



# Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz für neue und bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude

im Rahmen der Richtlinie 2010/31/EU vom 19. Mai 2010  
über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)

Luxemburg, April 2014

## **Kontaktdaten zum Bericht**

|               |   |
|---------------|---|
| Organisation  | Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg<br>Ministère de l'Economie<br>Direction générale de l'Energie |
| Postanschrift | 19-21, boulevard Royal, L-2449 Luxembourg   |
| Fax           | +352 247-84311  |

Der vorliegende Bericht entstand unter Mitwirkung von Markus Lichtmeß und Sven Viktor.

# Inhaltsverzeichnis

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | Einleitung .....   | 4  |
| 1.1     | Vorgehensweise bei der Umsetzung der Verordnung .....                          | 4  |
| 2       | Cost-Optimal-Methode .....   | 5  |
| 2.1     | Kapitalwertmethode, NPV .....  | 6  |
| 2.2     | Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung .....                        | 7  |
| 2.2.1   | Betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Betrachtungsweise .....       | 7  |
| 2.2.2   | Diskontierungsrate .....   | 7  |
| 2.2.3   | Energiepreissteigerung .....   | 7  |
| 2.2.4   | Mehrwertsteuer .....   | 7  |
| 2.2.5   | Betrachtungszeitraum .....   | 8  |
| 2.3     | Kostenstruktur .....   | 8  |
| 2.3.1   | Investitionskosten .....   | 8  |
| 2.3.2   | Investitionskosten – Kostenbildung .....                                       | 12 |
| 2.3.3   | Restwertbetrachtung und Neuinvestitionen .....                                 | 12 |
| 2.3.4   | Honorare für Planungsleistungen und Nebenkosten .....                          | 13 |
| 2.3.5   | Jährliche Kosten - Energiekosten .....   | 14 |
| 2.3.6   | Jährliche Kosten – Wartungs- und Instandhaltungskosten .....                   | 14 |
| 2.3.7   | Subventionen .....   | 15 |
| 2.3.8   | CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten .....                                       | 15 |
| 2.3.9   | Entsorgungskosten .....  | 15 |
| 3       | Bestimmung des Primärenergiebedarfes .....                                     | 16 |
| 3.1     | Anpassung des Heizwärmebedarfes .....  | 16 |
| 3.2     | Rechenmethode – Wohngebäude .....  | 17 |
| 3.3     | Rechenmethode – Nichtwohngebäude .....   | 18 |
| 3.4     | Bewertungsmatrix .....   | 18 |
| 3.4.1   | Wärmeschutz (Stufe I) .....  | 18 |
| 3.4.2   | Anlagentechnik (Stufe II) .....  | 19 |
| 3.4.3   | Referenzgebäude .....  | 20 |
| 3.4.4   | Szenarien .....  | 23 |
| 3.4.5   | Maßnahmenpakete und Kombinationen .....  | 24 |
| 4       | Ergebnisse .....   | 25 |
| 4.1     | Wohngebäude .....  | 26 |
| 4.1.1   | Neubau – Wohngebäude .....   | 27 |
| 4.1.1.1 | Wärmeschutz – Stufe I .....  | 27 |
|         | Einfluss von Subventionen (indikative Auswertung) .....                        | 28 |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                                       | 29 |
| 4.1.1.2 | Anlagentechnik – Stufe II .....  | 35 |
|         | Anlagenvergleich über alle Wärmeschutzklassen .....                            | 35 |
|         | Anlagenvergleich für Wärmeschutzklasse C .....                                 | 38 |
|         | Einfluss von Subventionen bei der Anlagentechnik (indikative Auswertung) ..... | 41 |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                                       | 44 |
| 4.1.1.3 | Fazit für neue Wohngebäude .....   | 50 |
| 4.1.2   | Bestand – Wohngebäude .....  | 51 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.1.2.1 | Wärmeschutz – Stufe I .....                                 | 51  |
|         | Einfluss von Subventionen (indikative Angabe).....          | 53  |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                    | 54  |
| 4.1.2.2 | Anlagentechnik – Stufe II .....                             | 61  |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                    | 68  |
| 4.1.2.3 | Fazit für bestehende Wohngebäude .....                      | 73  |
| 4.2     | Nichtwohngebäude .....                                      | 74  |
| 4.2.1   | Neubau – Nichtwohngebäude .....                             | 74  |
|         | 4.2.1.1 Wärmeschutz – Stufe I .....                         | 74  |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                    | 75  |
|         | 4.2.1.2 Anlagentechnik – Stufe II .....                     | 81  |
|         | Anlagenvergleich über alle Wärmeschutzklassen .....         | 85  |
|         | Direkter Anlagenvergleich für die Wärmeschutzklasse C ..... | 88  |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                    | 91  |
| 4.2.2   | Zwischenfazit für neue Nichtwohngebäude.....                | 96  |
| 4.2.3   | Bestand – Nichtwohngebäude.....                             | 98  |
|         | 4.2.3.1 Wärmeschutz – Stufe I .....                         | 98  |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                    | 99  |
|         | 4.2.3.2 Anlagentechnik – Stufe II .....                     | 105 |
|         | Anlagenvergleich über alle Wärmeschutzklassen .....         | 109 |
|         | Anlagenvergleich für Wärmeschutzklasse D.....               | 112 |
|         | Einfluss der Entwicklungsszenarien .....                    | 115 |
| 4.2.4   | Fazit für bestehende Nichtwohngebäude.....                  | 120 |
| 5       | Zusammenfassung .....                                       | 121 |
| 6       | Literaturverzeichnis.....                                   | 125 |
| 7       | Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....                    | 127 |

# 1 Einleitung

Gemäß der vom Europäischen Rat erlassenen Verordnung N° 244/2012 [1] (folgend *Verordnung* genannt) in Ergänzung zur Richtlinie 2010/31/EU [2] (folgend *Richtlinie* genannt) müssen alle europäischen Mitgliedsstaaten eine Überprüfung der energetischen Anforderungen für neue und bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude durchführen. Die genannte Verordnung beschreibt die Rahmenbedingungen für eine methodische Vorgehensweise bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Minimalanforderungen an Gebäude, deren Bauteile und technische Anlagen. Für eine Reihe ausgewählter Referenzgebäude sind auf Basis der in der Verordnung N° 244/2012 beschriebenen Methode, die aus wirtschaftlichen und primärenergetischen Gesichtspunkten optimalen Mindestanforderungen und Anforderungen zur Steigerung der Energieeffizienz zu bestimmen, bzw. den Nachweis zu erbringen, dass die in einem Mitgliedsland gestellten Anforderungen an bauliche und technische Systeme sich an diesen kostenoptimalen Niveaus orientieren.

## 1.1 Vorgehensweise bei der Umsetzung der Verordnung

Die Umsetzung der Verordnung N° 244/2012 [1] erfolgte auf Basis aller dort vorgegebenen verbindlichen Kriterien und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehender Richtlinien, Studien, Texten, Normen, Direktiven und landesspezifischen Gesetzestexten [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

Zunächst werden geeignete Referenzgebäude für die Gebäudekategorien Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus und verschiedene Nichtwohngebäude bestimmt, die als Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen dienen. In einem weiteren Schritt werden sinnvolle Maßnahmenpakete für bauliche und anlagentechnische Maßnahmen, in Abhängigkeit ihrer energetischen Effizienz, definiert.

Die Investitionskosten einzelner Maßnahmen und Maßnahmenpakete werden auf der Basis von Kostenstudien<sup>1</sup>, Kostenkennwerten, in Funktion der für die jeweilige Maßnahme charakteristischen Größe, wie beispielsweise Fläche, Leistung oder Volumenstrom, bestimmt. Aus den ermittelten Kostenkennwerten werden Kostenfunktionen abgeleitet.

Die Berechnung der Primärenergiebedarfe erfolgte in Anlehnung an die national gültigen Verordnungen über die Energieeffizienz von Wohn- und Nichtwohngebäuden [3], [4]. Die Berechnung stützt sich hierbei auf ein, für die Analysen sinnvoll angepasstes Rechenmodell. Dabei werden u. a. systematische Unterschiede zwischen gemessenem Wärmeverbrauch und berechnetem Wärmebedarf einbezogen, um eine praxistauglichere Einschätzung der Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten [11]. Dies betrifft insbesondere bestehende Gebäude, für die oft ein zu hoher Wärmebedarf berechnet wird [12].

Die Bestimmung der Cost-Optimal-Bereiche mittels der NPV-Methode<sup>2</sup> erfolgte mit einer eigens dafür entwickelten Software<sup>3</sup>, welche eine ganzheitliche Betrachtung unter Berücksichtigung der energetischen und finanziellen Aspekte für die unterschiedlichen Gebäude und Gebäudeteile ermöglicht.

---

<sup>1</sup> Siehe Abschnitt 2.3.1.

<sup>2</sup> NPV-Methode entspricht der Kapitalwertmethode gemäß den Anforderungen der EU-Richtlinie, [1], [2] [9].

<sup>3</sup> Goblet Lavandier & Associés, OptiCalC in Programmversion 1.38.

## 2 Cost-Optimal-Methode

Die durch die Verordnung N° 244/2012 vorgegebene Methode beschreibt wie Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, Maßnahmen zur Einbindung erneuerbarer Energien, sowie Maßnahmenpakete, welche sowohl Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz als auch den Einsatz erneuerbarer Energien bündeln, miteinander in Abhängigkeit ihrer energetischen Qualität, ausgedrückt durch den Primärenergiebedarf und ihrem Investitionsumfang, verglichen werden können.

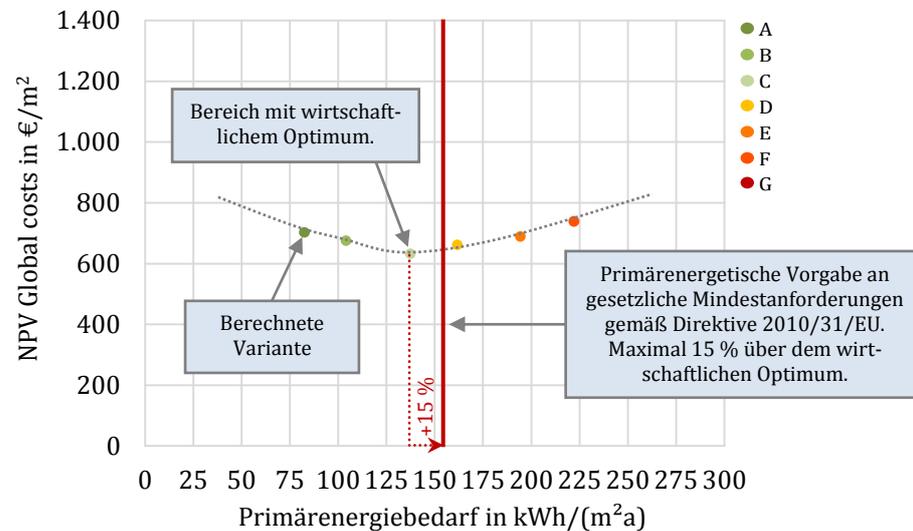


Abbildung 1: Grafische Darstellung der Festlegung der kostenoptimalen Anforderungswerte gemäß [1] und [2].

Als kostenoptimal wird die Maßnahme bezeichnet, welche im Vergleich die niedrigsten Globalkosten aufweist. Die gesetzlich vorgegebenen Mindestanforderungen an Energieeffizienzmaßnahmen sollen gemäß der Richtlinie 2010/31/EU primärenergetisch nicht mehr als 15 % vom Primärenergiebedarf der als kostenoptimal identifizierten Maßnahme abweichen. Ansonsten liegt nach der Richtlinie 2010/31/EU eine erhebliche Diskrepanz vor.

Die Bestimmung der Globalkosten und der Primärenergiebedarfe unterliegt diversen Vorgaben, welche in der Verordnung N° 244/2012 beschrieben sind. Im Rahmen der Globalkostenbestimmung werden beispielsweise Vorgaben an die zu verwendende Wirtschaftlichkeitsmethode und Anforderungen an die der Berechnung zugrundeliegenden Randbedingungen gestellt. Die Bestimmung der Primärenergiebedarfe soll nach Vorgabe der Verordnung auf Basis der auf nationaler Ebene vorgeschriebenen Rechenmethoden erfolgen. Die Verordnung stellt zudem klare Vorgaben über die zu analysierenden Energieeffizienzmaßnahmen und die Möglichkeit diese zu Maßnahmenpaketen zusammenzufassen, sowie über die Definition von Referenzgebäuden. Bei den Referenzgebäuden werden u. a. Vorgaben an die Gebäudeart, den Gebäudetyp, die Mindestanzahl der jeweils zu analysierenden Gebäude, sowie die Fallunterscheidung für bestehende und neue Gebäude gestellt. Die folgenden Kapitel liefern einen Einblick in die Bestimmung der Globalkosten sowie der Primärenergiekennwerte.

