nachhinein ggfls. angepasst werden müssen.

Ziel dieses Gutachtens ist daher

- eine Analyse der Anforderungsgrößen für den Neubau im Hinblick auf die Übereinstimmung mit den Zielen des Gebäudesektors;
- eine Ableitung erforderlicher Nebenanforderungen für Komponenten oder Teilsegmente des Gebäudes;
- die Ableitung weiterer methodischer Veränderungen etwa zur Bestimmung der Primärenergiefaktoren, des Referenzgebäudeverfahrens und der Berechnungslogik;
- die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Vorschläge, einschließlich einer kritischen Überprüfung der Wirtschaftlichkeitsmethodik sowie
- die Durchführung verschiedener Erörterungstermine, die die Wissensgrundlagen für wichtige Handlungsbereiche des Gebäuderechts schaffen.

Das Projekt bereitet mit dieser Arbeit die Grundlage für ein Folgeprojekt, das diese Analysen fortsetzt und vertieft.

Der Gegenstandsbereich des Projektes ist in Abbildung 3 dargestellt. Zudem wurden vier halbtägige Erörterungstermine vorbereitet, durchgeführt und nachbereitet, in denen unterschiedliche Themen vertieft diskutiert wurden. Zudem wurden vier halbtägige Erörterungstermine vorbereitet, in denen unterschiedliche Themen vertieft diskutiert wurden.

Abbildung 3: Gegenstandsbereich des Projektes

Konzeptionelle Vorarbeiten	Berechnungen	Erörterungstermine
Konzeptionelles Zielbild der Versorgung von Gebäuden	THG-Faktoren	Anforderungen an Gebäudeeffizienz beim Neubau/Wohnen
Überprüfung der und Entwicklung neuer Anforderungsgrößen	Wohngebäude: energetische Anforderungen	Kenngrößen im Hinblick auf Dekarbonisierung
Referenzgebäude	Wirtschaftlichkeit EH 55	Wirtschaftlichkeit
Wirtschaftlichkeitsmethodik	Monte-Carlo-Simulationen EH 40	Bestandsgebäude

3 Anforderungssystematik

3.1 Ausgangspunkt

Das Ziel dieses Kapitels ist es, eine neue Anforderungssystematik für das GEG zu entwickeln. Aktuell werden im GEG als Anforderungen für Wohngebäude folgende Größen definiert:

- **Jahres-Primärenergiebedarf Q_p** für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung inkl. Anteil erneuerbarer Energie. Die Primärenergie entspricht der Energiemenge, die zur Deckung des Endenergiebedarfs benötigt wird unter Berücksichtigung der zusätzlichen Energiemenge, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb der Systemgrenze „Gebäude“ bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Energieträger erforderlich ist. Der Endenergiebedarf deckt die Energieaufwendungen für die Gebäudebeheizung, die Trinkwarmwasserbereitung und eine ggf. vorhandene Lüftungsanlage.
- **Spezifischer Transmissionswärmeverlust H_T' (Bewertung des baulichen Wärmeschutzes)** als gemittelter Wärmeverlust der wärmeübertragenden Umfassungsflächen. Der spezifische Transmissionswärmeverlust zeigt den wärmeübertragenden umfassungsflächenbezogenen Transmissionswärmeverlust des gesamten Gebäudes. Die Größe stellt somit eine Kennzeichnung des mittleren Wärmeschutzes über die Gebäudehülle dar.

Aktuell wird das **Referenzgebäudeverfahren** verwendet, um den maximal zulässigen Primärenergiebedarf und den baulichen Wärmeschutz nachzuweisen. Das Referenzgebäude stimmt im Gebäudeentwurf (Ausrichtung und Geometrie) mit dem nachzuweisenden Gebäude überein. Die Randbedingungen der Anlagentechnik oder die Qualität der Gebäudehülle entspricht allerdings vorgegeben Referenzwerten. Der Primärenergiebedarf des nachzuweisenden Gebäudes darf nicht höher sein als der 0,75fache Wert von Q_p des Referenzgebäudes und dem 1,0fachen Wert von H_T' des Referenzgebäudes.

Die Q_p -Anforderung greift vor allem dann, wenn primärenergetisch ineffiziente Anlagentechnik (z.B. fossil, elektrische Direktheizung) vorhanden ist, da in diesen Fällen eine deutliche Übererfüllung der H_T' -Anforderung nötig ist, um die Hauptanforderung einzuhalten. Die H_T' -Anforderung greift immer dann, wenn primärenergetisch effiziente Anlagentechnik (z.B. Wärmepumpen, regenerativ) vorhanden ist, da in diesen Fällen eine deutliche Übererfüllung der Q_p -Anforderung erreicht wird, und die Nebenanforderung greift. Die Größe H_T' wird in Kapitel 3.5 einer kritischen Analyse unterzogen.

Daneben werden im GEG eine Reihe von weiteren Nebenanforderungen an Gebäude gestellt, wie z. B. ein bestimmter Anteil erneuerbarer Energien, sommerlicher Wärmeschutz, anlagentechnische Anforderungen und Anforderungen an Wärmebrücken und Dichtheit.

In diesem Kapitel werden diese Anforderungsgrößen einer kritischen Analyse unterzogen und Vorschläge für eine Weiterentwicklung gemacht.

3.2 Vorgehen

Die Untersuchungen bauen auf folgenden Studien auf: „Kurzgutachten zur Frage einer Ergänzung oder Umstellung des Anforderungssystems“ (Ecofys et al. 2018), „Untersuchung zu Primärenergiefaktoren“ (ifeu et al. 2018) und „Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie zu Flexibilisierungsoptionen“ (ibh et al. 2018). Die in diesen Gutachten entwickelten Erkenntnisse fließen in die Bewertung des Anforderungssystems ein oder werden neu bewertet.

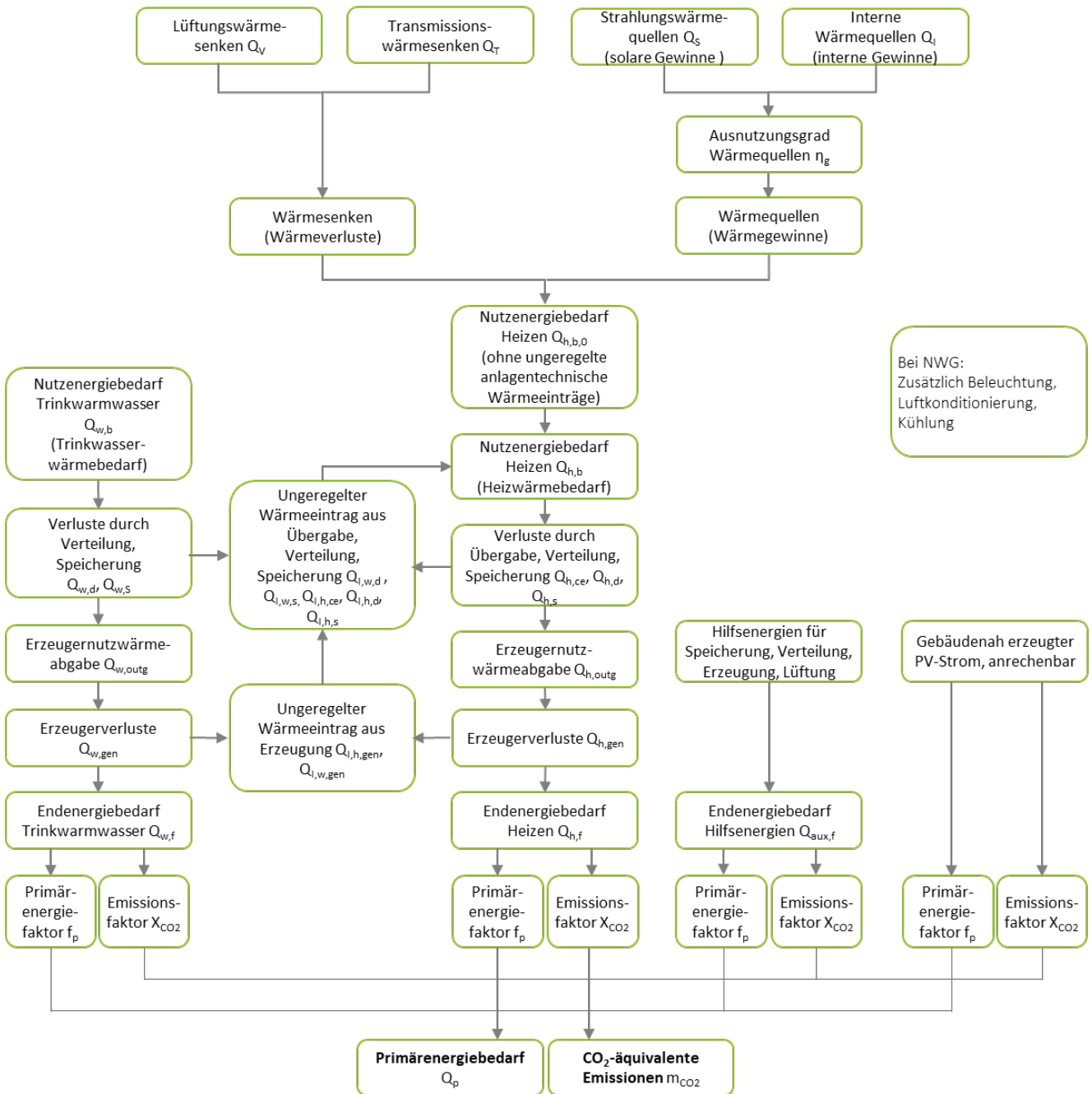
Die Untersuchung des Anforderungssystems ist in folgende Schritte gegliedert:

- Definition von Kriterien der Bewertung neuer Anforderungsgrößen
- Analyse von Effizienz-Anforderungsgrößen Schwerpunkt Wohngebäude (möglichst unabhängig von Ambitionsgrad und Methode)
- Analyse von Gesamt-/Versorgungs-/Dekarbonisierungsanforderungsgrößen Schwerpunkt Wohngebäude
- Analyse Referenzgebäude/feste Anforderungswerte/Varianten
- Übertragbarkeit auf Nichtwohngebäude
- Berechnungen für präferierte Sets an Anforderungsgrößen, Fokus Neubau

Insgesamt unterscheiden wir in der Analyse zwischen **Effizienzgrößen**, die die Höhe des Energiebedarfs bzw. die Effizienz von Umwandlungsschritten bewerten, und **Umweltgrößen**, die in der Gesamtbewertung des Gebäudes auf ein gesellschaftliches Schutzgut Bezug nehmen, beispielsweise Klima (THG-Emissionen).

Abbildung 4 stellt die unterschiedlichen in der Norm verwendeten Kenngrößen und ihr Wechselspiel dar, ausgehend von der Deckung der Wärmesenken und den Wärmege winnen bis hin zum Primärenergiebedarf und den ausgestoßenen Treibhausgasemissionen.

Abbildung 4: Überblicksabbildung für die Einordnung der unterschiedlichen Kenngrößen am Beispiel von Wohngebäuden



3.3 Zielbild der Anforderungsgröße

Die Bewertung der Anforderungsgrößen muss vor dem Hintergrund eines Zielbildes erfolgen. Aus energie- und gebäudewirtschaftlichen Analysen kristallisiert sich ein Korridor an volkswirtschaftlich sinnvollen Versorgungslösungen heraus (Zielbild), die im Gebäudebewertungssystem durch die Anforderungsgrößen entsprechend abgebildet werden muss. Zu diesem Zweck wurden in einer Nebenanalyse gebäudestrategische Studien ausgewertet und hinsichtlich ihrer Aussagen zu Energieträgern und Heiztechnologien zusammengestellt.

Mit dem Klimaschutzgesetz wurde beschlossen, dass Deutschland bis 2045 klimaneutral wird. Für den Gebäudesektor heißt das, dass spätestens 2045 die Wärmeversorgung vollständig klimaneutral erfolgt und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern endet. Die Anforderungsgrößen sollen Versorgungstechnologien abbilden, die langfristig keine Treibhausgase emittieren. Versorgungstechnologien, die fossile Energieträger nutzen, wie z. B. Gas-Brennwertkessel mit Erdgas, entsprechen diesem Zeitbild nicht. Ein Ersatz kann durch den Austausch des Energieträgers erfolgen (z. B. Wasserstoff) oder durch die Substituierung der gesamten Heizung. Tabelle 2 stellt die Aussagen verschiedener strategischer Studien zusammen (dena 2021, BMWI 2021, BDI 2021, Prognos et al. 2021, Ariadne 2021, Stiftung Klimaneutralität 2022).

Tabelle 2: Bewertung von Energieträgern und Umwandlungstechnologien in strategischen Studien/Dokumenten

Technologie	Neubau	Bestand
Energieträger Netzstrom		
Elektrische Wärmepumpe (WP)	Nahezu alle Strategiestudien bestätigen Wärmepumpen ein großes Potenzial für den Neubau.	Nahezu alle Strategiestudien bestätigen Wärmepumpen ein großes Potenzial für den Bestand, wenn die Gebäude ein geeignetes Heizungsvorlauf-Temperaturniveau aufweisen. Neben dem Temperaturniveau der Heizverteilung erweist sich im Bestand auch die Quelle und der Ort der Aufstellung als Herausforderung.
Für alle WP ist ein möglichst systemdienlicher Betrieb anzustreben. Hierzu sollten vor allem zeitlich variable Tarifierreize sicherstellen, dass die WP ihre Potenziale zur Systemdienlichkeit ausschöpft (Wasserspeicher, Gebäude als Speicher).		
↳ Erdgekoppelte WP	Besonders hocheffizient, daher empfehlenswert. Je nach Standort Restriktionen bzgl. Sondenbohrung/Kollektorverlegung und Verfügbarkeit der Bohrfirmen.	
↳ Luft-Wasser-WP	In vielen Gebäuden geeignet. Restriktionen bzgl. Aufstellung Außengerät möglich, insbesondere im Gebäudebestand	
↳ Weitere Wärmequellen:	Dezentrale WP können auch mit weiteren Wärmequellen betrieben werden, etwa mit PVT-Kollektoren oder kalten Nahwärmenetzen.	
↳ Luft-Luft-WP	Einsatz vor allem in besonders effizienten Gebäuden in der Zuluft der Lüftungsanlage	Einsatz selten geeignet
↳ WP-Hybridheizung (mit Gas, Öl oder Biomasse)	Für den Neubau sollte der Einsatz von Gas und Öl ausgeschlossen werden, da optimale Rahmenbedingungen für niedrige Temperaturen vorliegen. Allenfalls wäre eine Hybridheizung mit einem fossilen Anteil in der Größenordnung von ca. 10 % der Jahreswärmebereitstellung denkbar. Eine Kopplung WP-Biomasse-Hybrid kann eine Möglichkeit sein, um die WP möglichst systemdienlich zu betreiben.	Im Gebäudebestand können WP-Hybridssysteme geeignet sein, wenn die Heizkreis-Temperaturen im Gebäude nicht schnell genug abgesenkt werden können. Gas-WP-Hybridssysteme nutzen vorerst die vorhandene Infrastruktur und können sukzessive dekarbonisiert werden. Die Anlage sollte so ausgelegt sein, dass die WP für einen Zustand nach einer Sanierung die vollständige Wärmeversorgung übernehmen kann.
Direktelektrische Stromheizung	Grundsätzlich sind direktelektrische Heizungen deutlich weniger effizient als Wärmepumpen, da sie keine Umweltwärme nutzen.	

Technologie	Neubau	Bestand
↳ Heizstab	Einsatzbereiche liegen im Neubau in hocheffizienten Gebäuden, wo der Effizienzgewinn durch WP nicht im Verhältnis zum absoluten Wärmebedarf besteht. Daher sollte der Einsatz auf Gebäude mit geringer Heizlast oder geringem $Q_{h,b,0}$ beschränkt werden. Außerdem können Heizstäbe als Zusatzheizung zur Spitzenlast oder zur Abpufferung von solarem Überschussstrom eingesetzt werden.	Ggf. Heizstab als Zusatzheizung zur Spitzenlast oder zur Abpufferung von solarem Überschuss-Strom
↳ Strahlungsheizung, Infrarot-Heizung u. ä.	Strahlungsheizungen sind wenig geeignet, um Grundlastwärme bereit zu stellen; sie können aber aufgrund ihrer kurzen Reaktionszeit gezielt als Ergänzungsheizung eingesetzt werden. Die hohe Anschlussleistung und der hohe Stromverbrauch bei Betrieb sind kritisch zu sehen.	
	Wie Heizstab, aber ohne Spitzenlastfunktion	Einsatz selten geeignet wegen hohen Stromverbrauchs, eher als Booster z. B. in Badezimmern oder für temporär genutzte Gebäude
↳ Festkörper-Speicherheizung	Auf Grund der schlechten Regelbarkeit und geringeren Effizienz nicht empfehlenswert.	
Wärmenetze (diverse Energieträger)		
Bestands-Wärmenetze	<p>Bestehende Wärmenetze sind zunächst der natürliche Ausgangspunkt für die Weiterbeheizung von Gebäuden. Eine Abkopplung bereits angeschlossener Gebäude dürfte in der Regel nicht sinnvoll sein. Im Einzelfall kann ein Wärmenetzzrückbau dann sinnvoll sein, wenn keine ausreichenden EE-Wärmequellen erschlossen werden können oder eine Einzelversorgung mit einer deutlich höheren Effizienz erfolgen kann. Ein potenzieller Lock-in-Effekt kann dadurch entstehen, dass Wärmenetze heute noch einen hohen fossilen Anteil aufweisen. Hinzuweisen ist hingegen darauf, dass Wärmenetze im Lauf der nächsten Jahre transformiert werden.</p> <p>Das bedeutet, dass wenn Kunden heute nicht neu an ein Wärmenetz angeschlossen werden, weil der Status quo des Wärmenetzes zu einer schlechten Bewertung führt, diese Kunden verloren sind für die folgenden Dekaden bis zum nächsten Heizungstausch.</p> <p>Wärmenetze können aus folgenden Gründen auch langfristig sinnvoll sein:</p> <ul style="list-style-type: none"> Erschließung von Geothermie und unvermeidbarer Abwärme, die nur mit WN verteilbar sind. Erschließung von Niedertemperaturquellen über Groß-WP, insbesondere in Gebieten, in denen dezentrale Wärmepumpen schwer flächendeckend zu realisieren sind (bspw. städtische Gebiete, in denen die o.g. Restriktionen für WP gelten können). Günstige Nutzung von Solarthermie, da die großen Freiflächen-Kollektorfelder durch Skaleneffekte deutlich günstiger sind als dezentrale Dachanlagen. Möglichkeit der saisonalen Speicherung. <p>Dem gegenzurechnen sind Netzverluste und ein mitunter ineffizienter Betrieb besonders im Sommer.</p>	
Neu errichtete Wärmenetze	Neue Wärmenetze müssen von vornherein so ausgestaltet sein, dass sie nur bei niedrigen oder mittleren Temperaturen und nur mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Gas-KWK ist bei neuen Wärmenetzen nur noch im Einzelfall sinnvoll, wenn die KWK aus Sicht des Strommarktes erforderlich ist.	
Energieträger: Biomasse		
Feste Biomasse	<p>Grundsätzlich unterliegt Biomasse der Flächen- und Nutzungskonkurrenz. Sie sollte vor allem in Bereichen eingesetzt werden, in denen Alternativen kaum darstellbar sind, beispielsweise im Flug- und Schwerlastverkehr (Biomass to Liquid)), in der stofflichen Nutzung oder Prozesswärme. Wenn sie im Gebäude eingesetzt wird, dann vorrangig:</p> <ul style="list-style-type: none"> in geringen Mengen für Gemütlichkeit und Temperaturboostern im Winter in (feinstaubarmen) Kaminöfen u. ä. in Gebäuden, die (noch) nicht für eine Beheizung mit WP oder Wärmenetzen geeignet sind, z. B. im Denkmalschutz. 	

Technologie	Neubau	Bestand
↳ Pelletkessel/-ofen, Scheitholzkessel, Hackschnitzelkessel	Im Neubau bestehen mit WP kostengünstigere Möglichkeiten der Wärmeversorgung. Ein Rückgriff auf Biomasse ist eigentlich nicht erforderlich, trotz eines geringen Wärmebedarfs im Neubau, der nur sehr geringe Biomasse-Mengen in Anspruch nimmt.	Der Biomasse-Einsatz sollte fokussiert werden auf Gebäude, die nicht mit Effizienzmaßnahmen oder anderen EE-Heizungen optimiert werden können.
Biomethan und Biogas: Brennwertkessel	Während das Potenzial von Biomethan aus Reststoffen zusätzlich zu den heute genutzten Mengen begrenzt ist, können aus nachwachsenden Rohstoffen zusätzliche Potenziale erschlossen werden. Allerdings besteht auch im Bereich der Prozesswärme, der flexiblen Stromerzeugung und der stofflichen Nutzung eine hohe Nachfrage, so dass Biomethan nur dann eingesetzt werden sollte, wenn es keine guten Alternativen gibt. Vorrangig sollte daher eine teilweise strommarktoptimierte Nutzung in KWK und damit in Wärmenetzen, nicht in Einzelheizungen, angestrebt werden. Biogas in räumlicher Nähe zu Biogas-Anlagen spielt nur eine untergeordnete Rolle.	
	Im Neubau ist ein Einsatz nicht erforderlich, da andere Heizungsoptionen zur Verfügung stehen. Es gibt vereinzelte Ausnahmen, beispielsweise Hallengebäude mit dezentralen Heizungen, die hiervon ausgenommen werden könnten.	Im Bestand ist der Einsatz grundsätzlich möglich. Auf Grund der beschriebenen Nutzungskonkurrenz sollte es allerdings eingegrenzt werden auf Fälle, die nicht anders beispielsweise durch WP und Wärmenetze versorgt werden können. Biomethan ist deutlich teurer als fossiles Erdgas, solange der CO ₂ -Preis noch nicht zu stark angestiegen ist.
Bioöl: Brennwertkessel	Im Neubau bestehen mit WP kostengünstigere Möglichkeiten der Wärmeversorgung. Ein Rückgriff auf Bioöle ist nicht erforderlich.	Wie Biomethan. Zusätzlich Nachhaltigkeitsaspekte beim Import aus Lieferländern (Stichwort Palmöl)
Energieträger: Wasserstoff		
Wasserstoff Brennwertkessel	Wasserstoff H ₂ wird zukünftig überwiegend aus Strom hergestellt. Auf Grund der Umwandlungsineffizienzen im Vergleich zur direkten Stromnutzung sollte H ₂ nur in Gebäuden eingesetzt werden, in denen andere Lösungen nicht verfügbar sind oder in deren Nähe Wasserstoff ohnehin, etwa zur Versorgung von Ankerkunden, verfügbar ist. Auch diese Gase sollten bevorzugt in Anwendungen mit möglichst hohem energiewirtschaftlichem Nutzen eingesetzt werden, also beispielsweise im Bereich der Prozesswärme, der flexiblen Stromerzeugung und der industriellen Nutzung (Stahlerzeugung etc.). Zudem ist zu beachten, dass nennenswerte Mengen Power to Gas PtG und H ₂ erst nach 2030 zur Verfügung stehen werden. Bei H ₂ ist außerdem zu beachten, dass er kontinuierlich bis zu einer Obergrenze beigemischt werden kann. Ist die Obergrenze erreicht, ist eine Vollumstellung auf H ₂ erforderlich. Außerdem müssen die Versorgungsleitungen und Brennwertgeräte angepasst werden.	
	Im Neubau ist ein Einsatz nicht erforderlich, da andere Heizungsoptionen zur Verfügung stehen. Es gibt vereinzelte Ausnahmen, beispielsweise Hallengebäude mit dezentralen Heizungen, die hiervon ausgenommen werden könnten.	Im Bestand ist der Einsatz zwar technisch möglich, aber auf Grund der hohen Kosten und der beschriebenen Nutzungskonkurrenz auf Fälle begrenzt, die nicht anders beispielsweise durch WP und Wärmenetze versorgt werden können. H ₂ ist deutlich teurer als fossiles Erdgas, solange der CO ₂ -Preis noch nicht zu stark angestiegen ist.
Energieträger: Power to Gas (PtG)		
Power to Gas: Brennwertkessel	Im Prinzip wie H ₂ , allerdings geringere Umwandlungseffizienz, dafür keine Begrenzung bzgl. des Beimischungsgrades. Wichtig für die Bewertung von PtG ist die nachhaltige Herkunft des CO ₂ , die längerfristig ausschließlich aus erneuerbarem CO ₂ oder Luftabscheidung stammen sollte.	

Technologie	Neubau	Bestand
Energieträger: Power to Liquid (PtL)		
Power to Liquid: Brennwertkessel	Wie PtG, allerdings für Einsatzfälle mit flüssigen Brennstoffen.	
Energieträger: Solar		
Solarthermie	Auf Grund der hohen Flächeneffizienz ist ein Einsatz im Gebäude durchaus sinnvoll, zur WW-Bereitung, aber auch Heizungsunterstützung. Solarthermie erreicht im Einzelgebäude nur begrenzte Deckungsanteile und weist eine starke Saisonalität auf mit meist hohen sommerlichen Überschüssen (Ausnahme: Sonnenhauskonzept). Jedoch starke Konkurrenz durch PV, u.a. wegen sommerlicher Überschüsse, und im Gegensatz zu PV deutlich weniger Kostendegression im letzten Jahrzehnt.	
Energieträger: Unvermeidbare Abwärme		
Unvermeidbare Abwärme	Unvermeidbare Abwärme sollte genutzt werden, solange sichergestellt ist, dass die Abwärmequelle nicht auf fossilen Energien beruht bzw. auch für diese fossilen Quellen ein Transformationspfad bekannt ist.	

3.4 Definition von Kriterien der Bewertung neuer Anforderungsgrößen

Zur Bewertung der Anforderungsgrößen wurden in einem ersten Schritt Kriterien definiert und mit dem Auftraggeber abgestimmt. Die Kriterien für die Bewertung der Anforderungsgrößen sind:

- **Komplexität der Umsetzung:** Dieses Kriterium beschreibt, wie viel Änderungsbedarf in Normen oder in der Software besteht und welche anderen Umstände eine Umsetzung in der Praxis verkomplizieren.
- **Technologieoffenheit/Wirkung auf Technologie:** Hier wird beschrieben, ob die Anforderungsgröße technologieoffen wirkt, und wenn nein, inwieweit dies einer Anwendung entgegensteht.
- **Zielkompatibilität/-geschwindigkeit:** Hier wird beschrieben, ob die Anforderungsgröße in besonderer Weise zur Zielerreichung beitragen kann und ob sie eine höhere Zielerreichungsgeschwindigkeit erlaubt.
- **Beitrag zu sinnvollen (Niedrigenergie-) Baukonzepten:** Unter dieser Überschrift wird kontrolliert, ob die Anforderungsgröße sinnvolle Baukonzepte anregt.
- **Mit dem Kriterium Auswirkungen auf architektonischen Entwurf (Einschränkungen)** wird analysiert, ob sich Auswirkungen auf die architektonische Qualität eines Entwurfs ergeben könnten.
- **Mögliche oder bevorzugte Kombinationen mit zweiter Anforderungsgröße:** Hier ist zu beschreiben, zu welcher "Zwillings-Anforderungsgröße" diese am besten passt, oder ob die Größe kombinierbar ist.
- **Eignung für Referenzgebäude:** Funktioniert diese Anforderungsgröße besonders gut mit/ohne Referenzgebäude?
- **Eignung auch für Neubau und Bestand:** Ist die Anforderungsgröße für die Bewertung von Neubau und Bestand gleichermaßen gut geeignet?

- Verständlichkeit für Endkunden: Die neue Anforderungsgröße soll für Bauherr:innen, Eigentümer:innen und Planende verständlich sein.
- Wirkung auf Bezahlbarkeit (Investitionskosten): Hat die Anforderungsgröße Auswirkungen auf die Bezahlbarkeit des Gebäudekonzeptes?

Jede Analyse schließt mit einer Empfehlung, ob die Anforderungsgröße im Projekt weiter untersucht werden soll.

3.5 Effizienzanforderungen

Das System „Gebäude“ lässt sich aus energetischer Sicht in das Vermeiden von Wärmeverlusten und die Erzeugung und Verteilung von Wärme unterteilen. Die beiden Aspekte werden durch die Gebäudehülle und die Haustechnik verkörpert. Die Optimierung des Gesamtsystems erfolgt sinnvollerweise über beide Elemente, d. h. Effizienzmaßnahmen und erneuerbare Wärmeerzeugung sollten technisch und wirtschaftlich ausgewogen sein, um eine optimale THG Einsparung zu erzielen.

Klimaneutrale Gebäude einzig über eine erneuerbare Wärmeerzeugung ohne effiziente Anlagentechnik und Gebäudehülle zu erreichen, würde den Ressourcenverbrauch im Bereich der erneuerbaren Energien stark ansteigen lassen. Dies wäre weder aus volkswirtschaftlicher Perspektive noch in Bezug auf eine nachhaltige Entwicklung sinnvoll. Effiziente Gebäude – die optimierte Effizienz der Gebäudehülle und des gesamten Gebäudekonzeptes (Kompaktheit, Ausrichtung, Größe etc.) – spielen daher eine wesentliche Rolle für die Erreichung der Klimaziele. Die Effizienz des Gebäudesektors hat somit direkte Auswirkungen auf die künftige Gestaltung des Energiesektors, z. B. durch Vermeidung von Lastspitzen, durch Erhöhung der Speicherfähigkeit des Gebäudebestands etc.

Im ersten Schritt werden daher verschiedene Effizienzanforderungsgrößen analysiert. Die Effizienz-Anforderungsgrößen bewerten den erforderlichen Einsatz an Energieträgern für die Bereitstellung der Komfortanforderungen, insbesondere den baulichen Wärmeschutz und damit den Anteil der Energie, der durch die Gebäudehülle verloren geht. Sie zielt auf eine zielkompatible langlebig verbaute Gebäudesubstanz ab. Durch einen effizienten baulichen Wärmeschutz sinkt die Energienachfrage soweit, dass die Versorgung des Gebäudes mit erneuerbaren Energien vollständig und wirtschaftlich vorbereitet wird oder möglich ist. Die Effizienz-Anforderungsgröße soll Niedrigenergiekonzepte anreizen, die durch einen kompakten Baukörper, passive solare Gewinne und niedrige Lüftungsverluste (Dichtheit/Effizienz der Lüftung) geprägt sind. Es wird geprüft, ob die Effizienz-Anforderung gleichzeitig die Anlagentechnik (Heizung, Warmwasser (WW), Kälte, Hilfsenergie) bewerten kann. Folgende Effizienz-Anforderungsgrößen werden untersucht:

Tabelle 3: Betrachtete Effizienz-Anforderungsgrößen

Kenngroße		Wirkungsrahmen	
1	H_T'	Spezifischer Transmissionswärme-Transferkoeffizient	Wärmeverluste der Bauteile
2	$H_{T,S}'$	Spezifischer, äquivalenter Transmissionswärme-Transferkoeffizient	wie 1 + solare Gewinne, Optimierter Gebäudeentwurf (bei Bezug auf EBF)
3	Bauteil-Anforderungen		Anforderung an Gebäudehülle und Lüftung
4	$Q_{h,b,0}$	Heizwärmebedarf vor 1. Iteration	wie 2 + Lüftungsanlage (mit Wärmerückgewinnung (WRG))
5	$Q_{h,b}$	Heizwärmebedarf	wie 4, allerdings auch (ungeregelte) Wärme- und Kälteeinträge aus der Anlagentechnik
6	$Q_{h,outg}$	Erzeugernutzwärmeabgabe (Raumwärme-Anteil)	wie 5, allerdings zzgl. Systemverlusten nach dem Erzeuger
7	Q_f	Endenergie	Effizienzanforderung an Anlagentechnik ohne Einbeziehung der Umweltenergie
8	e_f	Endenergieaufwandszahl	Effizienzanforderung an Anlagentechnik
9	$e_{f, Umwelt}$	Endenergieaufwandszahl mit Umweltenergie	Effizienzanforderung an Anlagentechnik inkl. Einbeziehung der Umweltenergie

3.5.1 Spezifischer Transmissionswärmeverlust H_T'

Beschreibung. Der temperaturspezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust (H_T') (auch: Transmissionswärme-Transferkoeffizient) beschreibt einen "mittleren U-Wert" für die konditionierten (beheizt, gekühlt) Gebäudehüllflächen. Zur Ermittlung werden die Wärmeverluste aller Gebäudebauteile addiert, die an Erdreich, Außenluft oder nicht beheizte Bereiche grenzen. Anschließend wird der Wert durch die Flächen dieser Bauteile geteilt.

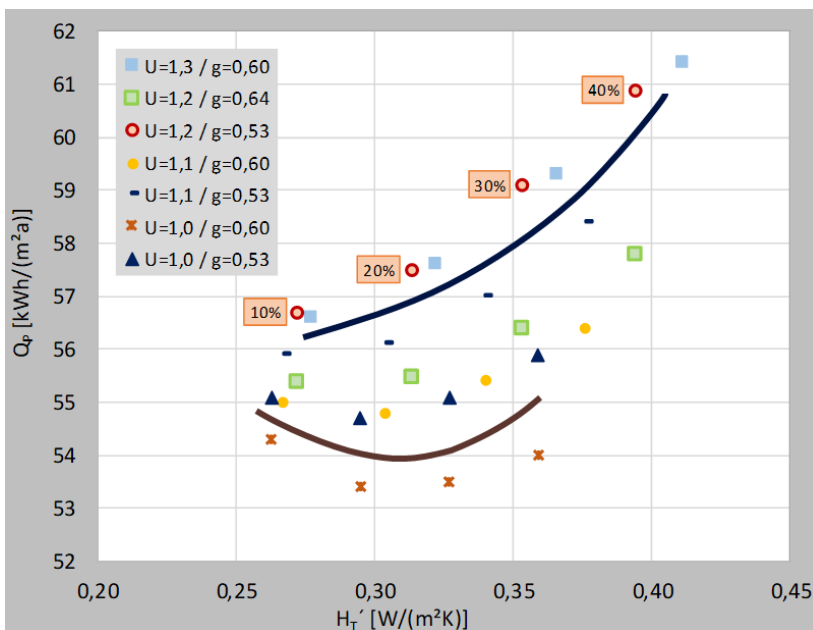
$$H_T = \sum U_i \cdot A_i \cdot F_{Xi} + H_{T,WB} \text{ [W/K]}$$

$$H_T' = H_T / \sum A \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Bewertung. H_T' stellt zusammen mit Q_p als Hauptforderung die bisherige Nebenanforderung des GEG dar. Als Einzelgröße ist H_T' nicht anwendbar, da es sich nur auf die Gebäudehülle bezieht. Für Effizienzhäuser ist H_T' zudem eine ungeeignete Führungsgröße, da die Leistung der Hülle ausschließlich unter Berücksichtigung der Wärmesenken und nicht unter Einbeziehung der nutzbaren Wärmequellen (intern und solar) erfolgt. Die Größe gibt zudem keinen Anreiz, ein energiesparendes Gebäudekonzept zu erstellen, da nur eine einseitige Betrachtung der Hüllverluste erfolgt und kein integraler Ansatz notwendig ist.

Abbildung 5 zeigt das Zusammenspiel der Haupt- und Nebenanforderung der aktuellen Anforderungssystematik im GEG. Eine Erhöhung des Fensterflächenanteils (um 10 % - 40 %) führt zur Erhöhung des H_T' -Wertes. Höhere H_T' -Werte suggerieren eine schlechtere energetische Performance, was für Standardfenster auch zutrifft. Allerdings zeigt sich insbesondere für energetisch bessere Fenster, dass der H_T' -Wert kein guter Indikator für die Leistung eines Gebäudes ist.

Abbildung 5: Zusammenspiel der Haupt- und Nebenanforderung der aktuellen Anforderungssystematik im GEG. Beispiel EFH, Niveau Hülle GEG-Referenz. Quelle: Berechnungen ibh



H_T' eignet sich daher **nicht** als Nebenanforderung und Größe zur Bewertung der Hüllflächenqualität.

Tabelle 4: Bewertung der Effizienzgröße „Spezifischer Transmissionswärmeverlust“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Anforderungsgröße des GEG: der zulässige Transmissionswärmeverlust entspricht den Wärmeverlusten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche des Referenzgebäudes (entsprechend Vorgaben U-Werte). Darüber hinaus findet H_T' Anwendung im Modellgebäudeverfahren, also dem vereinfachten Nachweisverfahren und liefert "Deckelwerte" für den Bestand in §50 GEG.
Komplexität der Umsetzung	Niedrige Komplexität: Größe ist einfach ermittelbar und die Größenordnung ist einschätzbar. Effizianzforderung H_T' ist bereits bestehende Effizianzforderung (seit EnEV)
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle, da Anforderung an die Gesamteffizienz der Gebäudehülle und nicht einzelner Bauteile. Keine Auswirkung auf Wärmegewinne und andere Effizienzmaßnahmen bei der Wärmeverteilung, Speicherung und Erzeugung.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Trägt nur eingeschränkt zur Zielerreichung bei, da zwar entwurfsoffen, aber kein direkter Zusammenhang mit Energiebilanz; alleinige Grenzwerte für die Verluste entsprechen nicht der Idee einer optimierten, effizienten Hülle. Das konkrete Anforderungsniveau für H_T' beeinflusst die Ausführung der langlebigen Gebäudehüllkomponenten.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Keine Anreize für optimierte Fensterflächen, solare Gewinne und Kompaktheit, bedingt durch Anforderungssystematik des Referenzgebäudeverfahrens (früher $f(A/V)$). Jedoch könnten methodische Änderungen z.B. einen besseren Anreiz zur Kompaktheit liefern, z.B. Einführen einer Abhängigkeit von A/V .
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Geringe Einschränkungen des architektonischen Entwurfes, allerdings auch keine (gewünschte) Auswirkungen auf die architektonische Qualität eines Entwurfs (auch wenn sich zumindest letzteres durch methodische Anpassungen verbessern ließe; siehe vorheriges Kriterium).
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Weitere Hauptanforderung zur Effizienz der Wärmeverteilung/-erzeugung und TGH-Emissionen notwendig.

Bewertung	Erläuterung
Eignung für Referenzgebäude	Kann sowohl mit Referenzgebäude als auch mit variablem oder festen Grenzwert funktionieren.
Eignung für Nichtwohngebäude	Auch für NWG geeignet, allerdings werden hier im derzeitigen GEG die mittleren U-Werte herangezogen.
Verständlichkeit für Endkunden	Eher gut (im Vergleich zu anderen Kennwerten)
Wirkung auf Baukosten	Kann Auswirkungen auf Investitionskosten haben, allerdings abhängig von Anforderungsniveau. Die Bestimmung (Nachweis) ist wenig aufwändig - bei der Ausführung können die Investitionskosten beeinflusst werden, da Maßnahmen an der Gebäudehülle nicht mit anderen Effizienzmaßnahmen verrechnet werden können.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und Komplettsanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen, da U-Werte im Bestand eher nachrangig/nicht gut zu bestimmen)
Weitere Vorteile	Einfacher und etablierter Ansatz, flexible Entwurfsplanung, Eignung auch für ungünstige Grundstücke, mit Excel optimierbar, u.a. für Vorplanung
Weitere Nachteile	Nur einseitige Betrachtung der Hüllverluste, kein integraler Ansatz
Bemerkungen	Wenn nicht bessere, integrale Kennwerte zur Berücksichtigung der Gesamteffizienz (z. B. Lüftungsverluste, solare Gewinne etc.) als Nachweisgröße eingeführt wird, dann unbedingt beibehalten.
Empfehlung	Keine Empfehlung zur Weiteranalyse; andere Alternativen erfüllen den hier untersuchten Zweck, die Effizienz abzubilden und dahingehend einen Anreiz zu setzen, besser.

3.5.2 Spezifischer, äquivalenter Transmissionswärme- Transferkoeffizient $H_{T,s}'$

Beschreibung. Solaroptimierter Kennwert der Gebäudehülle. Von den Transmissionswärmeverlusten werden die nutzbaren Solarenergiegewinne abgezogen. Diese Bewertungsgröße ist, anders als der H_T' -Wert, in der Lage, die energetische Qualität der Gebäudehülle zu beschreiben. Der Indikator wird in unterschiedlichen Varianten diskutiert, einmal bezogen auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche (wie H_T'), zum anderen auf Gebäudenutzfläche (z.B. NGF) bezogen.

Bewertung. $H_{T,s}'$ setzt Anreize für eine optimierte Bauweise, da solare Gewinne und kompakte Bauweise berücksichtigt werden. Im Unterschied zu H_T' handelt es sich hier allerdings um keinen reinen Bauteilkennwert, denn es bestehen Abhängigkeiten zum Standort (Klima, Strahlung), zur Innentemperatur und zur Art der Lüftung. Die Lüftungswärmeverluste hängen vom Ausnutzungsgrad der Gewinne ab (je größer die Lüftungswärmeverluste, desto besser wird $H_{T,s}'$ bewertet) und die solaren Gewinne durch Fenster erhöhen sich, wenn das Gebäude einen hohen Wärmebedarf hat. Dies bedeutet, dass die Kenngröße die Eigenschaften der Gebäudehülle nicht eindeutig abbildet, sondern durch die Dichtheit der Gebäudehülle und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung überlagert wird. Hierdurch ist dieser Kennwert weniger geeignet als bspw. $Q_{h,b,0}$.

Tabelle 5: Bewertung der Effizienzgröße „Spezifischer äquivalenter Transmissionswärme-Transferkoeffizient“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Keine Anforderungsgröße des GEG.
Komplexität der Umsetzung	Moderate Komplexität, jedoch durch Energieberater zu ermitteln wegen Abhängigkeit von Innentemperatur, Klima (Temperatur, Strahlung), Verschattung, Himmelsrichtung, Art der Lüftung. Allerdings erfordert die Einführung einer neuen Anforderungsgröße einen hohen Aufwand bei der Information aller Baubeteiligten (Planer, Baubehörden, Hersteller).
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle, da Anforderung an die Gesamteffizienz der Gebäudehülle. Bezieht Wärmegewinne und andere Effizienzmaßnahmen bei der Wärmeverteilung, Speicherung und Erzeugung nicht ein, kann nicht durch weitere Effekte aufgeweicht werden.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Trägt zur Zielerreichung bei (insbesondere, wenn die Kenngröße wohnflächenabhängig umgesetzt wird), da entwurfsoffener Ansatz, der auf konkretem Grenzwert für eine effiziente Hülle beruhen kann und damit zu optimiertem Entwurf führt. Je nach Anforderungsniveau beeinflusst HT' die Ausführung der langlebigen Gebäudehüllkomponenten. Allerdings keine Berücksichtigung anderer Effizienzmaßnahmen.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Je nach Anforderungsmethodik Anreize für eine optimierte Bauweise, da optimierte solare Gewinne (optimierte Ausrichtung und Größe der Fenster) und kompakte Bauweise (wenn die Kenngröße abhängig von der Energiebezugsfläche umgesetzt wird) berücksichtigt werden. Im Unterschied zu HT' handelt es sich allerdings um keinen reinen Bauteilkennwert mehr, denn es bestehen Abhängigkeiten zum Standort (Klima, Strahlung), zur Innentemperatur und zur Art der Lüftung, bspw. sinkt der Ausnutzungsgrad der solaren Gewinne bei Vorhandensein einer Wärmrückgewinnung.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Gewisse Einschränkungen des architektonischen Entwurfes je nach Ausgestaltung des Grenzwertes.
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Weitere Hauptanforderung notwendig.
Eignung für Referenzgebäude	Kann sowohl mit Referenzgebäude als auch mit variablem oder festem Grenzwert funktionieren.
Eignung für Nichtwohngebäude	Für Nichtwohngebäude nur bedingt geeignet, da bei NWG die Anlagentechnik gegenüber (der Kompaktheit) der Gebäudehülle i.d.R. eine deutlich wichtigere Rolle einnimmt, die hierbei nicht adressiert wird.
Verständlichkeit für Endkunden	Eher komplex, daher schlechtere Verständlichkeit (im Vergleich zu anderen Kennwerten)
Wirkung auf Baukosten	Kann Auswirkungen auf Investitionskosten haben, allerdings abhängig von Anforderungsniveau. Die Bestimmung (Nachweis) ist wenig aufwändig - bei der Ausführung können die Investitionskosten beeinflusst werden, da Maßnahmen an der Gebäudehülle nicht mit anderen Effizienzmaßnahmen verrechnet werden können.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und Komplettisanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen, da U-Werte im Bestand eher nachrangig/nicht gut zu bestimmen)
Weitere Vorteile	Kann Fehloptimierung verhindern
Bemerkungen	Kann als Alternative für HT' eingeführt werden.
Empfehlung	Prinzipiell geeignet, jedoch weniger intuitiv und umfassend als $Q_{h,b,0}$, wenn dieser mit Augenmaß definiert wird. Daher bedingte Empfehlung zur Weiteranalyse.

3.5.3 Bauteilanforderungen: Gebäudehülle und Lüftungskomponenten (Tabellenverfahren)

Beschreibung. Das Tabellenverfahren beschreibt Anforderung an Gebäudehülle und Lüftung. Es gibt zum einen maximal zulässige U-Werte (Wärmedurchgangskoeffizienten) der verschiedenen wärmeumschließenden Gebäudehüllflächen (Wand, Fenster, Dach etc.) zur Begrenzung der Transmissionswärmeverluste vor. Zum anderen werden Anforderungen an Wärmebrücken, Luftdichtheit und den Wärmebereitstellungsgrad (WBG) einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung gestellt.

Bewertung. Das Bauteilverfahren ist nicht als Hauptanforderung für den Neubau geeignet, da die spezifischen Anforderungen an konkrete Bauteile die Flexibilität und Variierbarkeit der einzelnen Anforderungen einschränkt.

Tabelle 6: Bewertung der Effizienzgröße „Bauteilanforderungen“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Das Tabellenverfahren findet im GEG Anwendung für Höchstwerte der U-Werte von Außenbauteilen bei Änderungen an bestehenden Gebäuden.
Komplexität der Umsetzung	Niedrige Komplexität
Wirkung auf Technologie	Etwas geringe Technologieoffenheit, da Anforderungen an spezifische Bauteile gestellt werden
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Stellt Mindeststandards für Bauteile, Luftdichtheit und WBG sicher. Trägt allerdings nicht zu optimiertem Entwurf bei (Neubau).
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Stellt Mindeststandards für Bauteile, Luftdichtheit und WBG sicher. Trägt allerdings nicht zu optimiertem Entwurf bei.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	geringen Einfluss auf den architektonischen Entwurf, wobei es keine Flexibilität bei den Anforderungen an spezifische Bauteile gibt
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Weitere Hauptanforderung notwendig.
Eignung für Referenzgebäude	Prinzipiell ja
Eignung für Nichtwohngebäude	Prinzipiell ja, auch für Sanierungen geeignet
Verständlichkeit für Endkunden	Gut (im Vergleich zu anderen Kennwerten)
Wirkung auf Baukosten	Einfluss auf Investitionskosten durch geringe Flexibilität da Anforderungen an spezifische Bauteile gestellt werden Auswirkungen auf die Bezahlbarkeit (allerdings abhängig von Anforderungsniveau).
Eignung für Neubau und Bestand?	Geeignet
Weitere Vorteile	Einfacher Ansatz
Bemerkungen	Eher nicht als Hauptanforderung geeignet; kann ggf. ein vereinfachtes Verfahren ergänzen; Werte müssen dann allerdings so ambitioniert sein, dass die Ergebnisse auf "sicherer Seite" liegen; weitere Anwendung im Bestand denkbar
Empfehlung	Nicht als generelle Hauptanforderung für Effizienz weiterverfolgen; bei Bedarf als Ergänzung zu einer anderen Anforderung aufgreifen

3.5.4 Nutzwärmebedarf vor 1. Iteration $Q_{h,b,0}$

Beschreibung. Der Nutzwärmebedarf vor der 1. Iteration beschreibt den Nutzwärmebedarf für Raumwärme. Sie umfasst die Transmissions- und Lüftungsverluste und zieht solare und interne Gewinne ab. Die Heizungstechnik hat keinen Einfluss auf die Größe (d.h. ohne Berücksichtigung des Wärmeeintrags durch Speicherung und Verteilung). Die DIN V 18599 bestimmt als Zwischenwert den „Heizwärmebedarf vor Iteration“ ($Q_{h,b,0}$), jedoch wird dieser softwareseitig nicht ausgewiesen (aber intern berechnet).

Bewertung. $Q_{h,b,0}$ bewertet den Gebäudeentwurf (langlebig verbaute Gebäudesubstanz) bzw. alle Elemente, die den Nutzwärmebedarf für Heizung erhöhen oder reduzieren können (Wärme- und Lüftungsverluste versus solare und interne Gewinne). Im Anforderungssystem sollte es mit einer zusätzlichen Anforderung zur Effizienz der Wärmeverteilung und -erzeugung kombiniert werden. Die Hüllflächenqualität kann jedoch durch den Einsatz einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung reduziert werden und so dünnere Dämmschichten ermöglichen. Diese Möglichkeit hängt allerdings stark von der Höhe des Anforderungswerts ab. Hier sollte durch die Berechnungen eruiert werden, wo eine sinnvolle Grenze zu ziehen ist. Je nach Anforderungsniveau und zeitlichem Verlauf ist es deshalb ggf. sinnvoll in einer Übergangsphase noch Bauteilanforderungen an die Hülle zu stellen.

Tabelle 7: Bewertung der Effizienzgröße „Nutzwärmebedarf vor 1. Iteration“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Keine Anforderungsgröße des GEG. Größe ist als Ergebnis der "Gebäudeberechnung" bekannt aus dem Verfahren der DIN V 4108-6.
Komplexität der Umsetzung	Mit Einführung der Größe wird ein bekannter "Bezugspunkt" eingeführt, erfordert aber doch einen erhöhten Aufwand bei der Information aller Baubeteiligten (Planer, Baubehörden, Hersteller). Die Umstellungen im Berechnungsverfahren wäre eher gering, da die Kenngröße des Nutzenergiebedarfs vor der 1. Iteration ohnehin berechnet wird, allerdings in Softwareprogrammen gesondert ausgegeben werden müsste.
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Maßnahmen zur Reduzierung des Nutzwärmebedarfs (Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle, Lüftungstechnik mit und ohne WRG, Gebäudeentwurf). Andere Effizienzmaßnahmen bei der Wärmeverteilung, Speicherung und Erzeugung werden nicht berücksichtigt
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Trägt zur Zielerreichung bei, da entwurfsoffener Ansatz, der auf konkretem Grenzwert beruhen kann und damit die Effizienz des Gebäudekonzepts bewertet. Je nach Anforderungsniveau kann $Q_{h,b,0}$ die Ausführung der langlebigen Gebäudehüllkomponenten beeinflussen. Effizienzziele können mit der Größe unmittelbar und umfassend adressiert werden.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Anreize für eine optimierte Bauweise je nach Anforderungsmethode, da kompakte Bauweise und optimierte solare Gewinne berücksichtigt werden. Allerdings kann alternativ zu höheren U-Werte der Hülle eine Lüftungsanlage mit WRG eingesetzt werden.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Gewisse Einschränkungen des architektonischen Entwurfes je nach Ausgestaltung des Grenzwertes.
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Weitere Hauptanforderung notwendig.
Eignung für Referenzgebäude	Kann sowohl mit Referenzgebäude als auch mit variablem oder festem Grenzwert funktionieren.
Eignung für Nichtwohngebäude	Prinzipiell ja, Effekte bei Einsatz von Lüftungstechnik müssen geprüft werden.

Bewertung	Erläuterung
Verständlichkeit für Endkunden	Nicht-Experten kann die Nutzenergie vereinfacht als die Energie beschrieben werden, die ein Gebäude zur Beheizung der Räume benötigt.
Wirkung auf Baukosten	Senkende Auswirkungen auf Investitionskosten, da Effizienzmaßnahmen miteinander verrechnet werden können, allerdings abhängig von Anforderungsniveau. Die Bestimmung (Nachweis) ist wenig aufwändig.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und Komplettisanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen, da U-Werte im Bestand eher nachrangig/nicht gut zu bestimmen)
Weitere Vorteile	Abschließende Kenngröße zur Bewertung des Gebäudeentwurfs, die alle Elemente, die den Nutzwärmebedarf für Heizung reduzieren können, berücksichtigt (Wärme- und Lüftungsverluste versus solare und interne Gewinne)
Weitere Nachteile	Schafft durch alleinigen Bezug zur Hülle und Nutzwärme keinen Anreiz, auf Zirkulation zu verzichten. Dies muss mit weiterer Anforderung adressiert werden, wie das Thema „Warmwasser“, welches in hocheffizienten Gebäuden einen sehr hohen relativen Anteil haben kann, generell.
Bemerkungen	Beim jetzigen Niveau könnte via Wärmerückgewinnung ein zu schlechtes Hüllenniveau realisiert werden. Der Grenzwert muss daher so niedrig angesetzt werden, dass dies vermieden wird. Je nach Anforderungsniveau und zeitlichem Verlauf ist es deshalb ggf. sinnvoll in einer Übergangsphase noch Bauteilanforderungen an die Hülle zu stellen. Könnte abhängig von A/V; EFH/MFH; reguliert werden
Empfehlung	Empfehlung zur Weiteranalyse unter Berücksichtigung obiger Bemerkungen

3.5.5 Nutzwärmebedarf $Q_{h,b}$

Beschreibung. Die Größe beschreibt den Nutzwärmebedarf für Raumwärme. Sie umfasst die Transmissions- und Lüftungsverluste und zieht solare und interne Gewinne ab. Die Heizungstechnik hat keinen Einfluss auf die Größe, allerdings werden Wärmeeinträge durch Speicherung und Verteilung berücksichtigt.

$$Q_{h,b} = Q_{\text{sink}} - \eta \cdot (Q_{\text{I,source}} + \sum Q_{S,i}) \text{ [kWh]}$$

Bewertung. $Q_{h,b}$ setzt Anreize für eine optimierte Bauweise da kompakte Bauweise und optimierte solare Gewinne berücksichtigt werden. Allerdings kann alternativ zu höheren U-Werte der Hülle eine Lüftungsanlage mit WRG eingesetzt werden (entsprechend $Q_{h,b,0}$). Zusätzlich gehen auch (ungeregelte) Wärme- und Kälteeinträge aus der Anlagentechnik ein. Diese verfälschen die Aussage über das (konstruktive) Gebäude. Aufgrund höherer Komplexität weniger intuitive Aussagekraft als $Q_{h,b,0}$.

Tabelle 8: Bewertung der Effizienzgröße „Nutzwärmebedarf“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Keine Anforderungsgröße des GEG. Die Bilanzgröße Nutzwärmebedarf des GEG wird nach DIN 18599 im Monatsverfahren (mit Referenzklima Potsdam) berechnet und integriert die Interaktion mit dem unregelmäßigen Wärmeeintrag der Erzeuger. Sie erfolgt über eine Iteration der Bilanzmonate, da die Wärmeeinträge der Verteilung/Speicherung vom Nutzwärmebedarf abhängig sind und diesen wiederum beeinflussen.
Komplexität der Umsetzung	Durch die iterative Berechnung und weil für die Erst-Berechnung schon die Heizungsverteilung/Speicherung bekannt sein muss, ist die Komplexität deutlich höher als bei $Q_{h,b,0}$. Die Umstellungen im Berechnungsverfahren wäre eher gering, da die Kenngröße des Nutzenergiebedarfs ohnehin berechnet wird.

Bewertung	Erläuterung
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle, da Anforderung an die Gesamteffizienz der Gebäudehülle. Durch Iteration Auswirkung auf andere Effizienzmaßnahmen bei der Wärmeverteilung und Speicherung.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Trägt zur Zielerreichung bei, da entwurfsoffener Ansatz, der auf konkretem Grenzwert beruhen kann und damit die Effizienz des Gebäudekonzepts bewertet. Je nach Anforderungsniveau kann Nutzwärmebedarf die Ausführung der langlebigen Gebäudehüllkomponenten beeinflussen.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Anreize für eine optimierte Bauweise je nach Anforderungsniveau, da kompakte Bauweise und optimierte solare Gewinne berücksichtigt werden. Allerdings kann alternativ zu höheren U-Werte der Hülle eine Lüftungsanlage mit WRG eingesetzt werden. Zusätzlich gehen auch (unge-regelte) Wärme- und Kälteeinträge aus der Anlagentechnik ein. Diese verfälschen die Aussage über das (konstruktive) Gebäude.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Gewisse Einschränkungen des architektonischen Entwurfes je nach Ausgestaltung des Grenzwertes.
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Weitere Hauptanforderung notwendig
Eignung für Referenzgebäude	Kann sowohl mit Referenzgebäude als auch mit variablem oder festem Grenzwert funktionieren.
Eignung für Nichtwohngebäude	Prinzipiell ja, Effekte bei Einsatz von Lüftungstechnik und durch Wärmeeinträge aus Anlagentechnik müssen geprüft werden.
Verständlichkeit für Endkunden	Nicht-Experten kann die Nutzenergie vereinfacht als die Energie beschrieben werden, die ein Gebäude zur Beheizung der Räume benötigt. Die Iteration der Wärmeeinträge ist allerdings etwas schwieriger zu beschreiben.
Wirkung auf Baukosten	Kann Auswirkungen auf Investitionskosten haben, allerdings abhängig von Anforderungsniveau. Die Bestimmung (Nachweis) ist wenig aufwändig.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und Komplettsanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen, da U-Werte im Bestand eher nachrangig/nicht gut zu bestimmen)
Bemerkungen	Berechnungen führen zu weniger kohärenten Ergebnissen als z.B. für $Q_{h,b,0}$
Empfehlung	Keine Empfehlung zur Weiteranalyse, aufgrund höherer Komplexität bei weniger intuitiver Aussagekraft gegenüber $Q_{h,b,0}$

3.5.6 Wärme-/Kälteenergiebedarf Q_{outg}

Beschreibung. Q_{outg} auch Erzeugernutzwärme/-kälteabgabe (h, w, c) genannt, beschreibt die Abgabe von Wärme für Heizung, Warmwassererzeugung oder Kälte der jeweiligen Erzeuger (d.h. zum Nutzwärmebedarf werden die Verluste der Wärmeübergabe, Wärmeverteilung und Wärmespeicherung der jeweiligen Erzeuger addiert). Sind mehrere komplett getrennte Wärmeversorgungssysteme vorhanden, so ist die Gleichung für jedes System getrennt anzuwenden und die Erzeugernutzwärmeabgabe für jeden Erzeuger einzeln zu bestimmen.

Beispielhafte Formeln für einzelne Erzeuger:

$$Q_{h,outg} = Q_{h,b} + Q_{h,ce} + Q_{h,d} + Q_{h,s} \quad (\text{Formel für Erzeugernutzwärme Heizen})$$

$$Q_{w,outg} = Q_{w,b} + Q_{w,ce} + Q_{w,d} + Q_{w,s} \quad (\text{Formel für Erzeugernutzwärme Warmwasser})$$

Bewertung. Die zunächst dargestellte Bilanzgröße Q_{outg} umfasst alle Bilanzanteile, also Heizung, Warmwasser, Beleuchtung etc. Bei der anschließenden Bewertung wird $Q_{h,outg}$ diskutiert, was nur ein Teil von Q_{outg} ist. $Q_{h,outg}$ ist eher als Q_{outg} für eine Anforderung

geeignet, wenn man primär die Gebäudehülle bzw. Heizung adressieren will. $Q_{h,outg}$ ermöglicht viel Gestaltungsspielraum für das Gebäudekonzeptes, da Effizienzmaßnahmen an langlebigen Gebäudehüllkomponenten durch Maßnahmen der Versorgungstechnik kompensiert werden können. Die Gebäudehülle kann hierbei nicht losgelöst vom Heizungssystem bewertet werden. Daher sollte $Q_{h,outg}$ nicht als alleinige Kenngröße eingesetzt werden und wäre durch weitere Effizianzorderungen wie H_T , $H_{T,s}$ oder $Q_{h,b,0}$ und eine zusätzliche Umwelanforderung zu ergänzen. Da $Q_{h,outg}$ die gesamte erzeugte Wärme darstellt, lässt sich an diesem Kennwert auch gut der Anteil erneuerbarer Wärme aufzeigen.

Tabelle 9: Bewertung der Effizienzgröße „Wärme-/Kälteenergiebedarf“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	GEG Bezugsgröße für Anteil Erneuerbarer Energien (§10 GEG: ...der Wärme- und Kälteenergiebedarf zumindest anteilig durch die Nutzung erneuerbarer Energien nach Maßgabe der §§ 34 bis 45 gedeckt wird.)
Komplexität der Umsetzung	Die Einführung einer neuen Anforderungsgröße erfordert einen erheblichen Aufwand bei der Information aller Baubeteiligten (Planer, Baubehörden, Hersteller). Die Umstellungen im Berechnungsverfahren wäre eher gering, da die Kenngröße des Wärmeenergiebedarfs ohnehin berechnet wird.
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Effizienzmaßnahmen und Erzeugersysteme, da Anforderung an Wärme-/Kälteenergiebedarf. Hat je nach Anforderungsniveau Auswirkungen auf die Effizienz der Hülle und der technischen Anlagen.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Nur bedingt, ermöglicht viele Freiräume, so dass Effizienzmaßnahmen an langlebigen Gebäudehüllkomponenten durch Maßnahmen an der Versorgungstechnik (Verteilung, Speicherung) kompensiert werden könnten. Die Gebäudehülle kann hierbei nicht losgelöst von der Heizungsentscheidung bewertet werden.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Nicht als alleiniges Kriterium. Würde der „Wärme- und Kälteenergiebedarf“ als einzige Effizianzforderung eingeführt, ermöglicht er (zu)viele Freiräume. Beispielsweise könnten Effizienzmaßnahmen der Hülle durch eine effiziente Warmwasserverteilung (Einsparung Zirkulationsleitung) kompensiert werden.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Keine Einschränkungen des architektonischen Entwurfes, da mit der Ausweitung der Nebenanforderung auf eine weiter gefasste Bilanzgrenze sich Architekten/Planern (neben den U-Werten) zusätzliche Freiheitsgrade zur Einhaltung der Effizianzforderung eröffnen. Hierzu gehören z.B. die Dichtheit des Gebäudes, die Minimierung der Verluste des Heizverteilsystems oder der Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Stellt nur in Kombination mit weiterer Effizianzforderung (z. B. H_T , $H_{T,s}$ oder $Q_{h,b,0}$) sicher, dass Effizienz der langlebigen Gebäudehüllkomponenten gegeben ist. Zusätzlich Kombination mit weiterer Kenngröße für Gesamtbewertung notwendig.
Eignung für Referenzgebäude	Kann sowohl mit Referenzgebäude als auch mit variablem oder festem Grenzwert funktionieren.
Eignung für Nichtwohngebäude	Geeignet.
Verständlichkeit für Endkunden	Während man Nicht-Experten die Endenergie vereinfacht als die Energie beschreiben kann, die einem Gebäude von außen zugeführt wird, ist der Wärmeenergiebedarf die Energie, die der Kessel liefern muss, die etwas schwieriger nachzuvollziehen ist.
Wirkung auf Baukosten	Geringe Auswirkungen auf Investitionskosten, da Maßnahmen an der Gebäudehülle mit anderen Effizienzmaßnahmen verrechnet werden können. Jedoch abhängig vom Anforderungsniveau.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und bei Komplettsanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen)
Weitere Vorteile	Berücksichtigt erneuerbare Wärme, daher gute Schnittstelle für erneuerbaren Wärmeanteil.
Weitere Nachteile	Berücksichtigt nicht die Effizienz des Erzeugers, daher nicht komplette Bewertung der Effizienz Versorgungsseite.

Bewertung	Erläuterung
Empfehlung	Eingeschränkt; nur in Kombination mit weiterer Effizianzforderung der Hülle und Kenngröße für Gesamtbewertung (inkl. Energieträger) sinnvoll

3.5.7 Endenergiebedarf Q_f - ohne Umweltenergie

Beschreibung. Die Endenergie Q_f beschreibt die gesamte Energie, die den jeweiligen Erzeugern für Heizung und Warmwassererzeugung und Kälte zuzuführen ist. Zusätzlich zum Wärmeenergiebedarf Q_{outg} werden also auch Erzeugungsverluste sowie Hilfsenergie für Gebäudetechnik inkl. Lüftung berücksichtigt. Die Endenergien Q_f werden nach Gewerken und Energieträgern getrennt bilanziert.

Beispielhafte Formeln für einzelne Erzeuger:

Endenergie Heizen $Q_{h,f} = Q_{h,outg} + Q_{h,g}$ (Formel für Endenergie Heizen)

Endenergie Kühlen $Q_{c,f} = Q_{c,outg} + Q_{c,g}$ (Formel für Endenergie Kühlen)

(mit Q_g =Erzeugerverluste)

Bewertung. Q_f stellt in Kombination mit weiteren Effizianzforderungen (z.B. H_T , $H_{T,S'}$ oder $Q_{h,b,0}$) sicher, dass ein Gesamtkonzept für das Gebäude erstellt wird, da die final bereitgestellte Energiemenge für die Beheizung des Gebäudes bewertet wird. Notwendig ist jedoch die zusätzliche Bewertung der Effizienz der Wärmeverteilung und -abgabe, da durch die alleinige Betrachtung der Endenergie bei einer effizienten Erzeugung zu geringe Anforderungen an die Wärmeverteilung/-abgabe gestellt werden. Dadurch ist die Vergleichbarkeit verschiedener Systeme (z.B. Biomasse versus Wärmepumpe) nicht gegeben. Für den Nutzer des Gebäudes zeigt die Endenergie die Menge an, die mit dem Versorger abgerechnet wird. Daher ist dieser Kennwert gut verständlich und leicht kommunizierbar. Allerdings liegt bisher der Fokus des berechneten Endenergiebedarfs auf dem Neubau. Im Bestand sind Effizienzklassen auf Basis des Endenergieverbrauchs eingeführt.

Tabelle 10: Bewertung der Effizienzgröße „Endenergie“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Keine Anforderungsgröße des GEG, Darstellung im Energieausweis (Schnittstelle zur Heizkostenabrechnung/Energieverbrauch). Allerdings Anforderungsgröße in der Innovationsklausel
Komplexität der Umsetzung	Die Einführung einer neuen Anforderungsgröße erfordert einen erheblichen Aufwand bei der Information aller Baubeteiligten (Planer, Baubehörden, Hersteller). Die Umstellungen im Berechnungsverfahren wäre eher gering, da die Kenngröße Endenergie ohnehin berechnet wird.
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Effizienzmaßnahmen und Erzeugersysteme, aber im Ergebnis schneiden WP immer gut und Biomasse schlecht ab. Hat je nach Anforderungsniveau Auswirkungen auf die Effizienz der Hülle und der technischen Anlagen.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Nur bedingt, ermöglicht viele Freiräume, so dass Effizienzmaßnahmen an langlebigen Gebäudehüllkomponenten durch Maßnahmen an der Versorgungstechnik kompensiert werden könnten; hängt von Grenzwert und Qualität der Endenergie ab (mit/ohne Umweltenergie?)
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Nicht als alleiniges Kriterium. Würde die Endenergie als einzige Effizianzforderung einführt, ermöglicht sie (zu)viele Freiräume. Beispielsweise könnten Effizienzmaßnahmen der Hülle durch eine effiziente Warmwasserverteilung (Einsparung Zirkulationsleitung) kompensiert werden.

Bewertung	Erläuterung
	Zusätzlich werden Wärmepumpen aufgrund der guten Jahresarbeitszahlen sehr gut bewertet und dadurch geringe Anforderungen an die Wärmeverteilung gestellt werden.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Keine Einschränkungen des architektonischen Entwurfes (ähnlich Q_{outg})
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Generell ausreichend als Effizienzanforderung. Stellt aber nur in Kombination mit weiterer Effizienzanforderung (z. B. H_T' , $HT_{,s}'$ oder $Q_{h,b,0}$) sicher, dass Mindesteffizienz an langlebigen Gebäudehüllkomponenten und der Wärmeverteilung gegeben ist. Daher Kombination mit weiterer Kenngröße für Gesamtbewertung notwendig.
Eignung für Referenzgebäude	Kann sowohl mit Referenzgebäude als auch mit variablem oder festem Grenzwert funktionieren.
Eignung für Nichtwohngebäude	
Verständlichkeit für Endkunden	Gute Verständlichkeit. Die Endenergie kann als die Energie beschrieben werden, die einem Gebäude von außen zugeführt wird (Energieverbrauch).
Wirkung auf Baukosten	Geringe Auswirkungen auf Investitionskosten, da Maßnahmen an der Gebäudehülle mit anderen Effizienzmaßnahmen verrechnet werden können. Jedoch abhängig vom Anforderungsniveau.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und bei Komplettsanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen)
Weitere Vorteile	Komplette Bewertung der gebäude- und versorgungseitigen Effizienz.
Weitere Nachteile	Keine Auswirkung auf Energieträgerwahl. Schlechte Vergleichbarkeit verschiedener Versorgungsvarianten durch strukturell bessere Bewertung von Wärmepumpen im Vergleich zu Biomasse-Kesseln.
Empfehlung	Empfehlenswert in Kombination mit weiterer Effizienzanforderung der Hülle und Kenngröße für Gesamtbewertung (inkl. Energieträger). Das Problem der Verrechnung von „Äpfel und Birnen“ und systematischer Bevorzugung von Wärmepumpen sollte adressiert werden.

3.5.8 Endenergetische Anlagenaufwandszahl e_f

Beschreibung. Die Anlagenaufwandszahl stellt das Verhältnis zwischen dem Aufwand an Endenergie und dem Nutzwärmebedarf (beispielsweise Heizwärmebedarf vor Iteration) dar, ist also ein Maß für die Anlageneffizienz. Bei einer niedrigen Aufwandszahl wird die Endenergie effizient genutzt. $e_f = Q_f / (Q_{h,b,0})$

Bewertung. Die Anlagenaufwandszahl e_f ist eine Kennzahl zur Optimierung der Anlagentechnik (Abgabe, Verteilung, Erzeugung). Sie hat nur einen bedingten Einfluss auf das Baukonzept und wenig Auswirkung auf die Gebäudehülle. Daher kann sie nur mit anderen Kennwerten zur Bewertung der Gebäudeeffizienz (z.B. H_T' , $HT_{,s}'$ oder $Q_{h,b,0}$) sowie einer zusätzlichen Umweltgröße eingesetzt werden. In Bezug auf die Vergleichbarkeit hat sie ähnliche Nachteile wie Q_f .

Tabelle 11: Bewertung der Effizienzgröße „endenergetische Anlagenaufwandszahl“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Die Anlagenaufwandszahl findet Anwendung in der DIN 4701-10, ist dort allerdings als Primärenergie-Aufwandszahl e_p definiert.
Komplexität der Umsetzung	Niedrige Komplexität: bereits eingeführte Größe. Ist in 18599 definiert, wird bislang nicht genutzt. Berechnung unkompliziert und vorhanden, jedoch kaum Erfahrungen zu Anwendung

Bewertung	Erläuterung
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Effizienzmaßnahmen an Anlagentechnik, Verrechnung mit Maßnahmen an der Gebäudehülle nicht möglich. Allerdings werden Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern z.B. Biomassekesseln aufgrund der guten Jahresarbeitszahlen sehr gut bewertet.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Beitrag zur Zielerreichung, denn die Kenngröße bewertet die Effizienz der Anlagentechnik.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Einfluss auf das Baukonzept, da eine effiziente Organisation der Verteilung (Leitungslängen) die Effizienz der Anlagentechnik sicherstellt. Beitrag zur sinnvollen Optimierung der Anlagentechnik.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Kaum Auswirkung auf Bauphysik/Architektur, jedoch Einbeziehung Kühlung weiter zu bedenken. Daher geringe Einschränkungen des architektonischen Entwurfes, da Kenngröße für die Anlagentechnik.
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Weitere Hauptanforderung zur Effizienz der Gebäudehülle und TGH-Emissionen notwendig.
Eignung für Referenzgebäude	Unabhängig vom Referenzgebäude (kann als variabler oder fester Grenzwert funktionieren). Machbarkeit jedoch anhängig vom Anforderungsniveau bzw. von der eingesetzten Technologie beim Referenzansatz (Wärmepumpe schwer zu übertreffen)
Eignung für Nichtwohngebäude	Ja, berücksichtigt allerdings nur die Effizienz des Heizsystems. Für Kühlung müsste ein eigener Faktor berücksichtigt werden.
Verständlichkeit für Endkunden	Effizienz der Anlagentechnik ist prinzipiell nachvollziehbar
Wirkung auf Baukosten	Kann Auswirkungen auf Investitionskosten der Anlagentechnik haben, allerdings abhängig von Anforderungsniveau. Fördert kosteneffiziente Anlagenoptimierung. Die Bestimmung (Nachweis) ist wenig aufwändig.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und Komplettisanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen, da U-Werte im Bestand eher nachrangig/nicht gut zu bestimmen)
Empfehlung	Eingeschränkte Empfehlung zur Weiteranalyse; ähnliche Problematik wie bei Q_f der systematisch besseren Darstellung von Wärmepumpen

3.5.9 Endenergetische Anlagenaufwandszahl inkl. Umweltenergie $e_{f,Umwelt}$

Beschreibung. Die hier analysierte Anlagenaufwandszahl stellt das Verhältnis zwischen dem Aufwand an Endenergie (inkl. Umweltenergie) und dem Nutzwärmebedarf dar, ist also ein Maß für die Anlageneffizienz unter Berücksichtigung der Umweltenergie. Bei einer niedrigen Aufwandszahl wird die Endenergie effizient genutzt.

Bewertung. Auch $e_{f,Umwelt}$ müsste mit mehreren Indikatoren kombiniert werden. $e_{f,Umwelt}$ erscheint nicht als sinnvolle Größe für die Definition der Effizienz des Gesamtkonzeptes, da die Umweltwärme, die durch Solarthermie oder Wärmepumpen nutzbar gemacht wird, den handelbaren Energien gleichgestellt wird. Es würde sich dafür aber eine genaue Bewertung der Effizienz der Anlage durch bessere Vergleichbarkeit ergeben. Es wäre also eine reine Kennzahl für die Effizienz des Heizungssystems.

Tabelle 12: Bewertung der Effizienzgröße „endenergetische Anlagenaufwandszahl inkl. Umweltenergie“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Die Anlagenaufwandszahl findet Anwendung in der DIN 4701-10, ist dort allerdings als Primär-energie-Aufwandszahl e_p definiert; entsprechende Definitionen für e_f finden sich allerdings bereits in der DIN V 18599-1. Zusätzlicher Einbezug der Umweltwärme.
Komplexität der Umsetzung	Moderate Komplexität: Anlagenaufwandszahl ist eine bereits eingeführte Größe, Berücksichtigung der Umweltenergie ist abstrakt, wird allerdings in der EU Statistik zur Ermittlung des erneuerbaren Anteils genutzt und als „key indicator for measuring progress under the Europe 2020 strategy“ bezeichnet
Wirkung auf Technologie	Technologieoffen für Effizienzmaßnahmen an Anlagentechnik, Verrechnung mit Maßnahmen an der Gebäudehülle nicht möglich. Aufgrund der Einbeziehung der Umweltenergie werden Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern nicht strukturell besser bewertet.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Beitrag zur Zielerreichung, da Kenngröße für Bewertung der Effizienz der Anlagentechnik. $e_{f,Umwelt}$ kann leicht aus vorhandenen Rechengrößen berechnet werden kann. Umweltenergie aus Solaranlagen ist in der aktuellen Bilanzierungsrechnung enthalten, Umweltenergie bei Wärmepumpen kann aus den vorhandenen Daten berechnet werden.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Gewisser Einfluss auf das Baukonzept, da eine effiziente Organisation der Verteilung (Leitungslängen) die Effizienz der Anlagentechnik sicherstellt. Die Größe wird durch den Heizwärmebedarf beeinflusst. Dadurch ist eine gewisse Verrechnung mit Maßnahmen an der Hülle möglich.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Geringe Einschränkungen des architektonischen Entwurfes, da Kenngröße für die Anlagentechnik
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Weitere Hauptanforderung zur Effizienz der Gebäudehülle und TGH-Emissionen notwendig.
Eignung für Referenzgebäude	Kann sowohl mit Referenzgebäude als auch mit variablem oder festem Grenzwert funktionieren.
Eignung für Nichtwohngebäude	Ja, berücksichtigt allerdings nur die Effizienz des Heizsystems. Für Kühlung müsste ein eigener Faktor berücksichtigt werden.
Verständlichkeit für Endkunden	Effizienz der Anlagentechnik ist prinzipiell nachvollziehbar, allerdings schwierig die Umweltanteile nachzuvollziehen; $e_{f,Umwelt}$ gibt auch mit Umweltenergie keine Auskunft, wieviel fossile Energie enthalten ist => ggf. mit Anteil erneuerbar ergänzen
Wirkung auf Baukosten	Kann Auswirkungen auf Investitionskosten der Anlagentechnik haben, allerdings abhängig von Anforderungsniveau. Die Bestimmung (Nachweis) ist wenig aufwändig.
Eignung für Neubau und Bestand?	Eignung für Neubau und Komplettsanierungen gleichermaßen (nicht bei Teilsanierungen, da U-Werte im Bestand eher nachrangig/nicht gut zu bestimmen)
Weitere Vorteile	Könnte erweitert werden auf Warmwasser, Kühlung
Weitere Nachteile	Eine Elektrodirektheizung würde ggf. auf den ersten Blick genauso gut – bzw. aufgrund der (nahezu) fehlenden Verluste aus Speicherung und Übertragung (für Raumheizung) sogar besser aussehen, als eine Wärmepumpe; entsprechend müsste weiter differenziert bzw. durch weitere Anforderungen flankiert werden.
Bemerkungen	Noch unklar, wie eine Einbeziehung z.B. der Beleuchtung konkret umgesetzt und mit Grenzwerten belegt werden könnte; die Anlageneffizienz kann i. V. m. mit $Q_{h,b,0}$ ggf. in einem geeigneten übergeordneten Indikator für THG/ Q_p mit erfasst werden, so dass nur 2 statt 3 Hauptindikatoren nötig sind.
Empfehlung	Eingeschränkte Empfehlung zur Weiteranalyse

3.5.10 Empfehlung für das GEG

Die Untersuchung der Effizienzgrößen zielt darauf ab, welche Kennwerte als Hauptanforderung für die dauerhaft verbaute Gebäudesubstanz dienen können. Die aktuelle KfW-

Evaluation zeigt zum Beispiel, dass H_T' sehr schwer einzuhalten ist. Sie wird nicht einmal von 50 % der Antragsteller unterschritten.

Die Bewertung der Kenngrößen erfolgt in Bezug auf die dargestellten Einzeloptionen und nicht direkt in der Kombination einer Anforderungssystematik:

Tabelle 13: Vergleich der Bewertungen der Effizienzgröße

Anforderungsgröße	H_T'	$H_{T,S}'$	Tabellen- verfahren	$Q_{h,b,0}$	$Q_{h,b}$	$Q_{h,outg}$	Q_f	e_f	$e_{f\text{ Umwelt}}$
Komplexität der Umsetzung	+	o	+	o	o	o	o	o	o
Technologieoffenheit/Wirkung auf Technologie	o	+	o	+	+	+	-	-	+
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	-	+	o	+	+	-	o	+	+
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	-	+	-	+	-	-	-	o	o
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	o	o	o	o	o	+	+	+	+
Eignung für Referenzgebäude	o	+	+	+	o	o	o	o	o
Eignung für Nichtwohngebäude	+	o	+	o	o	o	+	+	+
Verständlichkeit für Endkunden	o	o	+	o	-	o	+	o	o
Wirkung auf Baukosten	o	o	o	+	o	+	+	+	+
Eignung für Neubau und Bestand?	o	o	+	o	o	o	o	o	o
Empfehlung	-	o	(+)	+	-	o	+	-	o

(Legende Bewertung: + positiv; o neutral, - negativ)

Als Ergebnis der Analyse wird $Q_{h,b,0}$ uneingeschränkt als Effizienzkenngroße in Kombination mit weiteren Dekarbonisierungsgrößen empfohlen. Bei Einbettung in eine geeignete Methodik verspricht sie eine flexible, zielgerichtete Optimierung von Gebäudehülle und Lüftung. Die mögliche Verrechnung der Lüftungstechnik (insbesondere mit Wärmerückgewinnung) kann als Nachteil gesehen werden und erfordert besonderes Augenmerk. Spezifische Anforderungen an Komponenten der Hülle oder die Lüftungstechnik könnten die zielgerichtete Anwendung von $Q_{h,b,0}$ weiter unterstützen (abhängig vom Ambitionsgrad des festgelegten Wertes). Die Größe $e_{f\text{ Umwelt}}$ bietet sich prinzipiell als Kenngröße zur Bewertung der Effizienz der Wärmeverteilung/-erzeugung an, hier bedürften jedoch Fälle wie die Elektrodirektheizung einer gesonderten Betrachtung; eine geeignete übergeordnete Größe für THG/ Q_p dürfte diese Größe überflüssig machen. Auch Q_f wird als Effizienzgröße für das Gesamtkonzept weiter betrachtet. Zudem können die „Bauteil-Anforderungen“ – insbesondere im Hinblick auf Sanierungsanforderungen - im Blick behalten werden.

Unter Berücksichtigung der Gesamtsystematik bestehend aus drei Hauptanforderungen werden als Effizienzgrößen empfohlen:

Zur Adressierung der Effizienz der langlebigen Gebäudeteile: **Nutzwärmebedarf vor 1. Iteration $Q_{h,b,0}$** . Der Nutzwärmebedarf charakterisiert die Effizienz der gesamten Gebäudehülle und berücksichtigt anders als H_T' auch die solaren Gewinne.

Zur Adressierung der Effizienz des Gebäudekonzeptes: **Endenergie Q_f** . Die Endenergie-Anforderung regelt weitere Effizienzbereiche und deckt die Fälle ab, in denen Strom und Fernwärme weitestgehend dekarbonisiert sind („doppeltes Netz“). Für Biomasse-Konzepte ist die Endenergie ein passender Indikator, allerdings müssen für Wärmepumpen weitere Anforderungen etwas an die Jahresarbeitszahl festgelegt werden. Insgesamt ist der Indikator Q_f auch gut auf den Bestand übertragbar.

Ergänzend zu den beiden Effizienz-Hauptanforderungen sollten wie im bisherigen GEG einige explizite Zusatzanforderungen an die Effizienz einzelner Elemente gestellt werden.

3.6 Umweltgrößen

Zusätzlich zur Effizienz-Anforderungsgröße wird eine weitere Größe gesucht, die das Gebäude, bzw. den Betrieb des Gebäudes, gesamtheitlich bewertet, also inklusive der Qualität der eingesetzten Energieträger. Diese weitere Anforderungsgröße bewertet die Dekarbonisierung des Versorgungssystems im Zusammenspiel mit der Effizienz des Gebäudes und der Anlagentechnik. Die untersuchten Umweltgrößen sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Betrachtete Umwelt-Anforderungsgrößen

	Kenngroße		Wirkungsrahmen
1	Q_p	Primärenergiebedarf nicht-erneuerbar	Werden gebildet aus der Multiplikation der eingesetzten Endenergie mit dimensionslosen Bewertungsfaktoren. Einheit: kWh/m ² a
2	PER	Primary Energy Renewable-Bewertung	
3	$Q_f * f_{\text{pauschal}}$	Mit Klima- und Effizienzfaktoren bewertete Endenergie	Wird gebildet aus der Multiplikation der eingesetzten Endenergie mit einem THG-Faktor. Einheit: kg THG/m ² a
4	THG	Treibhausgasemissionen	
5	Erneuerbar	Anforderung „Versorgung mit erneuerbaren Energien“	Keine Berechnung, sondern Qualitätsanforderung

3.6.1 Nicht-erneuerbare Primärenergie Q_p

Beschreibung. Unter dem Begriff nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf Q_p versteht man den Gesamtenergiebedarf an fossilen und nuklearen Energierohstoffen, der notwendig ist, um den Endenergiebedarf des Hauses zu decken. Er beschreibt zusätzlich zum Energiegehalt der eingesetzten Energieträger auch die vorgelagerten Prozessketten bei der Gewinnung, Umwandlung, Speicherung der Energieträger und Verteilung mittels Primärenergiefaktoren. Das GEG bewertet nur die nicht-erneuerbaren Energierohstoffe, also Uranerz, Rohgas, Rohöl, Kohle etc.

Der Primärenergiebedarf wird durch Multiplikation der Endenergie mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor f_p des eingesetzten Energieträgers berechnet ($Q_p = Q_f \cdot f_p$). Der Primärenergiefaktor f_p beschreibt, das wieviel-fache an Rohstoffen für eine Einheit Endenergie eingesetzt werden muss. Ein Faktor 1,1 bedeutet beispielsweise, dass 1,1 Einheiten Rohgas für 1 Einheit Erdgas am Hauszähler notwendig sind. Für den gesamten Primärenergiebedarf werden alle eingesetzten Endenergieträger mit ihrem jeweiligen f_p bewertet und dann aufsummiert.

Bewertung. Bei der methodischen Bestimmung ergeben sich einige Besonderheiten, die aber nicht unbedingt zwangsläufig mit der Kenngröße Q_p verbunden sind. Für die Bewertung von Wärme aus KWK-Anlagen erfolgt eine Stromgutschrift für das Kuppelprodukt Strom gemäß der Rechenvorschrift der AGFW, der FW 309-Teil 1.¹ Dadurch sind die f_p von Fernwärme aus fossiler KWK sehr gering und werden durch einen Sockelwert nach unten begrenzt. Durch den geringen fossilen Anteil der Biomasse-Bereitstellungskette sind auch die f_p von Biomasse sehr niedrig.

Q_p ist nicht besonders gut geeignet, um langfristig die Zielerreichung zu steuern. Einerseits wird die unterschiedliche THG-Intensität von Brennstoffen nicht berücksichtigt (z. B. f_p von Gas, Steinkohle, Heizöl). Andererseits führen f_p , die in absehbarer Zeit immer weiter absinken, insbesondere der f_p von Strom, zu sehr niedrigen Q_p ohne Blick auf die Gebäudequalität. Ein sparsamer Umgang mit erneuerbaren Ressourcen wird von Q_p daher nicht begünstigt.

Eine Weiterentwicklung der Anforderung q_p z. B. in Richtung eines „Treibhausgas-korrigierten Q_p “ ist denkbar (siehe ifeu et al. 2018). Beispielsweise könnten die f_p von Gas, Öl und Steinkohle differenziert werden, ohne grundsätzlich in die Rechenlogik einzugreifen. Auch die methodischen Besonderheiten der KWK-Gutschrift können durch Übergang auf ein anderes Verfahren eliminiert werden.

Im Direktvergleich mit der Anforderungsgröße THG erscheint letztere für ein künftiges GEG geeigneter.

¹ Die Stromgutschriftmethode basiert darauf, dass bei einer KWK-Anlage zunächst alle verwendeten Energieträger mit ihrem Primärenergiefaktor gewichtet aufaddiert werden. Hiervon wird dann die Strommenge multipliziert mit dem Verdrängungsmix-Primärenergiefaktor abgezogen. Dieser Verdrängungsmix charakterisiert den Strommix, der durch die KWK-Anlage verdrängt wird. Der verbleibende Primärenergieeinsatz wird dann durch die bereitgestellte Wärmemenge dividiert. Die Stromgutschrift führt bei allen KWK-Anlagen zu sehr niedrigen Primärenergiewerten, da der Verdrängungs-Strommix mit dem PEF von 2,8 gewichtet wird. Die Vor- und Nachteile der Stromgutschriftmethode wurden ausgiebig in ifeu et al. (2018) diskutiert.

Tabelle 15: Bewertung der Umweltgröße „nicht-erneuerbare Primärenergie“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Anforderungsgröße des GEG und Kenngröße im Energieausweis, daraus abgeleitet auch Führungsgröße für das BEG.
Komplexität der Umsetzung	Bereits eingeführte Anforderungsgröße im GEG. Berechnung über vorgegebene Primärenergiefaktoren. Keine Änderung bei Softwareherstellern etc. notwendig
Wirkung auf Technologie	Das Verfahren ist vom Ansatz her technologieoffen. Bei Energieträgern, deren THG-Faktoren sich zeitlich verändern (Strom, Wärmenetze, PtX-Beimischung), wird die Technologieoffenheit durch die Art der zeitlichen Antizipation der Änderungen beeinflusst (Status Quo; Kurzfristprognose oder Mittelwert über Zeitraum). Die Technologieoffenheit wird zusätzlich eingeschränkt durch weitere methodische Wertentscheidungen, die sich grundsätzlich nicht vermeiden lassen, beispielsweise die Allokationsmethode bei KWK, die Bewertung von fester und gasförmiger Biomasse usw. Daher sind f_p nicht rein "naturwissenschaftlich", sondern zwangsläufig auch von Wertentscheidungen geprägt. Aktuelle GEG-Anforderung führt ja nach Energieträger zu ambitionierten (z.B. Erdgas) oder auch unambitionierten Vorgaben (z.B. Holz).
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	QP ist nicht besonders gut geeignet, um langfristig die Zielerreichung zu steuern. Einerseits wird die unterschiedliche THG-Intensität von Brennstoffen nicht berücksichtigt (z. B. f_p von Gas, Steinkohle, Heizöl). Andererseits führen f_p , die in absehbarer Zeit immer weiter absinken, insbesondere der f_p von Strom, zu sehr niedrigen Q_p ohne Blick auf die Gebäudequalität. Ein sparsamer Umgang mit erneuerbaren Ressourcen wird von Q_p daher nicht angereizt.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	In der Vergangenheit war q_p eine sinnvolle Steuerungsgröße, die die Effizienz des Gebäudes jenseits der Gebäudehülle regulieren konnte und gerade im Vergleich von – insbesondere fossilen - Brennstoffen mit Strom einen ganzheitlichen Blick eröffnete. Durch die oben beschriebene zeitliche Dynamik eignet sich Q_p immer weniger hierzu. Q_p -Grenzen wirkt aktuell nur bei fossilen und damit zumindest im Neubau ungewünschten Energieträgern.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Abhängig von Ausgestaltung der zweiten Anforderung. Positiv formuliert: Aktuell kaum keine Einschränkung der Entwurfsfreiheit, negativ: keine sinnvolle Lenkung des Entwurfsverfassers.
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Kombination mit einer Anforderungsgröße, die die Mindesteffizienz des Gebäudes bewertet, ist auf Grund der beschriebenen Besonderheiten bei Brennstoffen mit niedrigen f_p erforderlich, um einen sparsamen Umgang mit erneuerbaren Ressourcen zu ermöglichen.
Eignung für Referenzgebäude	Gleichermaßen geeignet für Referenzgebäudeansatz oder anderes Konzept
Verständlichkeit für Endkunden	Primärenergie kann als Bedarf „erschöpflicher Energierohstoffe“ gut erklärt werden. Vermittlungsbedürftig sind allerdings die o. g. methodischen Herausforderungen, insb. die niedrigen f_p bei Biomasse und Fernwärme.
Wirkung auf Baukosten	Bei Gebäuden mit niedrigen f_p (Biomasse, KWK) ergeben sich geringere Kosten für das Gebäude, da der Q_p -Wert leicht eingehalten wird. Die Höhe von Q_p lässt keinen Rückschluss auf Energiekosten zu.
Eignung für Neubau und Bestand?	Die Anforderungsgröße ist für die Bewertung von Neubau und Bestand gleichermaßen gut geeignet.
Weitere Vorteile	Kenngröße der EPBD (wobei der Entwurf der neuen EPBD insbesondere auch auf THG abhebt) Ressourcenverfügbarkeit wird adressiert, in der Vergangenheit auch hinreichende Wirkung für Klimaschutz und Energiekosten
Weitere Nachteile	Größe muss ständig angepasst werden (dynamische Entwicklung v.a. des Stromfaktors). Primärenergiefaktoren spiegeln die Klimawirksamkeit verschiedener fossiler Brennstoffe nicht ausreichend wider (Beispiel Öl und Gas) fehlende Bewertung Nachhaltigkeit/Verfügbarkeit bei Erneuerbaren
Bemerkungen	Eine Weiterentwicklung der Anforderung Q_p z. B. in Richtung eines „Treibhausgas-korrigierten“ Q_p ist denkbar. Beispielsweise könnten die f_p von Gas, Öl und Steinkohle differenziert werden, ohne grundsätzlich in die Rechenlogik einzugreifen. Auch die methodischen Besonderheiten der KWK-Gutschrift können durch Übergang auf ein anderes Verfahren eliminiert werden.
Empfehlung	Weiterentwicklung grundsätzlich möglich, aber nicht favorisierte Variante. Im Direktvergleich mit der Anforderungsgröße THG erscheint letztere für ein künftiges GEG geeigneter.

3.6.2 PER

Beschreibung. PER-Faktoren (PER: Primary Energy Renewable) bewerten die primären erneuerbaren Ressourcen, die in einer „fiktiven 100 % EE-Welt“ zur Deckung des Endenergiebedarfs eines Gebäudes benötigt werden, einschließlich der Verteilungs- und Speicherverluste. Vergleichsmaßstab ist „Primärstrom“, der direkt auf dem Haus erzeugt wird und ohne Speicherung genutzt wird. Dieser hat den Faktor 1,0. Für Heizstrom ergibt sich ein Stromfaktor von 1,8, weil ein Teil des Stroms saisonal gespeichert oder in Zeiten geringen EE-Angebots aus Gasturbinen mit EE-Gas erzeugt werden muss. Strom zum Kühlen erhält einen Faktor 1,1 wegen der guten Übereinstimmung mit dem PV-Angebot. Für Gas errechnet sich durch die Umwandlungsschritte Strom - H₂ - Methanisierung ein Faktor 1,75, für Öl 2,3.

Bioenergie wird mit einem Faktor 1,75 bewertet - Biomassemengen unterhalb einer Budgetgrenze mit dem Faktor 1,1 (beim Biomassebudget wird davon ausgegangen, dass jedes Gebäude ein „Anrecht“ auf eine gewisse Menge Biomasse hat). Das Verfahren wurde vom Passivhaus-Institut entwickelt (PHI 2021).

Bewertung. Die PER-Bewertung antizipiert, dass Energieträger in Zukunft (nahezu) THG-neutral werden und bewertet verstärkt die Systemdienlichkeit. Im Ergebnis wirkt das Verfahren so, dass eine Beheizung mit Wärmepumpen attraktiviert wird; Biomasse nur bis zu einem Budget; Gas- und Ölheizungen werden durch den vorweggegriffenen Wechsel zu PtG/PtL vergleichsweise ineffizient bewertet (Gas hat denselben Faktor wie Heizstrom). Allerdings basieren die Bewertungsfaktoren auf systemanalytischen Modellrechnungen, die konsolidiert werden müssten. Das Bewertungsverfahren eignet sich als Ausgangspunkt für die bewertete Endenergie. Nachteilig ist der hohe Erklärungsbedarf und die geringe Bekanntheit und Intuitivität für Gebäudeeigentümer und Gebäudeeigentümerinnen.

Tabelle 16: Bewertung der Umweltgröße „Primary Renewable Energy“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Verwendung zur Zertifizierung von Passivhäusern
Komplexität der Umsetzung	PER-Faktoren bisher weitgehend unbekannt, grundsätzliche Systematik passt nicht zum aktuellen und mittelfristigen Energiesystem. Vorbereitend müssen die PER-Faktoren für spezifische Anwendungen und Regionen bestimmt und veröffentlicht werden. Änderungen der regionalen EE-Verfügbarkeit oder verfügbarer Speicherkapazität erfordern Nachbesserungen der Faktoren. Stehen die Faktoren bereit, entspricht die weitere Berechnung dem aktuellen Verfahren mit nicht-erneuerbaren Primärenergiefaktoren.
Wirkung auf Technologie	Das Verfahren ist grundsätzlich technologieoffen in dem Sinne, dass die mit dem PER-Ansatz kompatiblen Lösungen ermöglicht werden, andere jedoch ausgeschlossen. Es werden allerdings Hilfsannahmen getroffen für die Berechnungen der PER-Faktoren. Beispielsweise wird Gas über „Power to gas“ abgeleitet. Die Bewertung von Biomasse wird über das Biomasse-Budget kalibriert, so dass effiziente Gebäude für Biomasse realisierbar sind. Das Methodenproblem bei der KWK-Bewertung bleibt bestehen.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	Hohe Zielkompatibilität. Die Bewertung antizipiert, dass Energieträger in Zukunft (nahezu) THG-neutral werden und bewertet verstärkt die Systemdienlichkeit. Im Ergebnis wirkt das Verfahren so, dass eine Beheizung mit Wärmepumpen attraktiviert wird; Biomasse nur bis zu einem Budget; Gas- und Ölheizungen werden durch den vorweggegriffenen Wechsel zu PtG/PtL vergleichsweise ineffizient bewertet (Gas hat denselben Faktor wie Heizstrom).

Bewertung	Erläuterung
	Allerdings unzureichende Berücksichtigung des Gaps zwischen aktueller realer Welt und PER-Vorstellung, Schwierigkeiten bei einer anderen Entwicklung als unterstellt.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Grundsätzlich ja
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Kein Unterschied zum bestehenden Verfahren bzw. abhängig von Ausgestaltung der zweiten Anforderung
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Kombination mit einer Anforderungsgröße, die die Mindesteffizienz des Gebäudes bewertet, ist erforderlich.
Eignung für Referenzgebäude	Gleichermaßen geeignet für Referenzgebäudeansatz oder anderes Konzept
Verständlichkeit für Endkunden	Die Größe ist erklärungsbedürftig. Die zu Grunde liegenden PER-Faktoren sind aufwändig hergeleitet, aber müssen transparent kommuniziert werden.
Wirkung auf Baukosten	Abhängig von Anforderungshöhe und politischen Setzungen für PER der fossilen Brennstoffe, grundsätzlich jedoch Steigerung der Investitionskosten, da anders als bei bisherigem Q_p erneuerbare nicht zur Erfüllung der Anforderungen beitragen. Bezüglich der zukünftigen Gesamtsystemkosten kann sich das PER-System kostendämpfend auswirken, da tendenziell Anreize zur effizienten Nutzung von EE und zur Nutzung der Speicherfähigkeit des Gebäudes geschaffen werden.
Eignung für Neubau und Bestand?	Die Anforderungsgröße ist rechnerisch für die Bewertung von Neubau und Bestand gleichermaßen gut geeignet. Inhaltlich für Bestand nur bedingt geeignet, da eigentliche PER für fossile Energieträger unsinnig - Bewertung daher fast ausschließlich Ergebnis einer (politischen) Setzung
Empfehlung	Insgesamt ein in sich schlüssiges Verfahren, das allerdings bereits ein vollständig erneuerbares Energiesystem vorwegnimmt, das derzeit noch nicht existiert. Die systemanalytischen Modellrechnungen müssten konsolidiert werden. Nachteilig ist die schwierige Übertragbarkeit auf den Gebäudebestand. Denkbar wäre es auch, einige Faktoren methodisch anders zu bewerten.

3.6.3 THG (im Betrieb) ($m_{CO_2äq}$)

Beschreibung. Seit dem Zeitalter der Industrialisierung wird die Erderwärmung zusätzlich vom sogenannten anthropogenen **Treibhauseffekt** durch die Emission folgender Substanzen verstärkt:

- Kohlendioxid,
- Methan,
- Distickstoffoxid (Lachgas),
- Ozon,
- Halogenkohlenwasserstoffe (z. B. FCKWs, Halone),
- Wasserdampf.

Der Bezug und die Nutzung von Energieträgern in Gebäuden sind mit Treibhausgas-Emissionen behaftet; dabei dominiert das bei Verbrennungsprozessen freigesetzte CO_2 . Aber auch Methan und (deutlich weniger signifikant) Lachgas sind an dem gesamten Treibhauspotenzial der Energieträger beteiligt.

Zum Vergleich der Auswirkungen verschiedener Treibhausgasemissionen wurde vom International Panel of Climate Change (IPCC) ein Index entwickelt, der das Verhältnis

des gesteigerten Strahlungsantriebs verschiedener Gase berücksichtigt. Dieser Index wird als Global Warming Potential (GWP) bezeichnet. Das IPCC stellte erstmals 1990 Daten für die GWPs zur Verfügung. Diese Daten unterliegen einer ständigen wissenschaftlichen Kontrolle und werden an neuere wissenschaftliche Erkenntnisse angepasst. Der fünfte und derzeit aktuellste Sachstandsbericht stammt aus dem Jahr 2013.

Im IPCC-Konzept erfolgt eine Normierung des Strahlungsantriebs einer Substanz i auf denjenigen von CO_2 . Das so berechnete Global Warming Potential (GWP) (Treibhauspotenzial) ergibt den massenbezogenen Charakterisierungsfaktor in der Einheit „kg CO_2e je kg Emission i “. Im Folgenden werden unter THG jeweils die mit dem Global Warming Potential gewichteten CO_2 -Äquivalente verstanden. Dabei werden die aktuellsten GWP mit dem Zeithorizont 100 Jahre des IPCC herangezogen.

Treibhausgas-Emissionen (THG) sind die durch den Energieverbrauch eines Gebäudes verursachten Emissionen. Bewertet werden direkte Emissionen am Standort (z.B. durch Verbrennung fossiler Brennstoffe) sowie alle durch die Bereitstellung der Energieträger außerhalb des Standorts verursachten Emissionen (z. B. Erzeugung von Strom oder Fernwärme, Gewinnung und Bereitstellung von Brennstoffen, Emissionen aus der landwirtschaftlichen Vorkette von Biobrennstoffen usw.). Üblicherweise werden verschiedene THG, mindestens CO_2 , CH_4 und N_2O , berücksichtigt und mittels des Global Warming Potential 100 gewichtet.² Die Berechnung der Treibhausgas-Emissionen erfolgt über die Multiplikation der eingesetzten Endenergie mit den für den jeweiligen Energieträger spezifischen Treibhausgasemissionsfaktor ($m_{\text{CO}_2\text{äq}} = q_f \cdot X_{\text{CO}_2\text{äq}}$). THG sind für Wohn- und Nichtwohngebäude sowie für Neubauten und Bestandsgebäude gleichwertig anwendbar, sodass es hier keine Unterscheidung in der Art der Anforderungsgröße gibt.

Bewertung. THG sind die unmittelbare Zielgröße der „klimaneutralen Gebäudebestandes“. Sie ist daher sowohl didaktisch als auch von den definierten Zielen eine wesentliche Zielgröße. Dabei ist allerdings zu beachten, dass das Klimaschutzgesetz (KSG) nach dem „Quellprinzip“ arbeitet, während das GEG eine „Verursacherbilanz“ durchführt. Außerdem bilden die Faktoren auch nicht-energetische Treibhausgase beispielsweise aus der Landwirtschaft oder prozessspezifische Emissionen ab.

Die Zielkompatibilität ist größer als bei Q_p , da Unterschiede in der THG-Intensität erfasst werden. Allerdings werden viele Energieträger in Zukunft deutlich sinkende und sich dynamisch entwickelnde Faktoren aufweisen. Daher entsteht der Bedarf, neben den THG-Emissionen ggf. noch eine weitere Umweltgröße zu definieren.

Auch für THG ergeben sich methodische Besonderheiten und zukünftig Änderungen u. a. durch die Stromgutschriftmethode bei KWK, durch die sehr niedrigen THG-Emissionen der Biomasseverbrennung oder die Ermittlung der THG-Faktoren für Wärmenetze.

Die Ausgestaltung von THG im GEG zur Bewertung von Neubauten oder Bestandsgebäuden kann über Klimaklassen erfolgen, die komplementär zu Endenergie-Effizienz-

² Das bedeutet, dass die Wirksamkeit der THG über 100 Jahre integriert wird. Alternativ dazu kann auch das GWP20 herangezogen werden, durch das kurzlebige THG wie Methan stärker gewichtet werden.

klassen zu verstehen sind. Die Anforderungen an Gebäude könnten über solche Klimaklassen formuliert werden. THG können auf das Referenzgebäudeverfahren angewendet werden.

Tabelle 17: Bewertung der Umweltgröße „THG im Betrieb“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Informationsgröße des GEG und Kenngröße im Energieausweis
Komplexität der Umsetzung	Die Emissionen werden bereits im bestehenden Verfahren angewendet. Berechnungsregeln mit GEG eingeführt, aber im Detail noch Klärungsbedarf, beispielsweise für Fernwärme. Ausgestaltung der Anforderungshöhe offen. Insgesamt geringe Komplexität
Wirkung auf Technologie	Das Verfahren ist vom Ansatz her technologieoffen in dem Sinne, dass die mit den Klimazielen kompatiblen Lösungen ermöglicht werden, andere jedoch ausgeschlossen. Bei Energieträgern, deren THG-Faktoren sich zeitlich verändern (Strom, Wärmenetze, PtX-Beimischung), wird die Technologieoffenheit durch die Art der zeitlichen Antizipation der Änderungen beeinflusst (Status Quo; Kurzfristprognose oder Mittelwert über Zeitraum). Die Technologieoffenheit wird zusätzlich eingeschränkt durch weitere methodische Wertentscheidungen, die sich grundsätzlich nicht vermeiden lassen, beispielsweise die Allokationsmethode bei KWK, die Bewertung von fester und gasförmiger Biomasse usw. Daher sind THG-Faktor nicht rein „naturwissenschaftlich“, sondern zwangsläufig auch von Wertentscheidungen geprägt.
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	THG sind die unmittelbare Zielgröße der „klimaneutralen Gebäudebestandes“. Sie ist daher sowohl didaktisch als auch von den definierten Zielen eine wesentliche Zielgröße. Dabei ist allerdings zu beachten, dass das Klimaschutzgesetz nach dem „Quellprinzip“ arbeitet, während das GEG eine „Verursacherbilanz“ durchführt. Ggf. wäre hier eine Anpassung des KSG sinnvoll. Die Zielkompatibilität ist größer als bei QP, da Unterschiede in der THG-Intensität erfasst werden. Allerdings können Energieträger nicht bewertet werden, wenn ihre spez. Emissionen sehr klein sind (Biomasse, Strom in der Zukunft, ...)
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Unterstützt den Weggang von fossilen Brennstoffen stärker. Details sind abhängig von Ausgestaltung der zweiten Anforderung. Lenkungswirkung schwindet jedoch bei niedrigen THG-Faktoren der Energieträger.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Kein Unterschied zum bestehenden Verfahren bzw. abhängig von Ausgestaltung der zweiten Anforderung bzw. von der Entscheidung für oder gegen ein Referenzgebäudeverfahren.
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	Kombination mit einer Anforderungsgröße, die die Mindesteffizienz des Gebäudes bewertet, ist auf Grund der beschriebenen Besonderheiten bei Brennstoffen mit niedrigem THG-Faktor erforderlich, um einen sparsamen Umgang mit erneuerbaren Ressourcen zu ermöglichen.
Eignung für Referenzgebäude	Gleichermaßen geeignet für Referenzgebäudeansatz oder anderes Konzept
Verständlichkeit für Endkunden	Gute Verständlichkeit, da THG die unmittelbare Zielgröße sind und in der öffentlichen Diskussion an Aufmerksamkeit gewinnen. Herleitung der THG-Faktoren muss möglichst transparent und nachvollziehbar sein.
Wirkung auf Baukosten	Bei Gebäuden mit niedrigen X_{CO_2aq} (Biomasse, KWK) ergeben sich geringere Kosten für das Gebäude, da der THG-Wert leicht eingehalten wird. Die Höhe von THG lässt keinen Rückschluss auf Energiekosten zu. Mittelbar wird den Endkunden die Verbindung von CO_2 -Preis und Gebäudeenergieverbrauch vor Augen geführt.
Eignung für Neubau und Bestand?	Die Anforderungsgröße ist grundsätzlich für die Bewertung von Neubau und Bestand gleichermaßen geeignet. Allerdings ergeben sich für Bestandsgebäude durch die hohen Emissionen von Gas und Öl sehr schlechte Ergebnisse.
Weitere Vorteile	Steuerungseffekt hin zu nachhaltigen Energieträgern bzw. Energieformen. Anforderungsgröße THG-Emissionen erleichtert den Vergleich der THG-Vermeidungskosten mit Maßnahmen in anderen Sektoren.
Weitere Nachteile	(Geringe) Umstellung bei Planern, weil eine neue Anforderungsgröße eingeführt wird. Dynamik im Strombereich KWK-Allokation schwierig fehlende Bewertung Nachhaltigkeit/Verfügbarkeit bei Erneuerbaren

Bewertung	Erläuterung
	bei Detailbetrachtung Unterschiede zum Quellenprinzip im KSG
Bemerkungen	Die Kompatibilität mit den Anforderungen der zukünftigen EPBD ist sicherzustellen.
Empfehlung	Weiteranalyse wird empfohlen.