## 2.1 Kapitalwertmethode, NPV

Die zur Bestimmung der Globalkosten anzusetzende Wirtschaftlichkeitsberechnung basiert auf einer NPV<sup>4</sup>-Methode, also auf einer Barwertbetrachtung aller Einnahmen und Ausgaben über einen definierten Betrachtungszeitraum. Als Ergebnis erhält man Globalkosten die, mittels einer Diskontierung der zeitlich anfallenden Zahlungsströme über einen definierten Betrachtungszeitraum, auf den Beginn des Betrachtungszeitraumes bezogen sind. Die Globalkosten werden mittels folgender Gleichung und nach [1] inflationsbereinigt bestimmt:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad \text{GL 1}$$

$\tau$  = Betrachtungszeitraum

$C_g(\tau)$  = Globalkosten zu Beginn des Betrachtungszeitraumes

$C_I$  = Initiale Investitionskosten

$C_{a,i}(j)$  = Jährliche Kosten der Maßnahme j im Jahr i

$R_d(i)$  = Abzinsungsrate siehe GL 2

$V_{f,\tau}(j)$  = Restwert der baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen am Ende des betrachtungszeitraumes, diskontiert auf den Startzeitpunkt des Betrachtungszeitraumes

Zur Diskontierung der jährlich anfallenden Zahlungsströme kommt folgender wirtschaftsmathematischer Ansatz nach [1] zum Tragen, welcher die Abzinsungsrate  $R_d(i)$  zum Zeitpunkt  $i$  nach Beginn des Betrachtungszeitraumes in Abhängigkeit der Abzinsungsrate  $r$  beschreibt:

$$R_d(i) = \left( \frac{1}{1 + r/100} \right)^p \quad \text{GL 2}$$

$p$  = Betrachtungsjahr, Anzahl der Jahre nach Beginn des Betrachtungszeitraumes

$r$  = Abzinsungsrate respektive Kapitalzins

Nachstehendes Bild zeigt eine beispielhafte Darstellung einer NPV-Analyse. Es werden die jährlichen Zahlungsströme wie Wartungs- und Energiekosten, der Restwert der technischen und baulichen Anlagen, sowie die im Betrachtungszeitraum erforderlichen Neuinvestitionen dargestellt. Bei den Kosten handelt es sich um die mittels GL 2 auf den Beginn des Betrachtungszeitraumes diskontierten NPV, bzw. um den Barwert. Die Summe aller Barwerte der Jahre  $i$  im Betrachtungszeitraum  $\tau$  einschließlich des NPV des Restwertes am Ende des Betrachtungszeitraumes  $V_{f,\tau}$ , sowie den anfänglichen Investitionskosten  $C_I$  ergeben die Globalkosten  $C_g(\tau)$ , welche in der nachfolgenden Abbildung zur besseren Vergleichbarkeit spezifisch je Quadratmeter Energiebezugsfläche dargestellt werden.

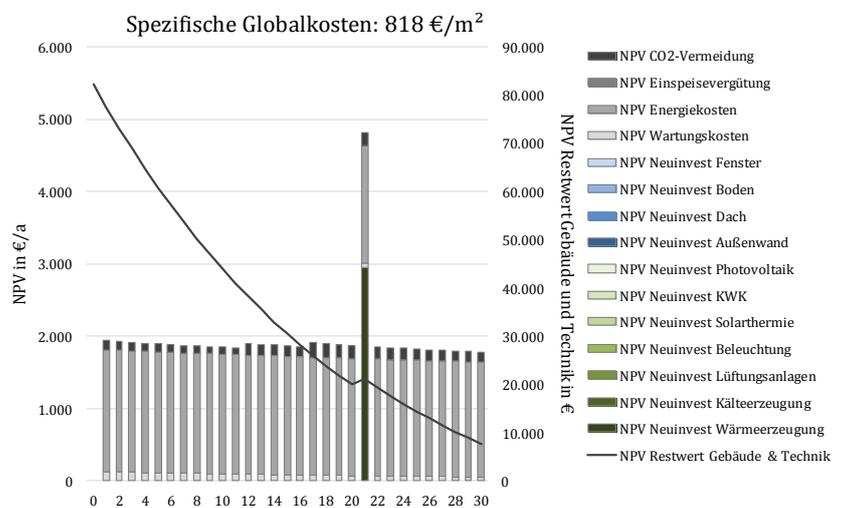


Abbildung 2: Grafische Darstellung der NPV-Methode.

<sup>4</sup> NPV = Net Present Value bzw. auch Kapital- oder Barwert genannt.

## 2.2 Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung

### 2.2.1 Betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Betrachtungsweise

Die Analyse soll sowohl aus betriebswirtschaftlichen (mikroökonomisch) als auch aus volkswirtschaftlichen (makroökonomisch) Gesichtspunkten erfolgen. Die volkswirtschaftliche Betrachtungsweise erfolgt ohne die Berücksichtigung von Steuern und Subventionen, aber unter Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Die betriebswirtschaftliche Betrachtungsweise beinhaltet Steuern und ggf. auch Subventionsbeihilfen, jedoch keine CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Es ist den Mitgliedsstaaten allerdings überlassen, welche der beiden Betrachtungsweisen zur Beurteilung der nationalen Anforderungen an die Gesamtenergieeffizienz herangezogen wird.

### 2.2.2 Diskontierungsrate

Die Diskontierungsrate  $r$  ist ein zentrales Element der Kapitalwertmethode und beeinflusst maßgeblich die Ergebnisse. Aus diesem Grund wird wie in der Verordnung N° 244/2012 gefordert, eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Gemäß der Verordnung [1] muss eine Abzinsungsrate mindestens 3 % betragen, in der Leitlinie zur Verordnung [9] wird eine Mindestabzinsungsrate von 4 % (sozialer Abzinsungssatz) angegeben. Für den Standardfall wird die Abzinsungsrate von 4 % aus dem aktuelleren Dokument herangezogen und für die Sensitivitätsanalyse eine Variation von  $\pm 2$  % vorgenommen.

Tabelle 1: Diskontierungsrate

| Bereich            | Werte           |
|--------------------|-----------------|
| Diskontierungsrate | 2 %   4 %   6 % |

### 2.2.3 Energiepreissteigerung

Die Energiepreissteigerung soll den jährlich steigenden Kosten für den Energiebezug Rechnung tragen. Da die Energiepreissteigerung analog zur Diskontierungsrate einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat, wird auch für die Energiepreissteigerung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die in Tabelle 2 aufgeführten jährlichen Preissteigerungen wurde in Anlehnung an [13] festgelegt und um Extremwerte ergänzt. Auf eine Unterscheidung der Energiepreissteigerung für unterschiedliche Energieträger wird in der vorliegenden Untersuchung verzichtet, da keine gesicherten Informationen zur Preisentwicklung spezieller Energieträger bekannt sind.

Tabelle 2: Jährliche Energiepreissteigerung

| Bereich                         | Werte                   |
|---------------------------------|-------------------------|
| Energiepreissteigerung pro Jahr | 1 %/a   2,8 %/a   5 %/a |

### 2.2.4 Mehrwertsteuer

Die Mehrwertsteuer wird nach den in [1] festgelegten Vorgaben ausschließlich für die mikroökonomische Betrachtung bei Wohngebäuden herangezogen. Für alle Neuinvestitionen wird ein in Luxemburg einheitlicher Steuersatz von 15 % angesetzt. Günstigere Steuersätze bei Sanierungsmaßnahmen von Wohngebäuden wurden bei der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt, da diese dem Gebäudeeigentümer nicht automatisch<sup>5</sup> zugutekommen und in der Gesamthöhe zudem begrenzt sind.

<sup>5</sup> Die Steuererstattung muss beantragt werden und erfolgt nicht automatisch mit der Abrechnung.

### 2.2.5 Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum wurde in Anlehnung an [1] für Wohngebäude mit 30 Jahren und für Nichtwohngebäude mit 20 Jahren festgelegt. Bei der volkswirtschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise werden die gleichen Betrachtungszeiträume angesetzt. Als Startzeitpunkt des Betrachtungszeitraumes wurde das Bezugsjahr 2013 gewählt, da am 1. Januar 2013 eine neue Gesetzgebung betreffend der Subventionierung von Energieeffizienzmaßnahmen für Wohnbauten in Kraft getreten ist.

## 2.3 Kostenstruktur

Die Kostenstruktur umfasst je nach Betrachtungsweise folgende Parameter, die in den nachstehenden Abschnitten genauer beschrieben werden:

- Investitionskosten (baulich und technisch, Erneuerungs-, Planungskosten, ...)
- Steuern<sup>6</sup>
- Subventionen<sup>6</sup>
- Jährliche Kosten (Energie-, Betriebs- und Instandhaltungskosten,..)
- Restwert baulicher und technischer Anlagen am Ende des Betrachtungszeitraumes
- Entsorgungskosten (sofern bekannt)
- CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

### 2.3.1 Investitionskosten

Die Betrachtung der Cost-Optimal-Bereiche erfordert nach Vorgabe der Verordnung N° 244/2012 eine Vollkostenbetrachtung für Neubauten und Sanierungsmaßnahmen. Eine Differenzkostenbetrachtung ist nicht erlaubt, da diese den vollen Umfang der analysierten Maßnahmen respektive Maßnahmenpakete nicht vollständig abbilden kann. Da das Primärziel der Untersuchung allerdings nicht in der Bestimmung von gesamten Projektkosten liegt, werden Kosten, die keinen direkten Einfluss auf die Energieeffizienz von Gebäuden haben, nicht berücksichtigt. Des Weiteren bleiben Kosten die für alle Maßnahmen gleich sind unberücksichtigt.

Für die durchgeführten Analysen wurden gezielt die Kosten bestimmt, die den genannten Vorgaben entsprechen. Bei baulichen Maßnahmen, wie beispielsweise einer Fassadendämmung, werden nur die Kosten berücksichtigt, welche einen Impact auf das energetische Verhalten der Fassade haben. Konstruktive Grundkosten werden nur im Falle sehr hochwertiger Dämmmaßnahmen angesetzt, um den erhöhten konstruktiven und finanziellen Aufwand bei größeren Dämmstärken einzubeziehen. Eine Berücksichtigung der Gebäudestruktur, also der Wände, Decken und Fußböden erfolgt hingegen nicht. Dies begründet sich neben der Vereinfachung der Analysen auch in einer allgemeingültigeren Aussage der Untersuchungsergebnisse, welche bei der genannten Herangehensweise unabhängig von der Bauart<sup>7</sup> des Gebäudes ist.

Bei anlagentechnischen Maßnahmen werden mit Ausnahme der Lüftungsanlagen, nur die Kosten auf Produktions- bzw. Erzeugerseite berücksichtigt. Zwar können Wärme- und Kälteerzeuger auch den Wunsch nach unterschiedlichen Anforderungen an ein Übergabesysteme mit sich bringen, allerdings ist die Wahl des Übergabesystems in der Regel an Komfortansprüche und

---

<sup>6</sup> Im Fall der betriebswirtschaftlichen Betrachtung von Wohngebäuden wird der Einfluss von Subventionen mit untersucht. Die Bewertung der kostenoptimalen Anforderungskennwerte orientiert sich aber weiterhin an denen, die ohne den Einfluss von Subventionen ermittelt wurden. Die Untersuchung wird an entsprechender Stelle durchgeführt, um den Einfluss von Fördermitteln auf die Gesamtwirtschaftlichkeit zu bewerten.

<sup>7</sup> Mit der Wahl der Bauart ist z. B. die Unterscheidung zwischen Massiv und Leichtbau gemeint.

Nutzerwünsche geknüpft und eine generelle Unterscheidung in Abhängigkeit des eingesetzten Erzeugers erscheint deshalb als nicht sinnvoll.

Da Luxemburg bislang nicht über eine strukturierte Datenbank mit Kosten für bauliche und technische Anlagen über alle Gebäudebereiche verfügt, wurden die Kosten größtenteils aus Kostenerhebungen benachbarter Länder entnommen. Da Luxemburg Baustoffe und technische Systeme überwiegend aus den direkt benachbarten Ländern bezieht, entsprechen die dort vorgefundenen Kosten in erster Näherung bereits gut den Luxemburger Marktpreisen. Auf der Basis verschiedener Quellen wurden die vorgefundenen Ansätze mit in Luxemburg erhobenen Daten abgeglichen, validiert und bei Bedarf auf die landesspezifischen Eigenheiten angepasst. Die folgende Liste gibt einen Überblick über die in dieser Studie verwendeten Kostenquellen:

- BMVBS DE 08/2012 (Vorstudie zu Wirtschaftlichkeit EnEV) [14]
- BMVBS DE 05/2012 (Verschärfung EnEV) [15]
- BMVBS DE 07/2012 (Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile) [16]
- BMVBS DE 30/1012 (Ergänzung zum Wirtschaftlichkeitsgutachten) [17]
- Evaluierung des Marktanzreizprogramms für erneuerbare Energien DE [18]
- Leitfaden für abgestimmte Modernisierungsempfehlungen [19]
- TGA-KO (Kostenfunktionen für Technische Gebäudeausrüstung) [20]
- IWU-Studie zu Modernisierung (Bau- und Anlagentechnik) [21]
- Überarbeitung des Luxemburger Förderprogramms (Bau- und Anlagentechnik) [22]
- Projektdaten von Goblet Lavandier & Associés Ingénieurs-Conseils S.A.<sup>8</sup>

Die aus den genannten Untersuchungen gewonnen Kostendaten wurden analysiert und in Abhängigkeit der spezifisch relevanten Größe/Größen geordnet, um hieraus in Abhängigkeit der Anlagengröße oder des Effizienzstandards, Kostenfunktionen abzuleiten. Die Effizienzstandards wurden hierbei in Anlehnung an die zur Erreichung der gesetzlich vorgegebenen Wärmeschutzstandards, welche sich in die Kategorien A bis I untergliedern, festgelegt [3], [4].

Alle baulichen Kostenfunktionen und -kennwerte (Tabelle 3) sind inklusive Mehrwertsteuer (vgl. 2.2.4), jedoch ohne Planungs- und Nebenkosten (vgl. 2.3.4) angegeben. Alle technischen Kostenfunktionen und -kennwerte (Tabelle 4 bis Tabelle 7) sind exklusive der Mehrwertsteuer (vgl. 2.2.4) und ohne Planungs- und Nebenkosten (vgl. 2.3.4) angegeben.