3.6.4 Bewertete Endenergie

Beschreibung. Der Endenergieeinsatz kann anstelle mit f_p mit definierten Bewertungsfaktoren $f_{\text{Bewertung}}$ bewertet werden, die aus verschiedenen ökologischen oder ökonomischen Erwägungen definiert werden, beispielsweise Klima- und Ressourceneffizienz ($Q_{\text{bewertet}} = Q_f \cdot f_{\text{Bewertung}}$). Das Ergebnis dieser Berechnung ist eine bewertete Endenergie.

In einer Energiesystemanalyse werden volkswirtschaftlich optimale Zielpfade aufgezeigt. Die Faktoren $f_{\text{Bewertung}}$ werden dann so definiert, dass in Gebäuden verwendete Energieträger, die in diesem volkswirtschaftlich optimalen Zielpfad sinnvoll sind, bevorzugt werden. Die $f_{\text{Bewertung}}$ könnten dann dementsprechend zielkompatibel austariert werden. Dabei können die $f_{\text{Bewertung}}$ auch Bezug auf f_p , THG-Intensität, Nutzungseffizienz oder andere Schutzgüter nehmen. Dieses Verfahren wird beispielsweise in der Schweiz, in Dänemark oder in Frankreich angewendet.

Tabelle 18: Beispiele für bewertete Endenergie

	EED	Dänemark	Klima/ Ressourcen-orientiert	Begründung
PV gebäudenah	2,5		1,0	
Strom Haushalt	2,5	1,9	1,3	Netzverluste, Back-up-Kraftwerke
Strom Heizen	2,5	1,9	1,5	Netzverluste, Back-up-Kraftwerke, teilweise saisonale Speicherung
Gas	1	1	1,7	Heute: THG. Zukunft: Strom+Elektrolyse+PtG-Produktion
Öl	1	1	2,0	Heute: THG. Zukunft: Strom+Elektrolyse+PtL-Produktion
Holz	1	1	1,0, ggf. mit Budget	Klimafreundlich, aber ressourcenknapp
Fernwärme ohne Trafoplan	1	0,85	1,5	
Fernwärme mit Trafoplan oder > 30 % EE	1	0,85	1,3	
Fernwärme > 70 % EE	1	0,85	1,0	Ggf. linear skalieren mit EE-Anteil

Bevor eine bewertete Endenergie mit den Faktoren $f_{\text{Bewertung}}$ eingeführt werden kann, müssen die $f_{\text{Bewertung}}$ bestimmt und veröffentlicht werden. Stehen die Faktoren bereit, entspricht die weitere Berechnung dem aktuellen Verfahren mit nicht-erneuerbaren PE-Faktoren. Dieses Vorgehen kann zu einem langwierigen Diskussionsprozess zur Festlegung der Faktoren führen.

Tabelle 19: Bewertung der Umweltgröße „Bewertete Endenergie“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	In Deutschland: keine. In anderen Ländern, bspw. Dänemark und Schweiz, werden Pauschalfaktoren schon lange eingesetzt.
Komplexität der Umsetzung	Vorbereitend müssen die $f_{\text{Bewertung}}$ bestimmt und veröffentlicht werden. Stehen die Faktoren bereit, entspricht die weitere Berechnung dem aktuellen Verfahren mit nicht-erneuerbaren PE-Faktoren. Langwieriger Diskussionsprozess zur Festlegung der Faktoren zu erwarten
Wirkung auf Technologie	Das Verfahren ist technologieoffen in dem Sinn, dass jede Technologie die dem Zielpfad entsprechende Chance eingeräumt wird. Eine Technologieoffenheit im Sinne: "Jede Technologie kommt zum Zug" würde der Zielerreichung widersprechen.
Zielkompatibilität/ -geschwindigkeit	Durch die Definition der $f_{\text{Bewertung}}$ aus den Zielpfaden ist die Zielkompatibilität ein entscheidender Vorteil dieses Verfahrens.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	anlagentechnisch perfekt, baulich bei geeigneten Werten bessere Lenkungswirkung als f_p
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	abhängig von gewählter Anforderungssystematik
Mögliche oder bevorzugte Kombinationen mit zweiter Anforderungsgröße	Kombination mit einer Anforderungsgröße, die die Mindesteffizienz des Gebäudes bewertet, ist empfehlenswert. Zweite Anforderungsgröße kann u.U. entfallen, wenn minimale $f_{\text{Bewertung}}$ nicht zu klein.
Eignung für Referenzgebäude	Gleichermaßen geeignet für Referenzgebäudeansatz oder anderes Konzept
Verständlichkeit für Endkunden	Erklärungsbedürftig, da "politisch definiert". Nach Umstellungszeit gut verständlich, sofern stabil.
Wirkung auf Baukosten	Abhängig von Anforderungshöhe und politischen Setzungen für PER der fossilen Brennstoffe, grundsätzlich jedoch Steigerung der Investitionskosten, da anders als bei bisherigem Q_p erneuerbare nicht zur Erfüllung der Anforderungen beitragen.
Eignung für Neubau und Bestand?	Die Anforderungsgröße ist für die Bewertung von Neubau und Bestand gleichermaßen gut geeignet.
Weitere Vorteile	-
Weitere Nachteile	Eigentliches Problem ist die Festlegung der Faktoren.
Bemerkungen	Die $f_{\text{Bewertung}}$ können sich auch an den PER-Faktoren orientieren.
Empfehlung	Zur Weiterbetrachtung empfohlen.

3.6.5 Absehbar erneuerbare Versorgung bzw. „Zero carbon ready“

Beschreibung. Eine weitere Möglichkeit ist es, eine Anforderung zu definieren, die keine Berechnung erfordert, sondern eine Qualität beschreibt. An Gebäude kann die Anforderung gestellt werden, dass sie „erneuerbar“ beheizt werden sollen. Damit verlagert sich die Bewertung auf die Frage, was als „erneuerbar“ definiert wird. In Frage kommen bspw. feste Biomasse, Flüssigbiomasse, gasförmige Biomasse, Umweltwärme und Sonnenenergie. Wärme aus Wärmenetzen ist nicht unmittelbar „erneuerbar“. Sie muss aber, ggf. durch Instrumente außerhalb des GEG, ebenfalls dekarbonisiert werden. Wärme aus Strom ist ebenfalls derzeit noch nicht vollständig erneuerbar. Durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist allerdings der Ausbaupfad für EE im Strombereich bereits vorgezeichnet. Daher könnte in einer Variante der Anforderung auch „absehbar erneuerbare Wärme“ zugelassen werden. Dies wäre dann Wärme aus Wärmenetzen und Strom.

Bewertung. Eine solche Umstellung wäre eine grundsätzliche Neuregelung. Es müssten verschiedene Detailregelungen getroffen werden, um die Anforderung zu konkretisieren. Grundsätzlich wäre eine „erneuerbare Versorgung“ aber regelungstechnisch einfach umsetzbar. Bei gasförmigen Brennstoffen und Ölen biogenen Ursprungs treten hingegen neue Komplexitäten bzgl. des Vollzugs auf.

Zur Gesamtbewertung des Gebäudebestands eignet sich die Kenngröße nur eingeschränkt, da sie nur einen Teilaspekt des Gebäudes betrachtet.

Tabelle 20: Bewertung der Umwelthanforderung „absehbar erneuerbar“

Bewertung	Erläuterung
Aktuelle Anwendung	Die in das GEG integrierten Anforderungen eines Mindestanteils an EE-Wärme sind eine Variante dieser Anforderung. Allerdings sind die Anforderungen stark technologiespezifisch diskutiert und können mit Effizienz-Ersatzmaßnahmen erfüllt werden.
Komplexität der Umsetzung	Eine solche Umstellung wäre eine grundsätzliche Neuregelung. Es müssten verschiedene Detailregelungen getroffen werden. Grundsätzlich wäre dies aber regelungstechnisch einfach umsetzbar. Bei gasförmigen Brennstoffen und Ölen biogenen Ursprungs treten hingegen neue Komplexitäten bzgl. des Vollzugs auf.
Wirkung auf Technologie	Grundsätzlich technologieoffen, allerdings nicht brennstoffoffen. Die Anforderung "erneuerbar" ist allerdings binär (ja/nein). Mitunter dürften weitere Nebenanforderungen erforderlich sein, z. B. an die Biomasse oder an Stromheizungen. Auch ist nicht zwangsläufig sichergestellt, dass flankierende Instrumente den Strom und Wärme aus Wärmenetzen dekarbonisiert werden. Dies müsste daher synchron geändert werden. Wenn man sich von der 1/0-Bewertung abkehrt, landet man wieder bei anderen Bewertungsverfahren.
Zielkompatibilität/ -geschwindigkeit	Hohe Zielkompatibilität, insbesondere wenn Nebenanforderungen die Nachhaltigkeit der EE sicherstellen. Im Neubau ist eine Umsetzung schnell möglich. Alternativ kann man aber im Neubau auch fossile Heizungen einfach verbieten.
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	Keine Wechselwirkungen mit der Gebäudehülle und keine positiven Auswirkungen auf Gebäudekonzept. Im Gegenteil, wenn es neben der Effizienzanforderung keine weitere Hauptanforderung gibt, bleiben wesentliche Gegenstandsbereiche, die bislang durch Q_p erfasst waren, unreguliert.
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	Wird durch die Größe nicht adressiert, aber auch nicht negativ beeinflusst.
Mögliche oder bevorzugte Kombinationen mit zweiter Anforderungsgröße	Zwingend ist die Kombination mit einer Effizienzgröße notwendig, z. B. $Q_{h,b,0}$. Evtl. müssen aber auch weitere Anforderungen an Effizienzbereiche gestellt werden, wie die Warmwasserbereitung, Kühlung, Beleuchtung (NWG) usw.
Eignung für Referenzgebäude	Referenzgebäude wird durch Vorfestlegung zulässiger Anlagentechnik in Teilen obsolet
Verständlichkeit für Endkunden	Sehr verständlich
Wirkung auf Bezahlbarkeit	EE-Technologien, insbesondere WP, sind heute im Neubau oft schon kostenoptimal.
Eignung für Neubau und Bestand?	eher für Neubau geeignet, im Bestand geht eine solche 1/0-Bewertung nicht. Hier ist ein schrittweises Vorgehen erforderlich.
Weitere Vorteile	-
Weitere Nachteile	Verhindert je nach Ausgestaltung mindestens ökonomisch sinnvolle Teillösungen, es sei denn, es wird großzügig ausgelegt.
Empfehlung	Die Anforderung kann als Anforderung kommuniziert, dann aber über ein anderes Verfahren, z. B. die Pauschalfaktoren, operationalisiert werden. Anstelle der EE-Anforderungen könnten auch fossile Lösungen verboten werden.

3.6.6 Empfehlung für das GEG

In der Gesamtschau der möglichen Umwelanforderungen schlagen wir vor, **als neue Hauptanforderung des GEG die THG-Emissionen aus dem Betrieb auszuwählen**. In der Gesamtschau überzeugt diese Anforderung:

- Sie bildet unmittelbar das Schutzgut ab.
- Sie ist rechentechnisch gut umsetzbar und als Kenngröße eingeführt.
- Und sie bewirkt einen Steuerungseffekt hin zu nachhaltigen Energieträgern.

Der wesentliche Nachteil der THG-Emissionen ist der durch die zunehmende Dekarbonisierung nachlassende Steuerungseffekt bzgl. des Ziels der Energieeinsparung. Aus diesem Grund schlagen wir vor, **eine zweite Anforderungsgröße zu definieren: die Endenergie**. Sie dient gewissermaßen als „Sicherheitsnetz“, wenn u. a. der Stromfaktor auf sehr niedrige Werte absinkt, um weiterhin eine effiziente Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien zu gewährleisten und zugleich die Endkundinnen und -kunden vor hohen Energiekosten zu schützen. Die Endenergieanforderung ist auch in Kombination mit Biomasse als Brennstoff sinnvoll, um einen effizienten Umgang mit der Ressource sicherzustellen.

Tabelle 21: Übersicht über die Bewertungen der Umweltkenngrößen

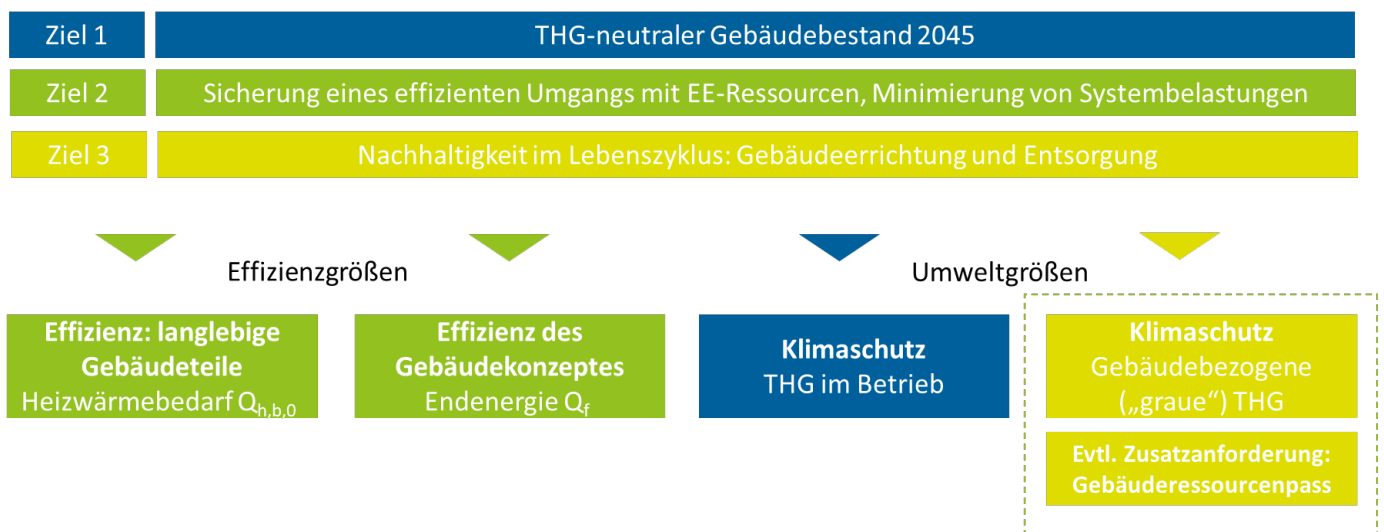
Anforderungsgröße	q _P	PER	q _{bewertet}	THG	Erneuerbar
Komplexität der Umsetzung	+	-	0	+	-
Wirkung auf Technologie	0	+	+	+	-
Zielkompatibilität/-geschwindigkeit	-	+/-	+	+	+
Beitrag zu sinnvollen Baukonzepten	-	+	+	0/+	-
Auswirkungen auf architektonischen Entwurf	0	0	0	0/+	-
Zusammenwirkung mit anderen Anforderungsgrößen	0	0	+	0	0
Eignung für Referenzgebäude	+	+	+	+	0
Verständlichkeit für Endkunden	0	-	-/+	+	+
Wirkung auf Baukosten	0	-	0	0	0
Eignung für Neubau und Bestand?	+	-	+	+	-
Empfehlung	Nein	Als Input zur Bestimmung von Q_{bewertet}	Ja, mit $f_{\text{bewertet}} = 1$	Ja	Operationalisiert über eine der vorangehenden Anforderungen

3.7 Empfehlung für eine Kombination von Anforderungsgrößen

Insgesamt ergibt sich damit der in Abbildung 6 dokumentierte Vorschlag für die neuen Anforderungsgrößen des GEG. Die Anforderungen an die gebäudebezogenen („grauen“) Emissionen werden im Folgeprojekt erarbeitet.

Für die Effizienzgröße, die eine langlebige Gebäudehülle anspricht, wird der Heizwärmebedarf $Q_{h,b,0}$ vorgeschlagen. Die Umweltgröße, die das Schutzgut Klima anspricht, ist THG im Betrieb. Beide Größen werden ergänzt um die Effizienzgröße Endenergie Q_f , die das gesamte Gebäudekonzept betrachtet. Mit diesen Größen können die angestrebten Ziele und Neuerungen des GEG erfüllt werden.

Abbildung 6: Ableitung der drei bzw. vier Anforderungsgrößen für ein neues GEG



3.8 Weitere Effizienzanforderungen

Ausgehend von der Hypothese, dass als Hauptanforderungsgrößen $Q_{h,b,0}$ Endenergie und Treibhausgasemissionen definiert werden, stellt sich die Frage, in wieweit weitere, technologie- oder komponentenspezifische Effizienzanforderungen Eingang in das GEG finden müssen. Eine Reihe von Effizienzanforderungen gibt es auch bereits im GEG.

Zur Einordnung des Erfordernisses zusätzlicher Effizienzanforderungen werden zunächst die Anteile der einzelnen Bilanzteile am gesamten Endenergiebedarf analysiert. Die Bereiche Heizung und Trinkwarmwasserversorgung werden dabei exemplarisch am Beispiel eines freistehenden Einfamilienhauses mit folgenden Randbedingungen beleuchtet:

- baulicher Wärmeschutz entsprechend der Mindestanforderung für das Effizienzhaus 55
- Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit solarer Trinkwassererwärmung
- Fußbodenheizung mit Systemauslegungstemperatur 35/28°C
- Lüftung: Fensterlüftung (V1) oder Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (V2)

Die Berechnung erfolgt mit Standardwerten der DIN V 18599:2018-09. Folgende zwei Abbildungen enthalten die resultierenden Anteile der jeweiligen Bilanzteile an dem gesamten Endenergiebedarf inkl. der Hilfs- und Umweltenergie in dem betrachteten Einfamilienhaus. Unter Berücksichtigung der Fensterlüftung weist der Nutzenergiebedarf Heizung einen Anteil von über 53 % am gesamten Endenergiebedarf aus. Die Anteile der Trinkwarmwasser-Verteilverluste und des Trinkwarmwasser-Nutzenergiebedarfs liegen bei jeweils 16 % und 10 % (vgl. Abbildung 7). Verfügt das Gebäude dagegen über eine Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, sinkt der Anteil des Nutzenergiebedarfs Heizung auf etwa 42 % und die Anteile der Trinkwarmwasser-Verteilverluste und des Trinkwarmwasser-Nutzenergiebedarfs erhöhen sich auf jeweils 21,6 % und 13,5 %. Die Energieaufwendungen für die Wohnungslüftung werden mit 3 % am gesamten Endenergiebedarf quantifiziert (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 7: Anteile der jeweiligen Bilanzteile an der gesamten Endenergie (inkl. Hilfsenergie und Umweltenergie) am Beispiel eines EFH mit Fensterlüftung (V1)

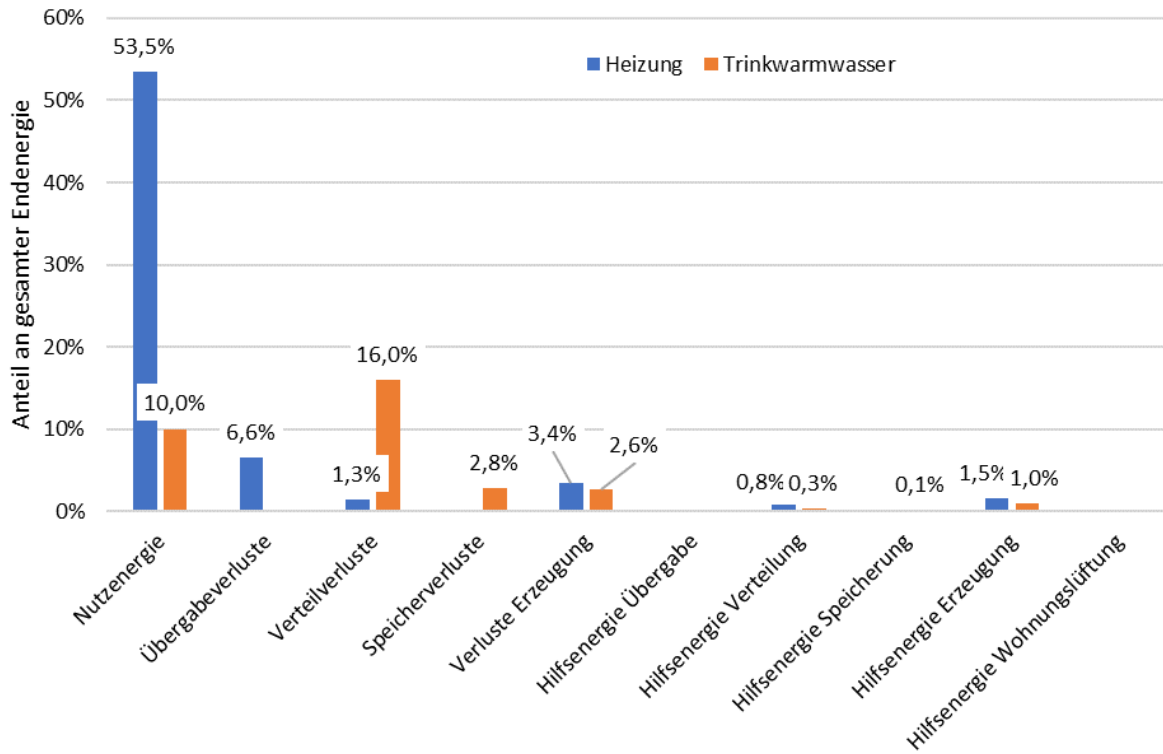
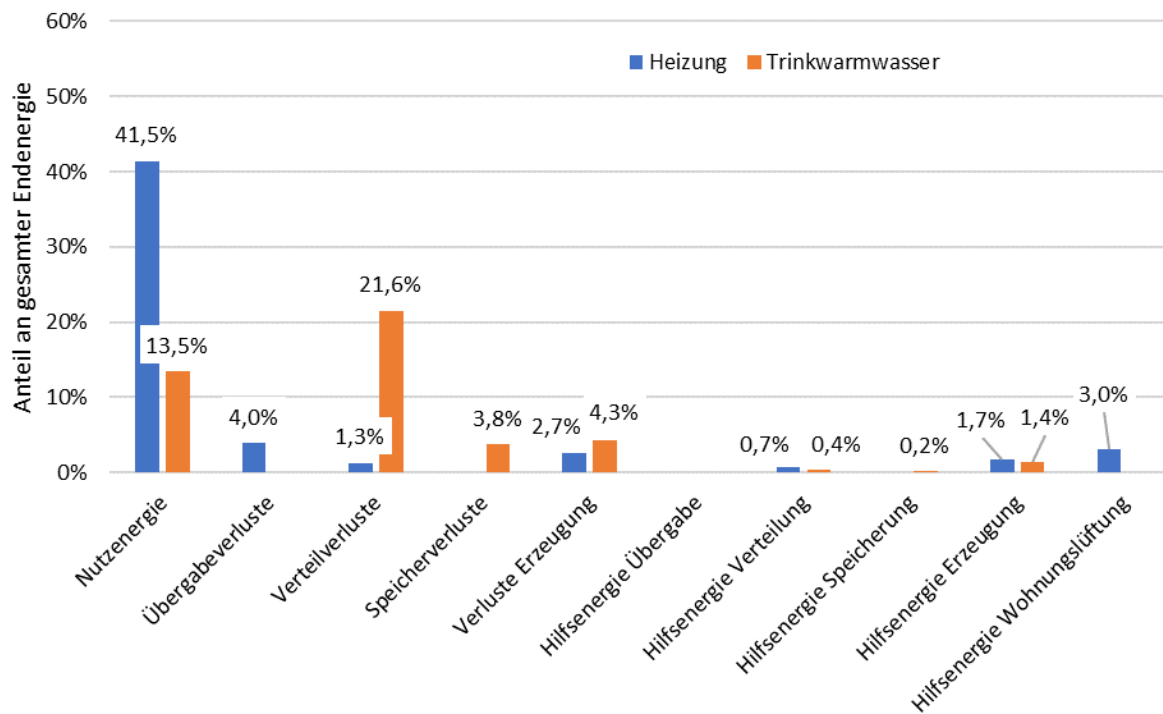


Abbildung 8: Anteile der jeweiligen Bilanzteile an der gesamten Endenergie (incl. Hilfsenergie und Umweltenergie) am Beispiel eines EFH mit einer zentralen Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (V2)



Eine analoge quantitative Auswertung für die Bereiche Beleuchtung und Kühlung in einem Nichtwohngebäude wird im Rahmen der Ausarbeitung nicht vorgenommen, da die Bewertung zu sehr von individuellen Verhältnissen abhängig ist. Auf zusätzliche Einzelanforderungen für die beiden Prozessbereiche kann dabei weitgehend bei zeitgemäßer Referenzausführung von Gebäude und Anlagentechnik verzichtet werden.

Aufbauend auf den durchgeführten Analysen und Diskussionen wird in Tabelle 22 das Erfordernis zusätzlicher technologie- oder komponentenspezifische Effizianzorderungen bewertet. Grundsätzlich gilt, dass bei sinnvoll festgelegten Anforderungsgrößen und -höhen auf einige zusätzliche Einzelanforderungen verzichtet werden kann und bei Effizienzbereichen, die über die Anforderungsgrößen nicht ausreichend adressiert werden, zusätzliche Anforderungen notwendig sind. Ob ein Teil der bisherigen anlagentechnischen Einzelanforderungen entfallen kann, hängt davon ab, wie die Anforderungsgrößen festgelegt werden.

Tabelle 22: Bewertung des Erfordernisses zusätzlicher Effizianzorderungen

Erforderliche weitere Nebenanforderungen für den Neubau bei Wahl der Anforderungsgrößen $Q_{h,b,0}$ Endenergie und THG	
Hülle	
U-Werte	Zusätzliche Anforderungen sinnvoll, wenn Lüftungsanlage mit WRG vorhanden und diese in die Berechnung von $Q_{h,b,0}$ einfließt und die Referenzanlage ohne Lüftung mit WRG definiert wird
Luftdichtheit	Zusätzliche Anforderungen sinnvoll, wenn Lüftungsanlage mit WRG vorhanden
Wärmebrücken	Keine zusätzliche Einzelanforderungen notwendig bei sinnvoll festgelegten Anforderungsgrößen
Lüftungsverluste	Keine zusätzliche Einzelanforderungen notwendig bei sinnvoll festgelegten Anforderungsgrößen
Heizung	
Temperaturniveau Vorlauf	Zusätzliche Anforderung zur Erreichung NT-Readiness erforderlich, ggf. bei Wärmepumpen schärfere Anforderung
Elektronische Regler bei Heizkörpern	Keine zusätzliche Einzelanforderungen notwendig bei sinnvoll festgelegten Anforderungsgrößen
Begrenzung der Rohrführung in unbeheizten Bereichen	Je nach Anforderungshöhe u. U. bei Wärmepumpen sinnvoll
Dämmforderung Pufferspeicher	Keine zusätzlichen Anforderungen notwendig
Wärmeerzeuger	Kessel mit fossilen Brennstoffen im Neubau ausschließen, sonstige Verbrennungsheizungen im Neubau in Abhängigkeit vom Gebäude limitieren (z.B. Wohngebäude nicht zulässig, nur bestimmte NWG/große WG anteilig erlaubt). (Bestand wird durch 65%-EE geregelt)
Begrenzung Direktstromheizung	Bei sinnvoll festgelegten Anforderungsgrößen keine weitere Begrenzung erforderlich.
Verbot Nachtspeicherheizung	Bei sinnvoll festgelegten Anforderungsgrößen keine weitere Begrenzung erforderlich.
Dämmung von Rohrleitungen	Ja, analog bisheriger Regelung
Effizienz der Umwälzpumpe	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da durch EEI bereits geregelt.

Erforderliche weitere Nebenanforderungen für den Neubau bei Wahl der Anforderungsgrößen $Q_{h,b,0}$ Endenergie und THG	
Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe	Nebenanforderung denkbar, Einfluss jedoch gering
Sonstige Anforderungen	Ob ein Teil der bisherigen anlagentechnischen Einzelanforderungen entfallen kann, hängt davon ab, wie die Anforderungsgrößen festgelegt werden.
Lüftung	
Pflicht zu Blower Door	Siehe Luftdichtheit
WRG Lüftung	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da bereits über $Q_{h,b,0}$ adressiert.
Hilfsenergie Lüftung	Keine zusätzliche Anforderung notwendig.
Vorschreiben der Bedarfsregelung	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da bereits über $Q_{h,b,0}$ adressiert.
Warmwasser	
Dusch-/WW-WRG: Einbaupflicht	Keine zusätzliche Anforderung notwendig
Dusch-/WW-WRG: Bonifizierung	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da bereits in Endenergie und THG adressiert.
Begrenzung des Zirkulationseinsatzes	Bei der weiteren Präzisierung des zukünftigen Referenzgebäudes ist zu prüfen, in welchen Gebäuden auf die Zirkulation verzichtet werden kann.
Dämmung von Rohrleitungen	Ja, mindestens analog bisheriger Regelung, Praktikabilität einer Verschärfung zu prüfen.
Effizienz der Zirkulationspumpe	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da Einfluss gering.
Leistungsaufnahme Zirkulationspumpe	Nebenanforderung denkbar, Einfluss jedoch gering
Bedarfsregelung Zirkulationspumpe	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da Einfluss sehr gering.
Dämmanforderung WW-Speicher	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da bereits in Endenergie und THG adressiert und Vorgaben in ErP vorhanden
Effizienz Erzeuger	Keine zusätzliche Anforderung notwendig, da bereits in Endenergie und THG adressiert und Vorgaben in ErP vorhanden
Beleuchtung	
Tageslichtnutzung	Keine zusätzliche Anforderung notwendig
Systemlichtausbeute	Nicht erforderlich bei zeitgemäßer Referenzanlage
Leuchteneffizienz	Nicht erforderlich bei zeitgemäßer Referenzanlage
Automatisierte Regelung	Nicht erforderlich bei zeitgemäßer Referenzanlage
Kühlung und sommerlicher Wärmeschutz	
Nutzkältebedarf	Nicht erforderlich bei zeitgemäßer Referenzausführung von Gebäude und Anlagentechnik
Übergabe	Keine, da keine technischen Regeln zur Bewertung verfügbar
Kälteverteilkreis	Nicht erforderlich bei zeitgemäßer Referenzanlage, ggf. Betriebsweise der Pumpen anpassen

Erforderliche weitere Nebenanforderungen für den Neubau bei Wahl der Anforderungsgrößen $Q_{h,b,0}$ Endenergie und THG

Erzeuger	Nicht erforderlich bei zeitgemäßer Referenzanlage
Inbetriebnahme, Zählereinbau/Monitoring	Möglichst vorschreiben, da wesentliches Potenzial, allerdings außerhalb bisheriger GEG-Logik

3.9 Ableitung konkreter THG-Faktoren

Zur Bestimmung der THG-Faktoren für die Berechnung der Umweltgröße müssen, analog zu den Primärenergiefaktoren, diese abgeleitet werden, die als spezifische Emissionsfaktoren die mit der Nutzung einer kWh zusammenhängenden Treibhausgase durch Bereitstellung und Nutzung (z. B. Verbrennung) beschreiben. Diese Vorarbeit wurde für die meisten Energieträger bereits in ifeu et al. (2018) geleistet. Die meisten dieser Faktoren entsprechen noch den aktuellen Gegebenheiten und können aus Anlage 9 GEG entnommen werden. Einige Faktoren müssen jedoch aktualisiert bzw. methodische Besonderheiten beachtet werden. An dieser Stelle werden erforderliche Veränderungen beschrieben.

3.9.1 Strom

Im Stromsektor ergibt sich durch die hohe Ausbaugeschwindigkeit erneuerbarer Energien eine große Dynamik. Allerdings führt der Ausstieg aus der Atomenergie und die Neubewertung des Betriebs von Kohlekraftwerken in Hinblick auf den Ukraine-Krieg zu einer Verzögerung des Rückgangs.

Zur Bestimmung der PEF- und THG-Werte wurde in dieser Studie in zwei Schritten vorgegangen:

1. Bestimmung der Energieträgerzusammensetzung auf Basis der Prognos-Kraftwerkssimulation

Zunächst wird auf Basis des Prognos-Kraftwerksparkmodells für ein 80% EE Strom bis 2030 (Ausbaupfad Koalitionsvertrag) die monatscharfe Aufteilung des Kraftwerksparks auf die einzelnen Energieträger berechnet. Dieses Szenario verfolgt einen Anteil von 80 % erneuerbarer Energien im Jahr 2030.

Neben dem über das Jahr gemittelten Strommix wird zusätzlich für das Stützjahr 2025 der Kraftwerkspark in der Heizperiode 1.10. bis 30.4. gemittelt, um zu überprüfen, welche Abweichungen sich dabei ergeben.

Tabelle 23: Energieträgeranteil der Modellierung des Strommixes in einem 80 %-EE-Szenario 2030 (Quelle: eigene Berechnungen Prognos)

Strom	2022	2025	2025 Heizstrom	2028	2030
Nettostromerzeugung in TWh	541	521		616	
Import in TWh		38		5	
Export in TWh					27
Netto-Import in %					
Energieträgeranteile Netto					
Steinkohle	15,6%	7,6%	9,2%	3,6%	2,1%
Braunkohle	16,2%	2,9%	4,6%	1,6%	0,4%
Heizöl	0,8%	0,5%	0,5%	0,2%	0,0%
Gas	10,4%	21,8%	24,2%	18,5%	16,8%
Kernkraft	5,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Wasser	3,8%	4,0%	3,1%	3,4%	2,8%
Wind	26,0%	35,0%	38,6%	40,6%	45,5%
PV	10,9%	17,5%	9,3%	23,0%	24,5%
Biomasse	1,8%	2,2%	2,1%	2,1%	2,0%
Biogas	5,2%	5,0%	5,0%	4,0%	3,2%
Abfallverbrennung	3,4%	3,5%	3,4%	3,0%	2,7%

2. Berechnung der Lebenszyklus-Faktoren mit dem ifeu-Umberto-Strommodell

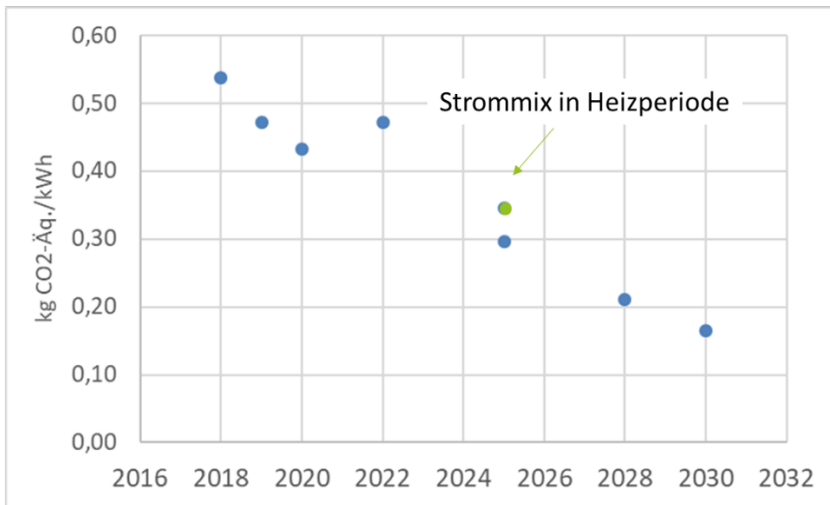
Die Anteile der Kraftwerkssegmente wurden monatlich aufgelöst an den ifeu-Strommaster übergeben, das basierend auf den Anteilen der Energieträger, der Herkunftsländer, der Nutzungsgrade und anderer technischer Parameter die Primärenergie- und THG-Faktoren inklusive Vorkette ausrechnet. Das Umberto-basierte Modell, das die Stromerzeugung eines Kraftwerksparkes nachbildet, wurde im Jahre 2001 am ifeu entwickelt und wurde seither regelmäßig angepasst und aktualisiert. Das Netzwerkmodell umfasst die grundlegenden Kraftwerkstypen und die zugehörigen Rohstoff-Vorketten. Es stellt eine flexible Möglichkeit dar, verschiedene Konfigurationen von Stromerzeugungsnetzwerken abzubilden, z.B. nationale oder regionale Stromnetze, firmen- oder anwendungsbezogene Netzwerke (z.B. Bahnstrom) oder andere spezielle Szenarien einschließlich zukünftige Energieträger-Zusammensetzungen oder ausgewählter Marginal-

Mixe. Die Parametrisierung des Modells umfasst die Energieträger-Zusammensetzung, die Herkunft der Energieträger, Eigenverbräuche der Kraftwerke, Netzverluste sowie technische Kraftwerksparameter wie Wirkungsgrade, Abgasreinigung, Wärmeauskoppelung etc.

Das Kraftwerksparkmodell wird regelmäßig dazu verwendet, die Umweltauswirkungen der Stromerzeugung in Deutschland sowie in anderen europäischen und nicht-europäischen Ländern zu quantifizieren. Dazu werden aktuellste Daten von EUROSTAT und von der Internationalen Energieagentur (IEA) verwendet. In gleicher Weise werden die Umweltauswirkungen von regionalen Stromnetzen (z.B. EU28 oder UCTE) berechnet. Die Aktualisierung erfolgt jährlich für die Stromerzeugung europäischer Länder und alle zwei Jahre für Länder außerhalb Europas. Details des ifeu-Strommasters sind hier nachzulesen: <https://www.ifeu.de/projekt/stromerzeugungkraftwerkspark-modell/>

Die sich ergebenden THG-Faktoren für Strom auf Niederspannungsebene sind in Abbildung 9 dargestellt.

Abbildung 9: Ergebnisse der Berechnung des ifeu-Strommasters auf Basis des Prognos 80 % EE-Szenarios (Quelle: eigene Berechnungen ifeu)



Die Festlegung eines Strom-THG-Faktors in einer sehr dynamischen Entwicklungsphase ist schwierig. Ohnehin sollte eine **regelmäßige Überarbeitung** erfolgen. Zu erwägen ist, hierfür im Gesetz eine Öffnungsklausel vorzusehen.

Wesentlich für die Höhe ist die Grundsatzentscheidung, mit welcher Zeitperspektive die Festlegung getroffen wird.

- In der Vergangenheit wurde der jeweils aktuellste verfügbare Wert für einen Stromfaktor festgelegt – die 560 g/kWh aus Anlage 9 GEG beziehen sich auf das Jahr 2018.
- Damit wird allerdings nicht die tatsächliche Bilanz der stromverbrauchenden Komponenten abgebildet. Denn diese erstreckt sich über die typischen Lebensdauern der Komponenten. Es wäre alternativ daher auch denkbar, einen Mittelwert über die Betriebsdauer, oder in Annäherung daran, einen zukunftsorientierten Wert, z. B. des Jahres 2030, heranzuziehen.
- Auf der anderen Seite unterliegt die Entwicklung des Strommixes zahlreichen exogenen Faktoren, die nicht langfristig vorhergesagt werden können. So kann durchaus von einer verzögerten Ausphasung von Kohlekraftwerken im Zusammenhang mit dem Ukrainekrieg ausgegangen werden.

Dafür sollte man sich vor Augen halten, dass die Bewertung einerseits auf Neubauten angewendet wird: dort erfüllt sie den Zweck, eine zielkompatible Planung anzureizen. Allerdings wird die Bewertung auch zur Analyse des Gebäudes im gegenwärtigen Stand herangezogen, beispielsweise im Energieausweis und für Bestandsgebäude. Die Festlegung des Faktors darf daher auch nicht zu weit in die Zukunft reichen.

Vor dem Hintergrund dieser unterschiedlichen Ansprüche an die Bewertung wird vorgeschlagen, mit der Festlegung des Faktors eine vorsichtig vorwärtsgewandte Betrachtung einzunehmen. Auf Grund der Unsicherheiten bezüglich des Kohleausstiegs und der reduzierten Stromerzeugung aus Erdgas schlagen wir einen **Faktor von 350 g/kWh** vor, der **alle drei Jahre aktualisiert** werden sollte.

3.10 Bewertung von Wärmepumpen und Effizienzanforderungen an Wärmepumpen

Da zukünftig hohe bis sehr hohe Anteile von elektrischen Wärmepumpen für die Wärmebereitstellung im Gebäudesektor erwartet werden, hat diese Technologie einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige Architektur der Energiesystems. Einerseits müssen die Energiemengen von erneuerbaren Erzeugungsanlagen bereitgestellt und über die Netze transportiert werden, andererseits aber auch das Gesamtsystem - anders als bisher – auf kritische Situationen in Bezug auf Erneuerbaren Energien-Angebot und Nachfrage ausgelegt werden. Da elektrischen Wärmepumpen aus Sicht des Gebäudesektors hier eine zentrale Rolle zukommt, werden die Herausforderungen und mögliche Anforderungen diesbezüglich im Folgenden skizziert.

3.10.1 Ausgangslage: Lastsituation von Wärmepumpen im deutschen Kraftwerkspark

Energiesystemstudien wie z.B. die dena Leitstudie 2, BMWi/BMWK-ISI Langfristszenarien, Klimaneutrales Deutschland 2045, BDI Klimapfade 2.0 gehen trotz starken Ausbaus von Wärmepumpen in Summe von einem, verglichen mit anderen Sektoren nur gering steigenden (+10%) oder sogar sinkenden Strombedarf im Gebäudesektor aus. Effizientere Beleuchtung und Elektrogeräte sowie ein Rückgang von Direktstromheizungen kompensieren den Mehrbedarf durch Wärmepumpen entweder teilweise oder komplett über das gesamte Jahr betrachtet.

Die Struktur des Strombedarfs von Wärmepumpen ist durch die stark saisonale und temperaturabhängige Nachfrage geprägt. Etwa 75 % des Jahresbedarfs entfallen auf die Monate Oktober bis März. Daher kommt es trotz des nur geringfügig veränderten Strombedarfs des Gebäudesektors zu Situationen, in denen der Strombedarf des Gebäudesektors höher liegen wird als heute.

Aktuell sind etwa eine Million Wärmepumpen mit einem Strombedarf von knapp 5 TWh im Jahr im Gebäudesektor installiert. Diese Größenordnung spielt aus Stromsystemsicht kaum eine Rolle. Bei 5 bis 6 Millionen Wärmepumpen im Jahr 2030 und langfristig 12 bis 16 Millionen Wärmepumpen steigt die Bedeutung für das Stromsystem an. Daher wird es an Bedeutung gewinnen, dass Wärmepumpen möglichst systemdienlich eingesetzt werden können. Sie sollten möglichst dann viel Strom verbrauchen, wenn der Anteil erneuerbarer Energie hoch ist. In Zeiten mit geringer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sollten sie ihren Einsatz so steuern können, dass über alle Stromverbraucher hinweg, die Residuallast geglättet wird. So können die notwendige vorzuhaltende Kraftwerksleistung und der Einsatz von Spitzenlast-Kraftwerken verringert werden.

Um eine zeitliche Flexibilität ohne Komforteinbußen erreichen zu können, ist neben dem Zustand der Gebäudehülle ein möglichst großer Wärmespeicher nützlich. Eine hohe Leistung der Wärmepumpe ist aus Stromsystemsicht vorteilhaft und erhöht die Flexibilität, da weniger Zeit benötigt wird, um den Wärmespeicher zu laden. Trotz der geringeren Effizienz kann auch der Einsatz von Heizstäben sinnvoll sein – insbesondere

zum Beladen des Speichers in Situationen, in denen die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien abgeregelt werden würde. Dieses Flexibilitätspotenzial zu erschließen, setzt zeitlich variable Strompreise und Netzentgelte voraus oder benötigt andere Maßnahmen, die ähnliche Anreize setzen.

In seltenen Situationen mit sehr niedrigen Temperaturen und niedriger erneuerbaren Erzeugung wird durch flexible Wärmepumpen ebenfalls ermöglicht, den Stromverbrauch so zeitlich aufzuteilen, dass zusammen mit anderen Flexibilitätsoptionen wie intelligentes Laden und Vehicle-to-Grid sowie, falls nötig, industriellem Demand-Side-Management das Stromsystem weniger Spitzenlastkraftwerke benötigt als bei einem starren Einsatz.

3.10.2 Effizienzanforderungen an Wärmepumpen

In Hinblick auf die zu erwartende stärkere Verbreitung von Wärmepumpen kann untersucht werden, ob Anforderungen an die folgenden Kennzahlen sinnvoll bzw. notwendig sind:

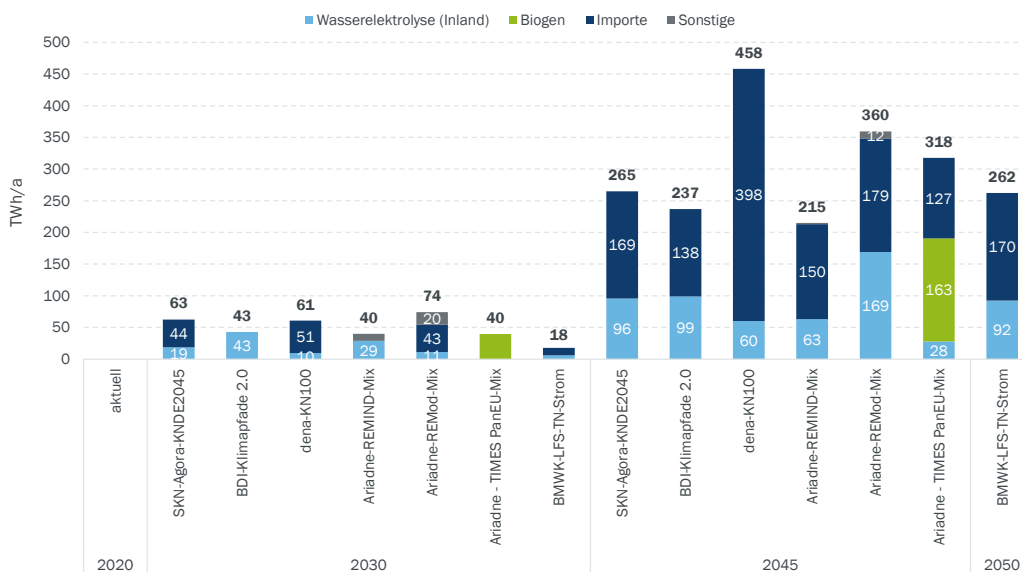
- Die **Arbeitszahlen** von Wärmepumpen bestimmen maßgeblich die zukünftig notwendige Menge elektrischer Energie zur Wärmebereitstellung in Gebäuden. Daher müssen Arbeitszahlen insbesondere für nicht oder nur teilsanierte Gebäude im Blick gehalten werden. Falls die jeweiligen Vorlauftemperaturen einen effizienten Wärmepumpenbetrieb nicht zulassen, sollten entweder größere Heizflächen genutzt (z. B. Fußboden- oder Wandheizung oder neue Heizkörper mit größerer Oberfläche) und/oder Hybrid-Wärmepumpen eingesetzt werden, die durch Einbezug eines Gas-Spitzellastkessels eine Mindesteffizienz der Wärmepumpeneinheit sicherstellen.
- Weiterhin ist die maximal notwendige elektrische **Leistung** sehr relevant, insbesondere bei tiefen Außentemperaturen. Neben der Art der Wärmequelle (Luft oder Erdreich/Grundwasser) und dem eingesetzten Kältemittel (herkömmliches oder natürliches Kältemittel) hat insbesondere die Auslegung der WP-Einheit ohne Heizstab einen Einfluss hierauf. Wird die Wärmepumpeneinheit kleinstmöglich ausgelegt, um die Anschaffungskosten zu minimieren, folgt daraus ein häufigerer Einsatz des elektrischen Heizstabs in Kälteperioden – mit entsprechenden Auswirkungen auf die notwendige Leistungsbereitstellung. Weiterhin erhöht eine eher großzügige Auslegung der Wärmepumpe oder die Kopplung mit weiteren Erzeugern (Hybrid-Wärmepumpe) das Flexibilitätspotenzial im Zusammenspiel mit einem Pufferspeicher.
- **Pufferspeicher** vergrößern das Flexibilitätspotential von Wärmepumpenheizungen (und so ggf. den Einsatz des Heizstabes zu minimieren). Sie erfordern aber auch ein etwas höheres Temperaturniveau im Betrieb bei dann etwas niedriger Effizienz.
- Bei der Festlegung von Anforderungen an Wärmepumpen im Ordnungsrecht muss letztlich eine **Abwägung** zwischen gebäudeindividuellem Optimum und Flexibilitätspotenzial für das gesamte Stromsystem getroffen werden. Bislang liegen jedoch keine Berechnungen vor, die diese Abwägung ermöglichen. Die Gutachter*innen empfehlen mit Blick auf den steigenden Anteil von Wärmepumpen die Durchführung von Analysen des Stromsystems für unterschiedliche Auslegungen von Wärmepumpen und Pufferspeichern.

3.10.3 Konkurrenz zu Wasserstoff und PtG

Angebotspotenzial Wasserstoff

Die mögliche Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff wird in aktuellen Energiesystemstudien ähnlich eingeschätzt, wie der Vergleich der in Abbildung 10 dargestellte Vergleich zeigt. Die Spannweite des Wasserstoff-Angebots im Jahr 2030 reicht von 18 TWh in den BMWi Langfristszenarien (TN Strom) über etwa 40 in den Szenarien „BDI Klimapfade 2.0“ sowie zwei Ariadne-Szenarien und gut 60 TWh in den Szenarien „SKN-Agora KNDE2045“ und dena KN100 bis hin zu 74 TWh im Szenario Ariadne „REMod-Mix“. Aktuell liegt das Angebot noch bei unter 0,5 TWh. Die Nutzung des Wasserstoffs sehen die fünf Gutachten überwiegend in den Sektoren Industrie, Umwandlung und Mobilität.

Abbildung 10: Angebot von klimaneutralem Wasserstoff – Inländische Erzeugung und Import in TWh/a. Vergleich aktueller Szenarien zur Klimaneutralität



Quelle: Prognos für Stiftung Klimaneutralität et al. (2022): Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien.

Im Gegensatz zu den integrierten systemischen Betrachtungen in den genannten Studien hat die Studie „Verfügbarkeit und Kostenvergleich von Wasserstoff“ vom DVGW vom Februar 2022 das aus Angebotssicht theoretisch erschließbare Angebot von Wasserstoff in Deutschland abgeschätzt. Im Gutachten wird nicht betrachtet, ob die Infrastruktur und Endgeräte den Wasserstoff nutzen können. Weiterhin werden in dem Gutachten keine Restriktionen auf der Nachfrageseite berücksichtigt. Hierzu zählen z.B. innerdeutsche Gasfernleitungen oder Gasverteilung (via Pipeline oder LKW) oder erforderliche Umrüstungen bei den Endanwendungen. Das Gutachten beziffert das Angebotspotenzial von „klimafreundlichen Gasen“ für 2030 auf 100 TWh (pessimistisch), 400 TWh (base case) bis 800 TWh (optimistisch). Nach Einschätzung der Bearbeitenden des Gutachtens sind die Werte für die mittleren und optimistischen Fälle unplausibel. Die begründet sich unter anderem wie folgt:

- Wechselwirkungen mit anderen Sektoren werden in dem Gutachten nicht betrachtet. So erfolgt beispielsweise keine Einordnung, dass bei hoher Biogaseinspeisung das Gas nicht mehr für die bisherige Nutzung zur Verfügung steht.
- Weiterhin werden keine Aussagen zum zusätzlichen Bedarf für Biomasse für zusätzliche Biogasanlagen getroffen. Und auch die Hochlaufkurven von neuen Technologien wie der Biomassefeststoffvergasung erscheinen unrealistisch schnell.
- Die Annahmen zum Import von Wasserstoff sind unausgewogen: während alle EU-Länder einen „fairen“ Anteil ihrer Wasserstoff-Erzeugung nach Deutschland exportieren, behält Deutschland selbst 100 % der eigenen Wasserstoff-Erzeugung. Die Mengen (auch für 2030) enthalten auch Importe aus Belarus und Russland, die aufgrund des Krieges in der Ukraine ebenfalls mit einem großen Fragezeichen zu versehen sind.
- Das Gutachten geht darüber hinaus von hohen Importen von grünem Wasserstoff aus direkten Nachbarländern, der EU sowie auch aus Belarus und Russland aus. Allerdings übersteigt der Wasserstoff-Bedarf dieser Länder inkl. unterstellter Exporte nach Deutschland ihre voraussichtliche inländische Erzeugung. Die getroffenen Annahmen zum Import nach Deutschland implizieren weiterhin eine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Europa im Jahr 2030 von deutlich über 50.000 TWh/a. Zum Vergleich: das Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS) ermittelt ein Gesamtpotenzial der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Europa abzüglich technischer und sozialer Einschränkungen von 15.000 TWh/a³. Diese Annahme ist daher als unrealistisch einzuordnen und die Importe aus diesen Ländern sehr fragwürdig.
- Zu guter Letzt stammen größere Importmengen aus Wasserstoff, der aus Erdgas hergestellt wird und auf geologische CO₂-Speicherung (CCS Carbon Dioxid Capture and Storage) angewiesen ist. Es ist fraglich, ob mit dieser Technologie (inkl. den Vorkettenemissionen und Abscheideraten) deutliche Klimavorteile gegenüber Erdgas erzielbar sind. Zudem ist ungeklärt, ob 2030 bereits hinreichend große CO₂-Lagerstätten verfügbar sind.

Nutzungskonkurrenz Wasserstoff

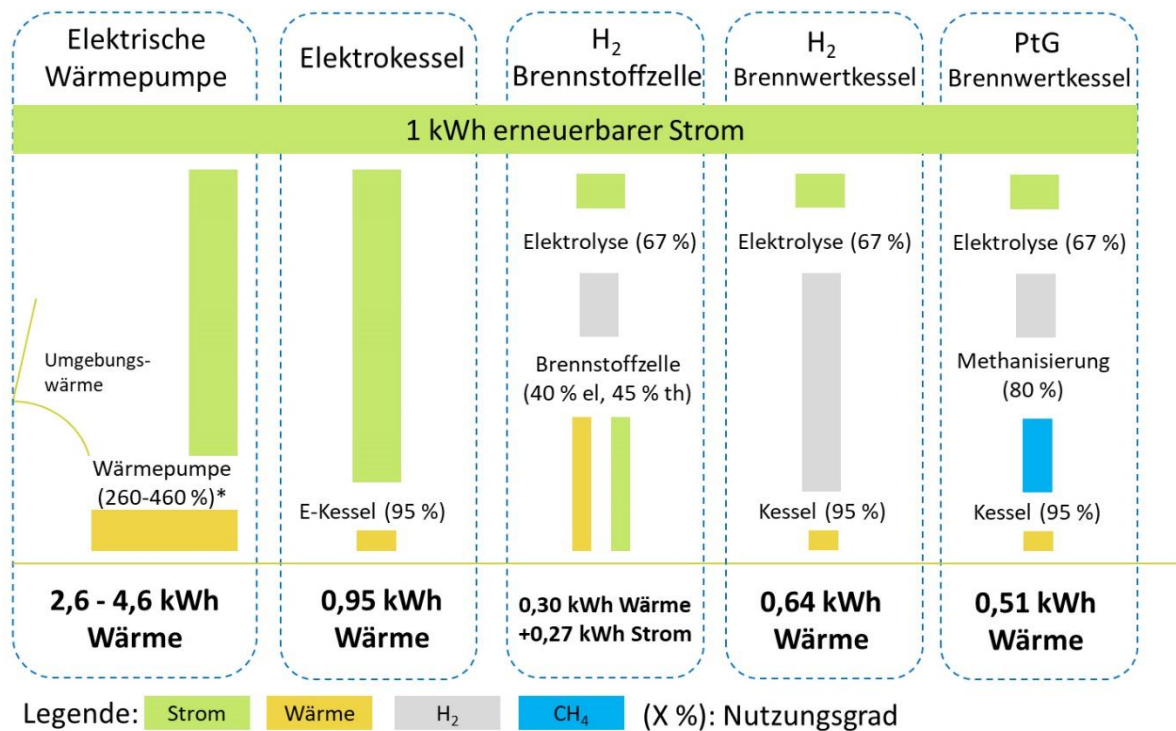
Die Szenarien der fünf Klimaneutralitätsstudien kommen zu einem recht einheitlichen Bild hinsichtlich der künftigen Wärmeversorgung. Der Großteil der Gebäude wird über Wärmepumpen und Wärmenetze versorgt. Die Biomasse spielt eine eher untergeordnete Rolle bei der Wärmeversorgung. Im dena KN100 Szenario kommen größere Mengen Wasserstoff zum Einsatz, wobei auch hier die Wärmepumpe dominiert.