Die baulichen Kostenfunktionen wurden sowohl für Wohngebäude (WG), als auch für Nichtwohngebäude (NWG) für die Falle des Neubaus und eines Bestandsgebäudes bestimmt. Bei einer Gebäudemodernisierung werden den effizienzabhängigen Kostenkennwerten, die sich beispielsweise bei einer Dämmmaßnahme in der zu realisierenden Dämmstärke ausdrückt, noch die Grundkosten einbezogen, was im Endeffekt einem Vollkostenansatz entspricht. Da die rein energiebedingten Kosten bei Fenstern nicht eindeutig bestimmt werden können, wurden auch für diese bauliche Maßnahmen stets Vollkosten angesetzt. Auch die baulichen Kosten für die Optimierung der Wärmebrücken und der Luftdichtheit werden pauschal in Abhängigkeit des Effizienzstandards festgelegt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die abgeleiteten Kostenkennwerte für die baulichen Maßnahmen:

---

<sup>8</sup> Es wurden mehrere jüngere Bauprojekte ausgewertet und die dort über Ausschreibung gefundenen Kosten mit den spezifischen Kostenansätzen für bauliche und technische Systeme verglichen; ggf. wurden die Kostenfunktionen auf Luxemburger Gegebenheiten angepasst.

## Investitionskosten

Tabelle 3: Kostenfunktionen und Kostenkennwerte für bauliche Maßnahmen

| Gebäudehülle<br>Bauteil                       | Neubau<br>WG <sup>9</sup>   | Neubau<br>NWG  | Bestand<br>WG              | Bestand<br>NWG             |
|---|---|--|----------------------------|----------------------------|
| Außenwand                                     | 2,53 €/m <sup>2</sup> ·cm)  | A <sup>10</sup> 3,79 €/m <sup>2</sup> ·cm)<br>B 3,22 €/m <sup>2</sup> ·cm)<br>C 2,53 €/m <sup>2</sup> ·cm) | NB + 90,9 €/m <sup>2</sup> | NB + 90,9 €/m <sup>2</sup> |
| Dach  | 2,30 €/m <sup>2</sup> ·cm)  | 2,30 €/m <sup>2</sup> ·cm)   | NB + 90,9 €/m <sup>2</sup> | NB + 90,9 €/m <sup>2</sup> |
| Fenster<br>in €/m <sup>2</sup>                | U <sub>w0,78</sub> A <sup>(+)</sup> 410/480 <sup>11</sup><br>U <sub>w0,85</sub> B 380/460<br>U <sub>w1,05</sub> C 360/440<br>U <sub>w1,34</sub> D 330/410<br>U <sub>w1,90</sub> E 320/380 | 651,3 · U <sub>cw</sub> <sup>-0,41</sup><br>min 432,8<br>max 754,2 <sup>12</sup>                           | wie Neubau                 | wie Neubau                 |
| Boden   | 1,42 €/m <sup>2</sup> ·cm)  | 1,42 €/m <sup>2</sup> ·cm)   | NB + 42,4 €/m <sup>2</sup> | NB + 42,4 €/m <sup>2</sup> |
| Luftdichtheit &<br>Wärmebrücken <sup>13</sup> | A 20 €/m <sup>2</sup><br>B 15 €/m <sup>2</sup><br>C 13 €/m <sup>2</sup><br>D 10 €/m <sup>2</sup><br>E 6 €/m <sup>2</sup>  | wie Wohngebäude  | wie Neubau                 | wie Neubau                 |

Die Kostenfunktionen für die wärmetechnischen und erneuerbaren Energien wurden für die jeweiligen Technologien in Abhängigkeit ihrer thermischen und elektrischen Leistung bestimmt. Im Fall einer Anlagensanierung werden die Kosten mit Ausnahme der Kosten für die Installation einer Photovoltaikanlage, pauschal um 15 % erhöht. Dadurch wird der höhere Aufwand bei der Erneuerung technischer Systeme berücksichtigt (z. B. den Rückbau der Altanlage, etc.).

Tabelle 4: Kostenfunktionen und Kostenkennwerte für heizungstechnische Installationen und Erneuerbare Energien

| Bereich                              | Kostenfunktion                             | Einheit               | a <sub>0</sub> · x <sup>a<sub>1</sub></sup> bei min, max |
|--------------------------------------|--|-----------------------|--|
| Brennwertkessel Öl                   | 1.316 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,47</sup>    | €/kW <sub>th</sub>    | min 86, max 619  |
| Brennwertkessel Gas                  | 1.092 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,48</sup>    | €/kW <sub>th</sub>    | min 61, max 508  |
| Pelletkessel mit Lager <sup>14</sup> | 4.134 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,44</sup>    | €/kW <sub>th</sub>    | min 191, max 2.024                                       |
| Fernwärme                            | 1.676 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,65</sup>    | €/kW <sub>th</sub>    | min 36, max 589  |
| Luftwärmepumpe                       | 2.538 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,28</sup>    | €/kW <sub>th</sub>    | min 605, max 1.607                                       |
| Sole-Wärmepumpe                      | 2.030 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,29</sup>    | €/kW <sub>th</sub>    | min 364, max 1.271                                       |
| Sole-Sondenfeld                      | 1.019 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,01</sup>    | €/kW <sub>th</sub>    | min 970, max 1.149                                       |
| Kamin                                | 145,5 · Q <sub>h</sub> <sup>-0,66</sup>    | €/kW <sub>th</sub> /m | min 1, max 50,1  |
| Heizöllager <sup>15</sup>            | 0,7 · V <sub>Lager</sub>                   | €/Liter               | 600 - 20.000 Liter                                       |
| KWK-Öl                               | 6.335 · Q <sub>el</sub> <sup>-0,45</sup>   | €/kW <sub>el</sub>    | min 319, max 6.900                                       |
| KWK-erneuerbar                       | 7.481 · Q <sub>el</sub> <sup>-0,35</sup>   | €/kW <sub>el</sub>    | min 686, max 8.484                                       |
| Solaranlage                          | 1.726 · A <sub>Koll</sub> <sup>-0,24</sup> | €/m <sup>2</sup>      | min 600, max 1.173                                       |
| PV-Anlage                            | 1.750 · P <sub>el</sub> <sup>0,00</sup>    | €/kW <sub>el</sub>    | min 1.500, max 2.200                                     |

<sup>9</sup> WG = Wohngebäude, NWG = Nichtwohngebäude, NB = Neubau

<sup>10</sup> Kosten in Abhängigkeit des Wärmeschutzstandards des Bauteil U-Wertes; aufgrund des erhöhten Aufwands für die Befestigung.

<sup>11</sup> Die Werte entsprechen den Kosten für ein Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus (EFH/MFH).

<sup>12</sup> Der U<sub>cw</sub>-Wert entspricht dem U-Wert der Gesamtkonstruktion des Fassadenbereichs.

<sup>13</sup> Kostenansatz in Abhängigkeit des Wärmeschutzstandards des Gebäudes bzw. der Bauteilgruppe.

<sup>14</sup> Die Lagergröße wird baulich auf ein Volumen von 150 m<sup>3</sup> begrenzt.

<sup>15</sup> Die Lagergröße wird baulich auf ein Volumen von 20.000 Liter begrenzt.

Die Kältemaschine (KM) wird in zwei Effizienzstufen „Standard“ und „verbessert“ unterteilt, welche zusätzlich mit einem luftgekühlten und einem effizienteren wassergekühlten Rückkühler (RK) kombiniert werden können. Im Falle einer Sanierung oder Modernisierung der Kälteanlagen werden analog zur Wärmeproduktion ebenfalls pauschal 15 % höhere Kosten angesetzt.

Tabelle 5: Kostenfunktionen und Kostenkennwerte für Kälteanlagen

| Bereich Kälte              | Kostenfunktion            | Einheit            | $a_0 \cdot x^{a1}$ bei min, max |
|----------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------------|
| KM – Standardeffizienz     | $805,3 \cdot Q_K^{-0,31}$ | €/kW <sub>th</sub> | min 64, max 490                 |
| KM – verbesserte Effizienz | $1.066 \cdot Q_K^{-0,33}$ | €/kW <sub>th</sub> | min 71, max 626                 |
| RK – Trockenkühler         | $196,7 \cdot Q_K^{-0,02}$ | €/kW <sub>th</sub> | min 164, max 189                |
| RK – Hybrider Rückkühler   | $395,7 \cdot Q_K^{-0,07}$ | €/kW <sub>th</sub> | min 235, max 354                |

KM = Kältemaschine, RK = Rückkühler

Die Bestimmung von Kostenfunktionen für Lüftungsanlagen erfolgt in Abhängigkeit der erforderlichen Luftkonditionierung und in Abhängigkeit der Effizienz der Wärmerückgewinnung, die in der Analyse mit 60% respektive 70% variiert wird. Neben der wärmetechnischen Effizienz wird zusätzlich die elektrische Effizienz der Lüftungsanlage kostenmäßig berücksichtigt und in der energetischen Berechnung mittels einer um 25 % reduzierten elektrischen Leistungsaufnahme der Ventilatoren (SFP-25 %) abgebildet. Darin enthalten sind die Kosten zur Reduzierung der Druckverluste durch größere Kanalquerschnitte und weniger druckverlustbehaftete Kanaleinbauten, sowie die Nutzung effizienter Ventilatoren und Motoren. Neben der zeitlichen Steuerung der Lüftungsanlagen wird in den energetischen Analysen auch eine bedarfsabhängige Anpassung der Luftvolumenströme über eine CO<sub>2</sub>-Steuerung berücksichtigt. Die Kostenfunktion der CO<sub>2</sub>-Steuerung fußt neben dem Volumenstrom  $V_{RLT}$  zusätzlich auf der Energiebezugsfläche  $A_n$ . Im Falle einer Sanierung oder Modernisierung werden die Kosten analog zu den übrigen Kostenfunktionen um pauschal 15 % erhöht.

Tabelle 6: Kostenfunktionen für Lüftungstechnische Anlagen

| Bereich Lüftung            | Kostenfunktion                | Einheit               | $a_0 \cdot x^{a1}$ bei min, max |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| H, WRG 60%                 | $190,5 \cdot V_{RLT}^{-0,30}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 10, max 42,8                |
| HK, WRG 60%                | $288,3 \cdot V_{RLT}^{-0,29}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 16, max 66,3                |
| H, WRG 60%, SFP-25%        | $219,1 \cdot V_{RLT}^{-0,30}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 11,5, max 49,2              |
| HK, WRG 60%, SFP-25%       | $331,5 \cdot V_{RLT}^{-0,29}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 18,4, max 76,2              |
| H, WRG 70%                 | $182,5 \cdot V_{RLT}^{-0,29}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 10,8, max 43,5              |
| HK, WRG 70%                | $280,6 \cdot V_{RLT}^{-0,29}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 16,8, max 67,0              |
| H, WRG 70%, SFP-25%        | $209,9 \cdot V_{RLT}^{-0,29}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 12,4, max 50,0              |
| HK, WRG 70%, SFP-25%       | $322,7 \cdot V_{RLT}^{-0,29}$ | €/(m <sup>3</sup> /h) | min 19,3, max 77,0              |
| CO <sub>2</sub> -Steuerung | $15 \cdot A_n/V_{RLT}$        | €/(m <sup>3</sup> /h) |                                 |

H = Heizfunktion, K = Kühlfunktion, WRG = Wärmerückgewinnung, SFP-25% = spezifische Leistungsaufnahme der Ventilatoren um 25 % reduziert (Berücksichtigt größere Kanalquerschnitte und effizientere Ventilatoren)

Die Bestimmung der Beleuchtungskostenkennwerte erfolgt neben der Effizienz der Beleuchtung auch in Abhängigkeit der Nutzungsanforderung. Die Kostenermittlung für Beleuchtung erfolgt

zonenweise in einem Gebäude, da unterschiedliche Anforderungen an die Beleuchtungsstärken einhergehen mit der zu installierenden Leistung und den Kosten. Als Beleuchtungstyp dienen Pendelleuchten mit stabförmigen Leuchtstofflampen. Neben der manuellen Beleuchtungssteuerung, sind ebenfalls nutzungsabhängige Kostenkennwerte für eine Präsenzkontrolle und eine Konstantlichtregelung angegeben. Bei einer Sanierung oder Modernisierung werden die Kosten um 15 % angehoben.

Tabelle 7: Kostenkennwerte für Beleuchtungsanlagen

| Beleuchtung und System              | Einheit          | N°01<br>Einzelbüro | N°03<br>Großraum-<br>büro | N°16<br>WC<br>Sanitär | N°19<br>Verkehr | N°34<br>Wohnen | sonst.<br>alle<br>anderen |
|-------------------------------------|------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|---------------------------|
| LRS <sup>16</sup> – direkt          | €/m <sup>2</sup> | 38                 | 45                        | 14                    | 13              | 0              | 28                        |
| LSR – direkt/indirekt               | €/m <sup>2</sup> | 50                 | 60                        | 21                    | 19              | 0              | 38                        |
| Präsenzkontrolle                    | €/m <sup>2</sup> | 10                 | 7                         | 9                     | 4               | 0              | 8                         |
| Konstantlichtregelung <sup>17</sup> | €/m <sup>2</sup> | 24                 | 20                        | 0                     | 7               | 0              | 13                        |

### 2.3.2 Investitionskosten – Kostenbildung

Über die Kostenfunktionen und Kostenkennwerte werden die Investitionskosten<sup>18</sup> für alle Gebäudetypen, Gebäudegrößen, Energiestandards und Anlagentechniken dynamisch bestimmt. Das hierfür in der Software vorgesehene Modul zur Kostenbestimmung greift dazu auf die Ergebnisse der Leistungsbilanz, die Gebäudegröße, die Gebäudeart, sowie die definierten Standards für die Anlagentechnik und den Wärmeschutz zurück. Die nachfolgende Abbildung zeigt das automatisierte Ablaufschema zur Bestimmung der Investitionskosten.