Der direkte Vergleich von Wärmepumpen mit klimaneutralen Heizkesseln zeigt, dass die Wärmepumpe die deutlich effizientere Technologie ist. Mit einer Kilowattstunde Strom können in der Wärmepumpe je nach Nutzungsgrad 2,6 bis 4,6 kWh Wärme erzeugt werden. Im Vergleich werden in einem Brennwertkessel, der mit Wasserstoff betrieben

³ Home-made or imported: On the possibility for renewable electricity autarky on all scales in Europe. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300811?via%3Dihub>. letzter Abruf am 09.05.2022

wird, mit der gleichen Strommenge lediglich 0,64 kWh Wärme erzeugt. Auch der Elektrokessel, die Brennstoffzelle und der PtG-Brennwertkessel weisen eine deutlich geringere Effizienz auf (vgl. Abbildung 11).

Abbildung 11: Vergleich durchschnittlicher Nutzungsgrade von Wärmepumpen, E-Heizern und PtG-Technologien unter typischen Bedingungen. H₂: Wasserstoff



Quelle: Agora Energiewende (2020), PwC (2020), ifeu (2012). * Abhängig von Gebäude, Wärmequelle und Heizungstemperatur. Darstellung ifeu

Ein bei diesem Vergleich häufig genannter Kritikpunkt dieser Betrachtung ist, dass Strom im Vergleich zu Brennstoffen nicht gespeichert werden könne. Da das Zeitprofil der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland deutlich vom Lastprofil der Wärmenachfrage abweicht, ist eine direkte Deckung des Strombedarfs für Wärmepumpe aus erneuerbaren Quellen nicht ganzjährig möglich. Die hieraus entstehenden Verluste und Kosten würden nicht berücksichtigt. In diesem Zuge werden auch kritische Situationen wie längere Dunkelflauten bei geringen Temperaturen genannt. Dieser Kritikpunkt wird in einem Gutachten der Stiftung Klimaneutralität aufgegriffen (Stiftung Klimaneutralität 2022). Hier wird unter anderem der Wasserstoffbedarf für eine Kilowattstunde Wärme aus Wärmepumpen und Wasserstoff-Heizkessel bei unterschiedlichen EE-Stromangeboten und Temperaturen verglichen. Der Vergleich führt zu folgenden Erkenntnissen:

- Das zukünftige Stromsystem wird sowohl aus fluktuierenden erneuerbaren Energien (Wind, PV) als auch regelbaren erneuerbaren Energien (Wasserkraft, Biomasse, Abfall, ...) gespeist werden. Diese werden ergänzt durch regelbare Kraftwerke, die mit Wasserstoff und synthetischen Energieträgern betrieben werden. Eine flexibilisierte Stromnachfrage führt zu einer Glättung der Residuallast und damit einem geringeren Bedarf an regelbaren Stromerzeugungskapazitäten.

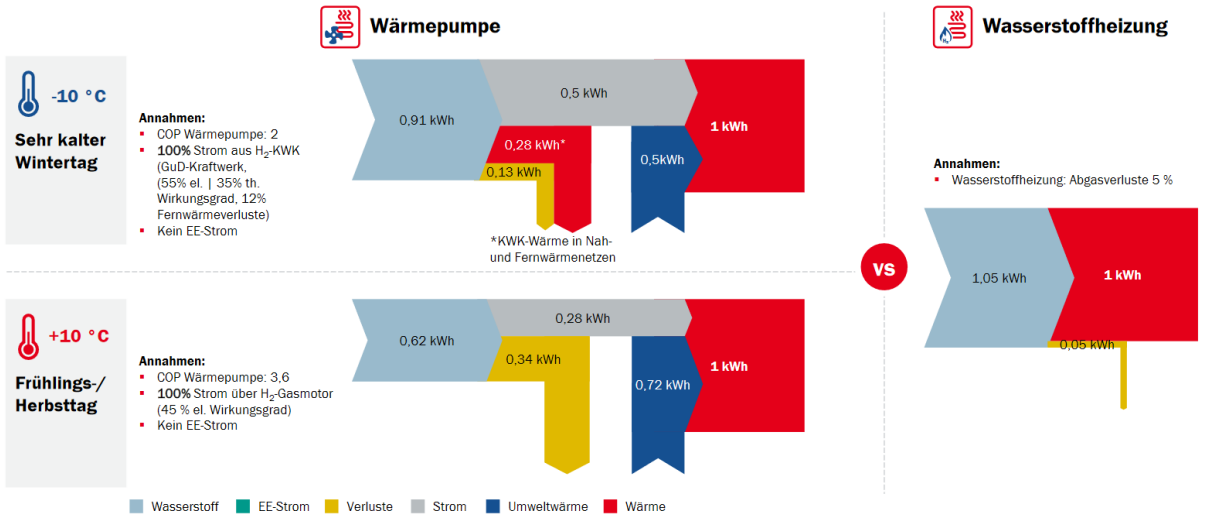
- Die Außentemperatur liegt im überwiegenden Anteil der Stunden des Wetterjahres in einem moderaten Temperaturbereich, in dem elektrische Wärmepumpen besonders effizient und flexibel sind. Weiterhin kann der Strombedarf in diesen Zeiten zu einem großen Anteil aus fluktuierenden und regelbaren erneuerbaren Energien gedeckt werden.
- Selbst an den wenigen, sehr kalten Wintertagen, an denen eine direkte Deckung des Strombedarfs der Wärmepumpen aus fluktuierenden erneuerbaren Energien nicht möglich ist, verbraucht eine Wasserstoffheizung mehr Wasserstoff als die Stromerzeugung für eine Wärmepumpe.

Den letzten Punkt verdeutlicht Abbildung 12. Sie stellt den Wasserstoffbedarf für eine Kilowattstunde Wärme aus Wärmepumpen und Wasserstoff-Heizkesseln bei unterschiedlichen EE-Stromangeboten und Temperaturen dar. Selbst in den wenigen Stunden pro Jahr, in denen sehr kalte Temperaturen herrschen und kein EE-Strom zur Verfügung steht (oberstes Beispiel), benötigt die Wärmeerzeugung mit einem Wasserstoff-Kessel 15 % mehr Wasserstoff als eine Wärmepumpe, deren Strom vollständig aus regelbaren Wasserstoff-KWK-Anlagen bereitgestellt wird. Stammt in kalten Situationen zumindest die Hälfte des Stroms für die Wärmepumpe aus fluktuierenden erneuerbaren Energien, so benötigt der Wasserstoff-Kessel mehr als die doppelte Menge an Wasserstoff. Bei mittleren Temperaturen und 90 % Stromerzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien benötigt der Wasserstoff-Kessel nahezu 20-mal so viel Wasserstoff, wie die Wärmepumpe. Über ein gesamtes Jahr benötigen Wasserstoff-Kessel also deutlich mehr Wasserstoff und entsprechende Speichervolumina als eine partiell durch Wasserstoff gedeckte Stromnachfrage für Wärmepumpen. Das Problem des zeitlichen Abstandes zwischen Wasserstoff-Erzeugung und Nutzung besteht für beide Systeme und muss im Falle der Wasserstoff-Kessel für deutlich größere Mengen gelöst werden.

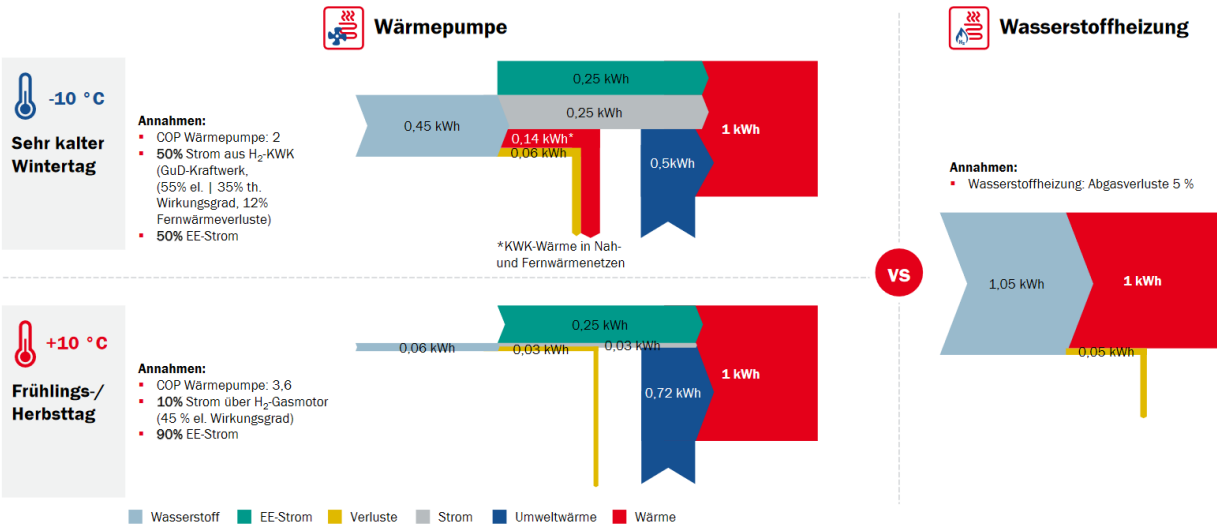
Abbildung 12: Wasserstoffbedarf für eine Kilowattstunde Wärme aus Wärmepumpen und Wasserstoff-Heizkessel bei unterschiedlichen EE-Stromangeboten und Temperaturen

Im Stromsystem kann Wasserstoff effizienter eingesetzt werden

→ Selbst in Situationen, in denen kein EE-Strom zur Verfügung steht, ist der Einsatz von Wasserstoff im Stromsystem und Wärmeversorgung via Wärmepumpen effizienter



→ In den häufigeren Situationen mit einem Beitrag der EE-Stromerzeugung, wird der Effizienzvorsprung des Stromsystems ggü. Wasserstoffheizungen deutlich größer



Quelle: Prognos für Stiftung Klimaneutralität (2022)

Ob eine Wärmeerzeugung aus Wasserstoff aus wirtschaftlicher Sicht zukünftig mit einer Wärmeversorgung durch Wärmepumpen konkurrieren kann, hängt maßgeblich vom Verhältnis der Strom- und Wasserstoffpreise ab. Ebenfalls noch unbeantwortet ist die Frage, wie eine vollständige Umstellung der Verteilungsinfrastruktur auf Wasserstoff flächendeckend oder auch punktuell (z.B. in unmittelbarer Nähe zu Ankerkunden) gelingen kann. Unabhängig von wirtschaftlichen und geopolitischen Überlegungen bleibt jedoch festzustellen, dass Wasserstoffoptionen aktuell nicht verfügbar sind und der Aufbau der erforderlichen Infrastruktur vergleichsweise lange dauern würde. Bis 2030 sind daher keine wesentlichen Beiträge zur Erreichung der Klimaziele im Gebäudesektor zu

erwarten. Aufgrund der genannten Unsicherheiten ist die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt nach 2030 bislang unklar.

Zu diskutieren ist auf der anderen Seite, welche Rolle der Import erneuerbarer Energien und Wasserstoff aus Hoch-Potenzialländern spielt und wie diese Mengen Ankerkunden zur Verfügung gestellt werden können (beispielsweise Industrieanlagen mit hohem Wasserstoffbedarf), in deren unmittelbarer Nähe dann auch eine Wasserstoffversorgung für Gebäude möglich wäre. Diese Diskussion sollte aufgrund ihrer Tragweite auf strategischer Ebene und unter Einbeziehung des gesamten Energiesystems geführt werden und liegt damit außerhalb des Auftrages dieses Vorhabens.

3.10.4 Empfehlungen für das GEG

Aus den obigen Ausführungen zum Energiesystem und den Erzeugungskapazitäten lässt sich ableiten, dass ein hoher Anteil elektrischer Wärmepumpen aufgrund der direkten Nutzung erneuerbaren Stroms sinnvoll ist, andererseits aber auch eine gesamtsystemische Herausforderung bedeutet. Um diese Aufgabe bestmöglich zu lösen, sollten Effizienzanforderungen an den Einsatz von Wärmepumpen gestellt werden. Einige dieser Elemente können im Rahmen des GEG adressiert werden.

- Eine Anforderung an die Jahresarbeitszahl (JAZ) für das System im eingebauten Zustand würde sicherstellen, dass rein elektrische Wärmepumpen immer dann eingebaut werden, wenn sie eine Mindesteffizienz erreichen. Da die Energiekosten einer Wärmepumpe eine zentrale Akzeptanzfrage darstellen werden – und diese direkt mit der JAZ korrelieren – wäre die Größe relevant für die Umsetzung der politischen Ziele. Weiterhin wäre die JAZ über die serienmäßig eingebaute Messeinrichtung einfach zu berechnen und anzuzeigen. Allerdings stellt sich hier die Frage, welche heizungstechnische Alternative bei Nichteinhaltung der Bedingung zum Zuge käme und inwieweit diese Anforderung im Neubau relevant ist. Diese Frage wird im Folgeprojekt abgehandelt werden.
- Stattdessen dürften mittelfristig insbesondere im Neubau Anforderungen an die **niedrigeren Systemtemperaturen** (NT ready) und **Pufferspeicher** (wo möglich) im GEG sinnvoll sein, bei denen zwischen gebäudeindividuellem Optimum und Flexibilitätspotenzial für das gesamte Stromsystem abgewogen werden sollte.
- Ergänzend oder alternativ wäre auch das „**Luxemburger Modell**“ denkbar. Hier findet eine umfangreiche Qualitätskontrolle bei der Abnahme des Wärmepumpensystems mit Prüfung vieler relevanter Aspekte statt. Bei der Qualitätsprüfung werden die Heizlast, die Auslegung der Wärmepumpe, die Qualität der Wärmeübertragung, der hydraulische Abgleich, die Isolierung der Rohrleitungen, die Positionierung der Außeneinheiten bezüglich der Schallemissionen und die Dichtheit des Kältemittelkreislaufes überprüft. Außerdem finden periodische Kontrollen im Betrieb statt, die eine optimale Betriebsweise der Wärmepumpen sichern sollen. Heizungsbauer und Schornsteinfeger werden zur Ausübung dieser Tätigkeiten regelmäßig geschult.

3.10.5 Fernwärme

Bei der Umstellung der Bewertungsmethode auf Treibhausgase muss noch eine weitere Besonderheit von Wärmenetzen untersucht werden. In Fernwärmenetzen werden häufig KWK-Anlagen eingesetzt, die Strom und Wärme in gekoppelten Prozessen bereitstellen. Für die energetische Bewertung von KWK und Fernwärme ist eine Aufteilung der Brennstoffenergie, Primärenergie und der Emissionen nach den Anteilen der Strom- und Wärmeerzeugung notwendig. Dafür gibt es verschiedene Allokationsmethoden.

Rückblick: Vorschlag zur Umstellung auf die Carnot-Methode in ifeu et al. (2018)

Die aktuell angewendete und in der EnEV sowie von den KfW-Förderprogrammen anerkannte Methode ist die Stromgutschriftmethode, darüber hinaus werden die Carnot- sowie die Finnische Methode angewandt. Die Methoden unterscheiden sich wie folgt:

- **Stromgutschriftmethode:** Bei der Berechnung des der Wärme zuzuschreibenden Anteils der Gesamtemissionen wird zunächst diese Gesamtmenge berechnet und davon die im Stromsystem ersetzte Emissionsmenge durch den koproduzierten Strom abgezogen. Dazu wird die Strommenge mit dem spezifischen Emissionsfaktor des Verdrängungsmixes multipliziert. Dieser Verdrängungsmix berücksichtigt, dass durch den KWK-Strom keine erneuerbaren Energieanlagen substituiert werden. Es ist der sogenannte „Grenzkraftwerksstrom“.
- **Carnot-Methode:** Die Aufteilung in Strom und Wärme erfolgt über eine Umrechnung des Wärmeanteils in Exergie, also den arbeitsfähigen Teil der Energie, abhängig vom Temperaturniveau.
- **Finnische Methode:** Die Aufteilung in Strom und Wärme erfolgt über den Vergleich mit Referenzwirkungsgraden der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme.

Zu einer ausführlichen Beschreibung der Methoden siehe Pehnt (2010).

Der Bilanzraum für die Betrachtung der Fernwärme umfasst jeweils die gesamte Erzeugungsanlage (ungekoppelte sowie gekoppelte Erzeugung) sowie den Hilfsstrom und die Netzverluste bis hin zur Übergabe an das Gebäude.

Die Stromgutschriftmethode führt bei KWK-Anlagen z. T. zu negativen (künstlich gekappten) bzw. sehr niedrigen Primärenergiefaktoren. Eine Steuerungswirkung zur Einbindung erneuerbarer Energien und zur Dekarbonisierung ist dann nicht gegeben.

Aus den Berechnungen in ifeu et al. (2018) und einer sehr umfangreichen Analyse dort wurde abgeleitet, dass eine Umstellung auf das Carnot-Verfahren zu empfehlen ist, weil die Stromgutschriftmethode zu einer sehr großen Bandbreite von Primärenergiefaktoren, zum Teil zu unplausiblen Werten (negative Werte) führt, die dann bei der Berechnung der PEF auf 0 gesetzt werden. Ein starker Einflussfaktor auf den PEF ist insbesondere die Höhe der Stromerzeugung der KWK-Anlage und der Verdrängungsmix, der bei der Berechnung angesetzt wird. Dieser wird sich zukünftig auch stark reduzieren, was die Funktionalität der Stromgutschriftmethode weiter beeinträchtigt.

Ausführliche Berechnungen zu den Konsequenzen der Umstellung sind in ifeu et al. (2018) dokumentiert. Für die Berechnung steht mit der FW 309 Teil 6 eine ausgearbeitete Methodik zur Verfügung.

Faktorkappung und produktbezogene Kennzahlen und Öko-Wärme-Tarif

Wenn man nun jedoch auf Treibhausgase und Carnot-Methode umstellt, was methodisch gerechtfertigt ist, ergibt sich ein Folgeproblem. Die THG-Werte dieser Netze sind, wenn die Netze noch keinen Transformationsprozess durchlaufen haben, bei Einsatz fossiler Energien mitunter hoch (Tabelle 24) und schwanken stark. Damit ergibt sich das Dilemma, dass ein Anschluss von Neubauten an Wärmenetze ausgeschlossen sein könnte, wenn sie noch am Anfang des Transformationspfades stehen.

Tabelle 24: THG-Faktoren für sehr gute („best“) und mittlere („konservativ“) THG-Faktoren für ein Wärmenetz mit Wärme aus dem angegebenen Energieträger (inkl. Hilfsstrom und Netzverluste) (Quelle: AGFW 2022)

Wärmequelle		$f_{\text{THG,konservativ}}$ g CO ₂ Äq/kWh	$f_{\text{THG,best}}$ g CO ₂ Äq/kWh
Heizwerke ohne KWK	Steinkohle	587	476
	Braunkohle	631	511
	Gas	333	272
	Heizöl	430	351
	Feste Biomasse	46	31
	Biogas	110	89
	Flüssige Biomasse	295	240
KWK-Anlage*	Steinkohle	238-288	130-235
	Braunkohle	256-310	140-252
	Gas	135-163	61-113
	Heizöl	174-210	79-146
	Feste Biomasse	20-22	8-14
	Biogas	42-51	19-35
	Flüssige Biomasse	118-143	53-99
Abwärme	FW- und prozessbedingter Anteil	90	5
	TAB	20	20

* Ohne Dampfnetze

Zugleich ist in diesen Situationen ein Anschluss eines Gebäudes an ein Wärmenetz trotzdem sinnvoll, da auch die Wärmenetze dekarbonisiert werden müssen und in vielen Eignungsgebieten eine gute Möglichkeit darstellen, erneuerbare Energien einzubinden – dies sollte auch über geeignete Instrumente verbindlich sichergestellt werden.

Um dieses Dilemma aufzulösen, gibt es aus Sicht der Gutachter zwei Möglichkeiten:

- Variante 1: Deckelung des THG-Faktors auf einen Maximalwert. Diese Variante ist aus Sicht der Gutachter dann akzeptabel, wenn in einem separaten Rechtswerk Betreiber von Wärmenetzen Dekarbonisierungsfahrpläne erstellen und Dekarbonisierungsziele (bis 2030 indikativ, danach verbindlich) einhalten müssen. Ansonsten würden Wärmenetze und dezentrale Systeme zu asymmetrisch behandelt.
- Variante 2: Produktbezogene Kennzahlen: „Grüner Wärme-Tarif“: Zulassung von zwei Bilanzkreisen.

Variante 2 bedarf einer weiteren Erläuterung: Diesen Vorschlag haben wir bereits in ifeu et al. (2018) als „Ökowärme-Tarif“ vorgeschlagen; er wird derzeit auch unter dem Stichwort „produktbezogene Kennzahlen“ diskutiert.

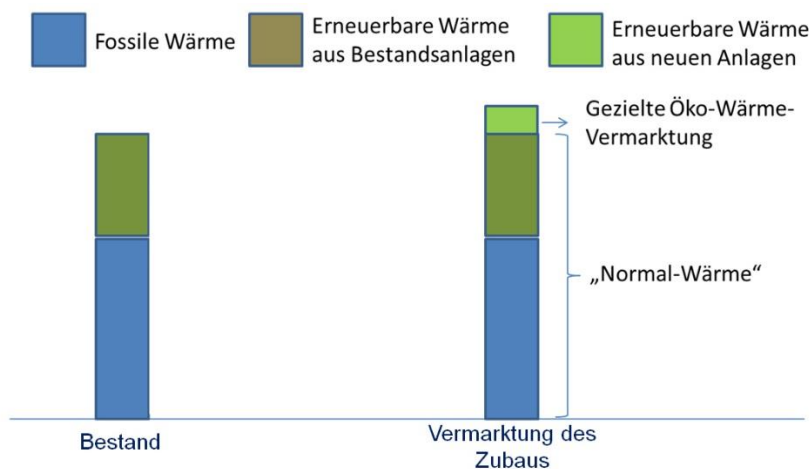
Grundgedanke ist bei der Berechnung der THG-Faktoren die Bildung von zwei Bilanzkreisen: Einem „Öko-Wärme-Bilanzkreis“, in dem die ab einem bestimmten Zeitpunkt (z. B. 2022, um Attentismus zu vermeiden) neu zugebaute EE-Kapazitäten verbucht werden können, und ein „Normalwärme“-Bilanzkreis für die verbleibenden Wärmeerzeuger. Kunden, die Öko-Wärme beziehen, können dann den für diesen Öko-Bilanzkreis berechneten THG-Faktor in Anspruch nehmen.

Eine derartige Option fördert die Anpassung der Erzeugung im Wärmenetz an die Vorgaben für Neubauten und Bestandsanierungen. Bestandsabnehmer müssten nicht mehr „mitgezogen“ werden. Zugleich ergibt sich ein Anreiz zum Ausbau der EE- und Abwärme-Quellen, die dann in diesen Ökobilanzkreis integriert werden können.

Um die Transformationswirkung dieses Modells zu bewahren, ist bei der Ausgestaltung darauf zu achten, dass eine Ausgliederung der EE-Erzeugung in einen Ökowärme-Tarif nur für zukünftigen Zubau möglich ist und dass keine Doppelzählung von Anlagen und Maßnahmen erfolgt.

Die Regelung getrennter Bilanzierung von Erzeugern könnte auch als Anreiz für die Einbindung externer Einspeiser im Sinne einer Einspeisevergütung gestaltet werden. So könnte auch die Durchleitung von (EE-)Wärme Dritter in Form eines separaten Bilanzkreises bewerkstelligt werden.

Abbildung 13: Grundprinzip des Öko-Wärmetarifs (Quelle: ifeu et al. 2018)



Wählt man dieses Vorgehen, dann stellen sich Folgefragen:

- Anwendung des Ökowärmebilanzkreises nur auf neue EE-Anlagen? Vorschlag: EE-Anlagen ab einem Stichtag, z. B. 1.5.2022. Evtl.: XX % der Bestandsanlagen (beispielsweise 10 % der Wärmemenge) als „Starterpaket“ zulassen. Begründung: kein Attentismus; Netze mit hohem EE-Anteil haben i.d.R. schon einen guten THG-Faktor. Das so gewählte Verfahren vermittelt einen stetigen Ausbauimpuls.

- Bilanzierungsmethodik: Vorschlag: Jahresbilanziell analog Jahres-THG-Bilanz. Begründung: analog zu den Wärmekennzeichnungsregeln in § 5 Abs. 1 Nr. 2 FFVAV. Freiwillige kürzere Bilanzierungszeiträume sind denkbar.
- Herkunftsnachweise. Vorschlag: Keine Anerkennung. Nur physische Einspeisung ins Netz.

3.10.6 Sonstige Energieträger

Die Faktoren der anderen Energieträger werden nicht modifiziert. Allerdings werden folgende Umbenennungen bzw. Modifikationen vorgeschlagen:

- „Biogas“ und „Biogas, gebäudenah verbraucht“ in: „Biomethan“ und „Biogas“. Begründung: Der Unterschied in der THG-Bewertung liegt im zusätzlichen Bearbeitungsschritt vom Biogas zum aufbereiteten, gereinigten und ins Gasnetz eingespeisten Biomethans.
- Keine Differenzierung des THG-Faktors für Biomethan und biogenes Flüssiggas nach Nutzungsart. Begründung: Bereits der Nutzungsgrad der Umwandlung berücksichtigt die THG-Wirkung. Eine zusätzliche Differenzierung nach Brennwertkessel, KWK oder anderer Nutzung ist nicht erforderlich bzw. führt zu einer Doppelanrechnung effizienter Nutzungsformen.
- Erdgas und Heizöl sollten auf den aktuellen Wert gemäß IINAS (2021) bzw. GEMIS 5.0 aktualisiert werden (in 5ern gerundet: Erdgas: 249 g/kWh; Heizöl: 318 g/kWh; Flüssiggas 276 g/kWh).
- Die anderen Energieträger wurden nicht überprüft.

3.10.7 Resultierende Tabelle für das GEG

Tabelle 25: Aktualisierte Faktoren für die Bewertung von Energieträgern (in Klammern die aktuellen Werte)

Kategorie	Energieträger	THG-Emissionsfaktor [g CO ₂ -Äquivalent pro kWh]	Primärenergiefaktor nicht erneuerbar*
Fossile Brennstoffe	Heizöl	320 (310)	1,2 (1,1)
	Erdgas	250 (240)	1,1 (1,1)
	Flüssiggas	275 (270)	1,1 (1,1)
	Steinkohle	400 (400)	1,1 (1,1)
	Braunkohle	430 (430)	1,2 (1,2)
Biogene Brennstoffe	Biomethan**	140 (140)	0,7 (0,5/0,7)
	Biogenes Flüssiggas***	180 (180)	0,7 (0,5/0,7)
	Biogas	75 (75)	0,3 (0,3/1,1)
	Bioöl	210 (210)	0,9 (1,1)
	Holz	20 (20)	0,2 (0,2)
Strom	Netzbezug	350 (560)	1,3 (1,8)
	gebäudenah erzeugt Photovoltaik oder Windkraft)	(aus 0 (0)	0 (0)

Wärme, Kälte	Erdwärme, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme	0 (0)	0 (0)
	Erdkälte, Umgebungskälte	0 (0)	0 (0)
	Abwärme aus Prozessen	40 (40)	0,2 (0,2)
Siedlungsabfälle		20 (20)	0 (0)
Nah- und Fernwärme		Gemäß FW 309-Teil 6**** Dabei sind die o.g. Brennstofffaktoren zu verwenden. Brennstoffe, für die keine Faktoren angegeben sind, werden nach dem Stand der Technik bilanziert, beispielsweise auf Basis der aktuellsten Fassung der GEMIS-Datenbank.	
	Für Referenzgebäude	Wird noch bestimmt	Wird noch bestimmt

* Der Primärenergiefaktor wird für die Dokumentation im Energieausweis nach den Anforderungen der EPBD benötigt.

** Biomethan: Es sind die Voraussetzungen nach Anlage 1 Nummer 1 Buchstabe a bis c des Erneuerbare-Energien-Gesetzes vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074) in der am 31. Juli 2014 geltenden Fassung erfüllt worden. Die Menge des entnommenen Biomethans entspricht im Wärmeäquivalent am Ende eines Kalenderjahres der Menge von Gas aus Biomasse, das an anderer Stelle in das Gasnetz eingespeist worden ist, und Massenbilanzsysteme für den gesamten Transport und Vertrieb des Biomethans von seiner Herstellung über seine Einspeisung in das Erdgasnetz und seinen Transport im Erdgasnetz bis zu seiner Entnahme aus dem Erdgasnetz verwendet worden sind.

*** Biogenes Flüssiggas: Die Menge des entnommenen Gases am Ende eines Kalenderjahres entspricht der Menge von Gas aus Biomasse, das an anderer Stelle hergestellt worden ist, und Massenbilanzsysteme für den gesamten Transport und Vertrieb des biogenen Flüssiggases von seiner Herstellung über seine Zwischenlagerung und seinen Transport bis zu seiner Einlagerung in den Verbrauchstank verwendet worden sind.

**** Der Gesetzgeber sollte sich vorbehalten, durch Verordnung eigene Regelungen zu treffen.

4 Weitere Analysen und Festlegungen

4.1 Referenzgebäude

4.1.1 Referenzgebäude oder feste Anforderungswerte

Im Hinblick auf die Gestaltung eines Anforderungsverfahrens für ein novelliertes GEG ist zu prüfen, ob und inwieweit ein Verzicht auf das Referenzgebäudeverfahren bei Wohn- und Nichtwohngebäuden möglich wäre, welche alternativen Regelungsmodelle in Frage kämen und welche Auswirkungen der Verzicht auf das Referenzgebäudeverfahren und das jeweilige alternative Regelungsmodell hätte.

Das Referenzgebäude ist ein „Spiegelbild“ des real geplanten Gebäudes mit einer standardisierten Bauausführung und Anlagentechnik, die die THG-Emissionen, den Endenergiebedarf und den Heizwärmebedarf des zu bauenden Gebäudes vorgibt. Alternativ hierzu wäre die Vorgabe eines Grenzwertes, der entweder abhängig von der Ausgestaltung des Gebäudes ist oder einem absoluten Wert entspricht (z. B. $\text{THG} < \text{XX kg CO}_{2,\text{Äq.}}/(\text{m}^2\text{a})$).

Seit der EnEV 2007 wird das Referenzgebäudeverfahren zur Ermittlung des maximal zulässigen Primärenergiebedarfs für Nichtwohngebäude verwendet. Angesichts der Vielzahl unterschiedlicher Nutzungen ist bei Nichtwohngebäuden ein derartiger Ansatz sehr vorteilhaft, wenn man umweltbezogene Anforderungen formulieren will, die gleichzeitig ambitioniert und trotzdem wirtschaftlich sind. Mit der EnEV 2009 wurde der Referenzgebäudeansatz für Wohngebäude übernommen. Die Notwendigkeit ergab sich einerseits aus der Zulässigkeit von zwei unterschiedlichen Verfahren zur Berechnung des Energiebedarfs (DIN V 4108-6/4701-10 und DIN V 18599), die zum Teil differierende Berechnungsergebnisse liefern. Zum anderen wurde ein einheitliches Verfahren für Wohngebäude und Nichtwohngebäude umgesetzt.

Das Referenzgebäude-Verfahren weist einige grundlegende Vorteile auf:

- Das Verfahren ermöglicht eine objekt- und nutzungsspezifische Formulierung von Anforderungen; damit kann der wirtschaftlich vertretbare Bereich gut ausgenutzt werden.
- Das Verfahren enthält einen prinzipiell umsetzbaren Vorschlag zur Ausführung der Bau- und Anlagentechnik, sofern der Anforderungswert direkt, d. h. ohne Abschlagsfaktoren, aus dem Referenzgebäude abgeleitet wird.
- Die Methode ist einheitlich für Wohngebäude und Nichtwohngebäude anwendbar. Sie kann daher problemlos auch bei gemischt genutzten Gebäuden Anwendung finden.

- Das Verfahren kann sowohl für Effizienz- wie auch Umweltgrößen verwendet werden.
- Das Verfahren ist vergleichsweise robust gegenüber dem Berechnungsverfahren, kann also beispielsweise auch bei mehreren Berechnungsvarianten verwendet werden.
- Bei Änderung von Randbedingungen in Berechnungsnormen oder im Gesetz (z. B. Klimadaten, Primärenergie- und Emissionsfaktoren) muss die Anforderungsformulierung nicht angepasst werden.
- Durch die Einführung von Abschlagsfaktoren kann das Anforderungsniveau beliebig skaliert werden, ohne Änderungen am Referenzgebäude vorzunehmen. Detaillierte Überlegungen zum Referenzgebäude sind damit auch bei Verschärfungen, z. B. im Rahmen von Förderprogrammen, entbehrlich; gleichzeitig werden Verschärfungen auch zahlenmäßig sofort offensichtlich.
- Das Verfahren ist bereits seit 2007 für Nichtwohngebäude eingeführt, seit 2009 auch für Wohngebäude und damit in der praktischen Anwendung bekannt.

Die wesentlichen Nachteile des Referenzgebäude-Verfahrens sind:

- Der Gebäudeentwurf findet im Hinblick auf die Gebäudeorientierung, den Fensterflächenanteil und die Gebäudekompaktheit in der derzeitigen Ausgestaltung des Referenzgebäudes (GEG 2020) keine Berücksichtigung.
- Der exemplarische Ausführungsvorschlag der Referenz wird teilweise als verbindliche Vorgabe missverstanden oder ohne weitere Prüfung in die Planung/Ausführung übernommen, dadurch bleiben wirtschaftliche und energetische Alternativen und Optimierungsmöglichkeiten ungenutzt.
- Mit der Einführung von Abschlagsfaktoren erfüllt das Referenzgebäude die Anforderungen nicht mehr, beschreibt also keine direkt umsetzbare Ausführungsvariante (s. GEG 2020).
- Durch die Einführung von Abschlagsfaktoren ergibt sich in Sonderfällen mit einem hohen Einfluss technischer Komponenten, die nicht im Referenzgebäude beschrieben sind und die daher vom ausgeführten Gebäude übernommen werden, eine größere prozentuale Verschärfung als intendiert.

Feste Anforderungswerte als Vorgabe für energetische Niveaus, wie zum Beispiel beim Passivhaus-Niveau (Heizwärmebedarf $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) oder im Rahmen früherer Energieeinsparverordnungen (Anforderungswerte in Abhängigkeit vom A/V-Verhältnis) können hinsichtlich einhergehender Vor- und Nachteile wie folgt gegenübergestellt werden.

Die wesentlichen Vorteile fester Anforderungswerte sind

- Sie sind in kürzerer Form und damit einfacher zu vermitteln als das Referenzgebäudeverfahren.
- Gebäudeorientierung und -kompaktheit können durch die Auswahl und Parametrierung von Modellgebäuden direkt in die Festlegung der Anforderungshöhe einfließen.

- Damit kann ein stärkerer Anreiz zu Effizienz steigernden Maßnahmen durch die Planung erfolgen.

Nachteile der Anforderungswerte sind:

- Nicht beeinflussbare Größen (Grundstück, Bebauungsplan, ...) können zu Einschränkungen der Baubarkeit führen; als Folge werden viele Einzelfallentscheidungen zu treffen sein.
- Die Methode ist nicht einheitlich für Wohngebäude und Nichtwohngebäude anwendbar. Für Nichtwohngebäude wäre aufgrund der Vielzahl von Nutzungsarten eine direkte Vorgabe von Anforderungswerten nur mit sehr großem Aufwand umsetzbar.
- Die Anforderungswerte für Förderungen müssen neu kalibriert werden und ändern sich ggfs. im Laufe der Zeit.
- Bei Änderung von Randbedingungen (z. B. Klimadaten, Primärenergie- und/oder Emissionsfaktoren) muss das Anforderungsniveau ggfs. nachjustiert werden.
- Vorgenannter Punkt gilt auch für Änderungen am Berechnungsverfahren; insbesondere auch mit Blick auf eine künftig zu erwartende stärkere Kongruenz mit europäischen Normen.
- Bei mehreren Berechnungsvarianten (Hauptverfahren / vereinfachte Verfahren) können ungewünschte Verschärfungen / Erleichterungen auftreten oder es müssten unterschiedliche Anforderungsniveaus je nach Nachweismethode eingeführt werden.

Die Gegenüberstellungen der methodischen Ansätze zur Formulierung von Anforderungen zeigen, dass beim Referenzgebäudeverfahren die Vorteile gegenüber den Nachteilen überwiegen. Die Analysen bezüglich der Vorteile "Berücksichtigung von Gebäudeorientierung und -kompaktheit" beim Verfahren der festen Anforderungswerte und deren mögliche Integration in das Referenzgebäudeverfahren werden in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

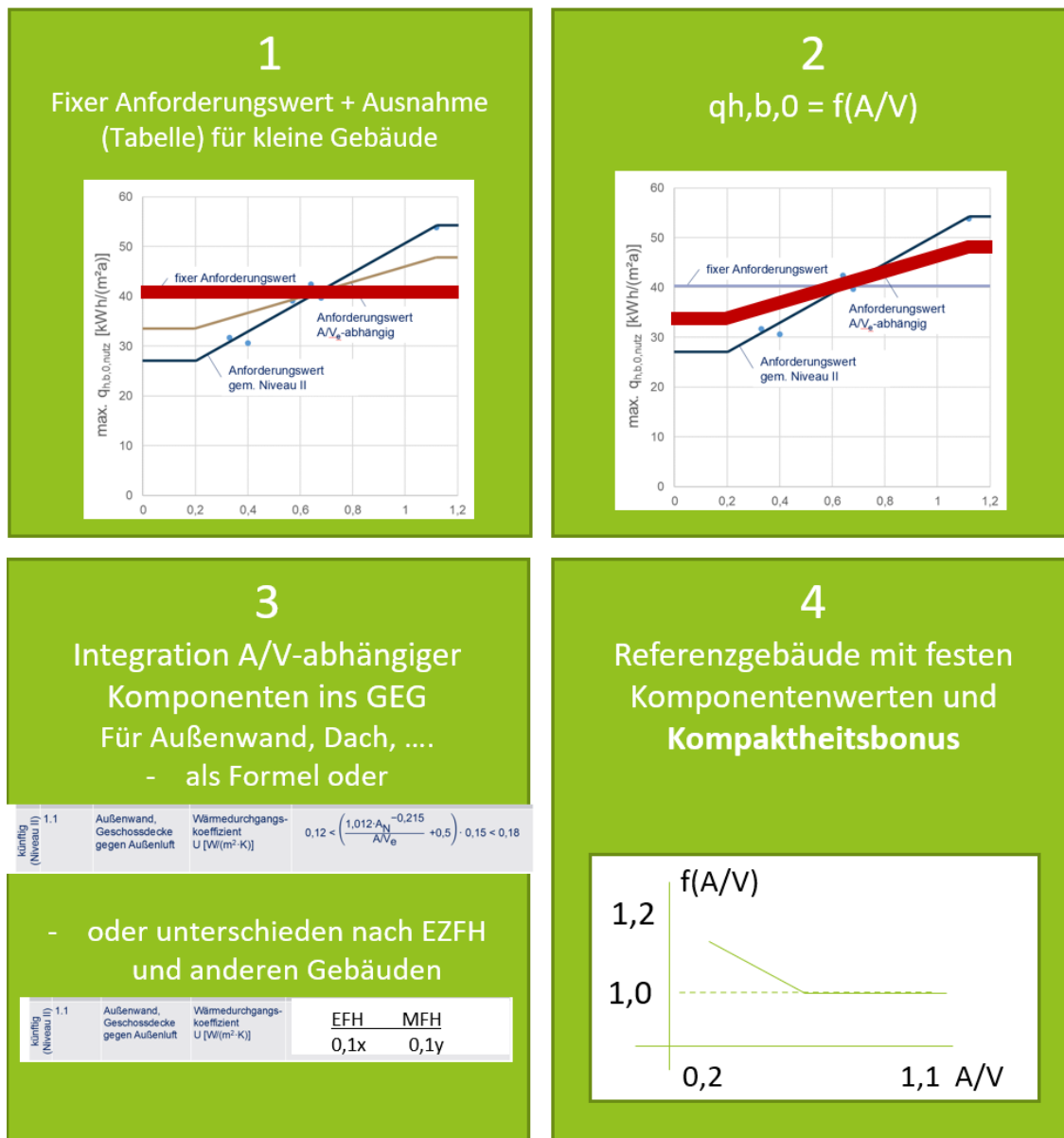
4.1.2 Integration von Aspekten der Kompaktheit

Kompakte Gebäudeformen weisen eine vergleichsweise geringe wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogen auf das beheizte Gebäudevolumen auf. Der Zusammenhang wird durch die Kenngröße "A/V-Verhältnis" beschrieben. Daraus folgt für das kompakte Gebäude ein i. d. R. geringerer Nutzenergiebedarf Heizen (Nutzwärmebedarf) gegenüber der weniger kompakten Ausführung. Der Zusammenhang ist in Abbildung 14 im Quadranten 1 durch den Verlauf der blauen Kurve eingetragen. Würde man für die Festlegung eines Anforderungsniveaus einen festen Anforderungswert unabhängig vom Kompaktheitsgrad vorgeben, würden fallweise relativ geringe Anforderungen für kompakte und relativ hohe Anforderungen für wenig kompakte Gebäude resultieren (rote Linie in Quadrant 1). Mit der Drehung der roten Kurve (Quadrant 2) und der damit eingeführten Abhängigkeit des Nutzenergiebedarfs Heizen vom A/V-Verhältnis kann eine Anpassung des Anforderungswertes erfolgen. Eine so beschriebene, vom A/V-Verhältnis abhängige Anforderungsformulierung, müsste auf alle drei Anforderungsgrößen (vergl. Abschnitt 5.1) wirken und wäre daher recht aufwändig abzuleiten. Dies gilt auch für die in Abbildung 14, Quadrant 4 dargestellte Möglichkeit der Einführung eines

"Kompaktheits-Bonus" im Referenzgebäudeverfahren. Ausgehend von der Referenzbeschreibung für ein wenig kompaktes Gebäude wird eine kompaktere Gebäudeausführung mit einem höheren zulässigen Anforderungswert "belohnt". Eine Möglichkeit, den Aufwand bezüglich der Ableitung einer "Bonusregelung" für die drei Anforderungswerte zu reduzieren, bildet der Ansatz in Abbildung 14, Quadrant 3, oberer Teil. Hier wirkt die A/V-Abhängigkeit direkt auf die Eingangsgröße in die Energiebilanz, auf den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert). Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Höhe des U-Wertes als zentrale Kenngröße des baulichen Wärmeschutzes nicht direkt ablesbar ist. Im unteren Bereich des Quadranten 3 ist die Möglichkeit aufgeführt, die Kompaktheit nach kleinen (Ein-/Zweifamilienhaus) und großen Gebäuden zu unterscheiden. Damit wird zwar keine differenzierte Kompaktheit in der jeweiligen Gebäudegruppe abgebildet, der Kompaktheitseinfluss zeigt sich aber im Hinblick auf eine Bevorzugung der Bauweise des Mehrfamilienhauses.

Der letztgenannte Ansatz wird in der vorgeschlagenen Anforderungsmethodik (vergl. Kap. 5) ausgearbeitet und mit Beispielberechnungen hinterlegt. Im Rahmen des Folgeprojekts sollen Möglichkeiten und Konsequenzen der Überlegung gemäß Abbildung 14, Quadrant 4 nochmals aufgegriffen werden. Hierbei muss abgewogen werden, ob Vorteile einer kompakten Bauweise im GEG angereizt werden müssen – insbesondere vor dem Hintergrund, dass kompaktes Bauen bereits durch die hohen Baupreise i. d. R. angestrebt wird – oder ob der vereinfachten Gestaltung der Referenzbeschreibung der Vorzug gegeben wird.

Abbildung 14: Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Kompaktheit im Anforderungsverfahren

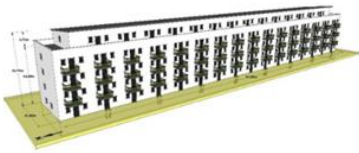


4.1.3 Integration von Aspekten der Fensterflächen

Die Aspekte der Fensterflächenanteile und Gebäudeausrichtung beim Referenzgebäudeverfahren werden anhand von Beispielberechnungen für drei Gebäude, großes Mehrfamilienhaus, kleines Einfamilienhaus und Bungalow (s. Abbildung 15) als Vertreter für unterschiedliche Kompaktheitsgrade untersucht.

Abbildung 15: Beispielgebäude zur Berechnung des Effektes von Fensterflächen

Mehrfamilienhaus (MFH), groß
 $A_N = 3811 \text{ m}^2$; $A/V_e = 0,40 \text{ m}^{-1}$



Einfamilienhaus (EFH)
 $A_N = 235 \text{ m}^2$; $A/V_e = 0,64 \text{ m}^{-1}$



Bungalow (Bun)
 $A_N = 128 \text{ m}^2$; $A/V_e = 1,12 \text{ m}^{-1}$



Als Wärmeschutzniveau wird jeweils das Niveau II gemäß Tabelle 28 angesetzt. Das jeweils zum Einsatz kommende Anlagensystem besteht aus den folgenden wesentlichen Komponenten: Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Auslegungstemperaturen 35/28°C, Zu-/Abluftanlage mit WRG 90 % sowie Warmwasserbereitung zentral über die Luft/Wasser-Wärmepumpe.

Zunächst werden die für die jeweiligen Gebäude zugrunde gelegten "normalen" fassadenbezogenen Fensterflächenanteile aufgezeigt. Diese Fensterflächenanteile wurden im Zuge der Erstellung der Modellgebäude festgelegt (ZUB 2010). Um die Veränderungen bezüglich der Nutz-, End- und Primärenergiebedarfe bei unterschiedlichen Fensterflächenanteilen aufzuzeigen, werden in einem ersten Schritt die "normalen" Verteilungen jeweils verdoppelt. Die Orientierung aller Fenster nach Osten zeigt anschließend den Einfluss der Gebäudeorientierung für die "normalen" und "hohen" Fensterflächenanteile auf. Die Ergebnisse der Berechnungen sind nachfolgend für die drei Gebäude mit den genannten Variationen dargestellt.

Mehrfamilienhaus

Fensterflächenanteile „normal“: Süd: 6 %; Ost: 28 %; West: 28 %; Nord: 6 %

Fensterflächenanteile „hoch“: Süd: 12 %; Ost: 46 %; West: 46 %; Nord: 12 %

Die Verdopplung der Fensterflächenanteile des Mehrfamilienhauses führt zu:

- Nutzenergiebedarf (gesamt) steigt von 17,3 auf 20,0 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) steigt von 17,3 auf 18,2 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) steigt von 31,1 auf 32,8 kWh/(m²a)
- H_T^1 steigt von 0,277 auf 0,371 W/(m²K)

Die Fassaden des Mehrfamilienhauses werden alle nach Osten orientiert (ausgehend vom „normalen“ Fensterflächenanteil)

- Nutzenergiebedarf (gesamt) sinkt von 17,3 auf 17,1 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) sinkt von 17,3 auf 17,1 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) sinkt von 31,1 auf 31 kWh/(m²a)
- H_T^1 bleibt 0,277 W/(m²K)

Die Fassaden des Mehrfamilienhauses werden alle nach Osten orientiert (ausgehend vom „hohen“ Fensterflächenanteil)

- Nutzenergiebedarf (gesamt) sinkt von 20,0 auf 19,6 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) sinkt von 18,2 auf 18,1 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) sinkt von 32,8 auf 32,5 kWh/(m²a)
- H_T^1 bleibt 0,277 W/(m²K)

Einfamilienhaus

Fensterflächenanteile „normal“: Süd: 32 %; Ost: 25 %; West: 25 %; Nord: 14 %

Fensterflächenanteile „hoch“: Süd: 64 %; Ost: 50 %; West: 50 %; Nord: 28 %

Die Verdopplung der Fensterflächenanteile des Mehrfamilienhauses führt zu:

- Nutzenergiebedarf (gesamt) steigt von 22,7 auf 23,0 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) bleibt 16,6 auf 16,6 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) bleibt 29,9 auf 29,9 kWh/(m²a)
- H_T^1 steigt von 0,218 auf 0,268 W/(m²K)

Die Fassaden des Einfamilienhauses werden alle nach Osten orientiert (ausgehend vom „normalen“ Fensterflächenanteil)

- Nutzenergiebedarf (gesamt) steigt von 22,7 auf 23,5 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) steigt von 16,6 auf 16,9 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) steigt von 29,9 auf 30,5 kWh/(m²a)
- H_T^1 bleibt 0,218 W/(m²K)

Die Fassaden des Einfamilienhauses werden alle nach Osten orientiert (ausgehend vom „hohen“ Fensterflächenanteil)

- Nutzenergiebedarf (gesamt) steigt von 23,9 auf 24,5 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) steigt von 16,6 auf 17,2 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) steigt von 29,9 auf 30,9 kWh/(m²a)
- H_T^1 bleibt 0,268 W/(m²K)

Bungalow

Fensterflächenanteile „normal“: Süd: 45 %; Ost: 24 %; West: 24 %; Nord: 19 %

Fensterflächenanteile „hoch“: Süd: 90 %; Ost: 48 %; West: 48 %; Nord: 38 %

Die Verdopplung der Fensterflächenanteile des Mehrfamilienhauses führt zu:

- Nutzenergiebedarf (gesamt) steigt von 32,6 auf 34,1 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) steigt von 25,7 auf 26,1 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) steigt von 46,3 auf 46,9 kWh/(m²a)
- H_T^1 steigt von 0,218 auf 0,273 W/(m²K)

Die Fassaden des Bungalows werden alle nach Osten orientiert (ausgehend vom „normalen“ Fensterflächenanteil)

- Nutzenergiebedarf (gesamt) steigt von 32,6 auf 34,1 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) steigt von 25,7 auf 26,3 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) steigt von 46,3 auf 47,3 kWh/(m²a)
- H_T^1 bleibt 0,218 W/(m²K)

Die Fassaden des Bungalows werden alle nach Osten orientiert (ausgehend vom „hohen“ Fensterflächenanteil)

- Nutzenergiebedarf (gesamt) steigt von 34,1 auf 36,7 kWh/(m²a)
- Endenergiebedarf (gesamt) steigt von 26,1 auf 27,0 kWh/(m²a)
- Primärenergiebedarf (gesamt) steigt von 46,9 auf 48,9 kWh/(m²a)
- H_T^1 bleibt 0,273 W/(m²K)

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Veränderung der Fenstergröße (Fensterflächenanteile) vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die ausgewiesenen End- und Primärenergiebedarfe mit sich bringt. Weiterhin wird deutlich, dass der Einfluss der Gebäudeorientierung bei normaler Verteilung der Fensterflächen über die Gebäudehülle, wie sie in den Beispielen hinterlegt ist, relativ gering ist. Dies gilt sowohl für normale und hohe Fensterflächenanteile in den Fassadenflächen.

Darüber hinaus ist hervorzuheben, dass Freiheitsgrade bezüglich der Gebäudeausrichtung relativ gering sind. Vorgaben über Bebauungspläne (beispielsweise Fluchten, Straßen-/Gartenseite) sowie die Berücksichtigung einer Nachbarbebauung und weitere Einschränkungen für den Entwurf beschränken die Bauausführung. Dies gilt gleichermaßen für Wohn- und Nichtwohngebäude.

Der Einfluss der Fensterflächenanteile bei Nichtwohngebäuden wird im Folgeprojekt betrachtet.

4.1.4 Empfehlungen für das GEG

Das Referenzgebäudeverfahren sollte zur Anforderungsgestaltung beibehalten werden. Es ist seit vielen Jahren bekannt; den durchaus vorhandenen Nachteilen steht eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber. Die Elemente der technischen Referenzbeschreibung werden gegenüber dem GEG 2020 mit neuen Kennwerten bzw. Komponenten versehen, sodass ein neues, grundsätzlich direkt umsetzbares Referenzgebäude entsteht.

Kompakte Gebäude sollen im Referenzgebäudeverfahren mit einem Anreiz versehen werden. Hierzu bieten sich folgende Ansatzpunkte an:

- Die Anerkennung von kompaktem Bauen erfolgt auf den einzelnen Entwurf bezogen. Der Ansatz ist dabei, für kompakte Gebäude den Anforderungswert (Effizienzkenngrößen und Umweltkenngröße) um einen Faktor, der abhängig vom A/V-Verhältnis ist, anzuheben.
- Alternativ kann die Anerkennung von kompakteren Gebäudekonzepten insgesamt erfolgen. Ein- und Zweifamilienhäuser weisen in Bezug auf die Wohnfläche ein höheres A/V-Verhältnis auf und werden in der Referenzbeschreibung mit einem erhöhten Wärmeschutzniveau (kleineren U-Werten) gegenüber kompakten Gebäuden (Mehrfamilienhäusern) versehen.

In den weiteren Betrachtungen (Kapitel 5) wird vom Ansatz unterschiedlicher U-Werte für EFH/ZFH und MFH ausgegangen.

Es wird empfohlen, auch vor dem Hintergrund der gesonderten Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz, Gebäudeorientierung und Fensterflächenanteile im Referenzgebäude nicht zusätzlich zu regulieren.