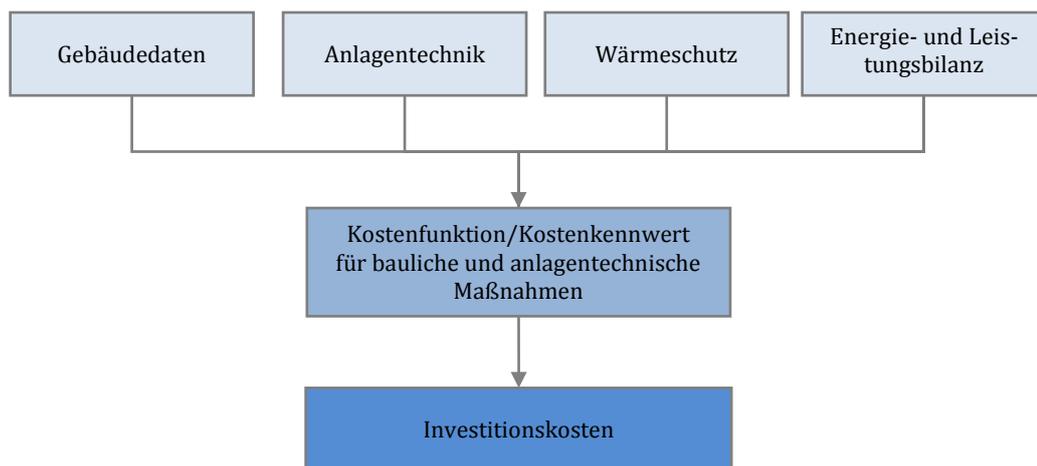


Abbildung 3: Ablaufschema-Bestimmung der Investitionskosten

### 2.3.3 Restwertbetrachtung und Neuinvestitionen

In der Globalkostenbestimmung ist auch der Restwert der baulichen und technischen Maßnahmen am Ende des Betrachtungszeitraumes zu berücksichtigen. Die Berechnung des Restwertes erfolgt analog zu der in [1] beschriebenen Vorgehensweise. Hierzu werden die anfänglichen Investitionskosten linear bis zum Ende der Lebensdauer der jeweiligen Maßnahme abgeschrieben.

<sup>16</sup> LSR = Leuchtstoffröhre T8

<sup>17</sup> Bei der Konstantlichtregelung ist die Präsenzsteuerung in den Kosten enthalten (gemeinsamer Sensor). Die Konstantlichtregelung erlaubt ebenfalls die Nutzung des Tageslichtangebots im Falle einer tageslichtabhängigen Steuerung.

<sup>18</sup> Gemäß der Leitlinie zur Verordnung [9] wird keine spezifische Kategorie für Kapitalkosten berücksichtigt.

ben. Die jährliche Wertverlustrate wird mittels folgender Gleichung in Abhängigkeit der Lebensdauer der Maßnahme sowie den anfänglichen Investitionskosten bestimmt.

$$WVR(i) = \left( \frac{C_{EL} - C_I}{L} \right) \quad \text{GL 3}$$

$WVR(i)$  = Jährliche Wertverlustrate in €/a

$C_{EL}$  = Restwert der Maßnahme am Ende der Lebensdauer

$C_I$  = Investitionskosten der Maßnahme am Anfang des Betrachtungszeitraumes

$L$  = Lebensdauer der Maßnahme nach Tabelle 8

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Lebensdauer der jeweiligen baulichen und technischen Maßnahmen, welche in Anlehnung an EN 15459 [23] und VDI 2067 [24] festgelegt und falls erforderlich mittels eigenen Annahmen ergänzt wurden.

Tabelle 8: Lebensdauer der baulichen und technischen Maßnahmen

| Maßnahme                                       | Lebensdauer in Jahren |                                |
|--|-----------------------|--------------------------------|
| Wärmeerzeuger                                  | 20 a                  | nach EN 15459                  |
| Wärmepumpe                                     | 15 a                  | nach EN 15459 <sup>19</sup>    |
| Peripherie (z. B. Sonden Sole WP, Tank, Kamin) | 50 a                  | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |
| Kühlung  | 15 a                  | nach EN 15459                  |
| Lüftung  | 25 a                  | nach EN 15459                  |
| Beleuchtung                                    | 15 a                  | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |
| Solaranlagen                                   | 20 a                  | nach EN 15459                  |
| KWK  | 15 a                  | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |
| PV-Anlagen                                     | 20 a                  | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |
| Außenwand                                      | 40 a                  | in Anlehnung EN 15459          |
| Dach   | 40 a                  | in Anlehnung EN 15459          |
| Fußboden                                       | 40 a                  | in Anlehnung EN 15459          |
| Fenster  | 30 a                  | nach EN 15459                  |

Da die Lebensdauer einiger Maßnahmen geringer ist als die Betrachtungsdauer, kann es erforderlich sein, diese zu ersetzen. Deshalb wird, wie in [1] beschrieben, bei Erreichen der Lebensdauer, die Investition neu getätigt und analog zur Anfangsinvestition weiter bis zum Schluss des Betrachtungszeitraumes abgeschrieben. Der so ermittelte Restwert einschließlich der getätigten Neuinvestition wird jeweils mittels GL 2 auf den Beginn des Betrachtungszeitraumes diskontiert.

### 2.3.4 Honorare für Planungsleistungen und Nebenkosten

Die zusätzlichen Kosten für die Planung der Maßnahmen bzw. Maßnahmenpakete zur Steigerung der Energieeffizienz und weiteren Nebenkosten, wurden mit 10 % der Investitionskosten für alle Varianten und Gebäudetypen angenommen. Dies entspricht üblichen Werten in Luxemburg.

<sup>19</sup> Bei einem Ansatz von 2 %/a für Wartungs- und Instandhaltungskosten.

### 2.3.5 Jährliche Kosten - Energiekosten

Nachfolgende Tabelle gibt die mittleren Energiepreise zu Beginn des Betrachtungsjahres wieder, welche auf Grundlage diverser statistischer Auswertungen für den Luxemburger Energiemarkt bestimmt wurden. Bei den dargestellten Preisen wird zwischen der mikro- und makroökonomischen Betrachtungsweise unterschieden. Dies ist erforderlich, da die Energiepreise bei der makroökonomischen Betrachtung ohne Steuern und Abgaben durchgeführt werden. Es wird zudem in beiden Szenarien zwischen Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden unterschieden, um den tendenziell geringeren Energiepreisen, bedingt durch höhere Verbrauchsmengen, Rechnung zu tragen.

Tabelle 9: Energiepreise zu Beginn des Betrachtungszeitraumes

| Energieträger              | Einheit | Mikroökonomisch |       | Makroökonomisch |       |
|----------------------------|---------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|                            |         | WG              | NWG   | WG              | NWG   |
| Heizöl <sup>20</sup>       | €/kWh   | 0,081           | 0,067 | 0,072           | 0,065 |
| Gas <sup>21</sup>          | €/kWh   | 0,058           | 0,040 | 0,054           | 0,039 |
| Rapsöl (RME) <sup>22</sup> | €/kWh   | 0,140           | 0,140 | 0,125           | 0,125 |
| Pellets <sup>23</sup>      | €/kWh   | 0,050           | 0,049 | 0,047           | 0,046 |
| Fernwärme <sup>24</sup>    | €/kWh   | 0,094           | 0,094 | 0,088           | 0,088 |
| Strom <sup>25</sup>        | €/kWh   | 0,163           | 0,087 | 0,140           | 0,083 |

### 2.3.6 Jährliche Kosten – Wartungs- und Instandhaltungskosten

Die jährlichen Kosten für Wartungs- und Instandhaltungskosten werden in der vorliegenden Studie mittels der in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Prozentsätze, prozentual zu den anfänglichen Investitionskosten der jeweiligen baulichen und technischen Maßnahmen bestimmt.

Tabelle 10: Ansatz für Wartungskosten

| Maßnahme                                 | Wartungs- und Instandhaltungskosten <sup>26</sup> |                                |
|--|---|--------------------------------|
| Wärmeerzeuger und Wärmepumpe             | 2,0 %/a   | nach EN 15459                  |
| Peripherie (Sonden Sole WP, Tank, Kamin) | 1,0 %/a   | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |
| Kühlung                                  | 4,0 %/a   | nach EN 15459                  |
| Lüftung                                  | 2,0 %/a   | nach EN 15459                  |
| Beleuchtung                              | 1,0 %/a   | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |
| Solaranlagen                             | 0,5 %/a   | nach EN 15459                  |
| KWK                                      | 4,0 %/a   | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |
| PV-Anlagen                               | 1,0 %/a   | in Anlehnung EN 15459/VDI 2067 |

<sup>20</sup> Quelle: Heizölpreise, <http://www.statec.lu> (Le Portail des statistiques du Grand-duché de Luxembourg), Abruf 11/13

<sup>21</sup> Quelle: Gas, <http://www.statec.lu> (Le Portail des statistiques du Grand-duché de Luxembourg), Abruf 11/13

<sup>22</sup> Quelle: <http://www.camen-ev.de>, Abruf 11/12, umgerechnet mit einem Energieinhalt von 10 kWh/l

<sup>23</sup> Quelle: <http://www.camen-ev.de>, Abruf 11/13

<sup>24</sup> Quelle: Auswertung der Energiepreise der Fernwärmenetze der Stadt Luxemburg und des Betreibers SUDCAL in Esch/Beval.

<sup>25</sup> Quelle: Strom, <http://www.statec.lu> (Le Portail des statistiques du Grand-duché de Luxembourg), Abruf 11/13.

Im Fall der Stromvermarktung (Einspeisung ins öffentliche Netz) wird ein Energiepreis von 0,045 €/kWh angesetzt.

<sup>26</sup> Die Angaben entsprechen einem Prozentsatz der Investitionskosten (ohne Planungskosten).

### 2.3.7 Subventionen

In der vorliegenden Studie werden staatliche Subventionen für Wohnbauten indikativ berücksichtigt. Die Subventionen werden gemäß den Vorgaben der aktuellen Gesetzgebung bestimmt [25]. Die Subventionen beziehen sich hierbei auf besonders effiziente Neubauten, energetische Sanierungen und erneuerbare Energietechnologien.

### 2.3.8 CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

Die den volkswirtschaftlichen respektive makroökonomischen Analysen zugrundeliegenden Kostenansätze für den Einkauf von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten wurden aus [1] entnommen. Die nachfolgende Tabelle gibt die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten im Laufe des Betrachtungszeitraumes wieder.

*Tabelle 11: Berücksichtigte Kosten zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung*

| <b>Zeitraum</b>   | <b>CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten €/tCO<sub>2</sub></b> |
|---|---|
| Zeitraum innerhalb des Betrachtungszeitraumes < 2025        | 20  |
| 2025 ≤ Zeitraum innerhalb des Betrachtungszeitraumes < 2030 | 35  |
| Zeitraum innerhalb des Betrachtungszeitraumes ≥ 2030        | 50  |

### 2.3.9 Entsorgungskosten

Die Entsorgungskosten für bauliche und anlagentechnische Maßnahmen werden aufgrund der Tatsachen, dass hierfür keine gesicherten Kostenansätze vorliegen und diese in der Verordnung N° 244/2012 nicht bindend berücksichtigt werden müssen, bei den folgenden Untersuchungen nicht berücksichtigt.

### 3 Bestimmung des Primärenergiebedarfes

Der Primärenergiebedarf stellt neben den Globalkosten die wichtigste Größe bei der Cost-Optimal-Bewertung dar. Da die der Cost-Optimal-Methode zugrundeliegende Verordnung N° 244/2012 die getrennte Bewertung von Wohn- und Nichtwohngebäuden fordert, muss auch für die Ermittlung der Primärenergiebedarfe der jeweiligen Gebäudekategorien ein geeignetes Rechenverfahren zugrunde gelegt werden. Die Ermittlung der Primärenergiebedarfe erfolgt deshalb in der vorliegenden Studie in Anlehnung an die national gültigen Rechenvorschriften. Bei der vorliegenden Betrachtung wurden allerdings sinnvolle Anpassungen vorgenommen, welche in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden.

Die verwendeten Primärenergie- und Umweltfaktoren sind der aktuellen Gesetzgebung entnommen und werden in folgender Tabelle zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 12: Verwendete Primärenergie- und Umweltfaktoren gemäß aktueller Gesetzgebung [3], [4].

|                  |  | <b>Primärenergiefaktor<br/>(kWh<sub>p</sub>/kWh<sub>e</sub>)<sup>27</sup></b> | <b>Umweltfaktor<br/>(kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>e</sub>)<sup>28</sup></b> |
|------------------|--|---|---|
| Brennstoffe      | Heizöl EL                                  | 1,10  | 0,300   |
|                  | Erdgas H                                   | 1,12  | 0,246   |
|                  | Flüssiggas                                 | 1,13  | 0,270   |
|                  | Steinkohle                                 | 1,08  | 0,439   |
|                  | Braunkohle                                 | 1,21  | 0,452   |
|                  | Holzackschnitzel                           | 0,06  | 0,035   |
|                  | Brennholz                                  | 0,01  | 0,014   |
|                  | Holz-Pellets                               | 0,07  | 0,021   |
|                  | Biogas                                     | 0,03  | 0,011   |
|                  | Rapsöl                                     | 0,18  | 0,157   |
| Strom            | Strom-Mix                                  | 2,66  | 0,651   |
| dezentrale KWK   | mit erneuerbarem Brennstoff                | 0,00  | 0,000   |
|                  | mit fossilem Brennstoff                    | 0,72  | 0,060   |
| Nah- & Fernwärme | aus KWK mit erneuerbarem Brennstoff        | 0,00  | 0,000   |
|                  | aus KWK mit fossilem Brennstoff            | 0,62  | 0,043   |
|                  | aus Heizwerken mit erneuerbarem Brennstoff | 0,25  | 0,066   |
|                  | aus Heizwerken mit fossilem Brennstoff     | 1,48  | 0,328   |

#### 3.1 Anpassung des Heizwärmebedarfes

Da die berechneten Heizwärmebedarfe insbesondere bei Gebäuden mit schlechtem Wärmeschutz auf der Basis der üblichen Rechenvorschriften sowohl für Wohn- als auch für Nichtwohngebäude erfahrungsgemäß von den realen Verbräuchen abweichen, werden diese in der vorliegenden Studie mittels des nachfolgend aufgeführten Anpassungsfaktor, welcher in [26] und [12] beschrieben wird, modifiziert. Dies ist erforderlich, um zum einen eine Überschätzung des Einsparpotentials von Wärmedämmmaßnahmen zu begrenzen und zum anderen realistischere Energiekosten auszuweisen und somit eine praxisnahe Einschätzung der Globalkosten- und

<sup>27</sup> Für Holz, Biogas, Rapsöl, und Heizwerken mit erneuerbarem Anteil als Energieträger entspricht dies dem nicht-regenerativem Anteil. Die Faktoren sind auf Endenergie bezogen.