5 Definition des Neubaustandards für ein novelliertes GEG

5.1 Vorgehen und Festlegungen

Vor dem Hintergrund der zuvor analysierten in Frage kommenden Anforderungsgrößen sowie der Anforderungsmethodik und den jeweils abgeleiteten Empfehlungen werden für die Definition des Neubaustandards im Rahmen eines novellierten GEG den Empfehlungen von Kapitel 0 folgend drei Anforderungsgrößen vorgeschlagen:

- **Nutzenergiebedarf Heizen** - der Nutzenergiebedarf Heizen vor der ersten Iteration $Q_{h,b,0}$
- **Endenergiebedarf** - Summe der Endenergiebedarfe für Wärme und Kälte (einschließlich Wohnungslüftung und -kühlung sowie Warmwasserbereitung) sowie Hilfsenergien bei Wohngebäuden. Bei Nichtwohngebäuden kommen die Anteile für Beleuchtung und raumluftechnische Anlagen (RLT) hinzu.
- **Treibhausgasemissionen** - Summe der mit Emissionsfaktoren bewerteten zuvor genannten Endenergiebedarfe.

Die zulässigen Werte der genannten Anforderungsgrößen werden, wie bislang, über das Referenzgebäude-Verfahren bestimmt.

Im Hinblick auf die Gestaltung der Anforderungshöhe werden in den Abschnitten 5.2 bis 5.4 erste Vorschläge bezüglich des baulichen Wärmeschutzes hergeleitet. Der Vorschlag für die anlagentechnischen Komponenten der Referenzausführung folgt in Abschnitt 5.5. Beispielhafte Auswirkungen bezüglich der Anforderungsgrößen eines novellierten GEG sowie vergleichende Darstellungen zum GEG 2020 zeigen die Berechnungsergebnisse in Abschnitt 5.6.

5.2 „Baubarkeit“ der Gebäudehülle

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Variationen hinsichtlich des baulichen Wärmeschutzes an baupraktischen Umsetzungen ausgerichtet. Untersucht werden nur U-Werte und daraus abgeleitete Dämmstoffdicken marktüblicher Produkte (inkl. möglicher technischer Innovationen) und deren Anwendungspotential in der Praxis. Dabei sind Grenzen hinsichtlich Statik, Brandschutz und Schallschutz mit in die Auswahl eingeflossen. So sind z.B. bei den Außenwandkonstruktionen monolithische Bauweise, zweischaliges Mauerwerk, Wandaufbauten mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) und Leichtbaukonstruktionen in die Betrachtung eingeflossen.

In Tabelle 26 sind exemplarisch die resultierenden U-Werte für die typische Neubaukonstruktionen in Abhängigkeit der verwendeten Materialien und typischen Dicken aufgeführt. Die farbliche Hinterlegung verdeutlicht, welche Kombinationen die Annahmen für das zukünftige Referenzgebäude nicht (rot) bzw. gerade (grün) erfüllen.

Tabelle 26: Exemplarische Eingangsmatrix für ein monolithisches Mauerwerk aus Ziegel mit handelsüblichen Mauerwerksstärken und deklarierten Wärmeleitfähigkeiten, für ein Mauerwerk mit WDVS und für zweischaliges Mauerwerk mit Ziegeln. PUR: Polyurethan. EPS: expandiertes Polystyrol. MW: Mineralwolle

Monolithisches Mauerwerk												
		Dicke in m										
		0,300	0,365	0,425	0,490							
Lambda in Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,05	0,161	0,133	0,115	0,100							
	0,06	0,192	0,159	0,137	0,119							
	0,07	0,222	0,184	0,159	0,139							
	0,08	0,252	0,209	0,181	0,158							
	0,09	0,282	0,234	0,202	0,177							
	0,10	0,311	0,258	0,224	0,195							
	0,11	0,339	0,283	0,245	0,214							
	0,12	0,368	0,307	0,266	0,232							

Mauerwerk mit WDVS														
		Dicke in m												
		0,080	0,100	0,120	0,140	0,160	0,180	0,200	0,220	0,240	0,260	0,280	0,300	
Lambda in Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,024	0,268	0,219	0,185	0,161	0,142	0,127	0,115	0,105	0,096	0,089	0,083	0,078	PUR
	0,032	0,346	0,284	0,241	0,210	0,185	0,166	0,151	0,138	0,127	0,117	0,109	0,102	EPS
	0,035	0,374	0,308	0,262	0,228	0,202	0,181	0,164	0,150	0,138	0,128	0,119	0,112	MW
	0,040	0,418	0,346	0,295	0,257	0,228	0,204	0,185	0,170	0,156	0,145	0,135	0,127	MW
	0,045	0,461	0,383	0,327	0,286	0,253	0,228	0,207	0,189	0,175	0,162	0,151	0,142	Holzfaser

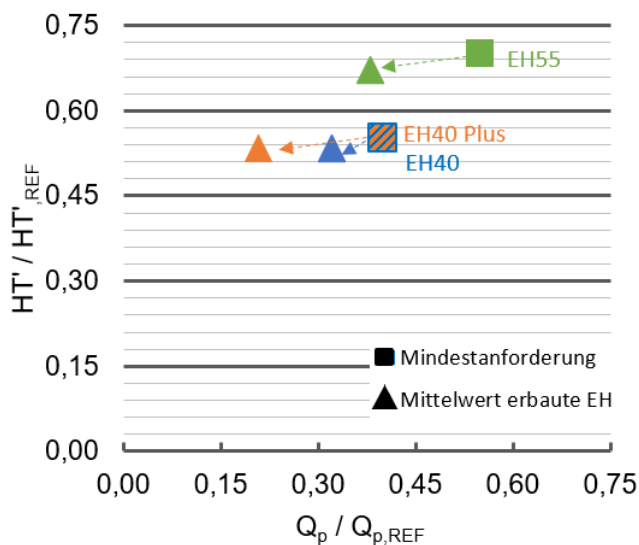
Zweischaliges Mauerwerk (Ziegel)													
		Dicke in m											
		0,080	0,100	0,120	0,140	0,160	0,180	0,200	0,220	0,240	0,260		
Lambda in Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,024	0,215	0,182	0,158	0,140	0,125	0,113	0,104	0,095	0,088	0,082	PUR	
	0,032	0,262	0,225	0,197	0,176	0,158	0,144	0,132	0,122	0,113	0,106	EPS	
	0,035	0,278	0,240	0,211	0,188	0,170	0,155	0,142	0,132	0,122	0,114	MW	
	0,040	0,302	0,262	0,232	0,208	0,188	0,172	0,158	0,147	0,137	0,128	MW	
	0,045	0,323	0,283	0,251	0,226	0,205	0,188	0,174	0,161	0,150	0,141	Holzfaser	

Zweischaliges Mauerwerk (Kalksandstein)													
		Dicke in m											
		0,080	0,100	0,120	0,140	0,160	0,180	0,200	0,220	0,240	0,260		
Lambda in Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,024	0,262	0,215	0,182	0,158	0,140	0,125	0,113	0,104	0,095	0,088	PUR	
	0,032	0,335	0,277	0,236	0,206	0,182	0,164	0,149	0,136	0,125	0,116	EPS	
	0,035	0,361	0,300	0,256	0,223	0,198	0,178	0,161	0,148	0,136	0,126	MW	
	0,040	0,403	0,335	0,287	0,251	0,223	0,201	0,182	0,167	0,154	0,143	MW	
	0,045	0,443	0,370	0,318	0,278	0,248	0,223	0,203	0,186	0,172	0,160	Holzfaser	

5.3 Baupraxis von Effizienzhäusern

In Abbildung 16 werden die umgesetzten Primärenergiebedarfe und Transmissionswärmeverluste aufgeteilt nach EH-Standard im Vergleich zum Referenzgebäude-Niveau dargestellt. Die Daten stammen aus der Evaluation der KfW-Förderdaten für den Zeitraum 2018 bis 2021. Das Verhältnis von $q_p/q_{p,Ref}$ ist auf der X-Achse, das von $H_T'/H_{T,Ref}'$ auf der Y-Achse aufgetragen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Anforderung an den Primärenergiebedarf (nach dem die Namensgebung der Effizienzhausstufen ausgelegt ist) sehr häufig unterschritten und damit die Anforderung des Effizienzhausstandards übererfüllt wird. Dies ist am deutlichsten bei EH 40 Plus zu erkennen, wo der Mittelwert aller umgesetzten Vorhaben bei rund 20 % des Referenzgebäude-Niveaus und damit deutlich unter der Anforderung (40 %) liegt. Die Mittelwerte der Transmissionswärmeverluste (Qualität der Gebäudehülle) erfüllen die Mindestanforderung hingegen nur knapp. Daraus lässt sich schließen, dass im Planungsprozess vor allem daraufhin iteriert wird, die Anforderungen an die Transmissionswärmeverluste einzuhalten. Dies kann technische, vor allem aber auch wirtschaftliche Gründe haben.

Abbildung 16: Mindestanforderungen und tatsächlich umgesetztes energetisches Niveau (Mittelwert) bei Inanspruchnahme einer Förderung



Insgesamt lässt sich daraus schließen, dass nach aktuellem Stand der Technik eine weitere Verschärfung der Anforderungen an den Primärenergieverbrauch gut umsetzbar wäre. Vorrangig betroffen von einer solchen Verschärfung sind fossile Energieträger, deren Rolle in Neubauten damit noch weiter abnehmen würde. Auch leichte Verschärfungen der Anforderung an die Transmissionswärmeverluste sind denkbar und technisch möglich. Es ist zu erwarten, dass weiterhin die Transmissionswärmeverluste und nicht der Primärenergiebedarf (bzw. die THG-Emissionen) den limitierenden Faktor bei den beiden Anforderungen darstellen wird.

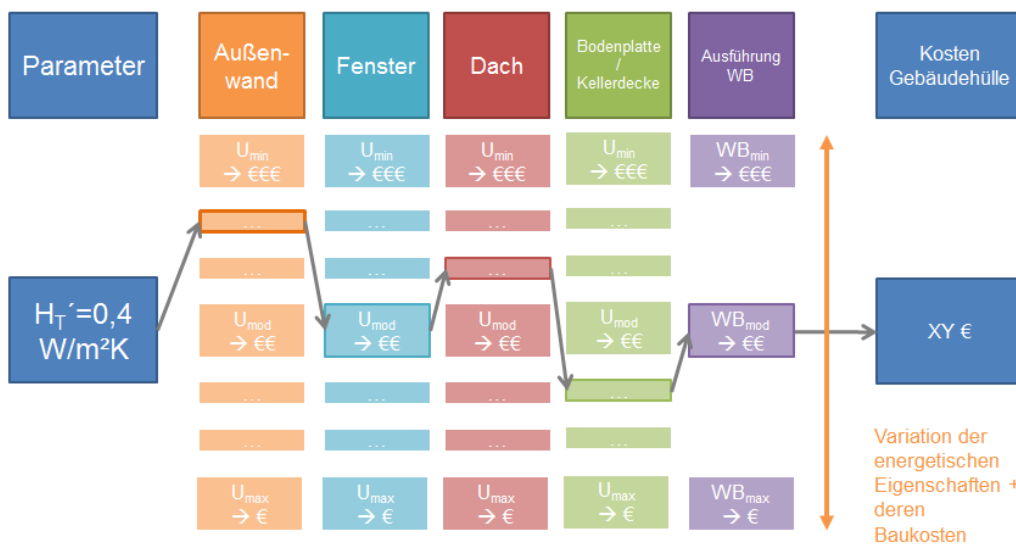
5.4 Parameterstudie zur Gebäudehülle

Sowohl für die Gebäudehülle als auch die Haustechnik sind eine Vielzahl an Konstruktionen bzw. Versorgungssysteme gegeben, um unterschiedlichste energetische Standards umzusetzen. Dieser Untersuchung liegt dazu eine Auswahl an marktüblichen Systemen und Eigenschaften für Bauteile und Wärmeerzeuger zugrunde, auf deren Basis Kosten und Energiebedarfe unter definierten Randbedingungen berechnet und eine Bewertung der Energie- und Kosteneffizienz ermöglicht werden.

Das Ziel dieser Analyse ist es, die technischen Möglichkeiten bei der Entwicklung eines bebaubaren Referenzgebäudes auszuloten und entsprechende Werte zu definieren.

Ausgangspunkt bildet eine Parameterstudie zur Gebäudehülle, in der die energiebedingten Mehrkosten ermittelt werden. Dazu werden alle möglichen Kombinationen der energetisch relevanten Bauteile (Außenwand, Dach, Kellerdecke, Fenster, Außentür und Wärmebrücken) gebildet (Abbildung 17), die sich in ihrer thermischen Qualität (U-Wert) und in ihren Investitionskosten unterscheiden. Die Ergebnisse werden entsprechend des spezifischen Transmissionswärmeverlusts der Gebäudehülle H_T' sortiert. Damit können diese den Anforderungen des Energiestandards (z. B. EH55 oder EH44) einfach zugeordnet und die Lösungsvarianten und deren Investitions- (inkl. Median und Quartilen) bzw. Differenzkosten identifiziert und mögliche Empfehlungen zu neuen Referenzwerten gegeben werden.

Abbildung 17: Schematische Darstellung der Parameterstudie Gebäudehülle.

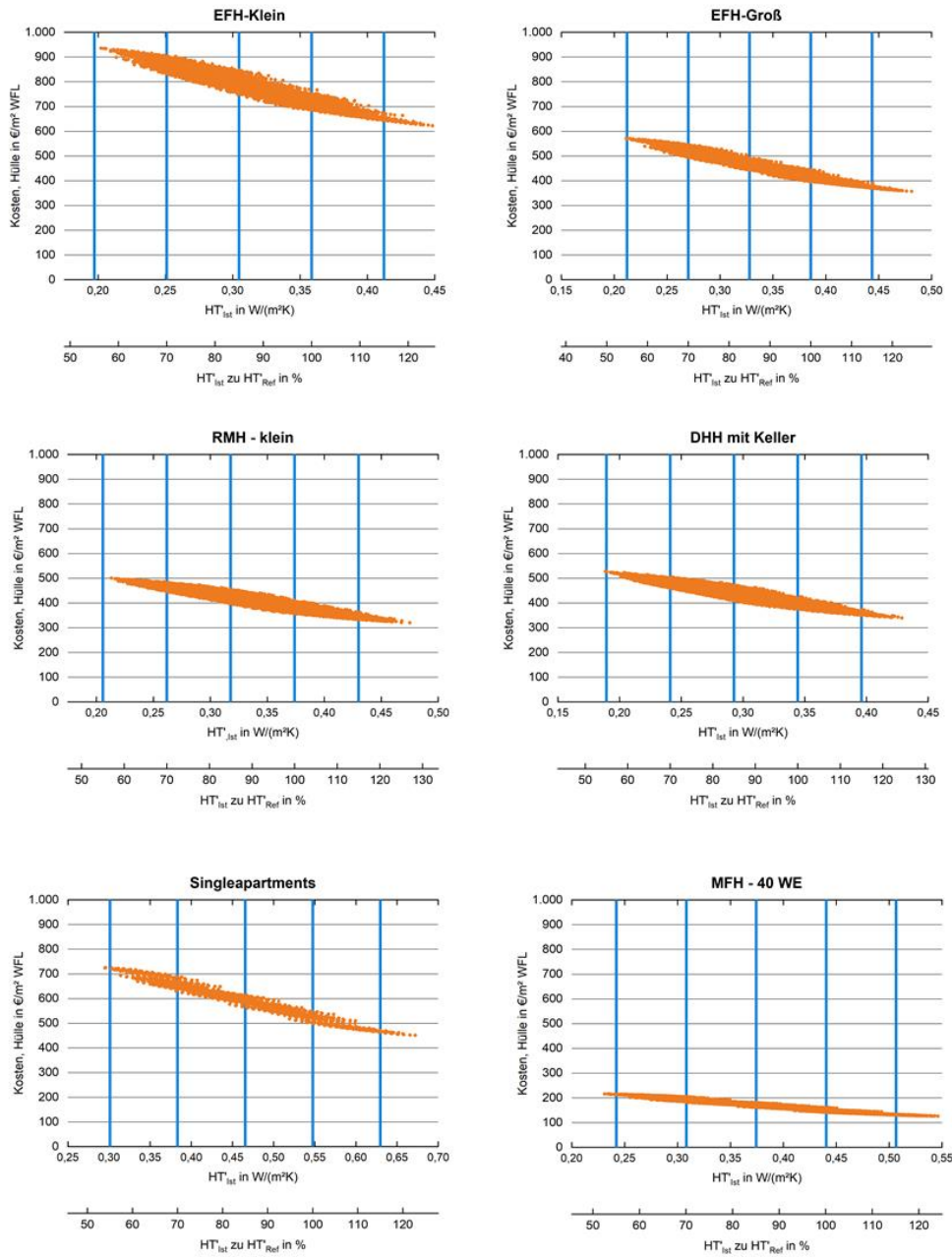


Weiterhin werden neben der Gebäudegeometrie auch eine möglichst repräsentative Definition der Gebäudehülle bei den Berechnungen betrachtet. Die Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen des ZUB (2010) dient als Grundlage. Variiert werden die Bauteile nach Tabelle 27.

Tabelle 27: Variation der U-Werte im Rahmen dieser Studie. Die derzeitigen Referenzwerte sind fett gekennzeichnet.

U-Wert in W/(m ² K)						
Wand	0,28	0,24	0,34	0,2	0,15	
Dach	0,2	0,24	0,34	0,14	0,31	0,1
OG	0,2	0,24	0,34	0,14	0,31	0,1
Flachdach	0,2	0,26	0,14	0,1	0,31	0,34
Keller	0,35	0,3	0,39	0,25	0,2	
Fenster	1,3	1,69	0,95	0,8	0,7	
Dachfenster	1,4	1,82	1	0,85	0,75	
Tür	1,8					
UWB	0,05	0,035	0,1	0,03		

Abbildung 18: Variation der Kosten je m² Wohnfläche in Abhängigkeit des gewählten baulichen Wärmeschutzes. Dargestellt sind exemplarisch die Ergebnisse für 6 Wohngebäude. Untersucht wurden alle Wohngebäude der ZUB Datenbank. (EFH: Einfamilienhaus, RMH: Reihenmittelhaus, DHH: Doppelhaushälfte, MFH: Mehrfamilienhaus, WE: Wohnungseinheit)

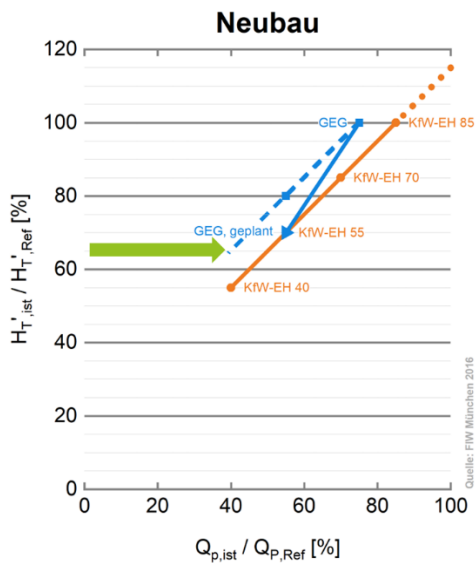


Durch eine Variation der U-Werte der einzelnen Bauteile lassen sich bei gleichen Investitionskosten unterschiedliche spezifische Transmissionswärmeverluste erreichen. Das bedeutet, dass durch sinnvolle Kombination der Bauteile Kosten gegenüber bauteilbezogenen und obligatorischen Mindestwerten eingespart werden können. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass hinsichtlich der thermischen Qualität der Gebäudehülle ein technischer Grenznutzen erreicht wird. Unter den hier gewählten Randbedingungen ist für niedrige spezifische Transmissionswärmeverluste die Anzahl möglicher Kombinationen limitiert. Mit einer technologisch noch praktizierbaren Erhöhung des derzeitigen

EH 55-Standards ($H'_{T} \leq 0,7 * H'_{T,Ref}$) auf $H'_{T} \leq 0,65 * H'_{T,Ref}$ (Abbildung 19) entstehen lediglich Mehrkosten für die Hülle in Höhe von durchschnittlich 0,5 %. Dem gegenüber stehen Einsparungen bei den Brennstoffkosten.

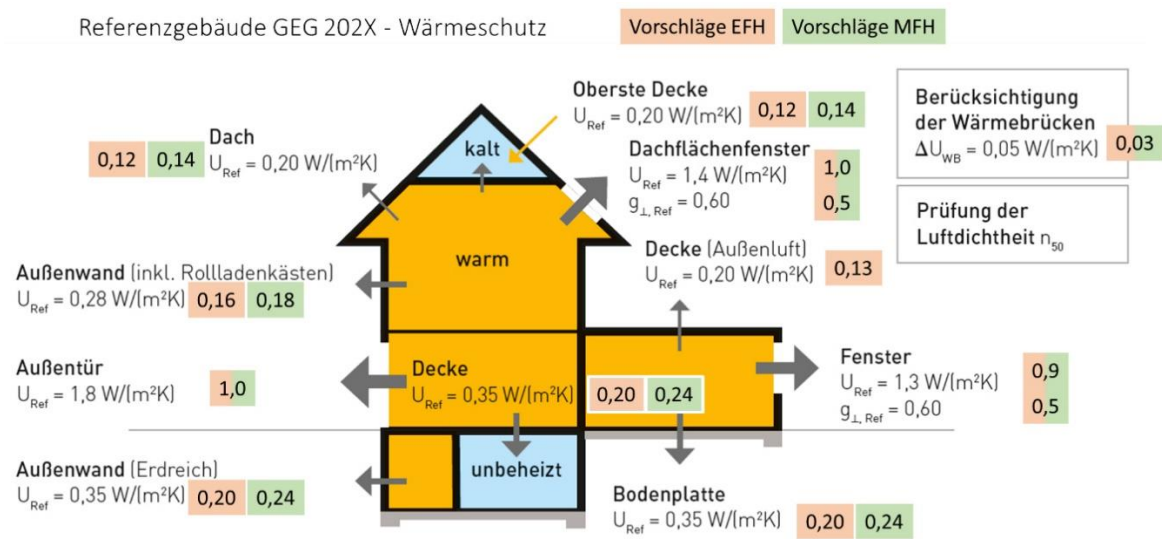
Insgesamt empfehlen wir daher eine Reduktion des spezifischen Transmissionswärmeverlustes durch entsprechende Anpassung der U-Werte im Referenzgebäude auf etwa 65 % des derzeit gültigen Referenzwertes (Abbildung 20).

Abbildung 19: Empfohlene Orientierungswerte für H'_{T} und q_p für ein künftiges Referenzgebäude sowie die parallele Entwicklung der Förderstandards, wobei in Zukunft nicht mehr H'_{T} und q_p , sondern $q_{h,b,0}$ und THG verwendet werden.



Daraus abgeleitet lassen sich für Wohngebäude folgende zukünftige Referenzwerte an den baulichen Wärmeschutz ableiten:

Abbildung 20: Empfohlene Werte (farbig hinterlegt) für ein künftiges Referenzgebäude im Vergleich zum derzeitigen Stand



Quelle des Bildes: zeRa

Tabelle 28: Vorschlag für ein aktualisiertes Referenzgebäude für Ein- und Zweifamilienhaus (EFH) und MFH (Spalten „Referenz“) und Vergleich mit dem in einer ersten Projektphase definierten Niveau I (entsprechend der Anforderungen an das vereinfachte Verfahren gemäß KfW/GEG 2022) und einem Niveau II (angelehnt an das GEG 2.0 ifeu et al. (2022))

Bauteile		Niveau I entspr. GEG 2022 Anlage 5	Niveau II	Referenz EFH/ZFH	Referenz MFH
Außenwände, Geschossdecken nach unten gegen Außenluft	U_{AW}	0,20 W/(m ² K)	0,16 W/(m ² K)	0,16 W/(m ² K)	0,18 W/(m ² K)
Fenster und sonstige transparente Bauteile	$U_{w; g}$	0,90 W/(m ² K); 0,53	0,80 W/(m ² K); 0,53	0,90 W/(m ² K); 0,50	0,90 W/(m ² K); 0,50
Dachflächenfenster	$U_{w; g}$			1,0 W/(m ² K); 0,50	1,0 W/(m ² K); 0,50
Türen (Keller- und Außentüren)	U_{AT}	1,2 W/(m ² K)	1,0 W/(m ² K)	1,0 W/(m ² K)	1,0 W/(m ² K)
Steildachflächen, oberste Geschossdecke, Dachgauben	U_D	0,14 W/(m ² K)	0,12 W/(m ² K)	0,12 W/(m ² K)	0,14 W/(m ² K)
Flachdach	U_D			0,11 W/(m ² K)	0,11 W/(m ² K)
Sonstige opake Bauteile (Kellerdecken, Wand- und Bodenflächen gegen unbeheizt/Erdreich etc.)	U_{op}	0,25 W/(m ² K)	0,18 W/(m ² K)	0,2 W/(m ² K)	0,24 W/(m ² K)
Wärmebrücken	ΔU_{WB}	0,035 W/(m ² K)	0,03 W/(m ² K)	0,03 W/(m ² K)	0,03 W/(m ² K)
Luftdichtheit der Gebäudehülle	n_{50}	1,0 h ⁻¹	0,6 h ⁻¹	0,6 h ⁻¹	0,6 h ⁻¹

5.5 Anlagentechnische Anforderungen an das Referenzgebäude

Als Referenzausführung der Anlagentechnik für Wohngebäude wird ein System vorgeschlagen, das

- eine zielorientierte Formulierung der Anforderungshöhe sowohl des Endenergiebedarfs als auch der Umweltgröße – Treibhausgasemissionen – ermöglicht,
- eine prinzipiell ausführbare Versorgungsvariante darstellt und
- im Berechnungsverfahren der DIN V 18599 abbildbar ist.

Es enthält im Kern eine **Referenzheizung**, die wie ein Fern- und Nahwärmenetz mit einem vorgegebenen THG-Faktor von 130 g/kWh berechnet wird (Wert ist vorläufig). Dieser Weg wurde gewählt, weil die Wahl beispielsweise einer Wärmepumpe als Referenzheizung zahlreiche andere Heizungssysteme u.a. mit Blick auf die Endenergie ausgeschlossen hätte, beispielsweise Fernwärme, Pelletkessel oder andere biogene Heizungen.

Insgesamt wird im Referenzgebäude, zunächst einheitlich für EFH und MFH, folgende anlagentechnischen Referenzausführung zu Grunde gelegt:

- Wärmeerzeugung über einen Referenzwärmeerzeuger (wie Fern- und Nahwärmenetz berechnet); Auslegungstemperatur 55/45 °C, zentrales Verteilsystem innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche; Wärmeübergabe mit freien Heizflächen;
- zentrale Warmwasserbereitung; gemeinsame Wärmebereitung mit Heizungsanlage; Verteilsystem mit Zirkulation, innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche;
- Für die Lüftungsanlage wird gegenüber dem aktuellen Referenzgebäude eine verbesserte zentrale Abluftanlage eingebaut, die bedarfsgeführt mit geregelter DC-Ventilator funktioniert (ggf. U-Wert-Deckel einführen, Untersuchungen dazu im Folgeprojekt).

Die Einbeziehung einer PV-Anlage in die Referenzausführung wird erst in Folgeprojekt betrachtet.

Hinweis: Die nicht dargestellten weiteren Angaben zum Anlagensystem werden wie in der technischen Ausführung des Referenzgebäudes gemäß GEG 2020 angesetzt. Eine Anpassung einzelner Parameter wird im Rahmen des Folgeprojekts vorgenommen.

Im Folgeprojekt wird noch geprüft, ob auch die Anlagentechnik bzgl. EZFH und MFH differenziert werden soll, beispielsweise hinsichtlich der Warmwasserbereitung und der eingesetzten Lüftungstechnik.

5.6 Berechnungsergebnisse

Anhand von zwei Beispielgebäuden (kleines Einfamilienhaus - EFH, kleines Mehrfamilienhaus - MFH) werden die Effizienzgrößen H_T^{-1} und $q_{h,b,0}$, die End- und Primärenergiebedarfe sowie die Treibhausgasemissionen für die Niveaus GEG 2020 und GEG neu berechnet und gegenübergestellt. Für die Primärenergie- und Emissionsfaktoren werden dabei aktuelle, gemäß GEG 2020, und prognostizierte (künftige) Werte gemäß Tabelle 29 und Tabelle 30 in Ansatz gebracht.

Tabelle 29: Zusammenstellung der zugrunde gelegten Primärenergiefaktoren

Randbedingungen	Referenz 2020		Referenz neu		WP LuftWasser		WP SoleWasser		WP LuftLuft		Pelletkessel		FW 0,25		EDirekt		BW Biome- than Solar TWE	
	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig	bis-her	künf-tig
f_p therm. [-]	1,1	1,1	0,6	0,6	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3	0,2	0,2	0,25	0,25	1,8	1,3	0,7	0,7
f_p aux [-]	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3	1,8	1,3

Tabelle 30: Zusammenstellung der zugrunde gelegten Emissionsfaktoren

Randbedingungen	Referenz 2020		Referenz neu		WP LuftWasser		WP SoleWasser		WP LuftLuft		Pelletkessel		FW 0,25		EDirekt		BW Biomethan Solar TWE	
	bis-her	künftig	bis-her	künftig	bis-her	künftig	bis-her	künftig	bis-her	künftig	bis-her	künftig	bis-her	künftig	bis-her	künftig	bis-her	künftig
x _{CO2 therm} [kg/kWh]	240*	240*	130	130	560	350	560	350	560	350	20	20	60	60	560	350	140	140
x _{CO2 aux} [kg/kWh]	560	350	560	350	560	350	560	350	560	350	560	350	560	350	560	350	560	350

* Die Anpassung des THG-Wertes auf 250 g/kWh auf Grund der aktuellen Studie in Tabelle 25 erfolgte erst kurz vor Redaktionsschluss.

Ausgehend von der Definition einer künftigen Ausführung des Referenzgebäudes

- Referenzgebäude GEG neu: baulicher Wärmeschutz gemäß (dort: Spalten Referenz EFH/ZFH und Referenz MFH); Anlagentechnik gemäß Abschnitt 5.5; Fern-/ Nahwärme: Primärenergiefaktor $f_{p,FW} = 0,6$; Emissionsfaktor $x = 130$ g/kWh); Strom: Primärenergiefaktor $f_{p,Strom} = 1,3$; Emissionsfaktor $x = 350$ g/kWh)

werden folgende Berechnungsfälle betrachtet:

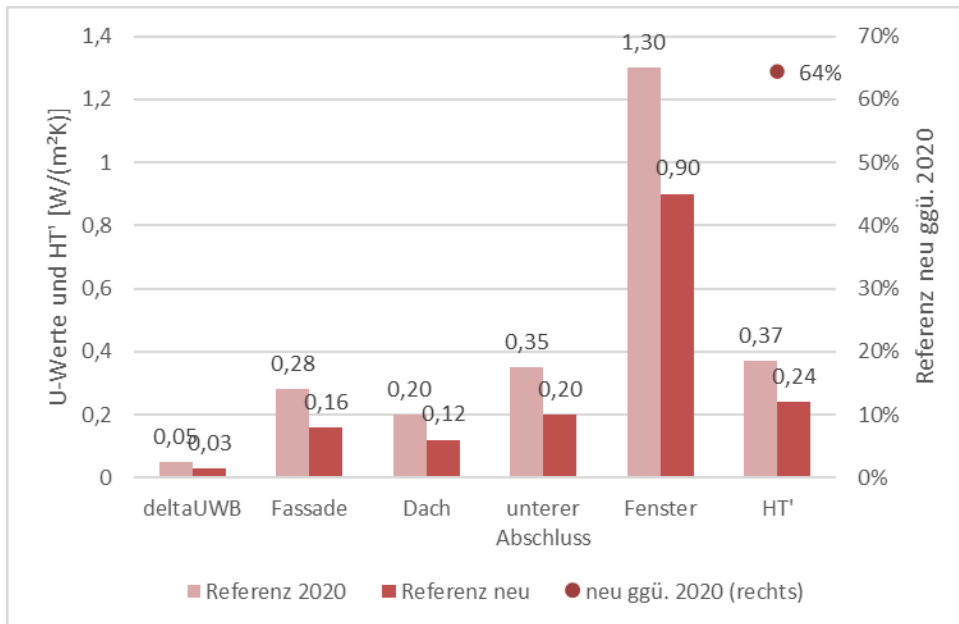
- Varianten der Referenzausführungen:
 - Referenzgebäude GEG 2020 mit aktuellen f_p - und THG-Werten
 - Referenzgebäude GEG 2020 mit neuen f_p - und THG-Werten
 - Referenzgebäude GEG neu mit aktuellen f_p - und THG-Werten
 - Referenzgebäude GEG neu mit neuen f_p - und THG-Werten
- Weitere Varianten der Anlagentechnik - nur mit neuen f_p - und THG-Werten; baulicher Wärmeschutz gemäß Tabelle 28
 - GEG neu: Luft/Wasser-WP, Flächenheizung, Abluft bedarfsgeführt
 - GEG neu: mit Sole/Wasser-WP, Flächenheizung, Abluft bedarfsgeführt
 - GEG neu: mit Luft/Luft-WP, Luftheizung, Zu-/Abluft bedarfsgeführt
 - GEG neu: mit Pelletkessel, Abluft bedarfsgeführt
 - GEG neu: mit Fernwärme ($f_p = 0,25$), Abluft bedarfsgeführt
 - GEG neu: mit Elektrodirektheizung, freie Heizflächen, Abluft bedarfsgeführt
 - GEG neu: mit Gas-Brennwertkessel (Biomethan, $f_p = 0,7$; $x = 140$ g/kWh), freie Heizflächen, Solarthermie für TWW, Abluft bedarfsgeführt.

5.6.1 Effizienzgrößen H_T' und $q_{h,b,0}$

In Abbildung 21 sind die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der einzelnen Bauteilgruppen sowie der resultierende auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust H_T' ganz rechts dargestellt.

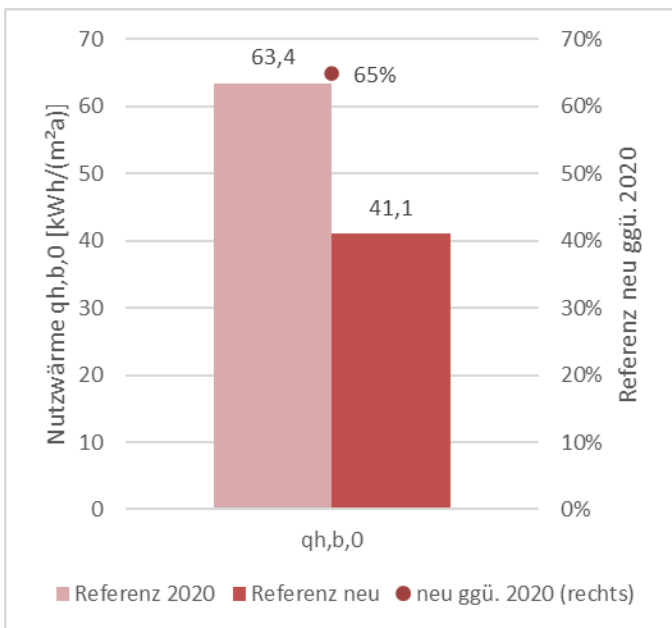
Für H_T' ergibt sich $0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für Referenz 2020 und $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für Referenz neu, letzteres entspricht 64 % gegenüber der Referenz 2020, im Diagramm ist dies als einzelner Punkt dargestellt mit Bezug auf die rechte Sekundärachse.

Abbildung 21: Ausführung Gebäudehülle - U-Werte und H_T' – EFH



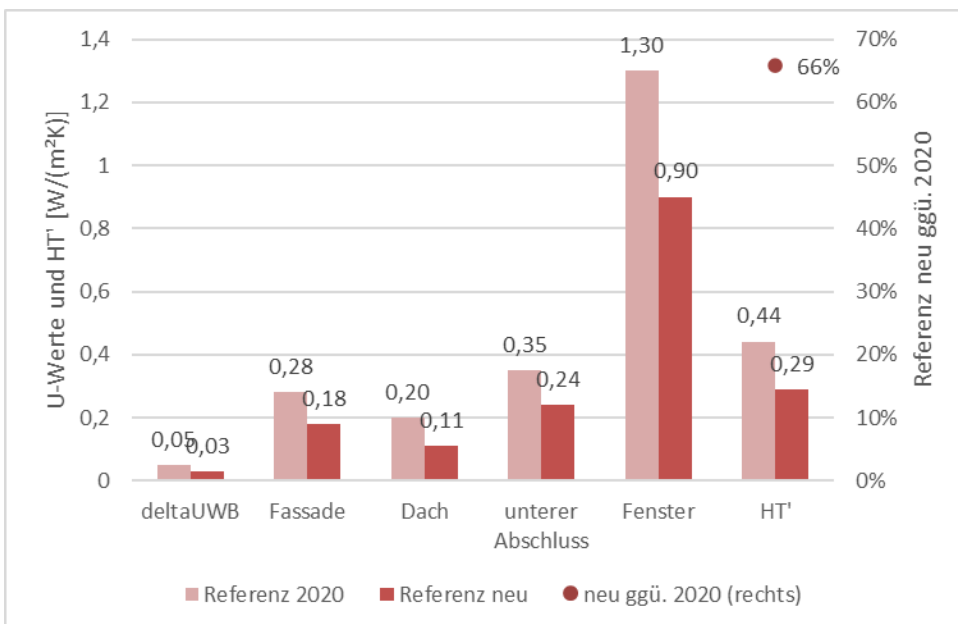
Die Gegenüberstellung der Ausführung Referenz 2020 und Referenz neu für das EFH ergibt für den Nutzenergiebedarf Heizen (vor Iteration) $q_{h,b,0}$ eine Absenkung von 63,4 auf 41,1 kWh/(m²a) also auf 65 % des Ausgangswertes (Abbildung 22). Der Wert von $q_{h,b,0} = 41,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ gilt auch für die im Weiteren betrachteten Varianten mit Ausnahme der Luft/Luft-Wärmepumpe. Für das letztgenannte System resultiert aufgrund der angesetzte Zu-/Abluftanlage die Effizienzkenngroße zu $q_{h,b,0} = 24,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Abbildung 22: Ausführung Gebäudehülle - Nutzenergiebedarf Heizen $q_{h,b,0}$ – EFH

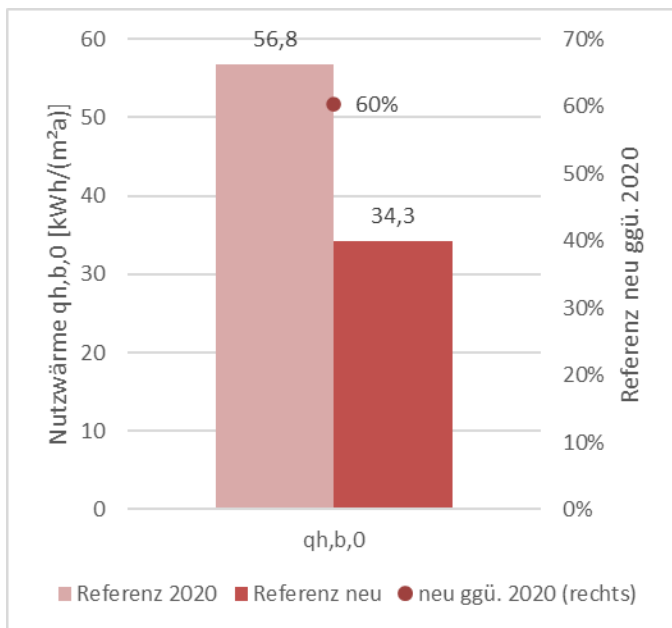


Beim Mehrfamilienhaus liegen die U-Werte für Außenwand und unteren Abschluss über den Werten des Einfamilienhauses. Für das Dach liegen sie jedoch darunter, da beim MFH als Flachdach ausgeführt. Der resultierende Wert H_T' liegt für die Referenz neu mit $0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bei 66 % des Wertes der Referenz 2020 (Abbildung 23).

Abbildung 23: Ausführung Gebäudehülle - U-Werte und H_T' – MFH



Der Heizwärmebedarf (Nutzenergie) beim MFH sinkt für die Referenz neu auf 60 % des Werts für die Referenzausführung 2020 (Abbildung 24). Für die Varianten mit der Luft/Luft-Wärmepumpe ergibt sich ein Wert von $q_{h,b,0} = 19,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

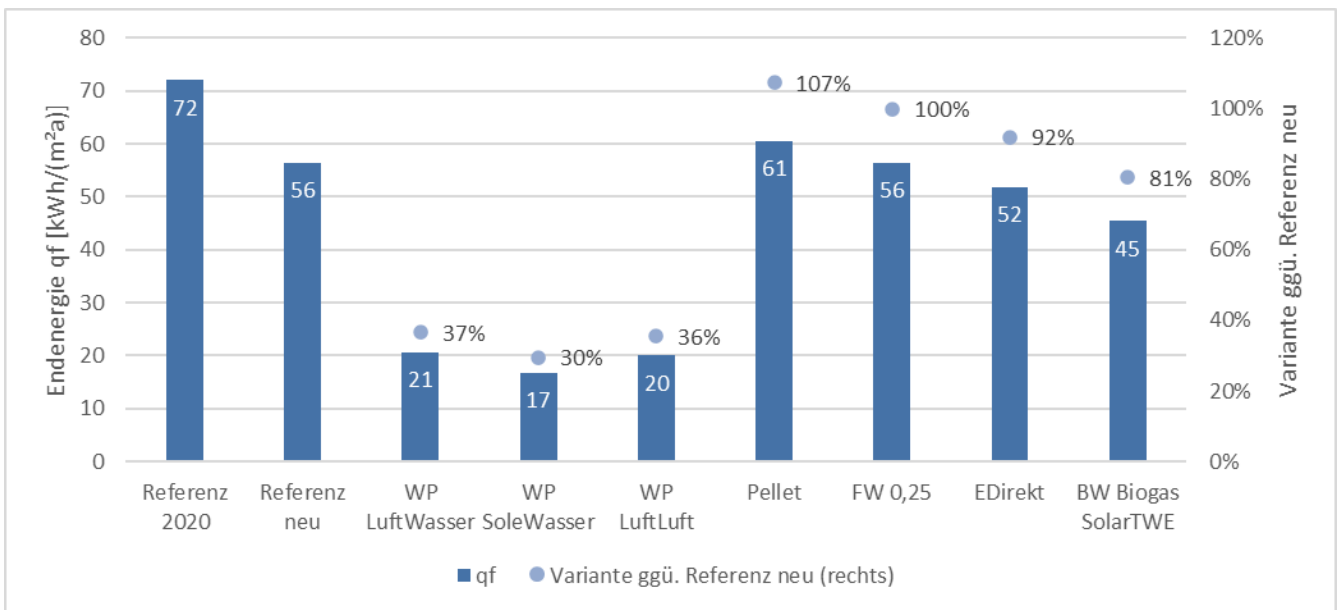
Abbildung 24: Ausführung Gebäudehülle - Nutzenergiebedarf Heizen $q_{h,b,0}$ – MFH

5.6.2 Endenergiebedarf

Für die Referenz 2020 ergibt sich für das EFH ein Endenergiebedarf (Heizwert bezogen) q_f von 72 kWh/(m²a), bei der Referenzausführung neu mit Fernwärmesystem stellt sich der Endenergiebedarf bei 56,4 kWh/(m²a) ein.

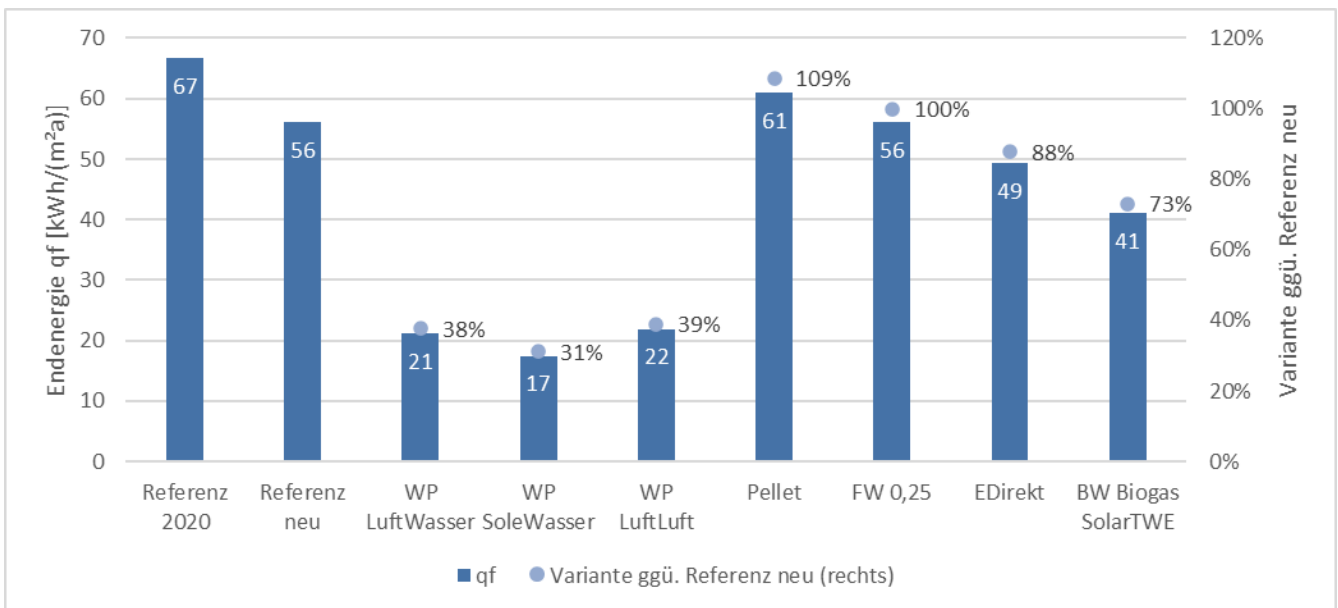
Die Varianten liegen - gegenüber der Referenz neu - bei 37 bzw. 30 % für die Systeme mit Wärmepumpen, bei 107 bzw. 100 % bei Biomasse und Fernwärme und bei 92 bzw. 81 % bei der Elektrodirektheizung und Brennwertkessel/Biomethan (siehe Datenbeschriftungen bezogen auf Sekundärachse rechts). Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 grafisch dargestellt.

Abbildung 25: Endenergiebedarf Referenzen und Varianten – EFH



Für das Mehrfamilienhaus liegen die Werte für den Endenergiebedarf der Referenzen 2020 und Referenz neu tendenziell etwas unterhalb der Werte des Einfamilienhauses. Die Prozentangaben relativ zur Referenz neu bei den Varianten ändern sich um bis zu 8 Prozentpunkte (Abbildung 26).

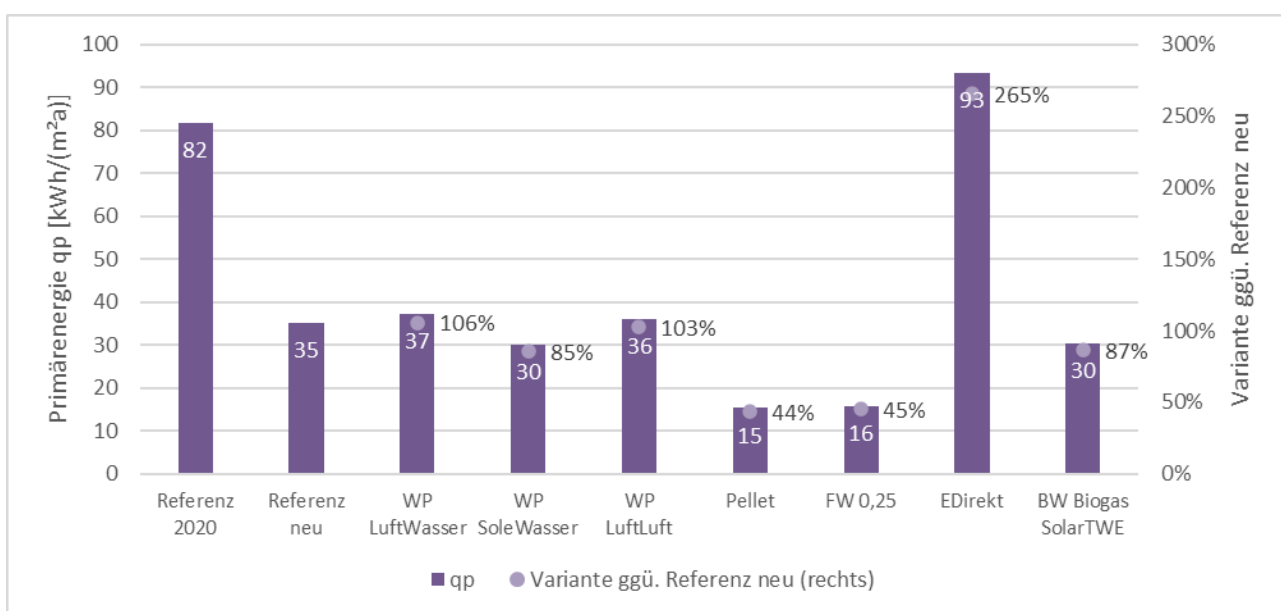
Abbildung 26: Endenergiebedarf Referenzen und Varianten – MFH



5.6.3 Primärenergiebedarf

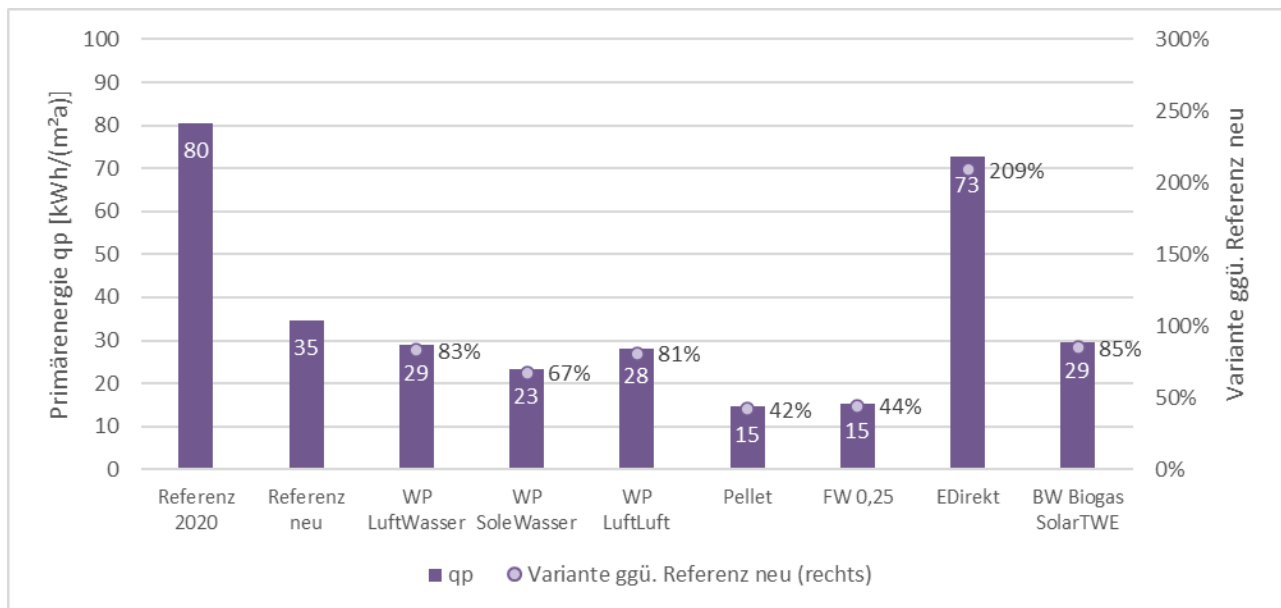
Die Referenzausführung 2020 ergibt beim Einfamilienhaus (EFH) für das aktuelle GEG eine Anforderung an den Primärenergiebedarf ($0,75 q_p$) von $61,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, die Referenzausführung neu liegt mit $35,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bei etwa 57 % dieses Wertes, siehe Abbildung 27. Die Varianten liegen bei den Wärmepumpen-Systemen über (Luft-Wasser-Wärmepumpe, 106 %; Luft-Luft-Wärmepumpe, 103 %) bzw. unter (Sole-Wasser-Wärmepumpe, 85 %) dem neuen Referenzwert und bei Biomasse und der Fernwärme mit optimiertem Faktor von 0,25 bei weniger als der Hälfte, d. h. 44 bzw. 45 %. Der Primärenergiebedarf der Elektrodirektheizung übersteigt der Referenzwert neu deutlich (265 %). Bei Einsatz des Brennwertkessels/Biomethan wird der Referenzwert neu leicht unterschritten (99 %).

Abbildung 27: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – EFH



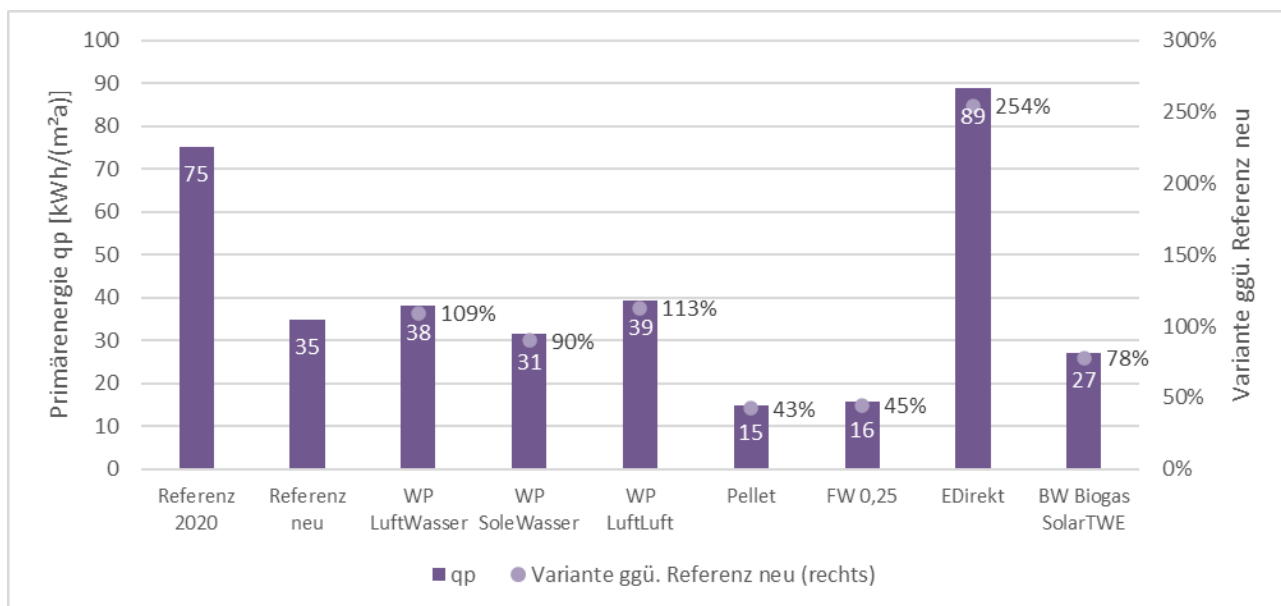
Mit den gegenüber den bisherigen Randbedingungen geänderten Primärenergiefaktoren für den Energieträger Strom (vergl. Tabelle 29) ergeben sich beim EFH die in Abbildung 28 dargestellten Primärenergiebedarfswerte. Mit den angepassten neuen Randbedingungen sinken bei der Betrachtung des EFH auch die Luft/Wasser- und Luft/Luft-Wärmepumpen unter den Referenzwert neu.

Abbildung 28: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig– EFH



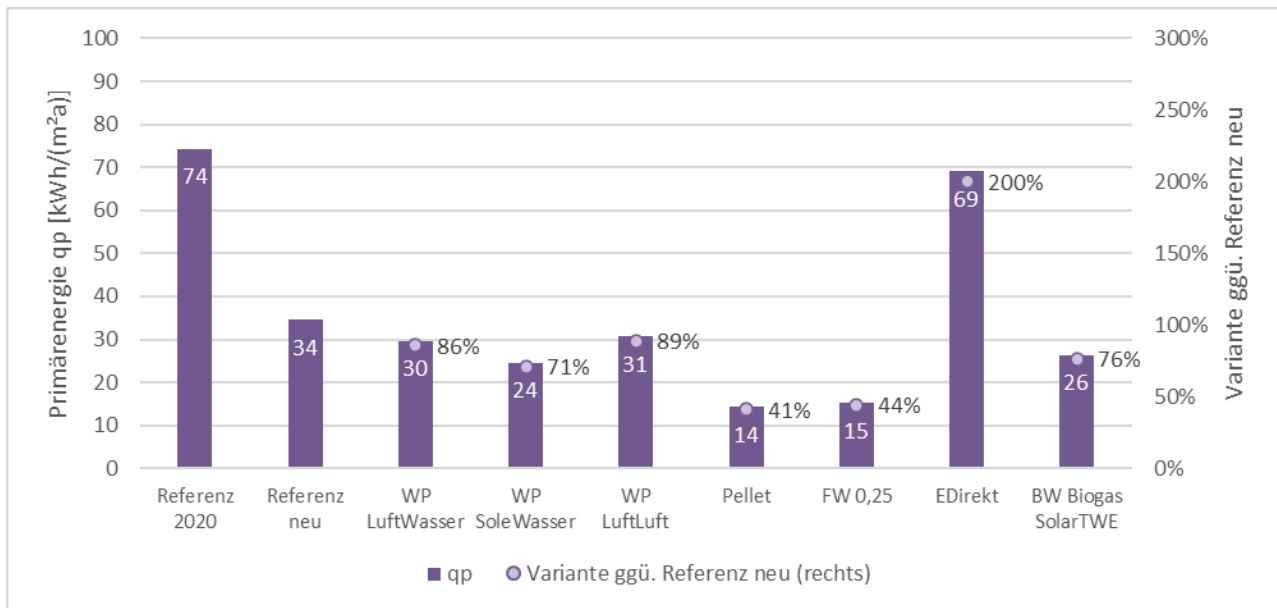
Beim Mehrfamilienhaus ergibt sich bei Verwendung der bisherigen Primärenergiefaktoren für die Anforderung GEG 2020 ein Wert von 56,4 kWh/(m²a), die Referenzausführung neu weist demgegenüber einen Wert von 34,9 kWh/(m²a) auf, (Abbildung 29). Für die Varianten liegen die Wärmepumpen etwa 3 bis 10 Prozentpunkte über den Werten des EFH, bei Pelletkesseln und Fernwärme annähernd unverändert. Beim Elektro-Direkt-System ergeben sich größere Änderungen ggü. dem EFH, beim BW-System mit Biomethan kleinere.

Abbildung 29: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – MFH



Die Umstellung auf neue Randbedingungen (Energieträger Strom) ergibt für alle drei Wärmepumpensysteme die Einhaltung der neuen Anforderung, also die Unterschreitung des Referenzwerts, siehe Abbildung 30. Auch beim Einsatz des Brennwertkessels/Biomethan wird der Referenzwert neu unterschritten (88 %).

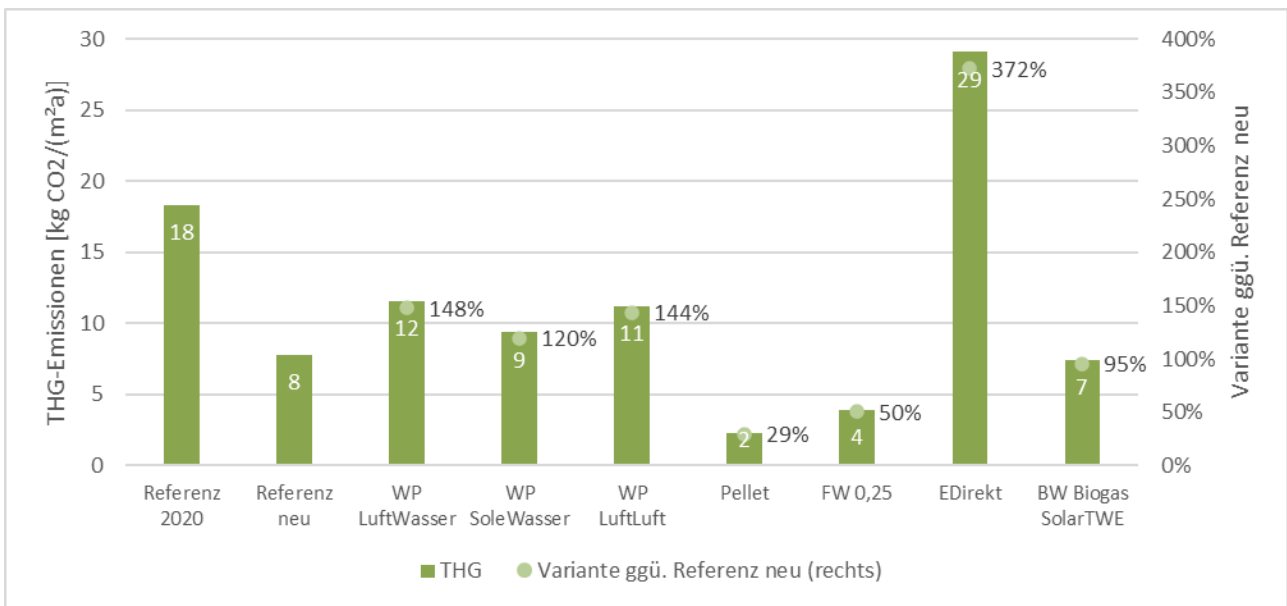
Abbildung 30: Primärenergiebedarf Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig – MFH



5.6.4 Treibhausgasemissionen

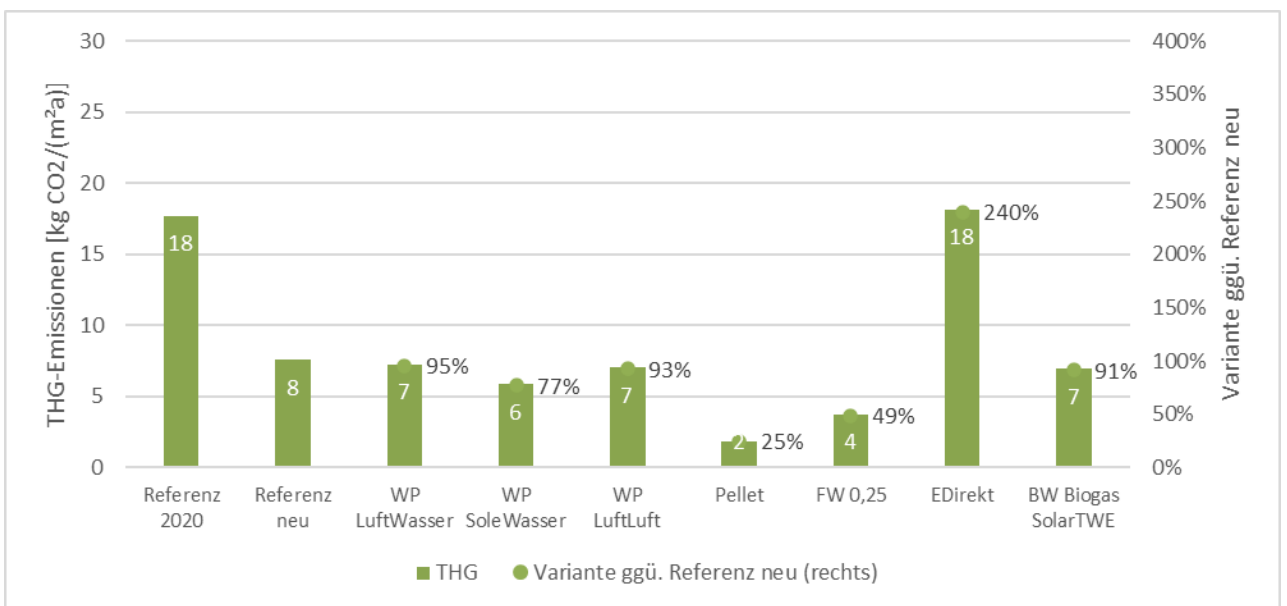
Die Treibhausgasemissionen liegen beim EFH unter Verwendung der bisherigen Emissionsfaktoren bei der Ausführung Referenz neu mit $7,8 \text{ kg CO}_2/(\text{m}^2\text{a})$ bei 43 % des Wertes, welcher sich für die Referenzausführung 2020 ergibt (Abbildung 31). Für die Wärmepumpen-Systeme liegen die Werte mit 148, 120 und 144 % über dem Wert der Referenz neu, weil der Stromfaktor mit 560 g/kWh in dieser Berechnung den Stand von 2018 widerspiegelt. Die Systeme Biomasse und Fernwärme (0,25) liegen deutlich unter dem neuen Referenzwert (29 bzw. 50 %); eine Unterschreitung mit 95 % liegt ebenfalls beim Brennwertkessel/Biomethan vor. Die Elektrodirektheizung weist THG-Emissionen von rd. $29 \text{ kg CO}_2/(\text{m}^2\text{a})$ auf und führt zu einer Überschreitung des Referenzwertes neu um 372 %.

Abbildung 31: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – EFH



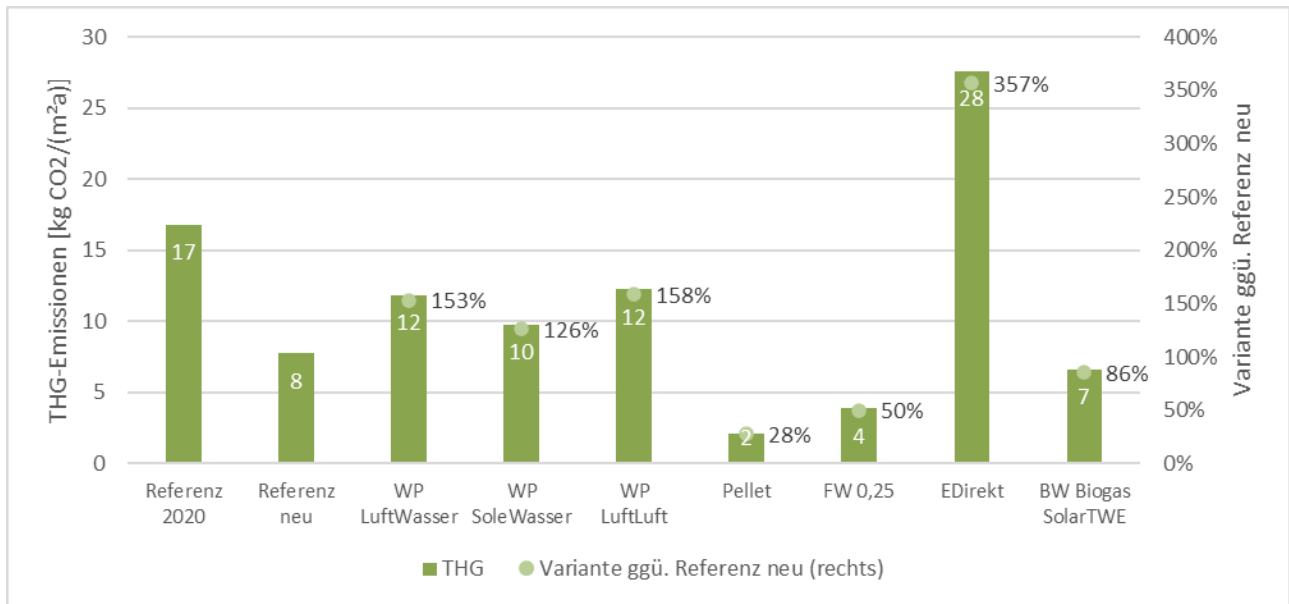
Durch die Anpassung der Randbedingungen (CO₂-Äquivalent für Wärmepumpen-Strom), vergl. Tabelle 30, sinken die Werte für alle Wärmepumpen-Varianten unter den Referenzwert neu, siehe Abbildung 32.

Abbildung 32: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig – EFH



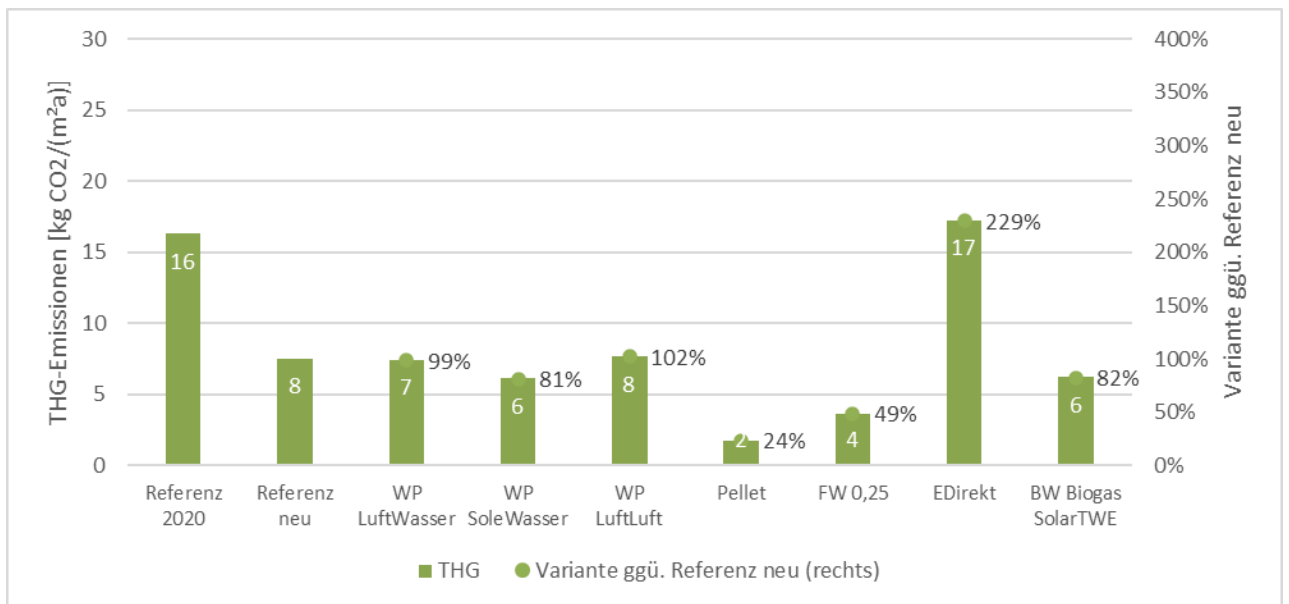
Die Werte für das Mehrfamilienhaus liegen mit den bisherigen Randbedingungen etwa in der Größenordnung der Werte des Einfamilienhauses (Abbildung 33).

Abbildung 33: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen bisher – MFH



Die Absenkung der CO₂-Äquivalente (Tabelle 30) führt beim MFH (Abbildung 34) zu vergleichbaren Absenkungen der Emissionen, bezogen auf die Werte des EFH.

Abbildung 34: Treibhausgasemissionen Referenzen und Varianten - Randbedingungen künftig – MFH



5.6.5 Diskussion

Die Analysen möglicher Anforderungsgrößen und Anforderungsverfahren führten zu den Empfehlungen, die drei Anforderungsgrößen Nutzenergiebedarf Heizen (vor Iteration), Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen in Verbindung mit dem Referenzgebäudeverfahren für die Definition eines Neubaustandards in einem novellierten GEG heranzuziehen. Zur Festlegung der Referenzvorgaben für den baulichen Wärmeschutz zeigen die Untersuchungen, dass U-Werte vorgesehen werden sollten, die zu einer Absenkung des H_T' -Wertes auf etwa 65 % des derzeit gültigen Referenzniveaus (GEG 2020) führen. Als Referenzanlagentechnik wird ein Fern-/Nahwärmesystem vorgeschlagen, das die Voraussetzungen mitbringt, sowohl für die Endenergie- als auch Umweltaanforderung zielführende Anforderungsniveaus formulieren zu können.

Die Berechnungsergebnisse der Energiebilanzen unter Zugrundelegung der neuen Referenzvorgaben können wie folgt zusammengefasst und kommentiert werden:

- Die Ergebnisse für die Effizienzgröße $Q_{h,b,0}$ zeigen bei dem fortgeschriebenen Ansatz GEG neu gegenüber dem Referenzgebäude nach GEG 2020 für die betrachteten anlagentechnischen Systeme mit Abluftanlage Absenkungen von 34 % beim EFH und 40 % beim MFH. Damit werden die zuvor genannten Potenziale der Verbesserung gegenüber dem Niveau des Referenzgebäudes GEG 2020 durch den höheren baulichen Wärmeschutz aufgezeigt. Die Auswirkungen des Einsatzes einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, der zu einer deutlichen Absenkung von $Q_{h,b,0}$ führt, müssen im Folgeprojekt untersucht werden. Gegebenenfalls ist eine Begrenzung der Bauteil-U-Werte vorzusehen.
- Die Anforderungswerte des Endenergiebedarfs werden, mit Ausnahme der Pelletheizung, von allen betrachteten Systemen eingehalten bzw. unterschritten. Die Variante mit Pelletheizung könnte zur Anforderungserfüllung z. B. mit einem verbesserten Wärmeschutz, einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung oder einer Solarthermie-Anlage ausgestattet werden. Es wird weiterhin deutlich, dass eine Referenztechnik auf Basis einer Wärmepumpe nicht zielführend wäre, da alle Varianten mit dieser Anlagentechnik die Anforderungen deutlich unterschreiten.
- Die Umweltgrößen Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen führen hinsichtlich der Anforderungserfüllung eines neuen GEG-Niveaus (Randbedingungen künftig) zu vergleichbaren Ergebnissen. Bis auf die Elektro-Direktheizung liegen alle Varianten unterhalb des jeweiligen Vergleichswerts der Referenz neu. Die Variante mit Elektro-Direktheizung müsste zur Unterschreitung der Umweltaanforderung mit umfassender Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes, dem Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sowie einer PV-Anlage ergänzt werden.

Insgesamt wird die zielführende Tauglichkeit der Anforderungsgrößen, das Funktionieren der Methode des Referenzgebäudes zur Anforderungsformulierung sowie die Erreichung eines ambitionierten Anforderungsniveaus mit der vorgeschlagenen Ausgestaltung des Referenzgebäudes mit baulichen und anlagentechnischen Komponenten aufgezeigt.

6 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Das folgende Kapitel erläutert die durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnungen für ein Einfamilienhaus (EFH) und ein Mehrfamilienhaus (MFH) im Standard „Effizienzhaus 55“ (EH 55) in verschiedenen Varianten sowie für typische Nichtwohngebäude als „Effizienzgebäude 55“ (EG 55). Vor der Erläuterung der Berechnungen wird zunächst die grundsätzliche Methodik der Wirtschaftlichkeitsbewertung skizziert und Eingangsdaten sowie Randbedingungen dargestellt.

Wurde Wirtschaftlichkeit bisher vor allem als „Erwirtschaftung von erforderlichen Aufwendungen über die übliche Nutzungsdauer“ gesehen – und damit stark auf die Bewertung von Amortisationszeiten abgestellt – so ist im Rahmen der ambitionierten Energie- und Klimapolitik auf nationaler und europäischer Ebene ein Wandel feststellbar. So wird für die individuelle (betriebswirtschaftlich definierte) Wirtschaftlichkeit eine Gesamtzieleerreichung aus volkswirtschaftlicher Sicht unterstellt, bei der zunächst die gesteckten Energie- und Klimaziele erreicht werden müssen – und dies dann möglichst wirtschaftlich. Der investiven Gebäudeförderung kommt dann insbesondere die Rolle zu, volkswirtschaftliche Erfordernisse bzw. volkswirtschaftlich optimale Pfade für die Betroffenen auch betriebswirtschaftlich sinnvoll darstellbar zu gestalten. Auf europäischer Ebene wird von der Kommission diesbezüglich auch eine Anpassung des Begriffs der Kostenoptimalität vorgeschlagen, die künftig neben den betriebswirtschaftlich relevanten Zahlen auch den über den CO₂-Preis hinausgehenden Schadenskosten und weitere externe Effekte sowie non-energy benefits einbeziehen und bepreisen muss.

Die Frage, ob die Wirtschaftlichkeitsberechnung auch in Deutschland hinsichtlich volkswirtschaftlicher Effekte (u.a. Klimafolgekosten, Schadenskosten) angepasst werden muss und wie das berechnet werden könnte, wird an dieser Stelle nicht vertieft – dies geschieht im Folgeprojekt. Die im Weiteren dokumentierten Wirtschaftlichkeitsbewertungen erfolgen als annuitätische Betrachtung, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben. Diese Anwendung erfolgt zunächst aktualitätshalber auf die Berechnung des EH 55-Standards.

6.1 Grundsätzliche Vorbemerkungen zur Wirtschaftlichkeit

Die ökonomischen Berechnungen, also die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von unterschiedlichen Optionen zur Realisierung von Neubauten bzw. von energetischen Modernisierungsmaßnahmen, kann mit verschiedenen Methoden ermittelt werden, z. B. auf Basis des Kapitalwerts, der Annuität, des internen Zinssatzes, der Amortisation oder eines vollständigen Finanzplans. Im Rahmen dieses Projektes erfolgten die ökonomischen Berechnungen in Anlehnung an die VDI 2067 Blatt 1 (September 2012) nach der Annuitätsmethode. Das Annuitätsverfahren gestattet es, einmalige Zahlungen/Investitionen mithilfe des Annuitätsfaktors über einen Betrachtungszeitraum und laufende jährliche Zahlungen zu Jahresgesamtkosten zusammenzufassen. Wesentliche Eingangsgröße in den Annuitätenfaktor ist der angenommene Diskontzinssatz. Bei der Analyse werden alle relevanten Kosten für die Gebäudehülle und Anlagentechnik betrachtet. Diese umfassen:

- Kapitalgebundene Kosten aus den erforderlichen Investitionen für
 - Gebäudehülle
 - Anlagentechnik
- Kosten für Ersatzbeschaffungen innerhalb des Betrachtungszeitraums (Wohngebäude: 30 Jahre, Nichtwohngebäude: 20 Jahre)
- Restwerte zum Ende des Betrachtungszeitraums
- Kosten für die bauliche und anlagentechnische Fachplanung
- Bedarfsgebundene Kosten
- Betriebs- und Instandhaltungskosten.

6.2 Ökonomische Berechnungen und Randbedingungen

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen gilt es, sowohl die zu erwartenden Investitionen als jährliche Kapitalkosten als auch die laufenden Kosten für Energie zu betrachten. Für Gebäude mit sehr geringem Energiebedarf steigen die Investitionen gerade für zu erreichende sehr geringe Bedarfe (etwa durch Investitionen in die Gebäudehülle) stark an. Auf der anderen Seite können die laufenden Energiekosten, abhängig von der zukünftigen Energiepreisentwicklung, hohe finanzielle Belastungen in der Betriebsphase verursachen.

6.2.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten der betrachteten Modellgebäude werden in verschiedene Kostenbestandteile unterteilt, um sowohl Kosten energetisch relevanter Komponenten (Bautechnik und Anlagentechnik) als auch sonstige Baukosten nicht energetisch relevanter Elemente (ebenfalls bauliche und anlagentechnische Unterteilung) differenziert darzustellen. Die Kosten teilen sich damit folgendermaßen auf:

1. nicht energetisch relevante Bauwerkskosten
2. energetisch relevante Kosten Bautechnik
3. energetisch relevante Kosten Anlagentechnik

Für alle Varianten gleich sind die „nicht energetisch relevanten Bauwerkskosten“, die diejenigen Kosten umfassen, die nicht die energetische Qualität des Gebäudes definieren, also ohne Gebäudehülle und Anlagentechnik für die Gebäudekonditionierung im Sinne des GEG.

Als Ausgangspunkt der Betrachtung werden hierzu Festlegungen für die Gebäudekosten getroffen, welche die Gesamtkosten für das Erreichen der aktuellen Anforderungen (75 % $q_{p,Ref}$; 100 % $H_{T,Ref}$) beschreiben. Diese Festlegungen basieren weitgehend auf den bereits im „Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie Flexibilisierungsoptionen“ (IBH, ITG, Ecofys, dena 2018) getroffenen Annahmen und sind nach Abgleich mit aktuellen Kostenkennwerten weiterer Quellen zunächst unter Verwendung der vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Preissteigerungsraten auf das Preisniveau 2021 hochgerechnet. Die Kosten sind (als Bruttokosten) wie folgt in Euro pro Quadratmeter und Nettogrundfläche angegeben und umfassen alle drei vorgenannten Kostenanteile (1. nicht energetisch relevante Bauwerkskosten, 2. energetisch relevanten Kosten Bautechnik, energetisch relevante Kosten Anlagentechnik) und werden als Kosten für :

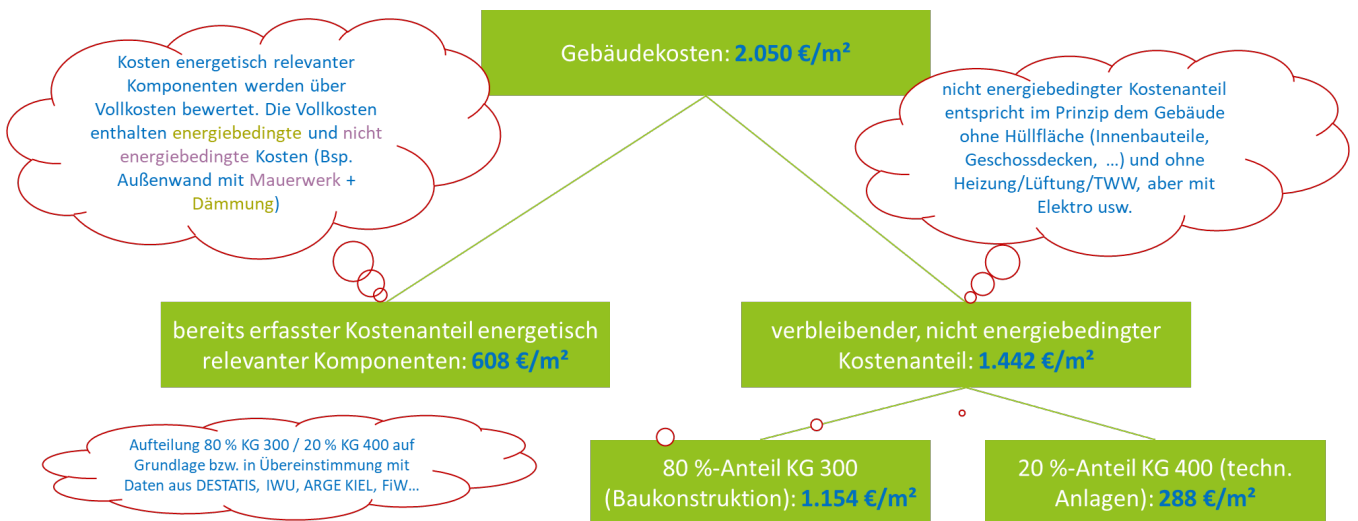
- für das Einfamilienhaus: 2.050 €/m² A_N
- für das Mehrfamilienhaus: 1.650 €/m² A_N

Diese zuvor genannten Festlegungen beziehen noch nicht die aktuelle Hochpreislage für das Investitionsjahr 2022 ein, für die nochmals ein Aufschlag von 20 Prozent berücksichtigt wird. Die Aufteilung der Gebäudekosten wird in Abbildung 35 als Zahlenbeispiel für das EFH erläutert. Die Gebäudekosten in Höhe von 2.050 €/m² A_N sind hier wie folgt aufgeteilt in

- einen aus der energetisch relevanten Bilanzierung heraus erfassten Kostenanteil energetisch relevanter Komponenten in Höhe von 608 €/m² und
- einen verbleibenden, nicht energetisch relevanten, Kostenanteil in Höhe von 1.442 €/m². Dieser nicht energetisch relevante Kostenanteil wird
 - zu 80 % (1.154 €/m²) als Kostenanteil der KG 300 (Baukonstruktion) mit einer Nutzungsdauer von 40 Jahren und
 - zu 20 % (288 €/m²) als Kostenanteil der KG 400 (technische Anlagen) mit einer Nutzungsdauer von 20 Jahren

in die Berechnung der Annuitäten einbezogen.

Abbildung 35: Zahlenbeispiel EFH zur Aufteilung der Gebäudekosten auf energetisch relevante Komponenten und verbleibenden, nicht energiebedingten Kostenanteil



Die Kosten der Anlagentechnik werden für typische Anlagenvarianten bestimmt, die sich nach Hauptwärmeerzeuger, Warmwasserbereitung, Lüftung und Übergabesystem unterscheiden. Je nach fallweise betrachteter Anlagenvariante erfolgt im Weiteren die Bestimmung der zur Erfüllung der Effizienz- und Umweltaanforderung erforderlichen baulichen Ausführung sowie die dafür anfallenden Investitionskosten. Der auf diese Weise ermittelte Kostenanteil ist in der Erläuterung oben bzw. in Abbildung 35 als „bereits erfasster Kostenanteil energetisch relevanter Komponenten“ (Erläuterung: „bereits erfasst“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass im Rahmen der energetischen Bilanzierung bauliche und anlagentechnische Elemente berücksichtigt und mit Kostenzuordnungen behandelt sind. Die Gesamtkosten eines Gebäudes ergeben sich aber erst aus der zusätzlichen Berücksichtigung nicht energiebedingter Kosten) bezeichnet.

Zum Vergleich von Varianten, die jeweils unterschiedliche Anforderungsniveaus erreichen, werden die aus den individuell ermittelten Investitions-, Betriebs- und Bedarfskosten resultierenden Annuitäten bestimmt.

Auf der Basis verschiedener Quellen wurden die vorgefundenen Ansätze für Bau- und Anlagenkosten mit entsprechenden Baupreisentwicklungen abgeglichen, validiert und bei Bedarf angepasst. Die folgende Liste gibt einen Überblick über die in dieser Studie einbezogenen externen Kostenquellen:

- Kostenkennwerte und -funktionen, wie im Vorgängergutachten „Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie Flexibilisierungsoptionen“ (IBH, ITG, Ecofys, dena 2018) beschrieben
- IWU-Studie zu Modernisierung (Bau- und Anlagentechnik) (IWU 2007)
- BKI (2020)
- sirAdos-Datenbank baupreise.de (SIRADOS 2015)

Im Rahmen dieser Studie werden die Investitionskosten mit der statistischen Baupreissteigerung auf das Investitionsjahr 2022 angepasst. Um das aktuelle Hochpreisniveau

abzubilden, wird dabei als Kostensteigerung von 2021 nach 2022 eine Preissteigerungsrate von 20 Prozent unterstellt. Bei den zugrunde gelegten Kostenansätzen bzw. Kostenfunktionen werden Vollkosten abgebildet. Auch die baulichen Kosten für die Optimierung der Wärmebrücken werden berücksichtigt.

Alle baulichen Kostenfunktionen beinhalten die Kosten für Lohn und Material pro Quadratmeter Bauteil, jedoch zunächst ohne Planungs- und Nebenkosten. Diese werden später als pauschaler Zuschlag berücksichtigt. Die Kostenfunktionen und Kostenkennwerte stammen aus den oben genannten Quellen und wurden punktuell durch eigene Kostennahmen ergänzt, da die vorhandenen Quellen teilweise veraltet oder unvollständig waren.

Die Ermittlung der anlagentechnischen Investitionskosten erfolgt für die jeweilige Technologie in Abhängigkeit von technologiespezifischen Kenngrößen. Das sind unter anderem:

- Auslegungsleistung in Abhängigkeit von Gebäude und baulichem Wärmeschutz
- Geometrische Kenndaten der Gebäude (Volumen, Fläche, Gebäudehöhe, ...)
- Anzahl der Wohneinheiten in den Mehrfamilienhäusern
- Anzahl der zu belüftenden Räume (NWG: Schule, Kindergarten)
- Nutzung

Die angesetzten anlagentechnischen Investitionskosten sind das Ergebnis umfangreicher Recherchen (siehe oben genannte Quellen). Sie beruhen auf Listenpreisen führender Hersteller und umfassen neben den Materialkosten auch die Lieferung, Montage und Inbetriebnahme sowie typische Rabatte und Preisaufläge. Die Kostenansätze wurden soweit möglich mit in der Literatur verfügbaren Ansätzen abgeglichen.

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung in den Mehrfamilienhäusern sind als wohnungszentrale Lüftungsanlagen konzipiert.

Die Investitionskosten zentraler Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung in den Nichtwohngebäuden beruhen auf den Angaben von Schiller/Mai/Händel (Schiller et al. 2014) und werden in Abhängigkeit vom Anlagenluftvolumenstrom ermittelt.

6.2.2 Kapitalkosten

Für die hier durchgeführten Betrachtungen wird angenommen, dass die Finanzierung über einen Kredit erfolgt. Dessen Laufzeit entspricht (fiktiv) einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren bei Wohngebäuden und 20 Jahren bei Nichtwohngebäuden. Die für bauliche und anlagentechnische Komponenten dabei angesetzte Lebensdauer der Einzelkomponenten wird in Anlehnung an VDI 2067 (Blatt 1) festgelegt.

In Absprache mit dem Auftraggeber wird den Auswertungen der „Grundfälle“ (siehe Auswertungen in Abschnitt 6.3.3) ein Kapitalzins von 0 % zugrunde gelegt. Aufgrund der aktuellen Zinsentwicklung erfolgt im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung zusätzlich die Auswertung für einen Kapitalzins in Höhe von 2 % (Abschnitt 6.3.5). Höhere Zinsen

führen zu steigenden Kapitalkosten und damit zu einer ungünstigeren Wirtschaftlichkeit, während niedrigere Zinsen diese verbessern.

Grundsätzlich erfolgen die Auswertungen inflationsbereinigt, d. h. als Realzinsbetrachtung. Als Preissteigerungsrate (zur Ermittlung der Kosten für Ersatzbeschaffungen innerhalb der Betrachtungszeitraums) wird mit der mittleren Preissteigerungsrate nach destatis aus den Jahren 2015 bis 2020 in Höhe von 3,1 % gerechnet.

6.2.3 Honorare für Planungsleistungen und Nebenkosten

Honorare für Planungskosten und Nebenkosten werden in den für dieses Projekt durchgeführten Berechnungen nicht explizit bewertet und sind als „durchlaufender Kostenanteil“ in den Gebäudekosten enthalten.

6.2.4 Mehrwertsteuer

Die Mehrwertsteuer wird einheitlich mit einem Steuersatz von 19 % angesetzt. In den Auswertungen für den Anwendungsfall Wohnnutzung ist dieser Steueranteil in den Kostenangaben enthalten. Kostenangaben für den Anwendungsfall Nichtwohngebäude erfolgen als Nettokosten ohne diesen Steueranteil.

6.2.5 Betriebs- und Instandhaltungskosten

Die Betriebskosten umfassen den jährlichen Aufwand für Wartung, Instandhaltung und Inspektion baulicher und anlagentechnischer Komponenten. Die Betriebs- und Instandhaltungskosten werden anteilig über die Investitionskosten für Teilkomponenten des Versorgungssystems anhand von Tabellenwerten (VDI 2067-1) ermittelt. Soweit möglich, wurden die Werte der VDI-Richtlinie angesetzt und bei Bedarf (insbesondere für den Anwendungsfall Wohngebäude) durch eigene Annahmen ersetzt.

6.2.6 Energiekosten und CO₂-Preise

Zur Berechnung der Energiekosten werden die Endenergiebedarfe für alle verwendeten Energieträger ermittelt und mit den jeweiligen Energiepreisen multipliziert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Endenergiebedarfe für Öl, Gas und Holz auf ihren Brennwert bezogen sind und zur Verwendung der vorliegenden Energiepreise auf den Heizwert umgerechnet werden.

Die Grenzübergangspreise basieren grundsätzlich auf dem World Energy Outlook 2021 und dabei auf dem stated policies scenario, welches das Szenario mit den höchsten Energiepreisen des WEO darstellt. Dieses Szenario liegt auch den Energiepreisen des Nationalen Energie- und Klimaplan 2021 (NECP) zu Grunde. Auf der europäischen Ebene wird dabei bereits eine stärkere Diversifizierung der Erdgasimporte durch zusätzliche LNG-Importe und Terminals bei vergleichsweise geringem Rückgang der Nachfrage unterstellt.

Allerdings ist die Entwicklung der Energiepreise aktuell sehr hohen Unsicherheiten und einer starken Dynamik unterworfen. Deshalb wurden die Grenzübergangspreise in den ersten Jahren auf Basis von Rohstoff Futures (Erdgas und Erdöl) angepasst (Stand 23. März 2022), welche bis Mitte des Jahrzehnts die aktuellen Unsicherheiten des Marktes abbilden. In den kommenden Jahren wird von einem starken Anstieg der Grenzübergangspreise ausgegangen. Spätestens ab 2030 folgen die Preise dann wieder den bisherigen Pfaden des WEO. Die Preise sind in Tabelle 31 dargestellt.

Auch nach der Übergangsphase, in der die Erdgasimporte diversifiziert werden und Deutschland einen eigenen LNG-Terminal aufgebaut hat, sind die Unsicherheiten sehr hoch und stark von geopolitischen Interessen beeinflusst.

Tabelle 31: Grenzübergangspreise für Erdgas, Erdöl und Strom (reale Preise 2020)

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040	2050
Erdgas (ct/kWh (hi))	1,7	2,8	11,0	7,8	5,0	4,0	2,6	2,7	2,8	3,1
Erdöl (ct/kWh)	2,3	4,0	5,7	5,3	4,6	4,2	4,4	4,6	4,9	5,4
Strom Baseload (€/MWh)	30,5	95,1	190,0	180,0	100,9	93,4	83,0	76,0	79,1	79,1

Stand der Berechnungen: 23. März 2022

Die Preisentwicklung der CO₂-Abgabe im Brennstoffemissionshandelsgesetz und des EU-ETS Preises sind in Tabelle 32 dargestellt. Der Preis der CO₂-Abgabe im BEHG ist bis zum Jahr 2026 festgelegt, für die anschließenden Jahre wurde ein relativ langsamer Anstieg auf Basis des Projektionsberichtes 2021 angesetzt. Aufgrund der erwarteten hohen Erdgaspreise wird von einem zunehmenden Ausstieg aus dem Erdgas und somit einem eher niedrigen Verlauf des BEHG-Preises ausgegangen. Bei dem EU-ETS Preis wurde der aktuell sichtbare schnelle Anstieg berücksichtigt.

Tabelle 32: Entwicklung des BEHG und EU-ETS Preises

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040	2050
CO ₂ -Abgabe BEHG (€/t)	-	25	29	33	42	50	105	152	190	200
EU-ETS (€/t)	25	55	80	83	86	89	100	125	150	190

Aus den Grenzübergangspreisen wurden die Endkundenpreise für die Abnahmefälle private Haushalte und kleinere Abnehmer im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) generiert. Neben den Beschaffungskosten wurden sämtliche Preisbestandteile, Steuern und Umlagen aktualisiert und berücksichtigt. Die EEG-Umlage geht gemäß Beschluss der Bundesregierung bereits in 2023 auf null zurück. In Tabelle 33 sind die Endkundenpreise als Realpreise mit dem Bezugsjahr 2020 inklusive Abgaben und Steuern, ohne CO₂-Preis, dargestellt. Für den Stromtarif der Wärmepumpen wurde die Annahme getroffen, dass dieser 80 % des Tarifs für Haushalte bzw. GHD beträgt.

Für die Verwertung der genannten Energiepreise erfolgt unter Berücksichtigung der fallweise angegebenen Abnahmemengen eine Aufteilung der als Mischpreise angegebenen Kosten in die Bestandteile Grund- und Arbeitspreis. Für den Anwendungsfall Nichtwohngebäude erfolgt darüber hinaus der Ansatz von abnahmeabhängigen Energieprei-

sen. Für Auswertungen zur Wirtschaftlichkeit werden aus den gegebenen Zeitreihen jeweils für die Betrachtungszeiträume (30 Jahre Wohngebäude, 20 Jahre Nichtwohngebäude) die geometrischen Mittelwerte als mittlere jährliche Preisänderungsraten berechnet. Dabei wird das aktuelle Hochpreisniveau (2022) als Ausgangsjahr der Betrachtung gewählt. Den Auswertungen der Grundfälle in Abschnitt 6.3.3 liegen Energiepreise inklusive CO₂-Preisanteil zugrunde. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse erfolgen in Abschnitt 6.3.4 zusätzliche Auswertungen zur Gegenüberstellung der Situationen mit und ohne CO₂-Preisanteil.

Tabelle 33: Endkundenpreise, inkl. Steuer, ohne CO₂-Preis (reale Preise 2020)

		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030	2035	2040	2050
Erdgas (ct/kWh (brutto))	Haushalte	7,1	8,3	18,1	14,3	11,0	9,8	8,2	8,4	8,6	9,1
Erdgas (ct/kWh (netto))	GHD	5,9	7,0	15,2	12,0	9,3	8,3	6,9	7,1	7,2	7,7
Heizöl (ct/kWh (brutto))	Haushalte	5,6	7,5	9,6	9,0	8,3	7,7	7,9	8,1	8,4	8,9
Heizöl (ct/kWh (netto))	GHD	4,7	6,3	8,1	7,6	7,0	6,5	6,6	6,8	7,0	7,5
Pellets (ct/kWh (brutto))	Haushalte	5,7	5,8	8,8	8,3	7,8	7,9	7,6	8,0	8,3	8,9
Pellets (ct/kWh (netto))	GHD	4,8	4,9	7,4	7,0	6,6	6,6	6,4	6,7	7,0	7,5
Fernwärme (ct/kWh (brutto))	Haushalte	10,7	10,9	15,7	14,0	12,5	12,0	12,0	12,7	13,4	14,4
Fernwärme (ct/kWh (netto))	GHD	8,4	8,5	12,2	10,9	9,7	9,3	9,3	9,8	10,4	11,2
Strom (ct/kWh (brutto))	Haushalte	32,0	32,0	41,9	37,6	33,4	31,4	30,1	29,3	30,1	30,8
Strom (ct/kWh (netto))	GHD	22,8	24,7	32,1	28,5	23,2	22,3	21,5	20,9	21,5	22,0

Abnahmemengen, Brennstoffen: Haushalte und GHD < 55.500 kWh, Strom Haushalte: 3.500 kWh/a, GHD: 50 MWh/a

6.2.7 Jahresgesamtkosten/Annuitäten

Die einfache Betrachtung der Investitionskosten ermöglicht zunächst keine Aussagen über den Nutzen einer Investition. Bei der Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden kann der Nutzen in Form der Energieeinsparung berechnet und monetär bewertet werden. Werden zusätzlich die weiteren Betriebskosten (z.B. für Wartung, Inspektion und Instandhaltung) berücksichtigt, können die Gesamtkosten einer Investition berechnet und – bei Definition eines einheitlichen Betrachtungszeitraums - als Jahresgesamtkosten abgebildet werden. Wird dies für verschiedene Varianten durchgeführt, ergibt sich die wirtschaftlichste Maßnahme aus dem Vergleich durch die geringsten Jahresgesamtkosten. In die Berechnungen gehen Preis- (z.B. für Energiepreise) und Zinsänderungen (z. B. effektiver Kapitalzins) innerhalb des Betrachtungszeitraums mit ein und werden, je nach Kostenart, durch Barwertbildung mit und ohne Diskontierung als Annuitäten ausgewiesen.

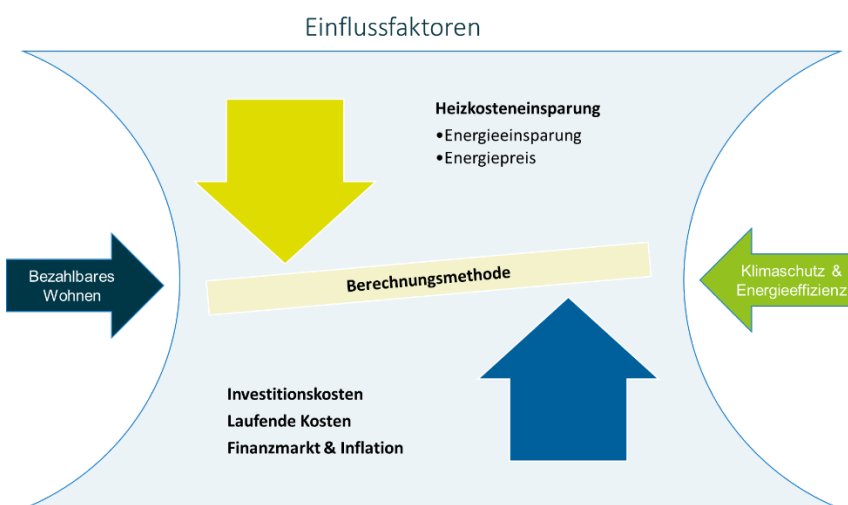
6.2.8 Umgang mit variablen Einflussparametern

Wie bisher dargelegt, spielt bei Wirtschaftlichkeits-Aussagen eine Vielzahl von Einflussparametern eine Rolle, nämlich:

- Art der Kostenbetrachtung (Vollkosten oder energiebedingte Kosten)

- Art der Kalkulationsmethode
- zugrunde gelegter Energiepreis und seine künftige Entwicklung (zeitliche Veränderung)
- Nutzungsdauer (oder Lebensdauer) des Gebäudes bzw. seiner Bauteile und deren energetische Qualität
- klimatische Randbedingungen am Gebäudestandort
- Entwicklung der Finanzmärkte
- monetäre Denkweise des Investors und dessen steuerliche Einbettung in den Finanzmarkt.

Abbildung 36: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer energetischen Maßnahme

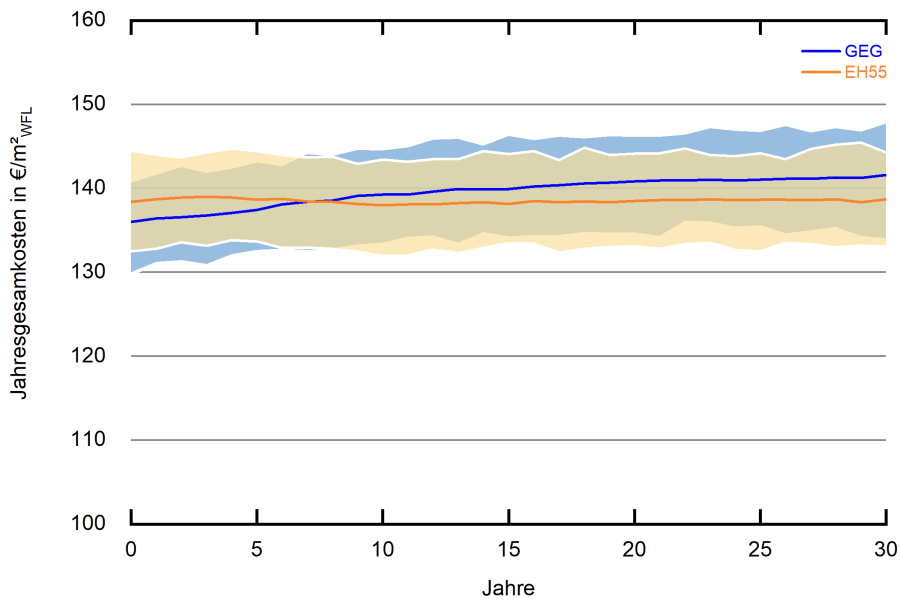


Neben den klimatischen, bauphysikalischen, geometrischen und ökonomischen Parametern werden die Ergebnisse auch durch die gewählte Kalkulationsmethode selbst beeinflusst. Eine normative Grundlage mit (methodischen) Vorgaben zur Wirtschaftlichkeitsbewertung ganzer Gebäude fehlt aktuell. Die VDI 2067 (Sept. 2012) liefert ausschließlich Grundlagen zur "Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen", bautechnische Komponenten sind hierin nicht erfasst. Je nach Berechnungsansatz und gewählten Annahmen und getroffenen Vereinfachungen gelangt man zu unterschiedlichen Aussagen über die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme. Das führt dazu, dass zum Teil heftig über die Sinnhaftigkeit baulicher Sanierungsmaßnahmen und z. B. die aus Wirtschaftlichkeitsberechnungen abgeleiteten Annuitäten einzelner Maßnahmen in der Öffentlichkeit diskutiert wird. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen im Rahmen dieses Projekts erfolgt die Festlegung der Randbedingungen zur Bewertung baulicher Maßnahmen (z. B. Nutzungsdauer) analog zu Vorgängeruntersuchungen (vgl. „Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie Flexibilisierungsoptionen“ (IBH, ITG, Ecofys, dena 2018)). Hierbei wird die Methodik der VDI 2067 (Ersatzinvestitionen innerhalb und Restwerte zum Ende des Betrachtungszeitraums) angewendet und insbesondere für die Berücksichtigung baulicher Maßnahmen durch entsprechende Erfahrungswerte ergänzt.

Im Rahmen dieses Projektes sind aufgrund der aktuellen politischen Situation viele getroffene Annahmen volatil. In den letzten Monaten ergeben sich zum Beispiel aufgrund des Ukraine-Kriegs sehr starke Schwankungen bei den Energiepreisen, bei den Investitionskosten (bis zu 30 % innerhalb eines halben Jahres) und bei der Inflation. Abbildung 37 zeigt beispielhaft die Darstellung der Unschärfen aller Parameter bei der Ermittlung der spezifischen Jahresgesamtkosten für den Neubau eines typischen Einfamilienhauses in zwei unterschiedlichen energetischen Ausführungen.

Angesichts dieser Unsicherheiten kommt man bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit nicht um Vereinfachungen herum. Wichtig sind in diesem Fall eine offene Darlegung der getroffenen Vereinfachungen und eine Diskussion der sich daraus ableitenden Konsequenzen. Zur offenen Darlegung gehört auch die möglichst umfassende Benennung der jeweils zugrunde gelegten Bewertungsrandbedingungen und eine explizite Benennung von identifizierten Unsicherheiten in den Randbedingungen. Deshalb erfolgt an späterer Stelle beispielhaft eine Darstellung der Sensitivitäten hinsichtlich der CO₂-Bepreisung und zu Kapitalkosten, da diese Eingangsgrößen der Wirtschaftlichkeitsberechnung das Ergebnis der Berechnung stark beeinflussen können.

Abbildung 37: Beispielhafte Darstellung der Unschärfen aller Parameter bei der Ermittlung der spezifischen Jahresgesamtkosten für den Neubau eines typischen Einfamilienhauses in zwei unterschiedlichen energetischen Ausführungen. Die schraffierten Bereiche stellen das Konfidenzintervall der Monte-Carlo-Analyse dar. Die durchgezogenen Linien zeigen den mittleren Verlauf.



6.3 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse Wohngebäude für den Effizienzhaus-55-Standard

6.3.1 Zusammenfassung der annuitätischen Bewertung

Zur besseren Übersicht der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Grundfälle aus Abschnitt 6.3.3) für den Anwendungsfall Wohngebäude wird nachfolgend eine Zusammenfassung der annuitätischen Bewertung der Wirtschaftlichkeit für das Ein- und Mehrfamilienhaus vorangestellt.

Tabelle 34: Änderung Gesamtannuität gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse EFH und MFH für das Niveau EH 55 (qP55/HT70), Angaben in Prozent

Niveau	qP55/HT70 (EH 55)	
	EFH	MFH
Gebäude		
GasBW + WRG	+ 0,9	+ 0,4
GasBW + St Hz.	+ 0,4	- 5,6
Luft/Wasser WP	- 8,1	- 10,9
Sole/Wasser WP	- 6,6	- 11,8
Biomasse	+ 1,7	- 7,6
Fernwärme	- 6,1	- 10,4
<i>Mittelwert</i>	<i>- 3,0</i>	<i>- 7,7</i>

Aus der zusammenfassenden Darstellung der Veränderung der Gesamtannuität gegenüber dem Vergleichsfall in Tabelle 34 ergibt sich für das Niveau qp55/HT70 im Fall des EFH eine im Mittel um 3,0 Prozent und für das MFH im Mittel um 7,7 Prozent verbesserte Annuität. Dies bedeutet, dass die erhöhten Investitionskosten im Vergleich zum Anforderungsniveau nach GEG 2020 in der annuitätischen Bewertung durch infolge der Investitionen reduzierte bedarfsgebundene Kosten über den Betrachtungszeitraum mehr als kompensiert werden. Somit kann das mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle anvisierte Niveau qp55/HT70 insgesamt als wirtschaftlich umsetzbares neues Anforderungsniveau für Wohngebäude bewertet werden.

Diese Aussage zur wirtschaftlichen Umsatzbarkeit gilt auch für die zusätzlich durchgeführten Sensitivitätsbetrachtungen bezüglich CO₂-Bepreisung (vgl. Abschnitt 6.3.4) und Kapitalzins (vgl. Abschnitt 6.3.5).

6.3.2 Vorbemerkungen zu Parametrisierung und Randbedingungen

Die im Weiteren dokumentierten Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit erfolgen für das primärenergetische Anforderungsniveau 55 % $q_{p,Ref}$ als Umwelanforderung in Verbindung mit zwei unterschiedlichen Niveaus der Effizienzanforderung: 70 % $H_{T,Ref}'$ und 55 % $H_{T,Ref}'$.