<sup>28</sup> Bei den Umweltfaktoren handelt es sich um CO<sub>2</sub> - Äquivalente. die Faktoren sind auf Endenergie bezogen.

Primärenergieniveaus zu ermöglichen, was für Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen essentiell ist [11].

$$f_{adapt} = -0,2 + \frac{1,3}{\left(1 + \frac{q_{del,h,c}}{500}\right)}$$

GL 4

$f_{adapt}$  = Anpassungsfaktor zur Korrektur der normativ berechneten Heizwärmebedarfe

$q_{del,h,c}$  = berechneter Heizwärmebedarf in kWh/(m<sup>2</sup>·a)

### 3.2 Rechenmethode – Wohngebäude

Die Berechnung des Primärenergiebedarfes für Wohngebäude erfolgt abweichend zu der in [3] beschriebenen Rechenvorschrift, mittels einem modifizierten Ansatz der DIN V 18599 und den im [4] beschriebenen Vereinfachungen, sowie der Modifikation für den berechneten Heizwärmebedarf nach GL 4. Durch die genannten Randbedingungen ergeben sich insbesondere für bestehende Gebäude mit schlechtem Wärmeschutz geringere Wärmebedarfe, die besser mit praktisch gemessenen Werten übereinstimmen. Um die in der vorliegenden Studie verwendete Berechnungsmethode zu validieren, wurden die berechneten Heizwärmebedarfe beider Verfahren für die analysierten Gebäude miteinander verglichen. Wie der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen ist, weisen beide Verfahren eine sehr gute Übereinstimmung auf. Da der Heizwärmebedarf bei Wohngebäuden einen maßgeblichen Einfluss auf den Primärenergiebedarf hat, kann mit guter Näherung auf das von den nationalen Rechenvorschriften abweichenden Rechenverfahren zurückgegriffen werden. Als Berechnungsprogramm kommt die Software EnerCalc<sup>29</sup> zur Anwendung, die entsprechend den Anforderungen angepasst wurde.

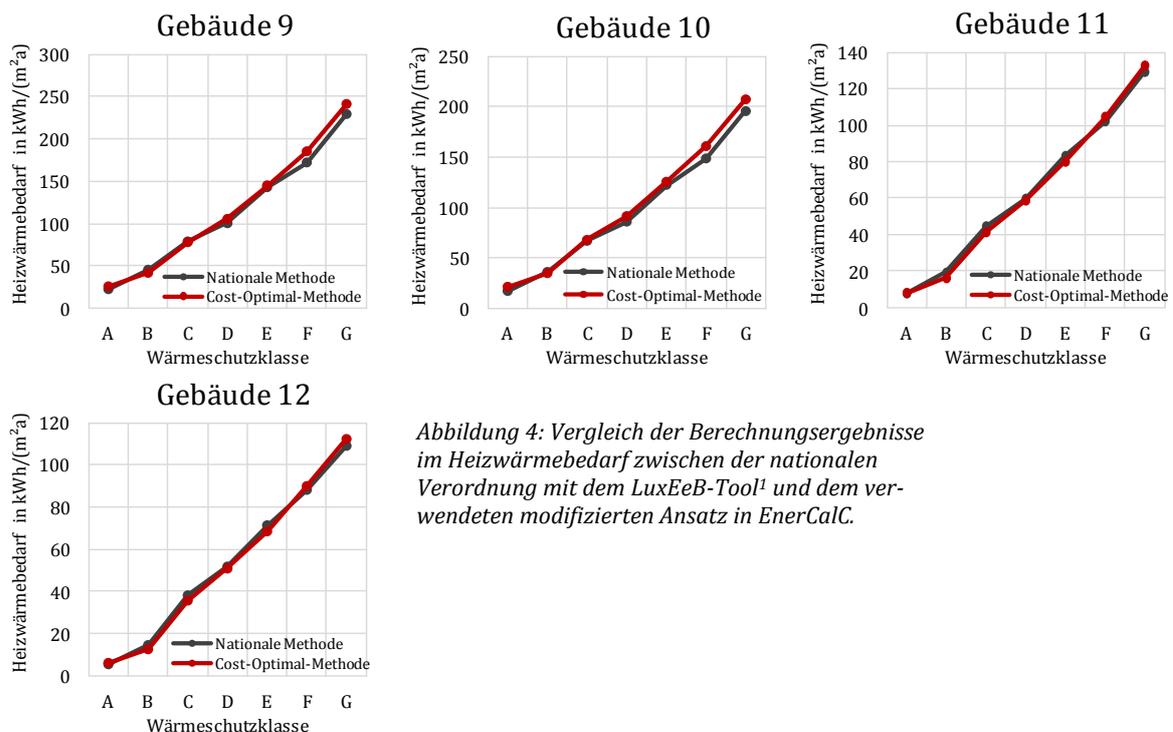


Abbildung 4: Vergleich der Berechnungsergebnisse im Heizwärmebedarf zwischen der nationalen Verordnung mit dem LuxEeB-Tool<sup>1</sup> und dem verwendeten modifizierten Ansatz in EnerCalc.

<sup>29</sup> <http://www.enob.info/?id=enercalc>, Abruf 11/13, Version 4.43.102. Mit dem Rechenansatz von EnerCalc kann neben der üblichen energetischen Bilanzen auch der Ansatz von Nullenergiegebäuden gemäß den vorgesehene Rechenregeln für Luxemburg berücksichtigt werden [17]. Dies erlaubt den Einfluss von im Gebäude erzeugtem Strom auf die energetische Bewertung.

### 3.3 Rechenmethode – Nichtwohngebäude

Die Berechnung des Primärenergiebedarfes für Nichtwohngebäude erfolgt in Anlehnung an die DIN V 18599 und den in [4] beschriebenen Vereinfachungen, sowie dem modifizierten Heizwärmebedarf nach GL 4. Als Software kommt EnerCalc<sup>29</sup> zur Anwendung.

### 3.4 Bewertungsmatrix

Für die Bewertung sind die Globalkosten und der Primärenergiebedarf von Relevanz. Erneuerbare Energieträger (z. B. Pellets) haben einen Einfluss auf den Gesamtprimärenergiebedarf – insbesondere bei Wohngebäuden mit ausschließlichen Wärmebedarf. Das Wärmeschutzniveau eines Gebäudes – also dessen Energieeffizienz – tritt so bei der primärenergetischen Bewertung in den Hintergrund. Deshalb erlaubt die Richtlinie auch die getrennte Bewertung von Wärmeschutz und Anlagentechnik. Diesem Zusammenhang geschuldet wird die Cost-Optimal Bewertung in der Stufe I für unterschiedliche Wärmeschutzniveaus bei gleicher Anlagentechnik durchgeführt und ausgewertet. Die Bewertung der Stufe II bezieht unterschiedliche Anlagentechniken mit ein, wobei die Bewertung ebenfalls für unterschiedliche Wärmeschutzniveaus erfolgt. Zur Begrenzung der möglichen Varianten und zur Vereinfachung der Ergebnisdarstellung werden für bauliche Standards und Anlagentechniken sinnvolle Maßnahmenpakete untersucht, die in folgenden Kapiteln beschrieben werden.

#### 3.4.1 Wärmeschutz (Stufe I)

Der Einfluss unterschiedlicher Wärmeschutzniveaus wird für die folgenden Ausprägungen untersucht. Dabei wird das in Luxemburg seit 2007 eingeführte Klassensystem für den Wärmeschutz zugrunde gelegt. Die Wärmeschutzklasse entspricht einem bestimmten Wärmeschutzniveau aller Bauteile eines Gebäudes in seiner Gesamtheit. Hierbei sind Maßnahmenkombinationen bezüglich der thermischen Qualität der Bauteile so gewählt, wie sie üblicherweise zur Erreichung dieses Niveaus erforderlich sind.

Tabelle 13: Typische Bauausführungen in den unterschiedlichen Effizienzklassen.

| Klassengrenze                    | A <sup>+30</sup> | A    | B    | C    | D                  | Min. <sup>31</sup> | E    | F    | G    | H    | I    |
|----------------------------------|------------------|------|------|------|--------------------|--------------------|------|------|------|------|------|
| U-Wert Fenster                   | 0,78             | 0,78 | 0,92 | 1,12 | 1,36               | 1,50               | 1,90 | 2,30 | 2,70 | 3,20 | 5,00 |
| U-Wert Boden                     | 0,15             | 0,15 | 0,22 | 0,28 | 0,34               | 0,40               | 0,50 | 0,60 | 0,90 | 1,00 | 1,08 |
| U-Wert Wand                      | 0,12             | 0,12 | 0,17 | 0,23 | 0,27               | 0,32               | 0,45 | 0,60 | 0,90 | 1,10 | 1,70 |
| U-Wert Dach                      | 0,10             | 0,10 | 0,13 | 0,17 | 0,21               | 0,25               | 0,30 | 0,40 | 0,65 | 1,23 | 1,95 |
| Wärmebrücken <sup>32</sup>       | 0,01             | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,10 <sup>33</sup> | 0,10               | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Lüftungsanlage WG <sup>34</sup>  | 85 %             | 85 % | 85 % | -    | -                  | -                  | -    | -    | -    | -    | -    |
| Lüftungsanlage NWG <sup>35</sup> | 75 %             | 75 % | 72 % | 68 % | 60 %               | 60 %               | 55 % | 50 % | 50 % | 50 % | 45 % |
| Luftdichtheit <sup>36</sup>      | 0,6              | 0,6  | 1,0  | 2,0  | 3,0                | 3,0                | 4,0  | 4,0  | 6,0  | 6,0  | 6,0  |

<sup>30</sup> Derzeit gibt es noch keine finale Definition für die Anforderungen an ein nearly zero-energy building in Luxemburg. Hinsichtlich des Wärmeschutzes wird das nZEB-Gebäude voraussichtlich dem Klasse A-Standard (Passivhausstandard) entsprechen [5], da eine weitere Verschärfung des Wärmeschutzstandards nicht kosteneffizienter sein wird.

<sup>31</sup> Mindestanforderungen gemäß aktuellem Règlement grand-ducal für Wohn- und Nichtwohngebäude [4] [5].

<sup>32</sup> Ab Klasse F ist der Zuschlag für Wärmebrücken zum Teil im U-Wert enthalten und wird in der Berechnung reduziert angenommen.

<sup>33</sup> Bei Nichtwohngebäuden werden die Anforderungen für die Wärmeschutzklasse D auf 0,05 W/(m<sup>2</sup>K) festgelegt.

<sup>34</sup> Ab der Wärmeschutzklasse B ist eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erforderlich. In der Tabelle wird die Effizienz der Wärmerückgewinnung in Prozent angegeben und entspricht dem Wärmebereitstellungsgrad eines Wärmerückgewinnungssystems unter Betriebsbedingungen gemäß [3].

<sup>35</sup> Im Fall wenn eine RLT-Anlage im Gebäude vorgesehen ist, entspricht der Prozentwert der Rückwärmzahl eines Wärmerückgewinnungssystems nach EN 308 gemäß [4].

<sup>36</sup> Im Fall einer ganzheitlichen energetischen Bewertung im Neubaufall wird von einer verbesserten Luftdichtheit ausgegangen.

### 3.4.2 Anlagentechnik (Stufe II)

Die Bewertung der Anlagentechnik erfolgt für die wesentlichen Energieanwendungen: Heizen, Lüften, Trinkwarmwassererwärmung und deren Hilfsenergiebedarfe für Wohn- und Nichtwohngebäude. Zusätzlich werden bei Nichtwohngebäuden die Energiegewerke Beleuchten und Kühlen einbezogen.

Für Nichtwohngebäude werden drei unterschiedliche Basisanlagenkombinationen als Maßnahmenpakete unterschieden, die sich hinsichtlich ihrer Energieeffizienz unterscheiden (ES I, ES II und ES III). Der Effizienzstandard II (ES II) entspricht einem derzeit üblich vorgefundenen Neubaustandard. ES I entspricht einer effizienteren Ausstattung; ES III einer ineffizienteren.

Bei Wohngebäuden erfolgt die Bewertung der Anlagentechnik für den Fall der Anlageneffizienz II, jedoch nur für die in der Wohngebäudebilanz berücksichtigten Technologien. Die Bewertung verschiedener Erzeugersysteme erfolgt wieder analog zu den Nichtwohngebäuden gemäß Tabelle 15.

Tabelle 14: Typische anlagentechnische Bauausführungen in den unterschiedlichen Effizienzstandards.

|                    |                             | <b>Effizienzstandard I (ES I)</b><br><b>Tabellenkürzel A1</b>   | <b>Effizienzstandard II (ES II)</b><br><b>Tabellenkürzel A2</b>  | <b>Effizienzstandard III (ES III)</b><br><b>Tabellenkürzel A3</b>  |
|--------------------|-----------------------------|---|--|--|
| <b>Beleuchtung</b> | Steuerung                   | manuelle Steuerung  | manuelle Steuerung   | dimmbar, in Abhängigkeit des Tageslichtangebotes   |
|                    | Präsenz                     | ohne Präsenzmelder  | mit Präsenzmelder  | mit Präsenzmelder  |
|                    | Art                         | direkt/indirekt   | direkt/indirekt  | überwiegend direkt   |
|                    | Lampe                       | Leuchtstofflampe, kompakt mit externem EVG  | Leuchtstofflampe stabförmig mit EVG  | Leuchtstofflampe stabförmig mit EVG  |
|                    | Regelung                    | keine Konstantlichtregelung   | Konstantlichtregelung  | Konstantlichtregelung  |
| <b>Lüftung</b>     | Qualität                    | manuell oder zeitgesteuert. Der Mindestaußenluftvolumenstrom der Anlage wird innerhalb der Nutzungszeit berücksichtigt  | manuell oder zeitgesteuert. Der Mindestaußenluftvolumenstrom der Anlage wird innerhalb der Nutzungszeit berücksichtigt                     | Regelung über Gassensoren. Der Außenluftvolumenstrom wird mit Hilfe von Gassensoren (z.B. CO <sub>2</sub> , VOC, Mischgas) bedarfsabhängig geregelt. |
|                    | Effizienz SFP <sup>37</sup> | Standard (2,85 kW/(m <sup>3</sup> /s))  | Effizient (1,9 kW/(m <sup>3</sup> /s))   | Effizient (1,9 kW/(m <sup>3</sup> /s))   |
| <b>Kühlen</b>      | Erzeuger                    | Wassergekühlt durch Sekundärkreis, Kolben-/Scrollverdichter, mehrstufig schaltbar, Kühlwassereintritt konstant, Trockenrückkühler   | Wassergekühlt durch Sekundärkreis, Kolben-/Scrollverdichter, mehrstufig schaltbar, Kühlwassereintritt konstant, Trockenrückkühler          | Wassergekühlt durch Sekundärkreis, Kolben-/Scrollverdichter, mehrstufig schaltbar, Kühlwassereintritt variabel, Verdunstungsrückkühler               |
|                    | Übergabe                    | Kaltwasser 8/14°C - Ventilatorkonvektoren   | Kaltwasser 8/14°C - Ventilatorkonvektoren  | Kaltwasser 14/18°C - Ventilatorkonvektoren   |
|                    | Verteilung                  | hoher Widerstand des Rohrnetzes, Betriebszeit saisonal, ungünstige hydraulische Auslegung des Netzes (keine Pumpenadaption, kein hydraulischer Abgleich, Überströmungen im Netz), unregelmäßiger Pumpenbetrieb. | mittlerer Widerstand des Rohrnetzes, Betriebszeit intermittierend, praxisnahe Auslegung der Hydraulik, geregelte und unregelmäßige Pumpen. | Energetisch optimiertes Rohrnetz, bedarfsgesteuerte Betriebszeit, optimale Auslegung der Hydraulik, geregelter Pumpenbetrieb.                        |
| <b>Wärme</b>       | Energieträger               | fossiler Brennstoff   | fossiler Brennstoff  | fossiler Brennstoff  |
|                    | Erzeuger                    | Niedertemperaturkessel  | Brennwertkessel, verbessert  | Brennwertkessel, verbessert  |
|                    | Übergabe                    | Heizkörper an Außenwand, 70/55  | Heizkörper an Außenwand, 55/45   | Heizkörper an Außenwand, 55/45   |
|                    | Regelung                    | P-Regler  | P-Regler   | PI-Regler  |

<sup>37</sup> Zu- und Abluftanlage ohne Heiz- und Kühlfunktion. Der Effizienzstandard ist vom Gesamtwirkungsgrad und vom Systemdruckverlust abhängig. In den Gesamtwirkungsgrad fließen die Effizienz von Ventilator, Motor, Frequenzumformer und Antrieb ein. Der Systemdruckverlust wird wesentlich von der gewählten Strömungsgeschwindigkeit (Kanaldimensionierung), der Kanalnetzplanung (Komplexität der Verteilung), sowie von den Strömungseigenschaften der Kanaleinbauten beeinflusst.

Über diese Grundeffizienzvarianten hinaus werden unterschiedlichste Technologien mittels Subsystemen eingezogen. Hier liegt der Fokus bei der Bewertung von verschiedenen Energieträgern (erneuerbar, fossil, etc.) und der Effizienz der technischen Systeme, jeweils für die drei anlagentechnischen Effizienzstandards. Einbezogen werden Varianten gemäß Tabelle 15. Kombiniert man die verschiedenen Energieeffizienzstandards (ES I bis III) mit den anlagentechnischen Ausstattungsmerkmalen ergeben sich 30 mögliche Varianten für die Anlagentechnik.

Tabelle 15: Anlagentechnische Ausstattungsmerkmale als Subsystem.

| Effizienzstandard | Kurzname  | Tabellenkürzel <sup>38</sup> | Beschreibung  |
|-------------------|-----------|------------------------------|---|
| ES I / II / III   | Sol       | A4 / A13 / A22               | Thermische Solaranlage zur Trinkwarmwassererwärmung und Heizungsunterstützung auf der Basis eines Flachkollektors. Die Auslegung der Anlage erfolgt individuell in Abhängigkeit des Energiebedarfs.   |
| ES I / II / III   | Pellets   | A5 / A14 / A23               | Wärmeerzeugung über einen Pellets und/oder Hackschnitzelkessel (in Abhängigkeit der Gebäudegröße). Es wird der Einfluss von erneuerbaren Energieträgern (Biomasse) zum Beheizen des Gebäudes bewertet.  |
| ES I / II / III   | FW        | A6 / A15 / A24               | Wärmelieferung über einen Fernwärmeanschluss mit KWK als Grundlastzeuger. Dies stellt in Luxemburg eine häufig vorgefundene Technologiekombination vor (in Städten).  |
| ES I / II / III   | LWP       | A7 / A16 / A25               | Luftwärmepumpe zur Beheizung des Gebäudes im bivalentem Betrieb in Verbindung mit einem weiteren Wärmeerzeuger (i. d. R. ein Elektroheizstab bei monoenergetischer Betriebsweise)   |
| ES I / II / III   | Geo       | A8 / A17 / A26               | Wärmepumpe auf der Basis von Geothermie. Die Auslegung des Sondenfelds erfolgt unter Annahme mittlere Bodendaten (40 W/m Sondenlänge).  |
| ES I / II / III   | PV        | A9 / A18 / A27               | Integration einer Photovoltaikanlage zur Eigenstromnutzung. Die Auslegung erfolgt auf der Basis der vorhandenen Dachfläche. Es wird davon ausgegangen, dass 15 % der Bruttodachfläche für die PV-Nutzung zur Verfügung stehen.                            |
| ES I / II / III   | KWK       | A10 / A19 / A28              | Dezentrale KWK-Anlage in Kombination mit einem Kessel auf der Basis fossiler Energien (Gas oder Heizöl). Die Auslegung der KWK-Anlage basiert auf 15 % des thermischen Leistungsbedarfs des Gebäudes. Die Betriebsweise wird als wärmegeführt angenommen. |
| ES I / II / III   | KWKBio    | A11 / A20 / A29              | Gleiche Randbedingungen wie bei der Variante "KWK" jedoch wird als Brennstoff für das KWK ein erneuerbarer Energieträger als Bioheizstoff angesetzt (Pflanzenöl und Biodiesel (RME), etc.).   |
| ES I / II / III   | KWKBio_PV | A12 / A21 / A30              | Gleiche Randbedingungen wie bei der Variante "KWKBio" jedoch mit gleichzeitiger Berücksichtigung einer PV-Anlage. Mit dieser Kombination wird der Einfluss einer erweiterten Eigenstrombedarfsdeckung bestimmt.   |

### 3.4.3 Referenzgebäude

Die Auswertung der Kosteneffizienz erfolgt getrennt für Wohn- und Nichtwohngebäude. Es werden je 4 unterschiedliche Gebäudegeometrien definiert, die im Falle der Neubau und Altbauuntersuchung herangezogen werden. Bei den Wohngebäuden (WG) wurden die verwendeten Gebäudegeometriemodelle aus Untersuchungen zum nationalen Förderprogramm übernommen, um nicht zuletzt auch eine Vergleichbarkeit dazu zu erreichen [22]. Es handelt sich jeweils um ein großes und ein kleines Ein- und Mehrfamilienhaus. Bei den Nichtwohngebäuden (NWG)

<sup>38</sup> Das Tabellenkürzel wird bei der Variantenkenung in den Ergebnistabellen verwendet. Die Unterscheidung in drei verschiedene Varianten ist der möglichen Kombination mit dem Grundeffizienzstandard ES I bis III geschuldet. In der Regel werden die Berechnungen im Grundeffizienzstandard ES II durchgeführt, was der mittleren Kennziffer für das Tabellenkürzel entspricht.

werden ebenfalls 4 Gebäude angesetzt. Hier handelt es sich um ein "synthetisch" erzeugtes Gebäude (G1, G5), welches bereits bei Kalibrierungsarbeiten im Rahmen der Entwicklung der Energieeinsparverordnung in Luxemburg verwendet wurde und um 3 reale Gebäudeentwürfe unterschiedlicher Konzeption. Sie entsprechen in Luxemburg üblich vorkommenden Gebäudegeometrien. Das Gebäude 4 entspricht einem Schulgebäude, um auch den Einfluss der Nichtklimatisierung mit einzubeziehen. Da die Bewertung auf der Basis des Referenzgebäudeansatzes erfolgt, wird auf eine weitere Differenzierung verzichtet.

Tabelle 16: Verwendete Gebäudegeometrien und -charakteristika

| Bereich                           | Einheit         | G1               | G2     | G3     | G4     | G9   | G10   | G11   | G12    |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|--------|--------|--------|------|-------|-------|--------|
|                                   |                 | G5 <sup>39</sup> | G6     | G7     | G8     | G13  | G14   | G15   | G16    |
| Gebäudeart <sup>40</sup>          | -               | NWG              | NWG    | NWG    | NWG    | WG   | WG    | WG    | WG     |
| Typ                               | -               | Büro             | Büro   | Büro   | Schule | EFH  | EFH   | MFH   | MFH    |
| Außenfassade                      | m <sup>2</sup>  | 694              | 3.417  | 3.276  | 2.009  | 248  | 428   | 992   | 2.046  |
| Fenster                           | m <sup>2</sup>  | 251              | 1.517  | 1.050  | 420    | 41   | 75    | 289   | 660    |
| Zu unbeheizt <sup>41</sup>        | m <sup>2</sup>  | 55               | 805    | 1.002  | 303    | 0    | 0     | 0     | 0      |
| Boden                             | m <sup>2</sup>  | 294              | 1.237  | 2.174  | 733    | 96   | 120   | 375   | 600    |
| Dach                              | m <sup>2</sup>  | 294              | 1.484  | 1.172  | 1.018  | 111  | 139   | 433   | 693    |
| Hüllfläche                        | m <sup>2</sup>  | 1.337            | 6.943  | 7.624  | 4.063  | 455  | 687   | 1.800 | 3.339  |
| Energiebezugsfläche <sup>42</sup> | m <sup>2</sup>  | 821              | 5.885  | 6.161  | 2.197  | 163  | 306   | 1.275 | 3.060  |
| Bruttovolumen                     | m <sup>3</sup>  | 2.996            | 24.266 | 21.212 | 9.130  | 595  | 1.116 | 4.650 | 11.160 |
| Kompaktheit A/V <sub>e</sub>      | m <sup>-1</sup> | 0,45             | 0,29   | 0,36   | 0,45   | 0,77 | 0,62  | 0,39  | 0,30   |
| Fensterflächenanteil              | %/Fassade       | 36%              | 44%    | 32%    | 21%    | 17%  | 18%   | 29%   | 32%    |
| Zonenzahl                         | -               | 6                | 7      | 5      | 8      | 1    | 1     | 1     | 1      |
| Heizen                            | ja/nein         | ja               | ja     | ja     | ja     | ja   | ja    | ja    | ja     |
| Kühlen                            | ja/nein         | ja               | ja     | ja     | nein   | nein | nein  | nein  | nein   |
| Belichten                         | ja/nein         | ja               | ja     | ja     | ja     | nein | nein  | nein  | nein   |
| Trinkwarmwasser                   | ja/nein         | ja               | ja     | nein   | ja     | ja   | ja    | ja    | ja     |
| Lüften <sup>43</sup>              | ja/nein/var.    | ja               | ja     | ja     | ja     | var. | var.  | var.  | var.   |

## Energiebedarf auf Nutzenergieebene

Die nachfolgenden Bilder zeigen die für die unterschiedlichen Referenzgebäude anhand der unter Ziffer 3.2 und Ziffer 3.3 beschriebenen Rechenmethoden ermittelten Nutzenergiebedarfe für Heizwärme, Kühlkälte, Lüfterstrom, Beleuchten und Hilfsenergiebedarf. Die Nutzenergiekennwerte werden für die Wärmeschutzstandards A bis E dargestellt und dienen als Grundlage für die energetische Bewertung von neuen Gebäuden<sup>44</sup>.

<sup>39</sup> Die Gebäudenummer entspricht dem identisch gleichen Gebäudeentwurf, es wird jedoch eine Fensterlüftung unterstellt. Dies ist in einigen Berechnungen zur Freischneidung bestimmter energetischer Anforderungen erforderlich.

<sup>40</sup> NWG entspricht einem Nichtwohngebäude, WG einem Wohngebäude.

<sup>41</sup> Flächen zu unbeheizten Räumen.

<sup>42</sup> Die Energiebezugsfläche entspricht gemäß den Verordnungen über die Gesamtenergieeffizienz dem beheizten Teil der Nettogrundfläche [3] [4].

<sup>43</sup> Bei Nichtwohngebäuden wird vom Einsatz einer RLT-Anlage ausgegangen, da dies in der Regel zur Aufrechterhaltung der Luftqualität in Bürogebäuden erforderlich ist. Bei Wohngebäuden wird die Lüftungsanlage in Abhängigkeit des vorhandenen Wärmeschutzniveaus zum Ansatz gebracht. Für Gebäude der Wärmeschutzklasse A+, A und B (Nullenergie- Passiv, und Niedrigenergiehaus) ist eine Lüftungsanlage erforderlich, um zum einen die höhere Energieeffizienz zu erreichen und zum anderen kann, aufgrund der hohen Gebäudeluftdichtigkeit, eine manuelle Fensterlüftung praktisch nicht mehr in allen Fällen ausreichend sein.