Als Vergleichsfall zur Quantifizierung der Investitionsmehrkosten sowie zur Gegenüberstellung der annuitätischen Gesamtbewertung dient das Anforderungsniveau nach aktuellem GEG (75 % $q_{p,Ref}$; 100 % $H_{T,Ref}'$). Für diesen Vergleichsfall ist die Referenzausführung nach GEG mit einem Gas-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger und anstelle der nicht bedarfsgeführten Abluftanlage eine bedarfsgeführte Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung unterstellt. Die im Weiteren verwendeten Bezeichnungen für den Vergleichsfall und die qp55-Varianten sind wie folgt:

- **GEG BW+WRG** (qp75/HT100)
- **qp55/HT70** (EH 55 nach aktuellen BEG-Kriterien)
- **qp55/HT55**

Als anlagentechnische Varianten für das betrachtete Anforderungsniveau 55 % $q_{p,Ref}$ mit den zwei unterschiedlichen Effizienzanforderungen werden folgende Fälle betrachtet:

- **BW+WRG:** Gas-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger mit Zu-/Abluftanlage bedarfsgeführt mit 90 % Wärmerückgewinnung
- **BW+ST Hz.:** Gas-Brennwertkessel als Wärmeerzeuger mit Solarthermie Heizung + TWW, Abluftanlage bedarfsgeführt
- **LuftWP:** Luft/Wasser-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger, Abluftanlage bedarfsgeführt
- **SoleWP:** Sole/Wasser-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger, Abluftanlage bedarfsgeführt
- **Bio:** Pelletkessel als Wärmeerzeuger, Abluftanlage bedarfsgeführt

- **FW:** Fernwärme als Wärmeerzeuger, Abluftanlage bedarfsgeführt

Der bauliche Wärmeschutz wird für die betrachteten Zielniveaus so angepasst, dass entweder die Umwelthanforderung (q_p) oder die Effizianzforderung (H_T') gerade erreicht wird. Die Darstellung der Auswertungen zur Wirtschaftlichkeit erfolgt im Weiteren für ein Einfamilienhaus (EFH) und ein freistehendes Mehrfamilienhaus (MFH) mit 6 Wohneinheiten zunächst in Abschnitt 6.3.3 für die „Grundfälle“, bei denen die in Abschnitt 6.2 dokumentierten Randbedingungen zugrunde liegen. Zusätzlich erfolgen in Abschnitt 6.3.4 Sensitivitätsbetrachtungen zur CO₂-Bepreisung und zum Kapitalzins.

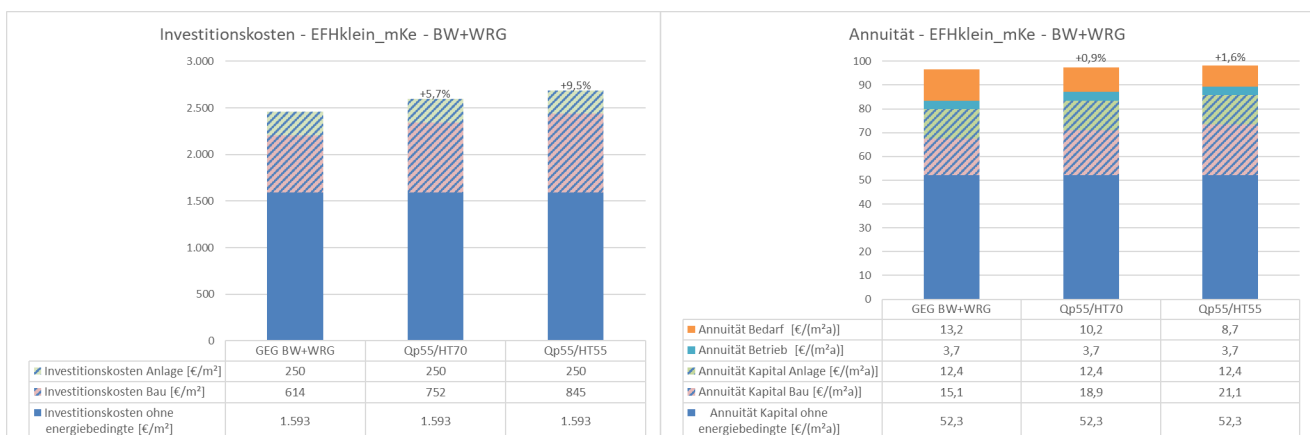
6.3.3 Auswertungen der Grundfälle

Für das Einfamilienhaus und die sechs anlagentechnischen Varianten folgt mit Abbildung 38 bis Abbildung 43 die Ausweisung der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse. Für das Mehrfamilienhaus erfolgen die analogen Auswertungen mit Abbildung 44 bis Abbildung 49.

Jeweils links werden die Investitionskosten und jeweils rechts die Annuitäten anhand von gestapelten Balken dargestellt. Die Darstellung der Investitionskosten erfolgt über die drei Anteile Investitionskosten Anlagentechnik (Investitionskosten Anlage [€/m²]), Investitionskosten Bautechnik (Investitionskosten Bau [€/m²]) und Investitionskosten nicht energetisch relevanter Elemente (Investitionskosten ohne energiebedingte [€/m²]). Analog erfolgt die Ausweisung der Annuitäten ebenfalls über gestapelte Balken, wobei die vorgenannten Investitionsbestandteile als „Annuität Kapital Anlage [€/m²a]“, „Annuität Kapital Bau [€/m²a]“ und „Annuität Kapital ohne energiebedingte [€/m²a]“ enthalten sind. Zusätzlich einbezogen sind hier als „Annuität Bedarf [€/m²a]“ und „Annuität Betrieb [€/m²a]“ die Annuitäten der bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten. Mit Bezug auf die Investitionskosten und Annuitäten des Vergleichsfalls (Balken jeweils ganz links) sind am oberen Ende der Balken der qp55-Varianten jeweils die Veränderungen in Prozent angegeben.

Mit Abbildung 38 folgen die Auswertungen für das Einfamilienhaus zur Erfüllung der qp55-Anforderungen mit Gas-Brennwertkessel und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung.

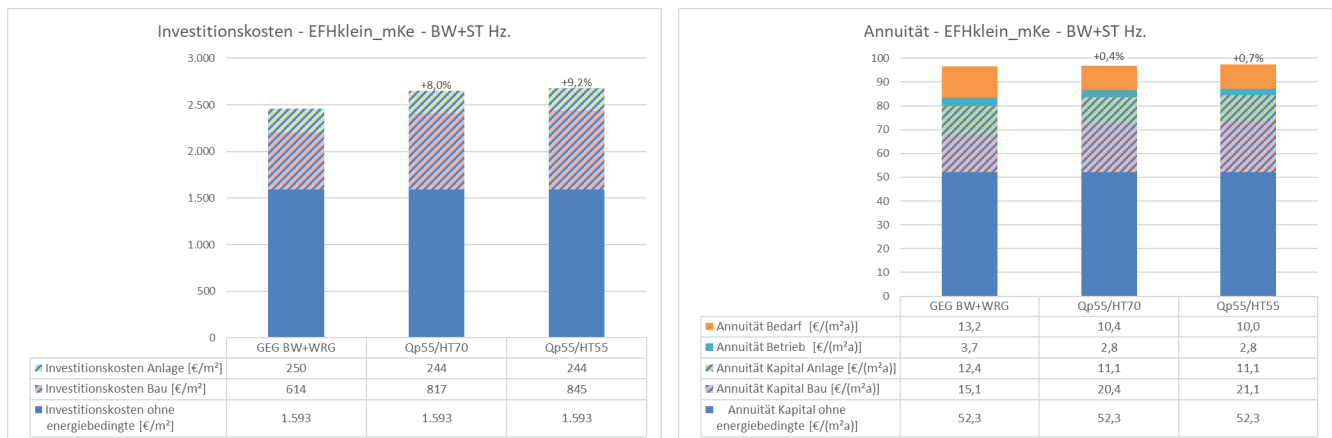
Abbildung 38: Ergebnisse EFH, Varianten Gas-Brennwertkessel mit Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung



Der Blick auf die links in vorausgehender Abbildung ausgewiesenen Investitionskosten zeigt, dass für das Niveau qp55/HT70 eine Erhöhung der Investitionskosten Bau auf 752 €/m² und für das Niveau qp55/HT55 in Höhe von 845 €/m² in die Bewertung eingeht. Mit Bezug auf die für das aktuelle Anforderungsniveau unterstellten Investitionskosten in Höhe von 2.460 €/m² ergeben sich für das Erreichen der Zielniveaus Investitionsmehrkosten von 5,7 bzw. 9,5 Prozent. Der Blick auf die rechts in Abbildung 38 ausgewerteten Annuitäten, in die neben der Bewertung der Investitionskosten auch die bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten einfließen, zeigt, dass die erhöhten Investitionskosten durch reduzierte bedarfsgebundene Kosten in der annuitätischen Betrachtung weitgehend kompensiert werden. Die Annuitäten sind im Vergleich zu dem Fall für die Erfüllung des aktuellen GEG-Anforderungsniveaus um 0,9 bzw. 1,6 Prozent erhöht. Für das mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle angestrebte Niveau qp55/HT70 liegt die Annuität um 0,9 Prozent über dem Vergleichsfall. Aus dem Blickwinkel der annuitätischen Bewertung und für die hier gewählten Randbedingungen sind alle betrachteten anlagentechnischen Varianten mit Gas-Brennwertkessel und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung als (geringfügig) unwirtschaftlich zu bewerten.

Mit Abbildung 39 folgt die Darstellung der Ergebnisse für die Varianten mit Gas-Brennwertkessel und Solarthermie Heizung (und Trinkwarmwasser).

Abbildung 39: Ergebnisse EFH, Varianten Gas-Brennwert-Kessel mit Solarthermie Heizung



Aufgrund der verbesserten baulichen Ausführungen, die den Auswertungen in Abbildung 39 unterstellt sind, resultieren für die Variante qp55/HT70 Mehrkosten von 203 €/m² gegenüber dem Vergleichsfall (links). Bei der Variante qp55/HT55 betragen die entsprechenden Mehrkosten 231 €/m². Wie im Fall der zuvor betrachteten Gas-Brennwert-Varianten mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung gilt auch für die mit Abbildung 39 ausgewerteten Varianten mit Gas-Brennwertkessel und solarthermischer Heizungsunterstützung, dass alle Varianten als (geringfügig) unwirtschaftlich aus der annuitätischen Bewertung hervorgehen, da auch hier die Investitionsmehrkosten nicht vollständig durch reduzierte bedarfsgebundene Kosten in der annuitätischen Bewertung kompensiert werden.

Mit Abbildung 40 und Abbildung 41 folgen die Auswertungen für die anlagentechnischen Varianten mit Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpe.

Abbildung 40: Ergebnisse EFH, Varianten Luft/Wasser-Wärmepumpe

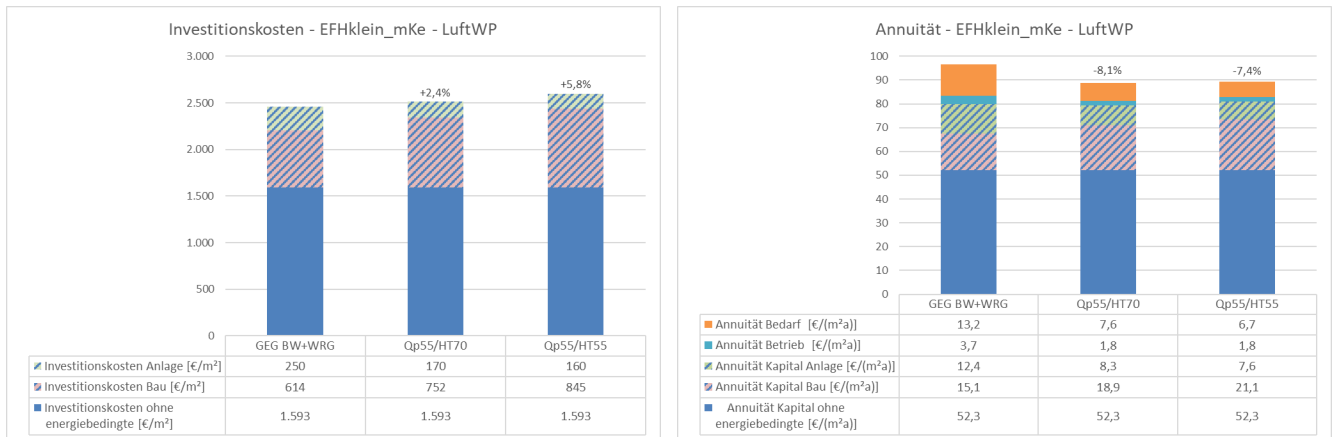


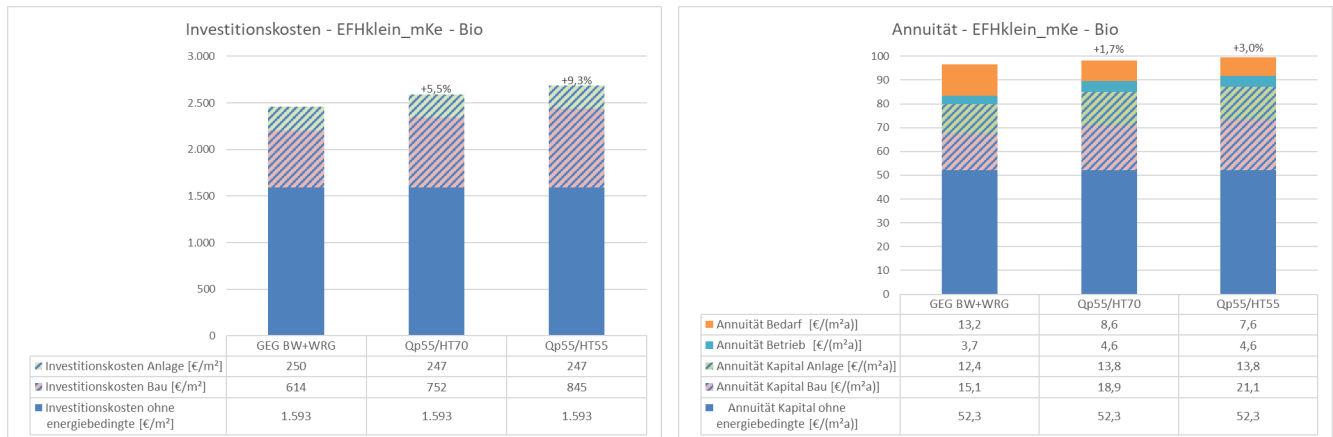
Abbildung 41: Ergebnisse EFH, Varianten Sole/Wasser-Wärmepumpe



Der Blick auf die Auswertungen der Investitionskosten in Abbildung 40 zeigt für das Niveau qp55/HT70 (EH55) um 2,4 Prozent erhöhte Investitionskosten aufgrund der ambitionierteren Effizianzforderung und den damit einhergehend höheren Investitionskosten Bau. Die Auswertung der Annuitäten zeigt für beide Fälle, dass die Einbeziehung der reduzierten bedarfsgebundenen Kosten die Investitionskostenerhöhungen in allen Fällen mehr als kompensiert. Somit können alle Erfüllungsoptionen für die Luft/Wasser-Wärmepumpe als wirtschaftlich bewertet werden. Für das mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle anvisierte Anforderungsniveau qp55/HT70 ergibt sich gegenüber dem aktuellen GEG-Anforderungsniveau eine um 8,1 % verbesserte Annuität. Die Ausführungen zur Luft/Wasser-Wärmepumpe lassen sich qualitativ auf die Auswertungen zur Sole/Wasser-Wärmepumpe in Abbildung 41 übertragen, weshalb an dieser

Stelle auf eine explizite Erläuterung der Ergebnisse zur Sole/Wasser-Wärmepumpe verzichtet wird. Für die anlagentechnischen Varianten mit Pelletkessel als Wärmeerzeuger folgt mit Abbildung 42 die Dokumentation der zugehörigen Ergebnisse.

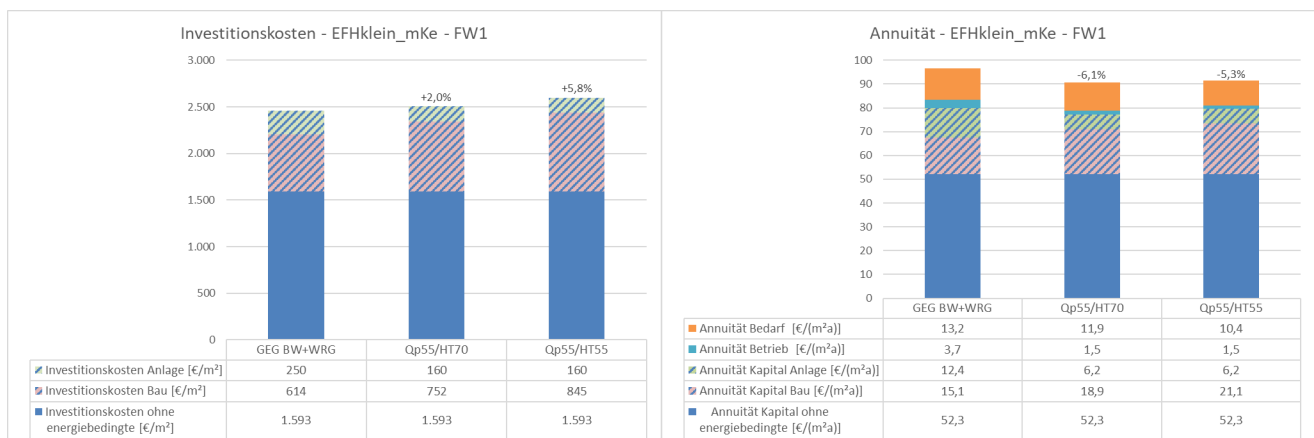
Abbildung 42: Ergebnisse EFH, Varianten Biomasse-Kessel



Für die mit Abbildung 42 betrachteten Varianten zeigt der Blick auf die Investitionskosten Bau, dass sich für das mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle anvisierte Anforderungsniveau qp55/HT70 gegenüber dem Vergleichsfall Mehrkosten in Höhe von 5,5 Prozent ergeben. Die annuitätische Bewertung der Biomassevarianten zeigt, dass ähnlich wie bei den Gas-Brennwertkessel-Varianten die Investitionsmehrkosten nicht vollständig durch Einsparungen der bedarfsgebundenen Kosten kompensiert werden können. Für die hier zugrundeliegenden Randbedingungen ergeben sich Erhöhungen der Gesamtannuitäten gegenüber dem Vergleichsfall von 1,7 bzw. 3,0 Prozent. Somit sind die betrachteten Biomasselösungen als (geringfügig) unwirtschaftlich zu bewerten.

Mit Abbildung 43 folgen die Auswertungen der Varianten mit Fernwärme als Wärmeerzeugungssystem. Wie bei den Wärmepumpenlösungen und den Biomassevarianten ist hier eine bedarfsgeführte Abluftanlage und keine solarthermische Heizungs- oder Trinkwarmwasserunterstützung unterstellt.

Abbildung 43: Ergebnisse EFH, Varianten Fernwärme



Gegenüber dem Vergleichsfall fallen für die in Abbildung 43 bewerteten Varianten die Investitionskosten für die Lüftungsanlage mit WRG sowie für die solarthermische Anlage weg. In Verbindung mit den höheren Investitionskosten Bau für die Effizienzanforderungen HT70 und HT55 ergeben sich für diese Niveaus um 2 bzw. 5,8 % höhere Investitionskosten. In den hier betrachteten Fällen ergeben sich für die Fernwärmeversorgung wirtschaftliche Lösungen, wobei das mit der GEG-Novelle anvisierte EH55-Niveau nach gegenwärtigen BEG-Kriterien eine um 6,1 % bessere Annuität als der Vergleichsfall aufweist.

Die für Wohngebäude durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalysen werden mit Tabelle 35 für die Investitionskostenänderungen und mit Tabelle 36 für die Änderungen der Gesamtannuitäten zusammengefasst. Für das mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle vorgeschlagene Anforderungsniveau ist jeweils die erste Spalte maßgeblich. Hiermit wird das gegenwärtige Effizienzhaus 55-Niveau nach BEG-Kriterien beschrieben.

Tabelle 35: Investitionskostenänderung gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse EFH, Angaben in Prozent

Niveau Variante	qP55/HT70 (EH 55)	qP55/HT55
GasBW + WRG	+ 5,7	+ 9,5
GasBW + St Hz.	+ 8,0	+ 9,2
Luft/Wasser WP	+ 2,4	+ 5,8
Sole/Wasser WP	+ 5,5	+ 9,1
Biomasse	+ 5,5	+ 9,3
Fernwärme	+ 2,0	+ 5,8
Mittelwert	+ 4,9	+ 8,1

Nach Tabelle 35 ergibt sich über alle betrachteten anlagentechnischen Varianten für das Niveau qP55/HT70 eine mittlere Investitionskostenerhöhung um 4,9 Prozent. Die geringsten Mehrkosten fallen für die Luft/Wasser-Wärmepumpe (2,4 Prozent) und für die Fernwärme (2,0 Prozent) an.

Tabelle 36: Änderung Gesamtannuität gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse EFH, Angaben in Prozent

Niveau Variante	qP55/HT70 (EH 55)	qP55/HT55
GasBW + WRG	+ 0,9	+ 1,6
GasBW + St Hz.	+ 0,4	+ 0,7
Luft/Wasser WP	- 8,1	- 7,4
Sole/Wasser WP	- 6,6	- 5,0
Biomasse	+ 1,7	+ 3,0
Fernwärme	- 6,1	- 5,3

Mittelwert	- 3,0	- 2,1
------------	-------	-------

Aus der zusammenfassenden Darstellung der Veränderung der Gesamtannuität gegenüber dem Vergleichsfall in Tabelle 36 ergibt sich für das Niveau qP55/HT70 eine im Mittel um 3,0 Prozent verbesserte Annuität. Dies bedeutet, dass die für dieses Niveau um im Mittel 4,9 Prozent erhöhten Investitionskosten in der annuitätischen Bewertung durch infolge der Investitionen reduzierte bedarfsgebundene Kosten über den Betrachtungszeitraum mehr als kompensiert werden. Somit kann das mit der im Referententwurf für die GEG-Novelle anvisierte Niveau qP55/HT70 insgesamt als wirtschaftlich umsetzbares neues Anforderungsniveau für das EFH bewertet werden. Diese Aussage gilt für die bei den Berechnungen zugrunde gelegten Randbedingungen (siehe Abschnitt 6.2) mit Verweis auf die in Abschnitt 6.2.8 beschriebenen Unsicherheiten.

Analog zur Erläuterung der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das Einfamilienhaus folgt im Weiteren, beginnend mit Abbildung 44 für die Varianten mit Wärmeversorgung durch einen Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung die Erläuterung der Ergebnisse für das Mehrfamilienhaus.

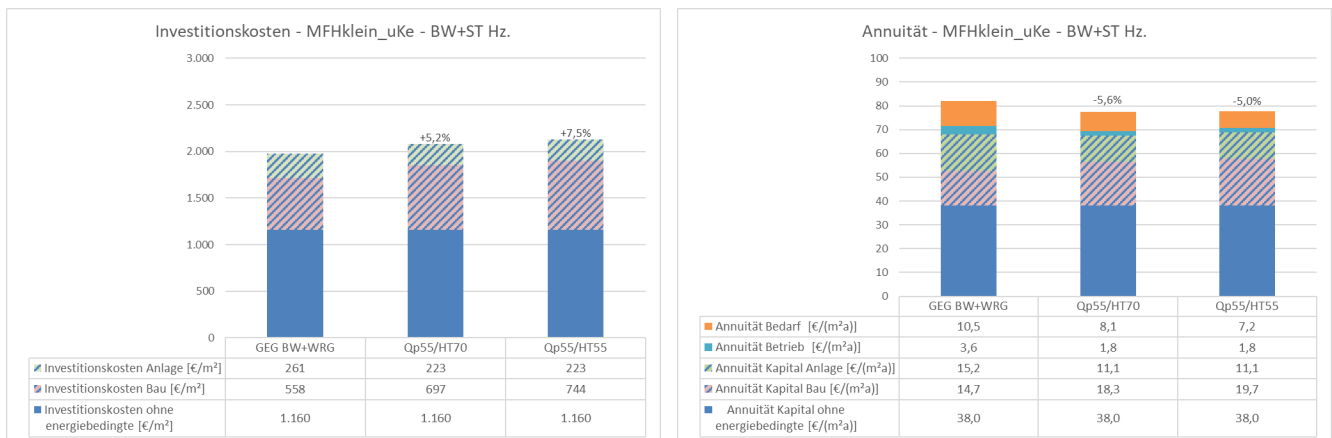
Abbildung 44: Ergebnisse MFH, Varianten Gas-Brennwert-Kessel mit Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung



Die links in Abbildung 44 beschriebenen Investitionskosten zeigen, dass für das Erreichen der Effizienzanforderung HT70 die Investitionskosten Bau auf 664 €/m² und für die Effizienzanforderung HT55 auf 744 €/m² steigen. Damit ergeben sich Investitionsmehrkosten gegenüber dem Vergleichsfall von 5,4 und 9,4 Prozent. Durch Einsparungen in den bedarfsgebundenen Kosten werden die Investitionsmehrkosten in der annuitätischen Betrachtung annähernd kompensiert. Die Annuität für das Niveau qP55/HT70 liegt mit 0,4 Prozent nur geringfügig über der Annuität des Vergleichsfalls. Die Varianten mit Gas-Brennwertkessel sind wg. der leichten Verschlechterung der Annuität als (geringfügig) unwirtschaftlich einzustufen.

Mit Abbildung 45 folgen die Auswertungen zur Varianten Wärmeerzeugung mit Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit solarthermischer Heizungs- (und Warmwasser-) Unterstützung.

Abbildung 45: Ergebnisse MFH, Varianten Gas-Brennwert-Kessel mit Solarthermie Heizung



Nach Abbildung 45 ergeben sich gegenüber dem Vergleichsfall für die Varianten mit Gas-Brennwertkessel und solarer Heizungsunterstützung Mehrkosten von 5,2 bzw. 7,5 % und somit in etwa wie für die Varianten mit Gas-Brennwertkessel und Zu-/Abluftanlage. Aus der annuitätischen Bewertung geht allerdings hervor, dass beide Varianten als wirtschaftlich einzustufen sind: für das mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle angestrebte Anforderungsniveau qP55/HT70 ergibt sich trotz der um 5,2 Prozent erhöhten Investitionskosten eine um 5,6 Prozent verbesserte Gesamtannuität gegenüber dem Vergleichsfall.

Für die Varianten mit Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpe folgen die Analysen zur Wirtschaftlichkeit mit Abbildung 46 und Abbildung 47.

Abbildung 46: Ergebnisse MFH, Varianten Luft/Wasser-Wärmepumpe

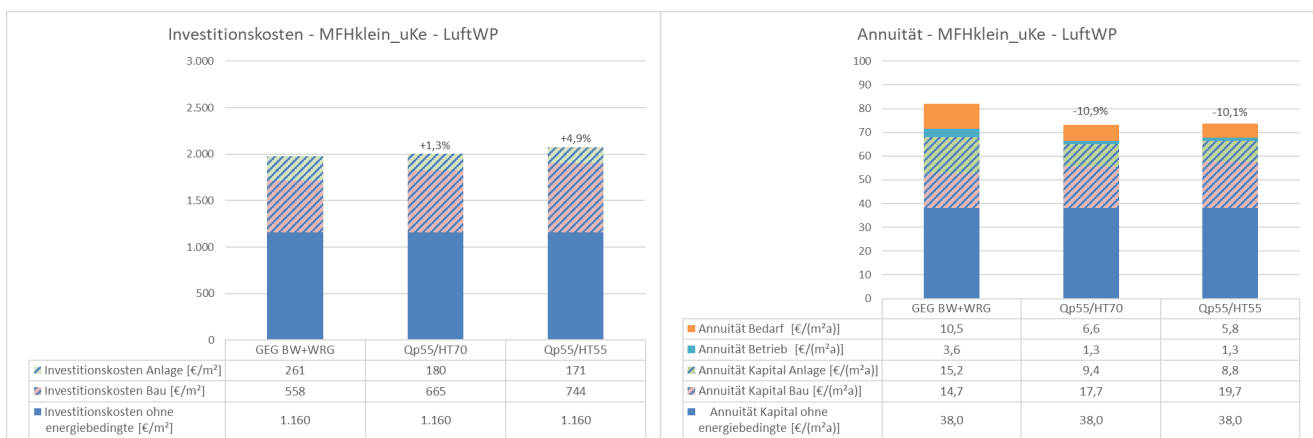
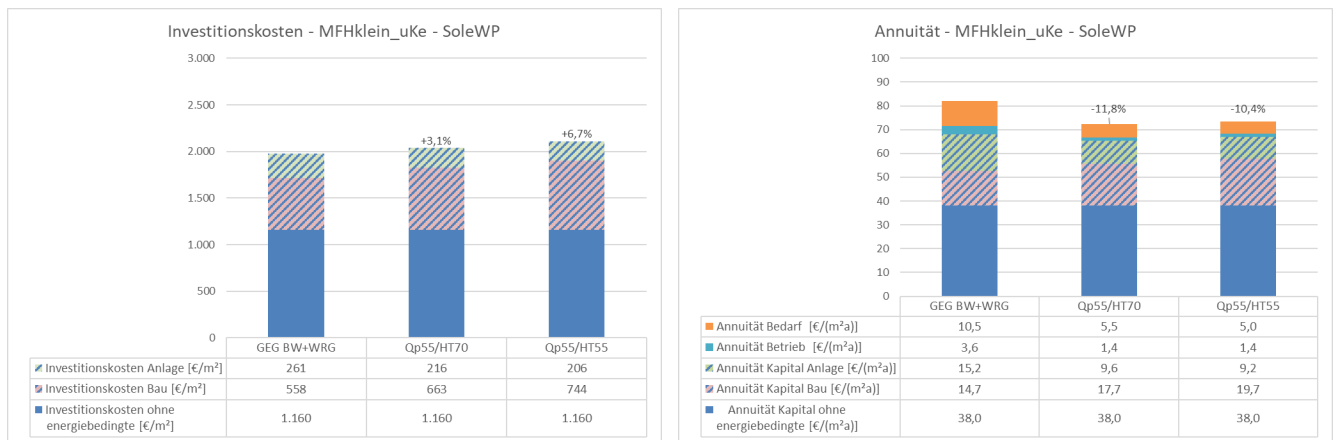
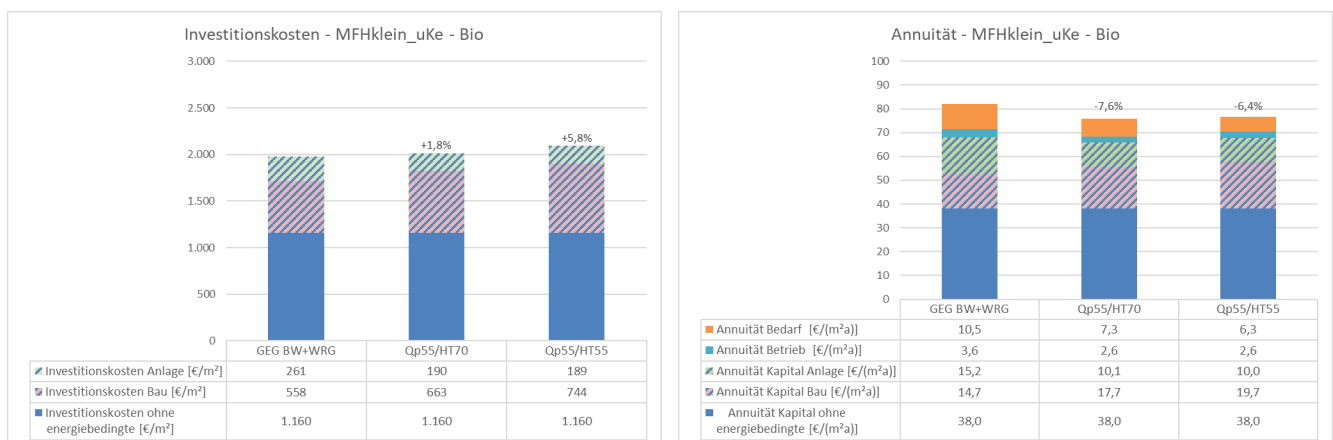


Abbildung 47: Ergebnisse MFH, Varianten Sole/Wasser-Wärmepumpe



Vergleichbar mit den Auswertungen zum Einfamilienhaus zeigen die Ergebnisse der Wärmepumpenvarianten in Abbildung 46 und Abbildung 47, dass die Investitionsmehrkosten, die für das Niveau qP55/HT70 im Fall der Luft/Wasser-Wärmepumpe um 1,3 Prozent und im Fall der Sole/Wasser-Wärmepumpe um 3,1 Prozent über dem Vergleichsfall liegen, durch Einsparungen der bedarfsgebundenen Kosten gemäß Auswertung der zugehörigen Annuitäten bei Weitem kompensiert werden. Im Fall der Luft/Wasser-Wärmepumpe liegt die Annuität um 10,9 Prozent um im Fall der Sole/Wasser-Wärmepumpe um 11,8 Prozent unter den Werten des Vergleichsfalls. Grundsätzlich sind alle Wärmepumpenlösungen auch für den Anwendungsfall Mehrfamilienhaus als besonders wirtschaftliche Erfüllungsoptionen zu bewerten.

Abbildung 48: Ergebnisse MFH, Varianten Biomasse-Kessel

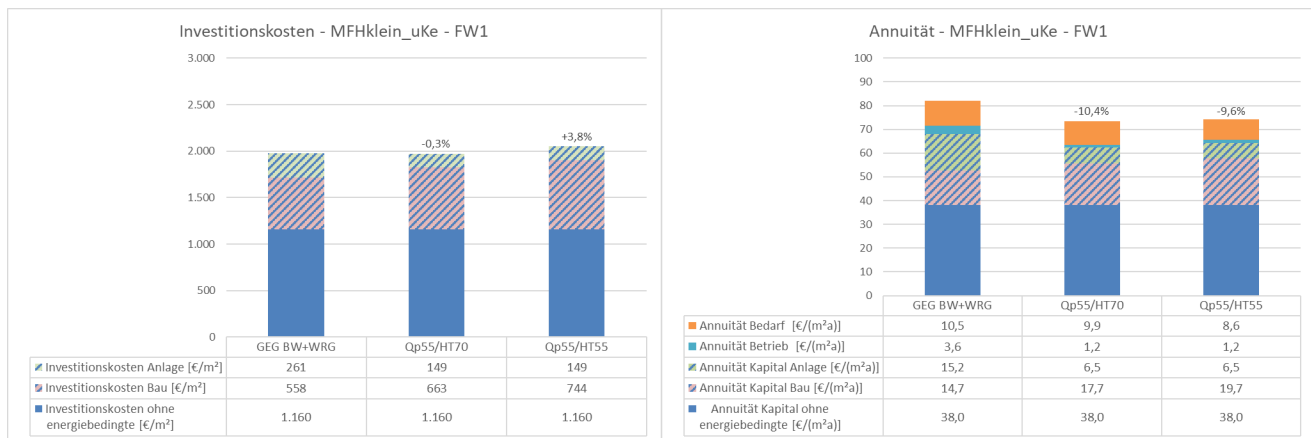


Gegenüber dem Vergleichsfall mit Wärmeerzeugung über einen Gas-Brennwertkessel in Kombination mit einer Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung und solarthermischer Warmwasserbereitung fallen bei den mit Abbildung 48 betrachteten Biomasselösungen deutlich geringere anlagentechnische Investitionskosten an. Bei dem Niveau qP55/HT70 resultieren Mehrkosten von 1,8 Prozent gegenüber dem Bezugsfall. Bei wei-

ter verbessertem Wärmeschutz für das Niveau HT55 liegen die Mehrkosten bei 5,8 Prozent. Für die Biomasselösungen führt die Bewertung anhand der Gesamtannuität in beiden Fällen zu wirtschaftlichen Erfüllungsoptionen. Gegenüber dem Vergleichsfall ergibt sich für das Niveau qP55/HT70 eine um 7,6 Prozent verbesserte Annuität.

Die Darstellung in Abbildung 49 dokumentiert die Ergebnisse für die Varianten mit Fernwärme als Wärmeversorger für das Mehrfamilienhaus.

Abbildung 49: Ergebnisse MFH, Varianten Fernwärme



Die in Abbildung 49 dargestellten Investitionskosten für die Fernwärmelösungen liegen aufgrund der reduzierten anlagentechnischen Investitionskosten für das Niveau qP55/HT70 unter den Investitionskosten des Vergleichsfalls. Für das Niveau qP55/HT55 ergeben sich aufgrund der steigende Investitionskosten Bau auch in der Summe gegenüber dem Vergleichsfall um 3,8 Prozent erhöhte Investitionskosten. Die betrachteten Anforderungsniveaus können mit Fernwärme als Wärmeversorgung gemäß der annuitätischen Bewertung als besonders wirtschaftliche Lösungen bewertet werden. Für das im Referentenentwurf für die GEG-Novelle vorgeschlagene Anforderungsniveau qP55/HT70 ergibt sich eine gegenüber dem Vergleichsfall um 10,4 Prozent verbesserte Annuität.

Tabelle 37 und Tabelle 38 fassen die Änderungen der Investitionskosten sowie die Änderungen der Gesamtannuität für das Mehrfamilienhaus zusammen.

Tabelle 37: Investitionskostenänderung gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse MFH, Angaben in Prozent

Niveau Variante	qP55/HT70 (EH 55)	qP55/HT55
GasBW + WRG	+ 5,4	+ 9,4
GasBW + St Hz.	+ 5,2	+ 7,5
Luft/Wasser WP	+ 1,3	+ 4,9
Sole/Wasser WP	+ 3,1	+ 6,7
Biomasse	+ 1,8	+ 5,8
Fernwärme	- 0,3	+ 3,8
Mittelwert	+ 2,8	+ 6,4

Nach Tabelle 37 ergibt sich über alle betrachteten anlagentechnischen Varianten für das Niveau qP55/HT70 eine mittlere Investitionskostenerhöhung um 2,8 Prozent. Im Fall der Fernwärmevariante fallen gegenüber dem Vergleichsfall sogar um 0,3 Prozent verminderte Investitionskosten an. Die Mehrkosten der Wärmepumpenlösungen liegen bei 1,3 Prozent für die Luft/Wasser-Wärmepumpe bei 3,1 % bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe.

Tabelle 38: Änderung Gesamtannuität gegenüber Vergleichsfall aktuelle GEG-Anforderung, Ergebnisse MFH, Angaben in Prozent

Niveau Variante	qP55/HT70 (EH 55)	qP55/HT55
GasBW + WRG	+ 0,4	+ 1,3
GasBW + St Hz.	- 5,6	- 5,0
Luft/Wasser WP	- 10,9	- 10,1
Sole/Wasser WP	- 11,8	- 10,4
Biomasse	- 7,6	- 6,4
Fernwärme	- 10,4	- 9,6
Mittelwert	- 7,7	- 6,7

Über alle anlagentechnischen Varianten hinweg ergibt sich gemäß Tabelle 38 für das Niveau qP55/HT70 eine gegenüber dem Vergleichsfall im Mittel um 7,7 Prozent verbesserte Annuität. Die Wärmepumpenlösungen und die Fernwärmeversorgung weisen sogar eine um über 10 Prozent verbesserte Gesamtannuitäten auf. Lediglich die Variante mit Gas-Brennwertkessel und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung stellt sich für das Niveau unwirtschaftlich dar. Die zusammenfassenden Aussagen gelten für die bei den Berechnungen zugrunde gelegten Randbedingungen (siehe Abschnitt 6.2) mit Verweis auf die in Abschnitt 6.2.8 beschriebenen Unsicherheiten.

6.3.4 Sensitivitätsbetrachtung CO₂-Bepreisung

Den in Abschnitt 6.3.3 dokumentierten Auswertungen der Grundfälle liegen Energiepreise für den Energieträger Gas inklusive CO₂-Bepreisung zugrunde (siehe auch Erläuterungen zu den Energiepreisen in Abschnitt 6.2.6). Die folgenden Auswertungen ergänzen für das Einfamilienhaus und für das Mehrfamilienhaus die Auswertungen der Grundfälle um Analysen ohne anteilige CO₂-Bepreisung. Zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit werden diese Auswertungen für das EFH und das MFH beschränkt auf die Ergebnisse für die anlagentechnischen Varianten Gas-Brennwertkessel mit Zu-/Ab-luftanlage und Luft/Wasser-Wärmepumpe.

Zunächst folgen mit Abbildung 50 und Abbildung 51 die Ergebnisse für das EFH. Jeweils links werden die bereits aus Abschnitt 6.3.3 bekannten Annuitäten der Grundfälle inklusive CO₂-Preisanteil und rechts die Annuitäten ohne CO₂-Preisanteil dargestellt.

Abbildung 50: Ergebnisse Sensitivität CO₂-Bepreisung EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: inklusive CO₂-Preisanteil, rechts ohne CO₂-Preisanteil

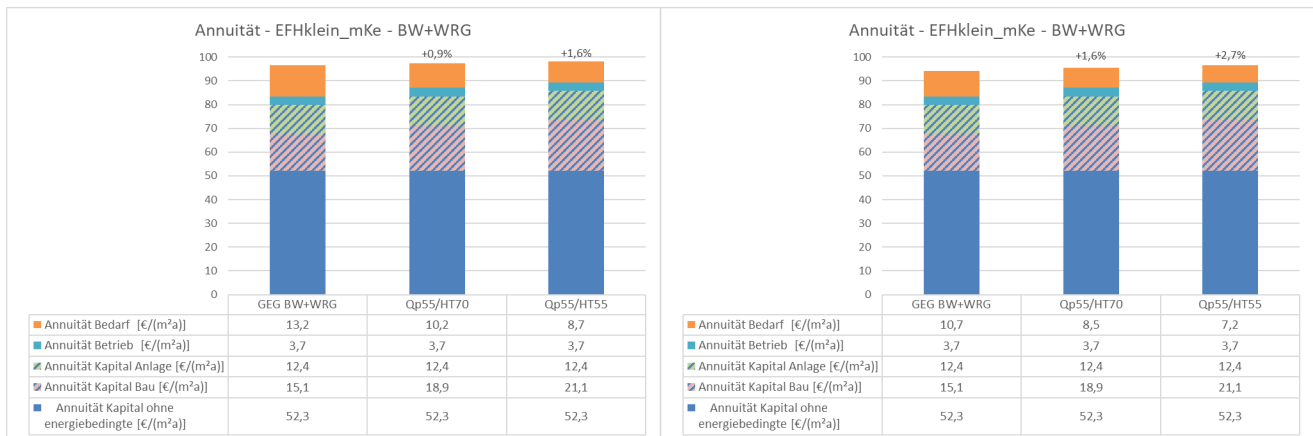
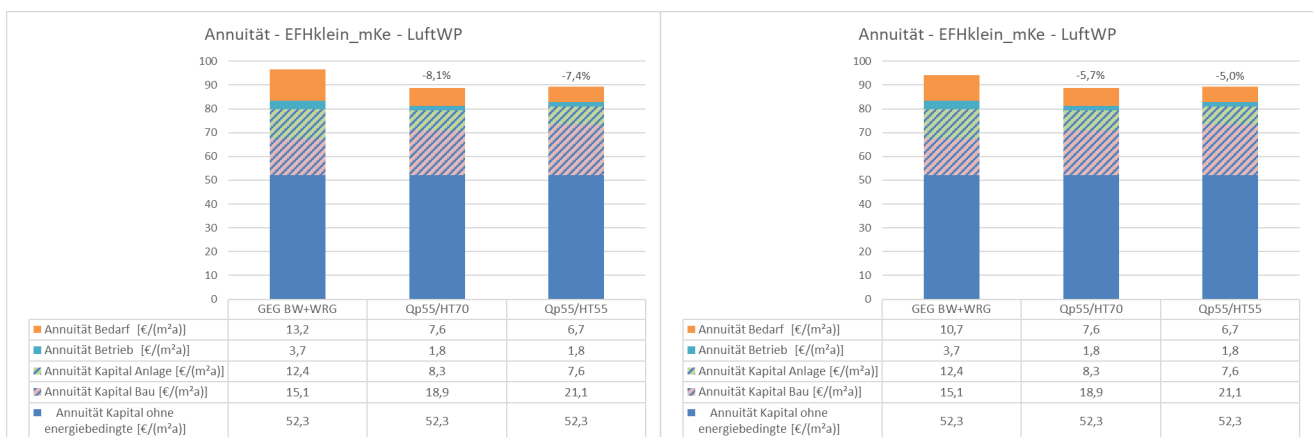


Abbildung 51: Ergebnisse Sensitivität CO₂-Bepreisung EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: inklusive CO₂-Preisanteil, rechts ohne CO₂-Preisanteil



Für die mit Abbildung 50 ausgewerteten Varianten mit Gas-Brennwertkessel zeigt sich, dass sich ohne Berücksichtigung des CO₂-Preisanteils für beide betrachteten Niveaus der H_T-Anforderung eine geringfügige Verschlechterung der Annuität ergibt. Für das H_T-Niveau HT70 erhöht sich die Annuitäten auf 1,6 Prozent und für das Niveau HT55 auf 2,7 Prozent. Demgegenüber zeigen die Auswertungen der Varianten mit Luft/Wasser-Wärmepumpe in Abbildung 51 eine etwas deutlichere Auswirkung auf die Annuitäten, da sich in diesen Fällen der nicht berücksichtigte CO₂-Preisanteil nur auf den Vergleichsfall bezieht und sich somit nur für diesen eine Reduzierung der Annuität der bedarfsgebundenen Kosten ergibt. Ohne Berücksichtigung eines CO₂-Preisanteils ist die Gesamtannuität der Variante Luft/Wasser-Wärmepumpe gegenüber der Referenz weiter vorteilhaft aber weniger stark ausgeprägt (Niveau HT70 5,7 Prozent ggü. Referenz, Niveau HT55 5,0 Prozent ggü. Referenz).

Mit Abbildung 52 und Abbildung 53 folgen die analogen Auswertungen für das **Mehrfamilienhaus** (MFH). Die Veränderung der Annuitäten infolge der Nichtberücksichtigung eines CO₂-Preisanteils ist vergleichbar mit den zuvor für das EFH dokumentierten Auswertungen, weshalb an dieser Stelle auf eine erneute bzw. weitergehende textliche Erläuterung verzichtet wird.

Abbildung 52: Ergebnisse Sensitivität CO₂-Bepreisung MFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: inklusive CO₂-Preisanteil, rechts ohne CO₂-Preisanteil

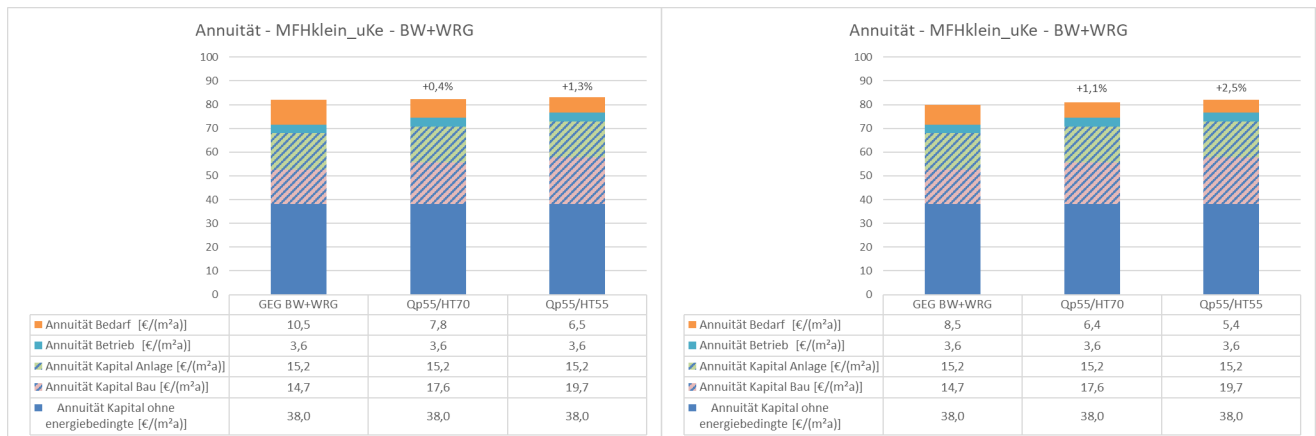
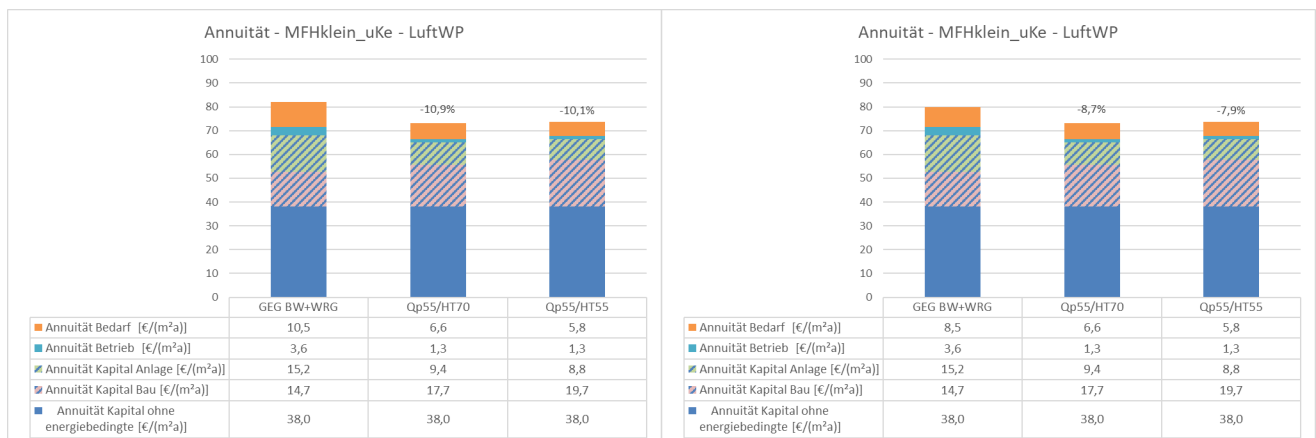


Abbildung 53: Ergebnisse Sensitivität CO₂-Bepreisung EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: inklusive CO₂-Preisanteil, rechts ohne CO₂-Preisanteil



6.3.5 Sensitivitätsbetrachtung Kapitalzins

Den mit Abschnitt 6.3.3 dokumentierten Ergebnissen der Wirtschaftlichkeitsanalyse der Grundfälle ist ein Kapitalzins in Höhe von real 0 Prozent hinterlegt. Die folgenden Auswertungen stellen dar, wie sich unter ansonsten gleichbleibenden Rechenrandbedingungen die Annuität bei einem Kapitalzins von real 2 Prozent verändert. Analog zu den Ergebnissen im vorigen Abschnitt werden die folgenden Auswertungen beschränkt auf die Varianten der Wärmeerzeugung mit Gas-Brennwertkessen mit Zu-/Abluftanlage und Luft/Wasser-Wärmepumpe und sowohl für das EFH als auch für das MFH dokumentiert. Jeweils links in den folgenden Abbildungen werden die Annuitäten der betrachteten Grundfälle aus Abschnitt 6.3.3 für den Kapitalzins 0 Prozent erneut wiedergegeben. Jeweils rechts folgt die Gegenüberstellung der Annuitäten unter Ansatz von 2 Prozent Kapitalzins. Hinweis: wegen der Erhöhung der Annuitäten ist in beiden Diagrammen jeweils die Skalierung der Ordinate angepasst. Es folgen mit Abbildung 54 und Abbildung 55 die Auswertungen für das EFH.

Abbildung 54: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %

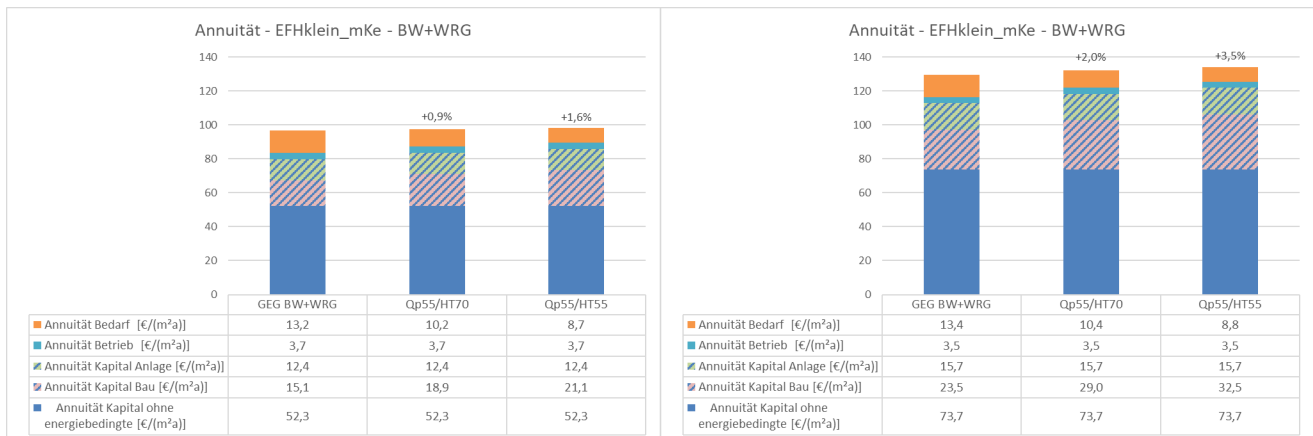
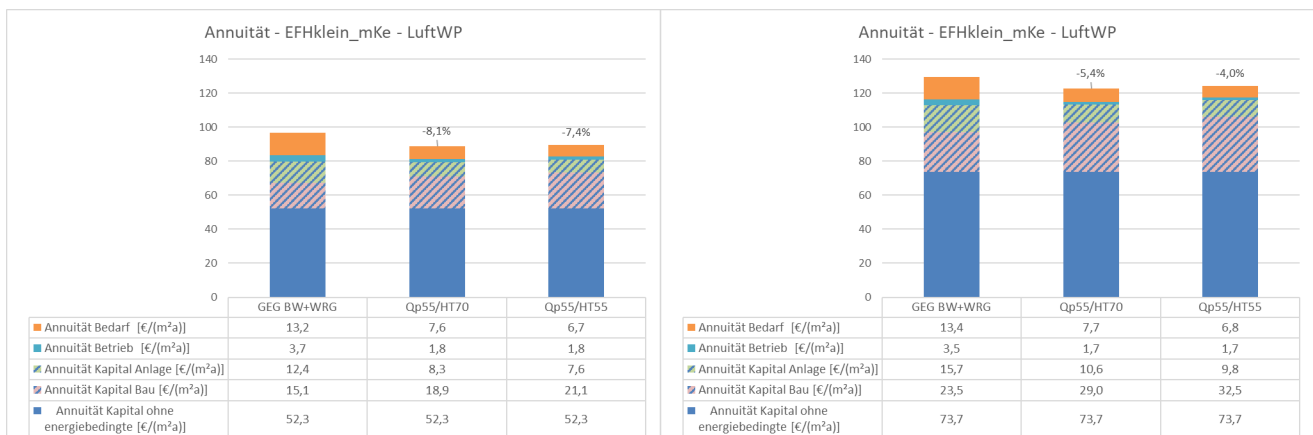


Abbildung 55: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %



Eine Erhöhung des Kapitalzins von 0 auf 2 Prozent führt in der annuitätischen Bewertung im Wesentlichen dazu, dass sich die Annuität der kapitalgebundenen Kosten erhöht. Für die mit Abbildung 54 dokumentierten Ergebnisse kann die Erhöhung der Annuität der kapitalgebundenen Kosten für Anlagentechnik, Bautechnik und nicht energiebedingter Kosten anhand der zusätzlich zu den Balkendiagrammen angegebenen Zahlenwerte gut nachvollzogen werden. Die Erhöhung der Annuität betrifft in gleicher Weise den Vergleichsfall sowie die einzelnen Erfüllungsoptionen zu den betrachteten Niveaus. Für die mit Abbildung 54 dokumentierten Ergebnisse zu den Varianten mit Gas-Brennwertkessel erhöhen sich die Annuitäten um 1,1 Prozentpunkte für die Effizianz Anforderungen HT70 sowie um 1,9 Prozentpunkte für HT55. Im Fall der Abbildung 55 ausgewerteten Fälle für die Luft/Wasser-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger ist die Annuität Anlagenvariante LuftWP gegenüber der Referenz auch bei einem Kapitalzins von 2 Prozent weiter vorteilhaft, aber weniger stark ausgeprägt (Verschlechterungen der Annuität gegenüber der Betrachtung mit einem Kapitalzins von 0 von 2,7 %-Punkten für das Niveau HT70 und 3,4 %-Punkten für das Niveau HT55).

Mit Abbildung 56 und Abbildung 57 folgend die entsprechenden Auswertungen für das MFH.

Abbildung 56: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins MFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Gas-Brennwertkessel in Verbindung mit Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %

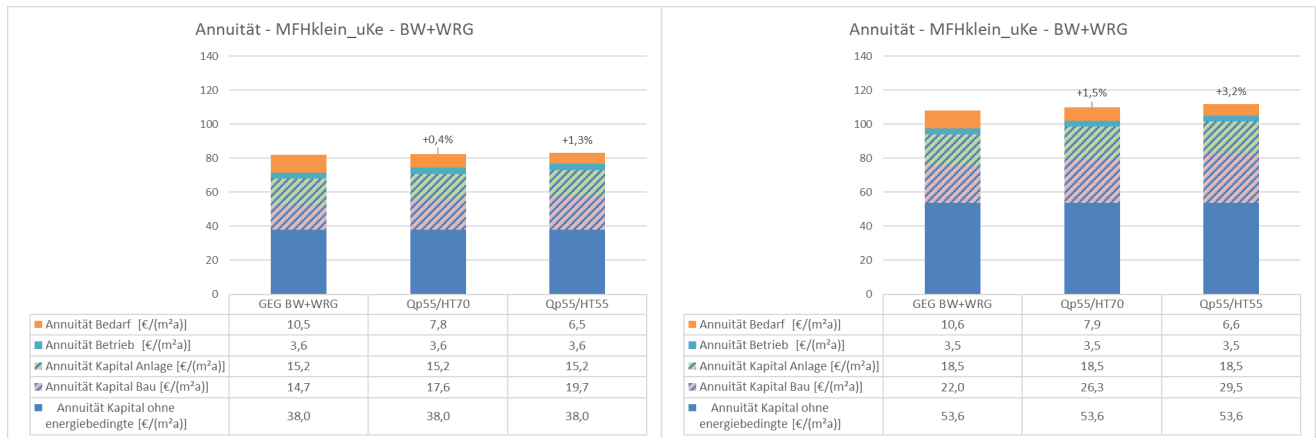
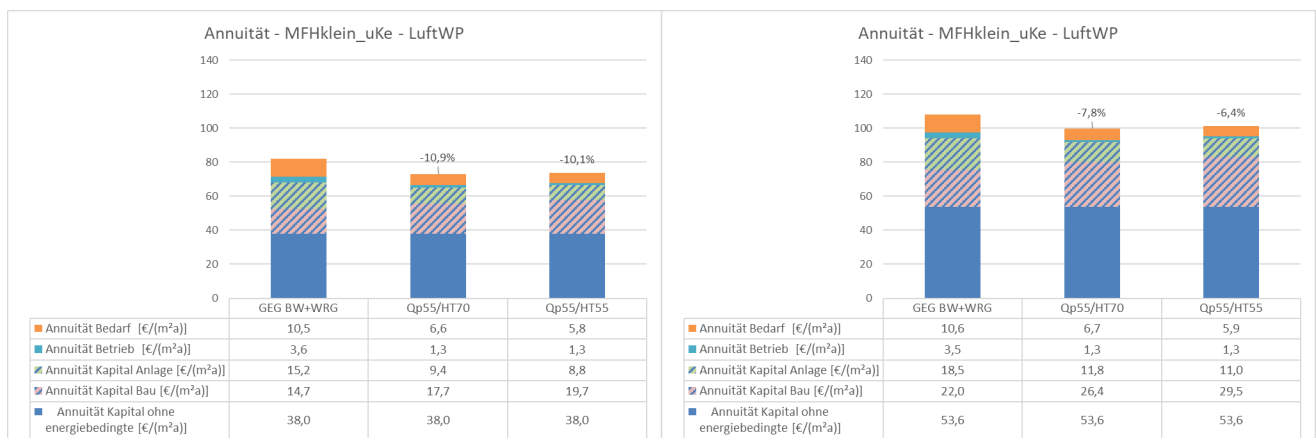


Abbildung 57: Ergebnisse Sensitivität Kapitalzins EFH, Auswertungen Annuitäten für Wärmeerzeugung durch Luft/Wasser-Wärmepumpe, links: Kapitalzins 0 %, rechts Kapitalzins 2 %



Nach Abbildung 56 ergibt sich für die Systeme mit Gas-Brennwertkessel infolge des von 0 auf 2 Prozent erhöhten Kapitalzins eine Verschlechterung der Gesamtannuität von 1,1 bis 1,9 %-Punkten. Je ambitionierter die Effizianzforderung umso deutlicher die Verschlechterung der Gesamtannuität. Gleiches gilt in der Tendenz auch für die Auswertungen in Abbildung 57 für die Luft/Wasser-Wärmepumpe als Wärmeerzeuger. Allerdings bleibt auch hier bei Unterstellung eines Kapitalzinses von 2 % die Anlagenvariante LuftWP vorteilhaft gegenüber der Referenz, die Gesamtannuität verschlechtert sich jedoch um 3,1 Prozentpunkten bei HT70 und um 3,7 Prozentpunkten bei HT55.

6.4 Ergebnisse der Abschätzung zur Wirtschaftlichkeit Nichtwohngebäude für den EG-55-Standard

6.4.1 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die für den Anwendungsfall Nichtwohngebäude durchgeführte Abschätzung zur Wirtschaftlichkeit basiert, wie im Weiteren noch näher beschrieben, auf energetischen Bilanzierungen, die im Rahmen eines für das GEG 2020 durchgeführten Untersuchung erstellt wurden (IBH, ITG, Ecofys, dena 2018). Die hierbei bewerteten Anlagenkonzepte zeichnen sich dadurch aus, dass es sich um bivalente Systeme zur Wärmeerzeugung handelt, bei denen unterschiedliche Grundlasterzeuger jeweils mit einem Gas-Brennwertkessel als Spitzenlasterzeuger betrieben werden. Für Grund- und Spitzenlastsystem wird jeweils ein Deckungsanteil von 50 Prozent unterstellt. Dies hat einerseits zur Folge, dass nicht für alle Anlagenkonzepte Erfüllungsoptionen für das primärenergetische Anforderungsniveau gebildet werden können. Andererseits erfolgt die Wärmebedarfsdeckung der Erfüllungsoptionen (außer im Fall der monovalent betriebenen Sole/Wasser-Wärmepumpe) zur Hälfte mit Gas. Für den Energieträger Gas liegen die Energiebezugskosten allerdings auf einem vergleichsweise hohen Kostenniveau, sodass sich hieraus entsprechend ungünstige Annuitäten der bedarfsgebundenen Kosten ergeben.

Zusammenfassend führen die für den Anwendungsfall Nichtwohngebäude durchgeführte Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit zu folgenden Aussagen:

- Die Investitionskosten erhöhen sich durch das Niveau EG 55 im Vergleich zum Anforderungsniveau nach GEG 2020 im Mittel über die betrachteten Erfüllungsoptionen um 4,3 Prozent.
- Die höhere Annuität der kapitalgebundenen Kosten wird durch niedrigere Annuität der bedarfsgebundenen Kosten beim EG 55 weitgehend kompensiert. Die Gesamtannuität erhöht sich im Mittel über alle betrachteten Erfüllungsoptionen um 2,7 Prozent.
- Dieses Ergebnis dürfte noch positiver ausfallen, wenn anstelle des in dieser Berechnung angesetzten Gas-Brennwertkessels als Spitzenlastkessel (der die Hälfte des Wärmebedarfs deckt und zu vergleichsweise hohen Annuitäten der bedarfsgebundenen Kosten führt), ein monovalenter Erzeuger eingesetzt wird. Dies wird im Folgeprojekt untersucht.
- In den Fällen, in denen die primärenergetische Anforderung von 55 % $q_{p,Ref}$ nicht erreicht wird, ist dies auf die unterstellten bivalenten Wärmeerzeugungsvarianten im Vorgängerprojekt zurückzuführen.

6.4.2 Vorbemerkungen zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit für Nichtwohngebäude

Zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit des mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle anvisierten Anforderungsniveaus EG 55 für neu zu errichtende Nichtwohngebäude folgen Auswertungen für das gegenwärtige Anforderungsniveau nach GEG 2020 im Vergleich zu dem Niveau EG 55 zu

- Investitionskosten,
- Annuitäten der kapitalgebundenen Kosten,
- Annuitäten der bedarfsgebundenen Kosten und
- Gesamtannuitäten.

Diese Auswertungen erfolgen auf Grundlage der energetischen Bilanzierungen für das „Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie Flexibilisierungsoptionen“ (IBH, ITG, Ecofys, dena 2018). Für die hier durchgeführte Abschätzung erfolgt die Neubewertung unter Ansatz der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Randbedingungen. Es werden die im Folgenden benannten anlagentechnischen Varianten rechnerisch bewertet:

1. Grundlast: BHKW; Spitzenlast: Gas-BW
2. Grundlast: Luft/Wasser Wärmepumpe; Spitzenlast: Gas-BW
3. (Grundlast:) Sole/Wasser Wärmepumpe; (nur bei Hotel: Spitzenlast: Gas-BW)
4. Grundlast: Biomassekessel; Spitzenlast: Gas-BW

Die Deckungsanteile Grundlast/Spitzenlast werden für die Ermittlung der bedarfsgebundenen Kosten zu je 50 Prozent unterstellt. Ausgehend von den rechnerisch nach DIN V 18599-5 berechneten maximalen Heizleistungen wird zur Ermittlung der Investitionskosten der Wärmeerzeuger für das Grundlastsystem 20 Prozent Leistungsanteil und für das Spitzenlastsystem 80 Prozent Leistungsanteil unterstellt.

Hinweise zu den tabellarischen Ergebnissen in Abschnitt 6.4.3 bis Abschnitt 6.4.6:

- In den Auswertungen zum anlagentechnischen System Luft/Wasser-Wärmepumpe (Grundlast) mit Gas-Brennwertkessel (Spitzenlast) sind teilweise **Einträge „k. A.“** ausgewiesen. Dies bedeutet **„keine Angabe“** und ist auf fehlende Kostenfunktionen zurückzuführen. da die vorhandene Kostenfunktion für Luft/Wasser-Wärmepumpen nur bis zu einer Leistung von 32 kW gilt und für größere Wärmepumpen keine Kostenfunktionen im Vorgängerprojekt vorgelegen haben.
- Weiterhin sind für das Niveau EG 55 **Einträge „Ausf. n. möglich“** enthalten. Dies steht für „Ausführung nicht möglich“ und bedeutet, dass das Erreichen des primärenergetischen Anforderungswertes 55 % $q_{p,Ref}$ für die betreffende anlagentechnische Variante nicht möglich ist. Dies ist in der Regel darauf zurückzuführen, dass die definierten Anlagenvarianten für die Wärmeversorgung jeweils einen Erzeuger für Spitzenlast aufweisen, für den ein Deckungsanteil von 50 Prozent unterstellt ist. Der Spitzenlastkessel ist in allen Fällen ein Gas-Brennwertkessel, sodass der von diesem bereitgestellte Anteil der Wärmeversorgung mit Blick auf das primärenergetische Anforderungsniveau 55 % $q_{p,Ref}$ sehr schlecht bewertet wird. Dies wiederum hat zur Folge,

dass selbst bei sehr ambitioniert ausgeführtem Wärmeschutz der Bauteile das primärenergetische Anforderungsniveau nicht erreicht werden kann.

6.4.3 Investitionskosten

Mit Tabelle 39 folgt die Ausweisung der berechneten Investitionskosten jeweils für das Erreichen der Niveaus 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] und 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] und die fallweise betrachteten anlagentechnischen Varianten. Angegeben werden jeweils Nettokosten mit der Unterscheidung zwischen nicht energiebedingten Kosten und Kosten energetisch relevanter Komponenten. Nicht energiebedingte Kosten umfassen z. B. Baukosten für alle Bauteile, die nicht der wärmeübertragenden Hüllfläche zuzuordnen sind oder Kosten für anlagentechnische Komponenten, die nicht der Konditionierung der Gebäude im Sinne der nach GEG zu berücksichtigenden Bilanzanteile dienen. Die Angabe der nicht energiebedingten Kosten dient also der Einordnung der energiebedingten Kosten gegenüber den nicht energiebedingten Kosten. Aus der Differenz der für das aktuelle GEG-Anforderungsniveau und für das EG 55-Niveau ausgewiesenen Kosten ergeben sich schließlich die für das EG 55-Niveau anfallenden Mehrkosten. Sämtliche Kostenangaben werden im Folgenden als spezifische Kosten pro Quadratmeter Nettogrundfläche angegeben.

Tabelle 39: Netto-Investitionskosten in €/m² Nettogrundfläche, nicht energiebedingter Investitionskostenanteil sowie Kosten energetisch relevanter Komponenten für die Niveaus 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] und 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55]

Niveau	Nettokosten energetisch relevanter Komponenten 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] in [€/m ²]	Nettokosten energetisch relevanter Komponenten				Nettokosten energetisch relevanter Komponenten			
		BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)	Nettokosten nicht energiebedingt in [€/m ²]								
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)		Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel
Büro klein, nicht gekühlt	1670	449	444	511	432	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	517	551
Büro groß, gekühlt	1558	1039	k. A.	1058	986	Ausf. n. möglich	k. A.	1133	Ausf. n. möglich
Kindertagesstätte	1689	521	515	606	517	668	631	609	572
Schule	1632	482	k. A.	554	482	557	k. A.	556	551
Hotel groß, gekühlt	1670	415	k. A.	515	437	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verbrauchermarkt	1165	825	877	757	781	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verwaltungsgebäude	1670	888	k. A.	982	891	1075	k. A.	1111	1132
Schulsporthalle	1632	850	869	949	841	990	1082	1012	936

Ausgehend von den in Tabelle 39 ausgewiesenen Kosten mit Differenzierung zwischen nicht energiebedingten Kosten und Kosten energetisch relevanter Komponenten folgt mit Tabelle 40 die Zusammenführung dieser Kostenanteile mit Angabe der Gesamt-Nettokosten für das aktuelle GEG-Anforderungsniveau und das EG 55-Niveau. Die Mehrkosten, die sich durch das EG 55-Niveau im Vergleich zum aktuellen GEG-Anforderungsniveau ergeben, sind im linken Teil der Tabelle 41 in [€/m²] und im rechten Teil in [%]

ausgewiesen. Zusätzlich ausgewiesen sind jeweils die Mittelwerte über die betrachteten anlagentechnischen Varianten sowie über die einzelnen Gebäude.

Tabelle 40: Nettokosten gesamt in €/m² Nettogrundfläche für die Niveaus 75 % q_{p,Ref} / 80 % Ü_{Ref} [GEG 2020] und 55 % q_{p,Ref} / 70 % Ü_{Ref} [EG 55]

Niveau	Nettokosten gesamt 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ü _{Ref} [GEG 2020] in [€/m ²]				Nettokosten gesamt 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ü _{Ref} [EG 55] in [€/m ²]			
	BHKW	WP Luft/ Wasser	WP Sole/ Wasser	Pelletkessel	BHKW	WP Luft/ Wasser	WP Sole/ Wasser	Pelletkessel
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)								
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel
Büro klein, nicht gekühlt	2118	2114	2181	2102	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	2187	2221
Büro groß, gekühlt	2598	k. A.	2616	2544	Ausf. n. möglich	k. A.	2691	Ausf. n. möglich
Kindertagesstätte	2210	2205	2295	2207	2357	2320	2298	2261
Schule	2113	k. A.	2185	2114	2189	k. A.	2187	2183
Hotel groß, gekühlt	2084	k. A.	2185	2106	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verbrauchermarkt	1991	2043	1923	1946	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verwaltungsgebäude	2558	k. A.	2651	2560	2744	k. A.	2780	2802
Schulsporthalle	2481	2500	2581	2473	2622	2714	2643	2567

Tabelle 41: Mehrkosten bei 55 % q_{p,Ref} / 70 % Ü_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q_{p,Ref} / 80 % Ü_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m² A_{NGF}]; rechts in [%]

Niveau	Mehrkosten bei 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ü _{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ü _{Ref} [GEG 2020] in [€/m ²]					Mehrkosten bei 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ü _{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ü _{Ref} [GEG 2020] in [%]				
	BHKW	WP Luft/ Wasser	WP Sole/ Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude	BHKW	WP Luft/ Wasser	WP Sole/ Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)										
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel		Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	
Büro klein, nicht gekühlt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	6	119	62	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	0,3 %	5,6 %	3,0 %
Büro groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	75	Ausf. n. möglich	75	Ausf. n. möglich	k. A.	2,9 %	Ausf. n. möglich	2,9 %
Kindertagesstätte	147	116	3	54	80	6,7 %	5,2 %	0,1 %	2,5 %	3,6 %
Schule	75	k. A.	2	70	49	3,6 %	k. A.	0,1 %	3,3 %	2,3 %
Hotel groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-
Verbrauchermarkt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-

Verwaltungsgebäude	187	k. A.	129	242	186	7,3 %	k. A.	4,9 %	9,4 %	7,2 %
Schulsporthalle	140	214	63	94	128	5,7 %	8,5 %	2,4 %	3,8 %	5,1 %
<i>Mittelwerte je Anlagenvariante</i>					<i>MW gesamt:</i>	<i>Mittelwerte je Anlagenvariante</i>				<i>MW gesamt:</i>
	137	165	46	116	102	5,8 %	6,9 %	1,8 %	4,9 %	4,3 %

Die zusammenfassende Auswertung der für das Niveau EG 55 anfallenden Investitionsmehrkosten im Vergleich zum gegenwärtigen GEG-Anforderungsniveau in Tabelle 41 zeigt zunächst unabhängig von den ausgewiesenen Kosten, dass nur für bestimmte Gebäude bzw. Anlagenvarianten überhaupt Erfüllungsoptionen für das Niveau EG 55 gebildet werden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die definierten Anlagenvarianten für die Wärmeversorgung jeweils einen Erzeuger für Spitzenlast aufweisen, für den ein Deckungsanteil von 50 Prozent unterstellt ist. Der Spitzenlastkessel ist in allen Fällen ein Gas-Brennwertkessel, sodass der von diesem bereitgestellte Anteil der Wärmeversorgung mit Blick auf das primärenergetische Anforderungsniveau 55 % $q_{p,Ref}$ sehr schlecht bewertet wird. Dies wiederum hat zur Folge, dass selbst bei sehr ambitioniert ausgeführtem Wärmeschutz der Bauteile das primärenergetische Anforderungsniveau nicht erreicht werden kann. Für diese Fälle erfolgt dann in der tabellarischen Auswertung zu Kennzeichnung als „*Ausf. n. möglich*“ (*Ausführung nicht möglich*). Weiterhin erfolgen teilweise Kennzeichnungen mit „k. A.“ (keine Angabe) für die Anlagenvarianten mit Luft/Wasser-Wärmepumpe. Dies bedeutet, dass eine Bewertung der gebildeten Varianten unabhängig von der Anforderungserfüllung nicht erfolgen kann, weil keine Kostenfunktionen bzw. -ansätze für Luft/Wasser-Wärmepumpen mit thermischen Leistungen größer 32 kW verfügbar sind (siehe auch Hinweis in Abschnitt 6.4.2).

Gemäß Tabelle 41 ergeben sich Investitionsmehrkosten durch das EG 55 je nach Gebäude zwischen 49 und 186 € pro Quadratmeter Nettogrundfläche. Bezogen auf die Gesamtinvestitionskosten entspricht dies einer prozentualen Erhöhung der Kosten um 2,3 bis 7,2 Prozent. Gemittelt über für die einzelnen Anlagenvarianten gebildeten Erfüllungsoptionen (für diejenigen, für die eine Erfüllungsoption möglich ist) betragen die Investitionsmehrkosten zwischen 46 und 165 € pro Quadratmeter Nettogrundfläche, wobei die Sole/Wasser-Wärmepumpe als monovalentes System mit 46 €/m² die geringsten Mehrkosten aufweist. Über alle Varianten hinweg ergeben sich im Mittel Investitionsmehrkosten in Höhe von 102 € pro Quadratmeter Nettogrundfläche, was einer Erhöhung im Mittel um 4,3 Prozent entspricht.

6.4.4 Annuität kapitalgebundener Kosten

Ausgehend von den nach Abschnitt 6.4.3 ermittelten Investitionskosten für die Anforderungsniveaus GEG 2020 und EG 55 folgt mit Tabelle 42 die Ausweisung der Annuität der kapitalgebundenen Kosten. Wie bereits im Fall der für Wohngebäude durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgen die Berechnungen unter Ansatz eines Kapitalzinssatzes von real 0 Prozent. Eine zusätzliche Sensitivitätsbetrachtung für einen höheren Realzinssatz ist für den Anwendungsfall Nichtwohngebäude nicht erfolgt.

Zusätzlich zur Ausweisung der Annuitäten für die Anforderungsniveaus GEG 2020 und EG 55 erfolgt die Ausweisung der Veränderung der Annuität der kapitalgebundenen Kosten durch EG 55 im Vergleich zu einer Ausführung nach GEG 2020.

Tabelle 42: Annuität kapitalgebundener Kosten energetisch relevanter Elemente in €/m²a für die Niveaus 75 % q_{p,Ref} / 80 % Ü_{Ref} [GEG 2020] und 55 % q_{p,Ref} / 70 % Ü_{Ref} [EG 55]

Niveau	Annuität Kapital energetisch relevanter Elemente 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ü _{Ref} [GEG 2020] in [€/m ² a]				Annuität Kapital energetisch relevanter Elemente 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ü _{Ref} [EG 55] in [€/m ² a]			
	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel
1. Wärmeerzeuger (Grundlast) (Deckung 50 %; Leistung 20 %)	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast) (Deckung 50 %; Leistung 80 %)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel
Büro klein, nicht gekühlt	18,7	17,8	19,3	17,8	<i>Ausf. n. möglich</i>	<i>Ausf. n. möglich</i>	19,5	22,2
Büro groß, gekühlt	53,8	k. A.	51,4	51,5	<i>Ausf. n. möglich</i>	k. A.	56,1	<i>Ausf. n. möglich</i>
Kindertagesstätte	19,9	18,6	20,7	19,4	24,5	22,5	20,8	21,1
Schule	22,7	k. A.	24,1	22,6	26,2	k. A.	24,2	25,8
Hotel groß, gekühlt	22,0	k. A.	24,5	22,6	<i>Ausf. n. möglich</i>	k. A.	<i>Ausf. n. möglich</i>	<i>Ausf. n. möglich</i>
Verbrauchermarkt	29,0	29,9	26,9	27,6	<i>Ausf. n. möglich</i>	<i>Ausf. n. möglich</i>	<i>Ausf. n. möglich</i>	<i>Ausf. n. möglich</i>
Verwaltungsgebäude	43,5	k. A.	45,1	44,2	51,9	k. A.	52,1	54,6
Schulsporthalle	33,9	33,1	35,0	33,0	38,1	40,1	36,8	35,9

Tabelle 43: Veränderung Annuität kapitalgebundener Kosten energetisch relevanter Elemente bei 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m² ANGF]; rechts in [%]

Niveau	Veränderung Annuität kapitalgebundener Kosten bei 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] in [€/m ² a]					Veränderung Annuität kapitalgebundener Kosten bei 55 % $q_{p,Ref}$ / 70 % \bar{U}_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % $q_{p,Ref}$ / 80 % \bar{U}_{Ref} [GEG 2020] in [%]				
	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)										
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel		Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	
Büro klein, nicht gekühlt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	0,1	4,4	2,3	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	0,6 %	24,7 %	12,6 %
Büro groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	4,7	Ausf. n. möglich	4,7	Ausf. n. möglich	k. A.	9,1 %	Ausf. n. möglich	9,1 %
Kindertagesstätte	4,6	3,8	0,1	1,6	2,5	23,2 %	20,6 %	0,3 %	8,5 %	13,1 %
Schule	3,4	k. A.	0,1	3,2	2,2	15,1 %	k. A.	0,4 %	14,0 %	9,8 %
Hotel groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-
Verbrauchermarkt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-
Verwaltungsgebäude	8,4	k. A.	7,0	10,3	8,6	19,4 %	k. A.	15,6 %	23,3 %	19,4 %
Schulsporthalle	4,2	6,9	1,8	2,9	4,0	12,5 %	21,0 %	5,3 %	8,8 %	11,9 %
Mittelwerte je Anlagenvariante					MW gesamt:	Mittelwerte je Anlagenvariante				MW gesamt:
	5,2	5,4	2,3	4,5	4,0	17,5 %	20,8 %	5,2 %	15,9 %	13,1 %

Die Auswertungen in Tabelle 42 zeigen, dass sich durch das EG 55 die Annuität der kapitalgebundenen Kosten je nach Gebäude um 2,2 bis 8,6 €/m²a erhöht. Die Bandbreite der prozentualen Erhöhungen gegenüber der Annuität des Vergleichsfalls liegt dabei zwischen 9,1 und 19,4 Prozent. Über alle Erfüllungsoptionen gemittelt erhöht sich die Annuität der kapitalgebundenen Kosten um 4 €/m²a, was einer prozentualen Erhöhung um 13,1 Prozent entspricht. Dieser Erhöhung der Annuität der kapitalgebundenen Kosten wirkt in der Ermittlung der Gesamtannuität die Reduzierung der Annuität der bedarfsgebundenen Kosten, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, entgegen.

6.4.5 Annuität bedarfsgebundener Kosten

Infolge der erhöhten Investitionskosten, die gegenüber dem Vergleichsfall für das Erreichen des EG 55-Niveaus anfallen, ergeben sich in der annuitätischen Bewertung auch entsprechende Erhöhungen der Annuitäten der kapitalgebundenen Kosten. Gleichermaßen werden durch das verbesserte bauliche Wärmeschutzniveau die Energiebedarfe und somit die Energiebezugskosten reduziert. Dies führt zu einer entsprechend verbes-

serten Annuität der bedarfsgebundenen Kosten. Tabelle 44 dokumentiert für das gegenwärtige GEG-Anforderungsniveau und für das Niveau EG 55 die berechneten Annuitäten der bedarfsgebundenen Kosten. Analog zu den bisherigen Auswertungen folgt mit Tabelle 45 die Ausweisung der Veränderung der Annuitäten gegenüber dem Vergleichsfall der gegenwärtigen GEG-Anforderung.

Tabelle 44: Annuität bedarfsgebundener Kosten in €/m²a für die Niveaus 75 % q_{p,Ref} / 80 % Ü_{Ref} [GEG 2020] und 55 % q_{p,Ref} / 70 % Ü_{Ref} [EG 55]

Niveau	Annuität Bedarf 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ü _{Ref} [GEG 2020] in [€/m ² a]				Annuität Bedarf 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ü _{Ref} [EG 55] in [€/m ² a]			
	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel
Büro klein, nicht gekühlt	18,3	14,3	9,4	16,2	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	9,2	13,1
Büro groß, gekühlt	19,3	k. A.	12,2	18,1	Ausf. n. möglich	k. A.	11,5	Ausf. n. möglich
Kindertagesstätte	19,2	14,0	7,3	16,0	14,7	11,1	7,2	14,1
Schule	10,8	k. A.	5,5	9,3	7,7	k. A.	5,3	6,9
Hotel groß, gekühlt	16,1	k. A.	16,4	18,7	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verbrauchermarkt	14,4	13,0	12,5	14,2	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verwaltungsgebäude	18,3	k. A.	12,3	16,2	14,0	k. A.	10,1	11,9
Schulsporthalle	25,5	19,7	16,4	22,5	18,7	14,8	13,9	17,9

Tabelle 45: Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % q_{p,Ref} / 70 % Ü_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q_{p,Ref} / 80 % Ü_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m² A_{NGE}]; rechts in [%]

Niveau	Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ü _{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ü _{Ref} [GEG 2020] in [€/m ² a]					Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ü _{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ü _{Ref} [GEG 2020] in [%]				
	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel		Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	
Büro klein, nicht gekühlt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-0,1	-3,1	-1,6	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-1,6 %	-19,4 %	-10,5 %
Büro groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	-0,7	Ausf. n. möglich	-0,7	Ausf. n. möglich	k. A.	-5,7 %	Ausf. n. möglich	-5,7 %
Kindertagesstätte	-4,5	-3,0	-0,2	-2,0	-2,4	-23,5 %	-21,0 %	-2,2 %	-12,3 %	-14,7 %
Schule	-3,1	k. A.	-0,1	-2,3	-1,8	-28,6 %	k. A.	-2,5 %	-25,2 %	-18,7 %

Hotel groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-
Verbrauchermarkt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-
Verwaltungsgebäude	-4,3	k. A.	-2,2	-4,3	-3,6	-23,5 %	k. A.	-18,1 %	-26,3 %	-22,6 %
Schulsporthalle	-6,8	-4,9	-2,6	-4,6	-4,7	-26,6 %	-24,8 %	-15,6 %	-20,3 %	-21,8 %
<i>Mittelwerte je Anlagenvariante</i>					<i>MW gesamt:</i>	<i>Mittelwerte je Anlagenvariante</i>				<i>MW gesamt:</i>
	<i>-4,7</i>	<i>-3,9</i>	<i>-1,0</i>	<i>-3,3</i>	<i>-2,9</i>	<i>-25,5 %</i>	<i>-22,9 %</i>	<i>-7,6 %</i>	<i>-20,7 %</i>	<i>-17,5 %</i>

Nach Tabelle 45 führen die bei EG 55 reduzierten jährlichen Energiebezugskosten je nach Gebäude zu einer Reduzierung der Annuität der bedarfsgebundenen Kosten zwischen 0,7 und 4,7 €/m²a). Dies entspricht einer Reduzierung um 5,7 bis 22,6 Prozent. Über die gebildeten Erfüllungsoptionen der einzelnen Anlagenvarianten gemittelt ergeben sich Reduzierungen der bedarfsgebundenen Annuitäten zwischen 1,0 und 4,7 €/m²a), was einer Verbesserung um 7,6 bis 25,5 Prozent entspricht. Über alle Erfüllungsoptionen hinweg gemittelt liegt die Verbesserung der Annuität der bedarfsgebundenen Kosten bei 2,9 €/m²a) bzw. 17,5 Prozent. Inwieweit die vorbeschriebenen Verbesserungen der bedarfsgebundenen Annuitäten die Erhöhungen der kapitalgebundenen Annuitäten kompensieren, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

6.4.6 Gesamtannuität

Anhand der vorhergehenden Abschnitte kann nachvollzogen werden, wie sich durch das mit der im Referentenentwurf für die GEG-Novelle anvisierte Anforderungsniveau EG 55 einerseits die Annuitäten der kapitalgebundenen Kosten erhöhen und andererseits die Annuitäten der bedarfsgebundenen Kosten verbessern. Unter weitergehender Einbeziehung der Annuitäten der betriebsgebundenen Kosten (hier nicht im Einzelnen dokumentiert) ergeben sich die mit Tabelle 46 dokumentierten Gesamtannuitäten für die Niveaus GEG 2020 und EG 55. Die Veränderung der Gesamtannuität wird anschließend mit Tabelle 47 beschrieben.

Tabelle 46: Gesamtannuität in €/(m²a) für die Niveaus 75 % q_{p,Ref} / 80 % Ū_{Ref} [GEG 2020] und 55 % q_{p,Ref} / 70 % Ū_{Ref} [EG 55]

Niveau	Annuität gesamt 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ū _{Ref} [GEG 2020] in [€/(m²a)]				Annuität gesamt 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ū _{Ref} [EG 55] in [€/(m²a)]			
	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)								
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel
Büro klein, nicht gekühlt	34,3	33,2	30,7	35,0	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	30,7	36,2
Büro groß, gekühlt	73,4	k. A.	69,7	74,9	Ausf. n. möglich	k. A.	74,1	Ausf. n. möglich
Kindertagesstätte	37,7	34,0	30,5	36,9	38,9	34,9	30,4	36,6
Schule	32,3	k. A.	33,2	34,6	34,3	k. A.	33,2	35,6
Hotel groß, gekühlt	34,6	k. A.	45,0	44,8	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verbrauchermarkt	44,6	46,1	43,5	44,9	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich
Verwaltungsgebäude	59,4	k. A.	61,9	63,9	65,6	k. A.	66,8	69,9
Schulsporthalle	58,8	55,9	56,0	58,6	57,8	57,7	54,8	56,8

Tabelle 47: Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % q_{p,Ref} / 70 % Ū_{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q_{p,Ref} / 80 % Ū_{Ref} [GEG 2020], links in [€/m² A_{NGE}]; rechts in [%]

Niveau	Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ū _{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ū _{Ref} [GEG 2020] in [€/m²a]					Veränderung Annuität bedarfsgebundener Kosten bei 55 % q _{p,Ref} / 70 % Ū _{Ref} [EG 55] gegenüber 75 % q _{p,Ref} / 80 % Ū _{Ref} [GEG 2020] in [%]					
	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude	BHKW	WP Luft/Wasser	WP Sole/Wasser	Pelletkessel	Mittelwerte je Gebäude	
1. Wärmeerzeuger (Grundlast)											
2. Wärmeerzeuger (Spitzenlast)	Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel		Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel	nur Hotel: Gas-BW-Kessel	Gas-BW-Kessel		
Büro klein, nicht gekühlt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-0,1	1,2	0,6	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-0,2 %	3,5 %	1,6 %	
Büro groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	4,5	Ausf. n. möglich	4,5	Ausf. n. möglich	k. A.	6,4 %	Ausf. n. möglich	6,4 %	
Kindertagesstätte	1,2	0,8	-0,1	-0,3	0,4	3,2 %	2,4 %	-0,5 %	-0,9 %	1,0 %	
Schule	2,0	k. A.	-0,1	1,0	1,0	6,2 %	k. A.	-0,2 %	2,7 %	2,9 %	
Hotel groß, gekühlt	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	k. A.	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	
Verbrauchermarkt	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	Ausf. n. möglich	-	
Verwaltungsgebäude	6,2	k. A.	4,8	6,0	5,7	10,4 %	k. A.	7,8 %	9,3 %	9,2 %	
Schulsporthalle	-1,0	1,8	-1,2	-1,8	-0,5	-1,7 %	3,3 %	-2,1 %	-3,0 %	-0,9 %	
Mittelwerte je Anlagenvariante					MW gesamt:	Mittelwerte je Anlagenvariante					MW gesamt:
	2,1	1,3	1,3	1,2	1,5	4,5 %	2,8 %	1,9 %	2,3 %	2,7 %	

Die mit Tabelle 47 dokumentierten Veränderungen der Gesamtannuität für EG 55 im Vergleich zum gegenwärtigen Anforderungsniveau nach GEG 2020 zeigt, dass die infolge der erhöhten Investitionskosten steigenden Annuitäten der kapitalgebundenen Kosten teilweise durch die verbesserten Annuitäten der bedarfsgebundenen Kosten kompensiert werden. Teilweise ergeben sich allerdings auch Verschlechterungen der Gesamtannuität (bis zu 5,7 €/m²a bzw. 9,2 Prozent). Varianten, für die eine erhöhte Gesamtannuität berechnet ist, sind unter den gewählten bzw. zugrundeliegenden Randbedingungen als unwirtschaftlich zu bewerten. Im Mittel über alle gebildeten Erfüllungsoptionen erhöht sich die Gesamtannuität um 1,5 €/m²a bzw. 2,7 Prozent.

7 Einführung des Anforderungsniveaus EH/EG 55 in einer kleinen Novelle

7.1 Beschreibung

In einem Zwischenschritt wurde die Untersuchungsfrage gestellt, welche Änderungen im GEG-Text für eine EH 55-Novelle erforderlich wären. Hierzu haben die Bearbeitenden des Konsortiums

- einen überarbeiteten Gesetzestext erstellt, der insbesondere die § 10, 15 bis 19, Anlage 3 und 5 anpasst; und
- eine überschlägige Wirkungsabschätzung durchgeführt, die im folgenden Unterkapitel dokumentiert ist.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse des EH 55 wurde in Kapitel 6.3 und 6.4 dokumentiert.

7.2 Wirkungsabschätzung durch Anhebung des Anforderungsniveaus auf EH 55

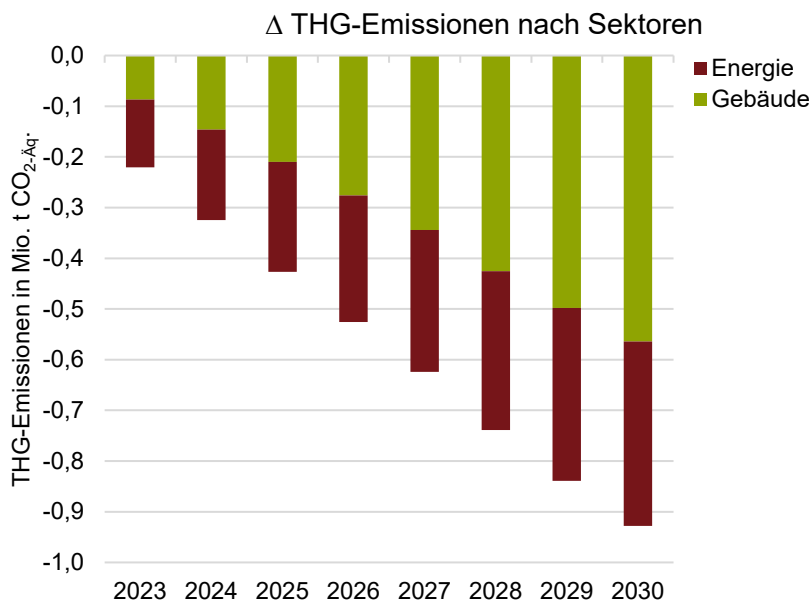
Mit Hilfe des FIW/ITG-Gebäudemodells werden die Wirkung der Erhöhung des Anforderungsniveaus im Neubau auf EH 55 zum 1. Januar 2023 für den gesamten Gebäudebestand abgeschätzt. Unterstellt wird, dass im Zeitraum bis 2025 der deutlich überwiegende Anteil der Neubauten im EH 55-Standard errichtet werden. Das hat neben der Verbesserung des baulichen Wärmeschutzes auch Auswirkungen auf die Beheizungsstruktur. Da in Neubauten bereits jetzt fast keine Ölheizungen mehr eingebaut werden und durch die Verschärfung der Anforderungen der Einsatz von Gasheizungen deutlich abnimmt, ergibt sich eine Verschiebung hin zu strombasierten Geräten (Wärmepumpen) und Wärmenetzen.

Die Anhebung des baulichen Wärmeschutzes und die Verschiebung hin zu mehr strombasierten Systemen bei gleichzeitig fortschreitender Dekarbonisierung der Energieerzeugung führt zu einer zusätzlichen Einsparung an Endenergie aus gasförmigen und flüssigen Energieträgern. Beim Strom kommt es aufgrund des erhöhten Wärmepumpeneinsatzes zu leichten Mehrverbräuchen. Die Wirkung zeigt sich in den Differenzdarstellungen zur Endenergie und THG-Emissionen im Vergleich zum Weiter-So-Szenario (GEG Niveau).

7.2.1 THG-Emissionen

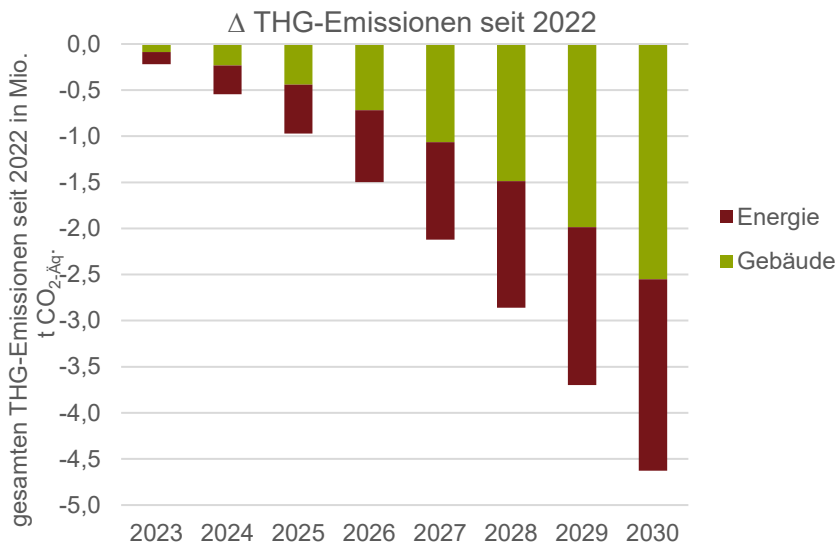
Die Auswirkungen auf die jährlichen THG-Emissionen sind in Abbildung 59 dargestellt. Im Jahr 2030 ist im Gebäudesektor durch die Verschärfung auf EH 55 eine Verringerung der Emissionen gegenüber dem Weiter-So-Szenario von 0,56 Mio. t CO₂-Äq. möglich. Durch den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen und zentralen Wärmenetzen wird ein Teil der eingesparten Emissionen auf den Energiesektor verlagert, wo noch einmal 0,37 Mio. t CO₂-Äq. eingespart werden können. In der Summe sind durch die Einführung des ambitionierten Neubaustandards im Jahr 2030 die jährlichen THG Emissionen um ca. 0,93 Mio. t CO₂-Äq. geringer.

Abbildung 58: Differenz der jährlichen THG-Emissionen aufgrund der Einführung des EH55 Niveaus ab 1.1.2023 in den Sektoren Gebäude und Energie



Summiert man alle Einsparungen (Abbildung 59) pro Jahr im Zeitraum 2022 bis einschließlich 2030 auf, so ergibt sich daraus eine Einsparung an THG Emissionen von 4,6 Mio. t CO₂-Äq. Davon entfallen ca. 2,5 Mio. t CO₂-Äq. auf den Gebäudesektor und ca. 2,1 Mio. t CO₂-Äq. dem Energiesektor.

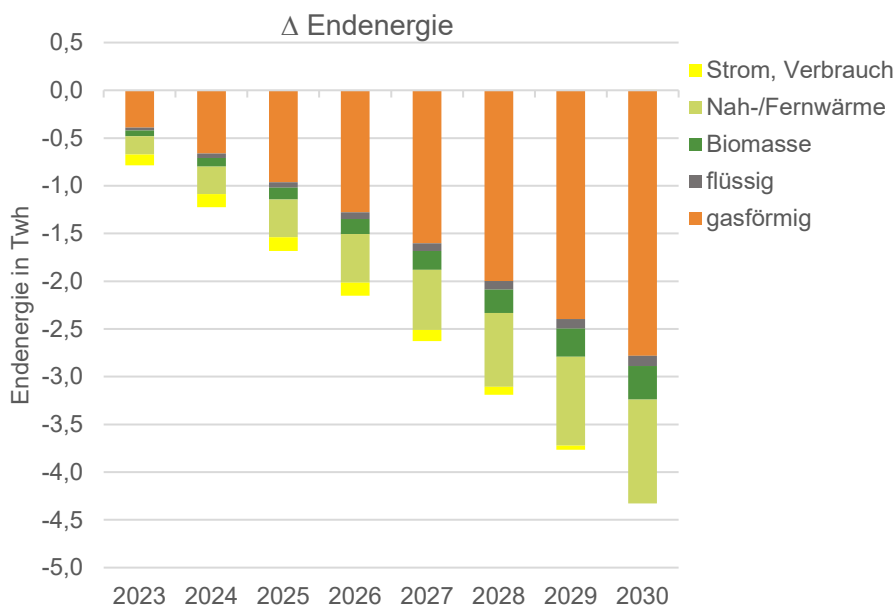
Abbildung 59: Differenz der kumulierten THG-Emissionen in den Sektoren Gebäude und Energie seit 2022 im Vergleich zum Weiter-So.



7.2.2 Endenergieverbrauch

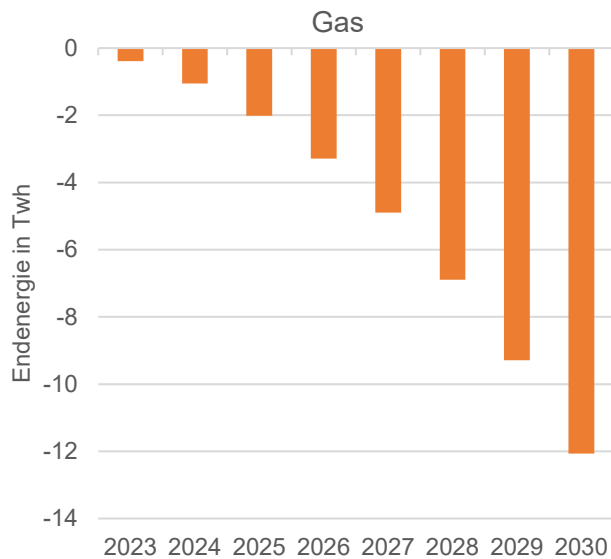
Die Anhebung des Anforderungsniveaus bewirkt im Jahr 2030 gegenüber dem Weiter-So-Szenario zusätzliche Einsparungen an Endenergie aus gasförmigen und flüssigen Energieträgern von zusammen etwa 3 TWh, wobei die gasförmigen Energieträger den größten Teil zu den Einsparungen beitragen. Bei der Nah- und Fernwärme sowie Biomasse könnten zusammen noch einmal rund 1,4 TWh zusätzlich eingespart werden (Abbildung 60).

Abbildung 60: Differenz des Endenergieverbrauchs nach Energieträger im Vergleich zum Weiter-So-Szenario.



Neben dem jährlichen Effekt ist auch die **bis zum Jahr 2030** insgesamt erzielte Mehreinsparung durch die Einführung des ambitionierteren GEG-Niveaus von Interesse (Abbildung 61). Diese Einsparungen seit dem Jahr 2022 sind für den Energieträger Gas in der folgenden Abbildung dargestellt. Im Jahr 2030 kann durch diese Maßnahmen der Endenergieverbrauch für Gas insgesamt um ca. 12 TWh reduziert werden.

Abbildung 61: Differenz der kumulierten Endenergieeinsparung für den Energieträger Gas seit 2022 im Vergleich zum Weiter-So.



7.2.3 Fazit

Die Berechnungen zeigen, dass mit der Einführung des höheren Anforderungsniveaus im Neubau ein wichtiger Schritt in Richtung des Zielwertes für den Gebäudesektor für das Jahr 2030 gemacht wird:

- Durch die Einführung des EH-55 Standards als gesetzlicher Neubaustandard werden im Jahr 2030 etwa 1 Mio. t CO₂-Äq. weniger emittiert und ca. 3 TWh Erdgas eingespart, bzw.
- Durch die Einführung des EH 55 Standards als gesetzlicher Neubaustandard werden bis einschließlich dem Jahr 2030 etwa 4,6 Mio. t CO₂-Äq. weniger emittiert und ca. 12 TWh Erdgas eingespart.

8 Ausblick auf das Folgeprojekt

Dieses Projekt hatte das Ziel, eine neue Grundsystematik für den Neubau zu entwickeln. Verschiedene Fragestellungen für den Neubau müssen vertieft werden, insbesondere mit Blick auf Nichtwohngebäude, auf die Lebenszyklusbetrachtung und die Modellierung von Anforderungen an Solaranlagen.

Des Weiteren klammert dieses Projekt weitestgehend Bestandsgebäude aus. Dies bezieht sich sowohl auf Nachrüst-, Nutzungs- und Sanierungspflichten. Weitere Themen, die in diesem Projekt nicht behandelt werden konnten, umfassen die Steigerung der „Effizienz im Betrieb“, die Integration von LCA (Life Cycle Assessment)-Aspekten, die Integration von embodied energy/emissions („graue Energie/Emissionen“), die Erweiterung des Augenmerks auf Baustoffe, Baukonzept, Flexibilität, Kreislauffähigkeit des Gebäudes, Quartierslösungen, die Anrechenbarkeit von synthetischen Brennstoffen, aber auch Fragen der sozialen Verträglichkeit und des Vermieter-Mieter-Dilemmas.

Diese Aspekte werden in einem Folgeprojekt analysiert, das nahtlos an die Ergebnisse dieses Vorhabens anknüpft.

9 Anhang

9.1 Durchgeführte Veranstaltungen

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Erörterungstermine durchgeführt, die in Tabelle 47 dokumentiert sind. Das Ziel der Erörterungstermine ist es, einen gemeinsamen Kenntnisstand zu übergeordneten Themen aufzubauen und den aktuellen Sachstand zu dokumentieren.

Tabelle 48: Übersicht über die Erörterungstermine im Rahmen dieses Projektes

Datum	Thema
27.09.2021	Anforderungen an Gebäudeeffizienz beim Neubau/Wohnen
13.10.2021	Kenngroßen der Dekarbonisierung
23.11.2021	Wirtschaftlichkeit
15.12.2021	Bestandsgebäude

9.2 Literaturverzeichnis

AGFW (2022): Eigene Berechnungen auf Basis der AGFW-Datenbank. Persönliche Mitteilung

Ariadne (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Konsortium Ariadne. Download <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitat-2045-szenarienreport/> (letzter Zugriff 10.6.2022)

BKI (2020): BKI Baukosten Gebäude + Bauelemente Neubau

Boston Consulting Group (2021): Klimapfade für Deutschland 2.0. Im Auftrag des BDI.

Consentec GmbH, Fraunhofer ISI, ifeu, TU Berlin (2021): Langfristszenarien 3. Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands. Download <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/> (letzter Zugriff 10.6.2022)

dena (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Berlin

Ecofys, Öko Institut, Prognos, dena (2020): Kurzgutachten zur Frage einer Ergänzung oder Umstellung des Anforderungssystems. Im Auftrag des BMWi.

IBH, ITG, Ecofys, dena (2018): Kurzgutachten zur Aktualisierung und Fortschreibung der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sowie zu Flexibilisierungsoptionen. Im Auftrag des BMWi.

ifeu et al. (2021): Neukonzeption des Gebäudeenergiegesetzes (GEG 2.0) zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes. ifeu, EnergieEffizienzInstitut, B. Schulze-Darup, Heidelberg, Weimar, Berlin

ifeu, Prognos AG, Ecofys, dena (2018): Untersuchung zu Primärenergiefaktoren. Im Auftrag des BMWi. Heidelberg, Berlin

IINAS (2021): Kurzstudie THG-Emissionen und nichterneuerbarer Primärenergieverbrauch des deutschen Erdgasmix im Jahr 2019 und 2020 sowie Ausblick auf 2030. Download <https://iinas.org/app/uploads/2021/12/IINAS-2021-KEV-THG-Gas-ASEW-final.pdf> (letzter Zugriff 8.5.2022)

IWU (2007): Energieeffizienz im Wohngebäudebestand Techniken, Potenziale, Kosten und Wirtschaftlichkeit. IWU, Darmstadt. Download https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/2007_IWU_LogeEtAl_Querschnittsbericht-Energieeffizienz-im-Wohngeb%C3%A4udebestand.pdf.

Pehnt (2010): Lehrbuch Energieeffizienz. Springer Verlag Heidelberg

PHI (2021): Kriterien für den Passivhaus-, EnerPHit- und PHI-Energiesparhaus-Standard Version 10a1. Download https://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_gebäude_de.pdf (letzter Zugriff 8.5.2022)

Agora Energiewende und Stiftung Klimaneutralität: Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität. Hg. Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.

Schiller et al. (2014): Chancen der Energetischen Inspektion für Gesetzgeber, Anlagenbetreiber und die Branche. Abschlussbericht. Schiller Engineering, ILK, Licht und Luft Consult, Hamburg. Download <https://www.baufachinformation.de/mobil/forschungsbericht/chancen-der-energetischen-inspektion-fuer-gesetzgeber-anlagenbetreiber-und-die-branche/241109>

Sirados (2015): sirAdos-Datenbank baupreise.de.

Stiftung Klimaneutralität (2022): „Wärmepumpen vs. Wasserstoffheizungen: Auswirkungen auf ein 100% erneuerbares Stromsystem“. <https://www.stiftung-klima.de/de/themen/gebäude/waermepumpen-wasserstoffheizungen/>. Letzter Abruf am 09.05.2022

ZUB (2010): Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. Endbericht - Oktober 2010. Hg. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V.

9.3 Abkürzungsverzeichnis

A/V	Oberflächen-Volumen-Verhältnis
EE	Erneuerbare Energien
EFH	Einfamilienhaus
EG	Effizienzgebäude
EH	Effizienzhaus
EPBD	Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
EZFH	Ein- und Zweifamilienhaus
f_p	Primärenergiefaktor
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
H ₂	Wasserstoff
H _T	Transmissionswärmeverlust
JAZ	Jahresarbeitszahl
KSG	Klimaschutzgesetz
MFH	Mehrfamilienhaus
NT	Niedertemperatur
PEF	Primärenergiefaktor
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
Q	Wärme
THG	Treibhausgase
WDVS	Wärmedämm-Verbundsystem
WP	Wärmepumpe