<sup>44</sup> Im Fall von Bestandsgebäuden können Unterschiede dazu auftreten, je nachdem ob der Einfluss von Lüftungsanlagen berücksichtigt wird, oder ob andere Parameter, wie der Einfluss von Wärmebrücken und die Gebäudeluftdichtigkeit, freigeschnitten werden.

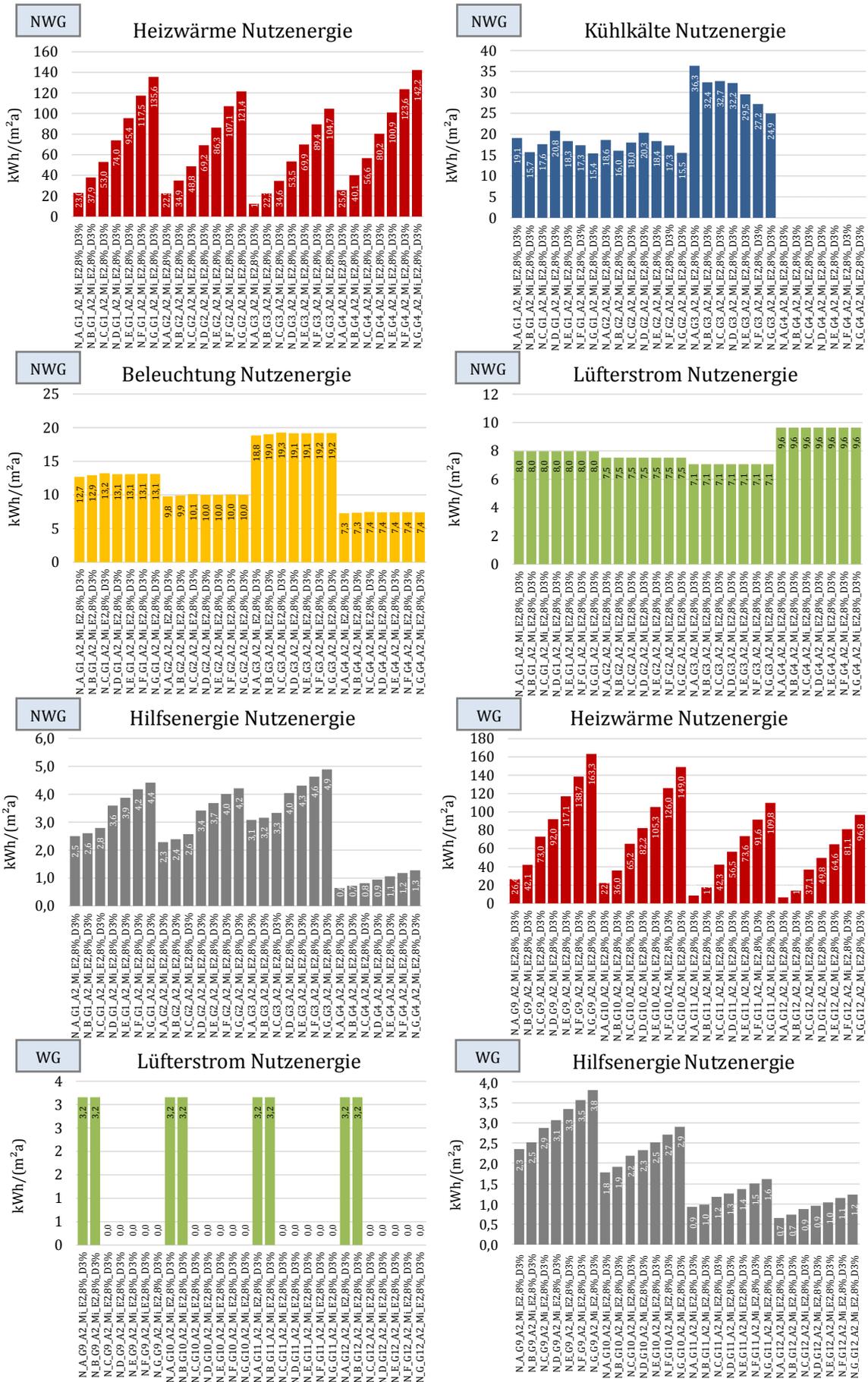


Abbildung 5: Nutzenergiebedarfe für die berechneten Gebäude in Abhängigkeit des Wärmeschutzstandards.

### 3.4.4 Szenarien

Der Einfluss von externen sich veränderlichen Größen wird in Szenarien abgebildet. Dabei werden die folgenden veränderlichen Einflussfaktoren für die Energiepreissteigerung und die Entwicklung des Kapitalzinses gemäß Tabelle 1 und Tabelle 2 bewertet und werden in den unter Abschnitt 2.2 aufgeführten Angaben variiert. Dabei werden die folgenden Kombinationen festgelegt, die eine mögliche gegenseitige Beeinflussung beider Größen einbeziehen. Gemäß der Verordnung N° 244/2012 [1] muss eine Abzinsungsrate mindestens 3 % betragen, in der Leitlinie zur delegierten Verordnung [9] wird eine Mindestabzinsungsrate von 4 % (sozialer Abzinsungssatz) angegeben. Für den Standardfall wird die Mindestabzinsungsrate von 4 % des aktuelleren Dokuments herangezogen und für die Sensitivitätsanalyse eine Variation von  $\pm 2$  % vorgenommen.

Tabelle 17: Entwicklungsszenarien (S1–6) für Energiepreise und wirtschaftliche Situation.

| Bereich                | S1   | S2   | S3  |
|------------------------|--|--|---|
| Beschreibung           | Moderat steigende Energiepreise und Weiterentwicklung der aktuellen Trends hinsichtlich Inflation, Konjunktur, Wirtschaftswachstum, Leitzinsniveau und Markterwartung. | Stark ansteigende Energiepreise aufgrund sich verknappender oder verteuender Energieressourcen unter Beibehaltung einer moderaten Weiterentwicklung der Wirtschaftslage. | Gering ansteigende Energiepreise aufgrund eines erhöhten Einsatzes von regenerativen Energien, nutzen neuer Technologien oder dem erfolgreichen Erschließen neuer Energieressourcen. Gute wirtschaftliche Entwicklung der EU-Region mit einer Erhöhung des Kapitalzinses als Folge. |
| Energiepreissteigerung | 2,8 %/a  | 5 %/a  | 1 %/a   |
| Kapitalzins            | 4 %  | 4 %  | 6 %   |

| Bereich                | S4  | S5   | S6   |
|------------------------|---|--|--|
| Beschreibung           | Gering ansteigende Energiepreise aufgrund eines erhöhten Einsatzes von regenerativen Energien, nutzen neuer Technologien oder dem erfolgreichen Erschließen neuer Energieressourcen. Weniger stark ausgeprägte wirtschaftliche Entwicklung der EU-Region mit niedrigen Kapitalzinsen als Folge. | Stark ansteigende Energiepreise aufgrund sich verknappender oder verteuender Energieressourcen. Gute wirtschaftliche Entwicklung der EU-Region mit einer Erhöhung des Kapitalzinses als Folge. | Stark ansteigende Energiepreise aufgrund sich verknappender oder verteuender Energieressourcen. Weniger stark ausgeprägte wirtschaftliche Entwicklung der EU-Region mit niedrigen Kapitalzinsen als Folge. |
| Energiepreissteigerung | 1 %/a   | 5 %/a  | 5 %/a  |
| Kapitalzins            | 2 %   | 6 %  | 2 %  |

### 3.4.5 Maßnahmenpakete und Kombinationen

Die Kombination aus baulicher Effizienzbewertung nach Stufe I und anlagentechnischer Effizienzbewertung gemäß Stufe II ergeben für ein Gebäude bereits 330 Varianten. Unter Berücksichtigung aller Faktoren (mögliche Energiepreissteigerung, Neubau/Altbau, Betriebs- und Volkswirtschaftlichkeit und Kapitalzins, Förderung, etc.) ergeben sich pro Gebäude 23 760 Varianten. Es erscheint klar, dass zur Erleichterung der Auswertung möglichst nur sinnvolle Maßnahmenpakete untersucht werden sollten. Das folgende Bild zeigt den schematischen Ablauf einer Variantenanalyse. Ausgehend von einem Gebäude wird dafür der Wärmeschutzstandard variiert und für jede dieser Varianten unterschiedliche Kombinationen von Anlagentechniken berücksichtigt. Darauf aufbauend schließen die sensitiven Auswertungen an, die wiederum für jede Einzelvariante durchgeführt werden.

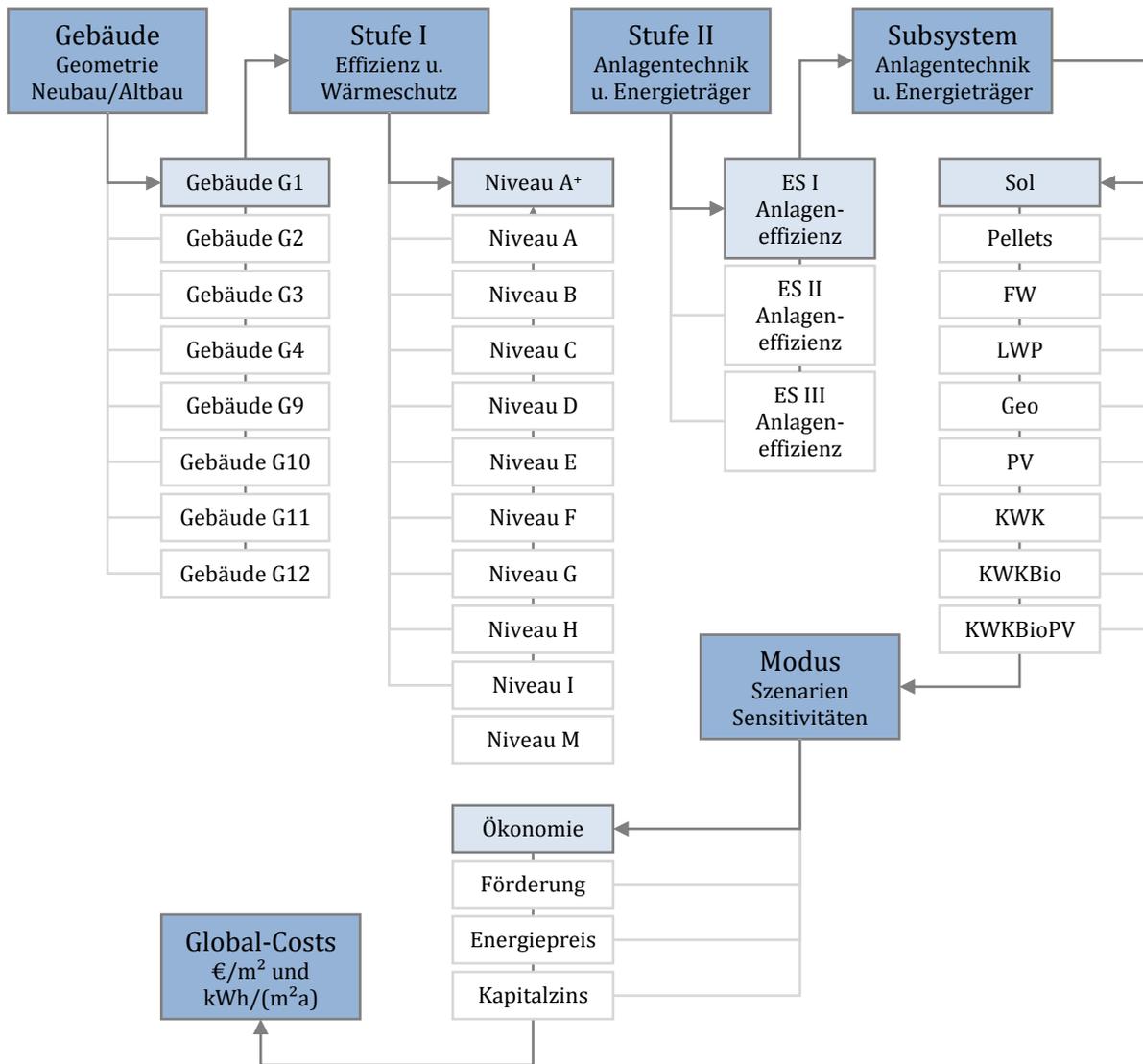


Abbildung 6: schematische Darstellung der Variantenanalyse. Die eingefärbten Felder zeigen eine mögliche Variante im Schema.

## 4 Ergebnisse

Die Analysen werden für Wohn- und Nichtwohngebäude getrennt dargestellt. Hinsichtlich der Kostenbewertung unterscheiden sich neue und bestehende Gebäude grundsätzlich und werden daher immer differenziert betrachtet. Innerhalb des Gebäudealters (Neubau/Altbau) erfolgt zuerst die Bewertung gemäß dem Szenario I (vgl. Abschnitt 3.4.4) und anschließend eine weitere Differenzierung nach den Kriterien Subventionen, Kapitalzinsänderung und Energiepreissteigerung. Dabei wird innerhalb einer jeden Bewertung jeweils die Makro- und Mikroökonomische Bewertung dargestellt.

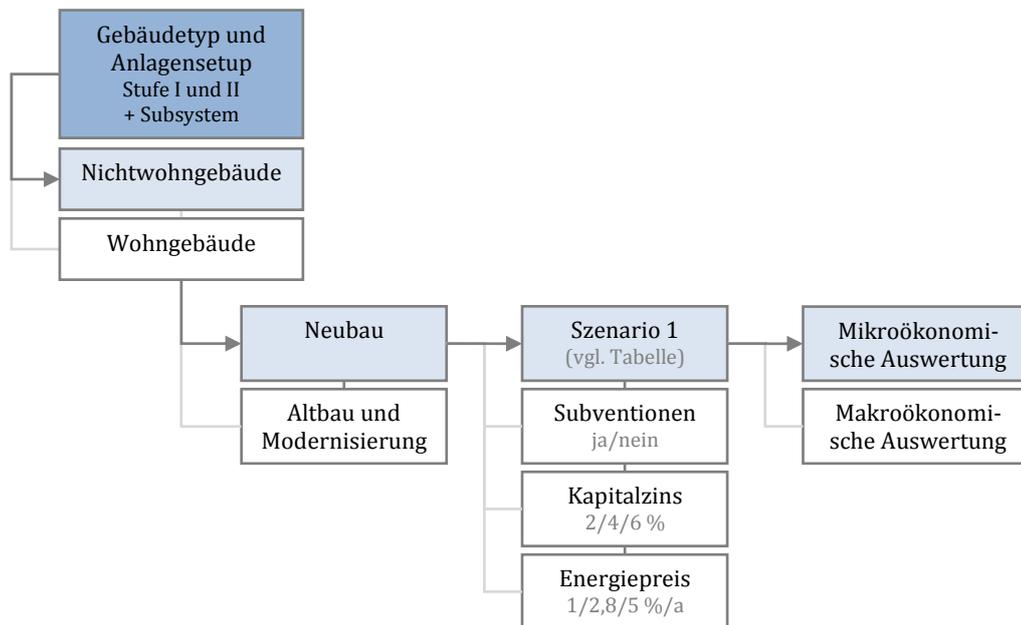
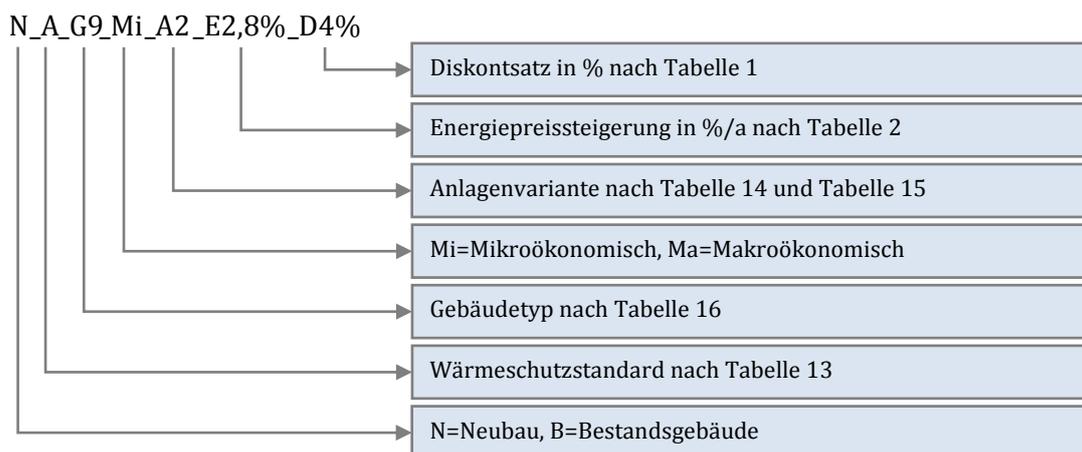


Abbildung 7: Schema der Ergebnisdarstellung. Die eingefärbten Felder zeigen eine mögliche Variante im Schema.

Die Ergebnisse werden jeweils grafisch und tabellarisch dargestellt. Alle Grafiken weisen die gleiche Skalierung hinsichtlich der Einheiten "Primärenergiebedarf" und "Globalkosten" auf, um eine bessere direkte Vergleichbarkeit verschiedener Varianten zu ermöglichen. Alle in einer Grafik dargestellten Varianten werden im direkten Anschluss tabellarisch gelistet. Die Variante in einer Tabelle hat folgende Kennung:



## 4.1 Wohngebäude

Für Wohngebäude wurde der Energieeffizienzstandard für neue Gebäude im Jahr 2012 bei der Wärmeschutz- und Gesamtenergieeffizienzklasse D/D auf jeweils C/B verschärft. An die Bauteile von modernisierten Gebäuden werden Mindestanforderungen an den Wärmeschutz gestellt, sofern sie ersetzt oder erneuert werden. Diese liegen in etwa zwischen den Anforderungen der Wärmeschutzklasse D/E und sind in Tabelle 13 als "Min." und in den Auswertungen als Klasse M gekennzeichnet. Im Fall der Modernisierung werden, ähnlich wie bei neuen Wohngebäuden, Berechnungen für unterschiedliche Wärmeschutzstandards durchgeführt und die Globalkosten bestimmt.

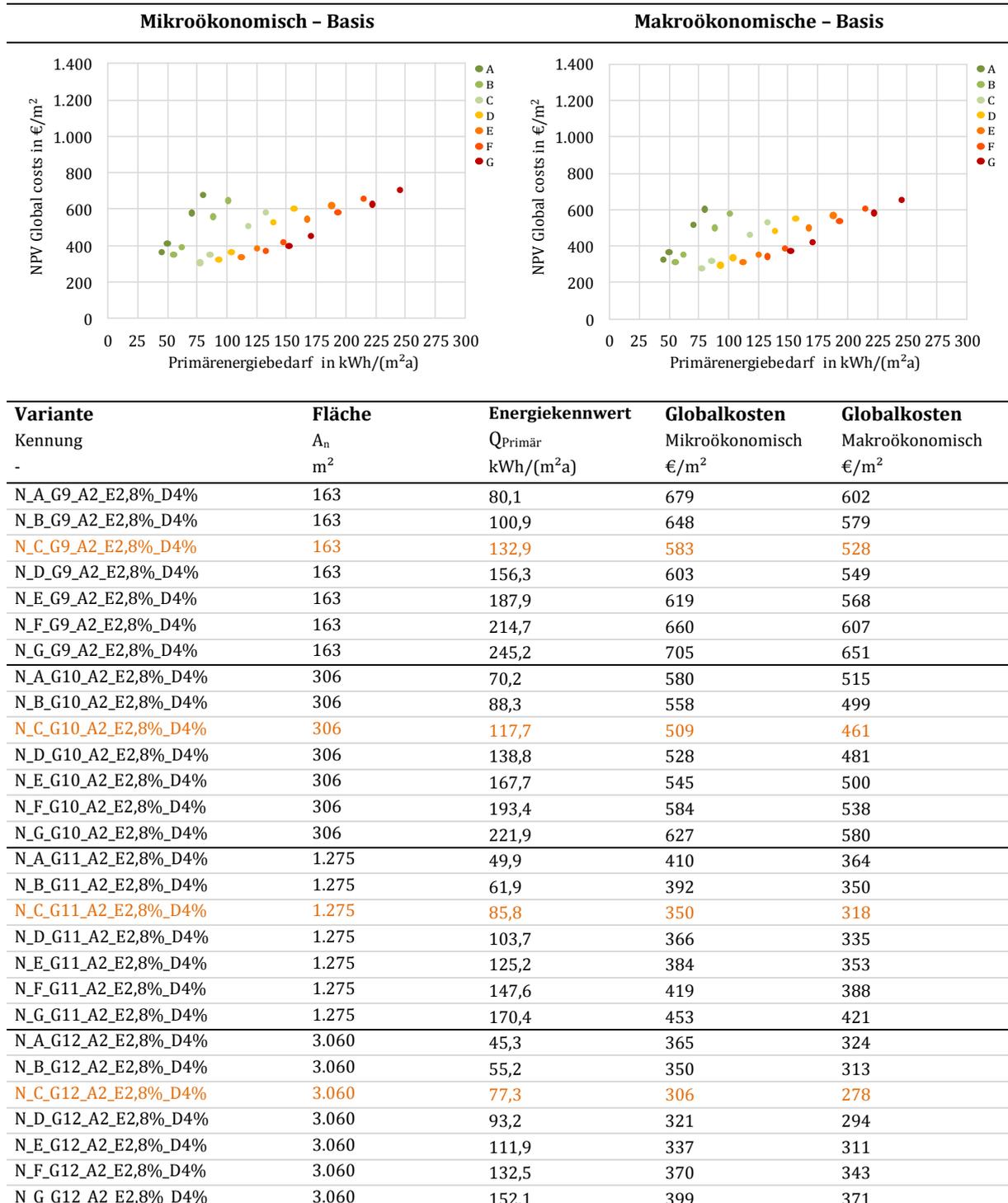
Die Bestimmung der kostenoptimalen Niveaus orientiert sich an den mikroökonomischen bzw. betriebswirtschaftlichen Ergebnissen. In allen gezeigten Tabellen sind die aktuellen gesetzlichen Anforderungen orange markiert und die jeweilige Variante mit den niedrigsten Globalkosten grün eingefärbt. In dem Fall wird neben der primärenergetischen Anforderung, die den aktuellen gesetzlichen Vorgaben entspricht, auch die Über- oder Unterschreitung im Vergleich zum Primärenergiebedarf der kostenoptimalen Variante in Prozent angegeben. Stimmen die Varianten mit den niedrigsten Globalkosten und die gesetzlichen Anforderungen überein, erfolgt keine separate Kennzeichnung.

### 4.1.1 Neubau – Wohngebäude

#### 4.1.1.1 Wärmeschutz – Stufe I

Der Einfluss unterschiedlicher energetischer Bauweisen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit wird für die vier beschriebenen Wohngebäude angegeben. Die aktuellen Anforderungen an neu zu errichtende Gebäude liegen bei der Anforderungsklasse C. Auf makro- und mikroökonomischer Ebene weist dieser Wärmedämmstandard bei allen Gebäuden die geringsten Gesamtkosten auf. Wobei bei größeren Wohngebäuden (Mehrfamilienhäuser) die Globalkosten für bessere Wärmeschutzniveaus geringfügiger steigen, als bei kleinen Gebäuden.

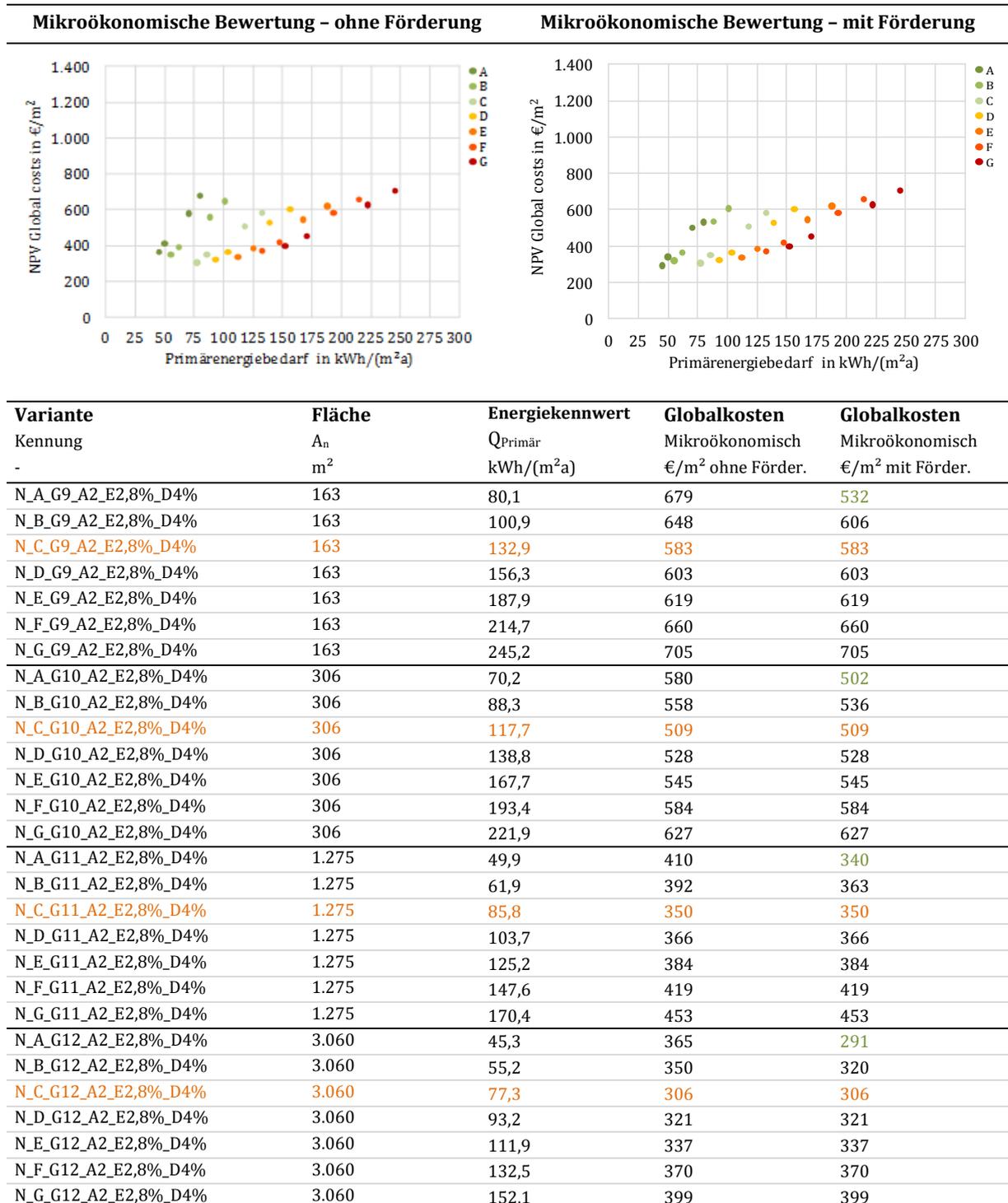
Tabelle 18: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Einfluss von Subventionen (indikative Auswertung)

Für Wohngebäude können nach aktueller Gesetzgebung Förderungen für Niedrigenergie- und Passivhäuser gewährt werden. Folgende Analyse zeigt den Einfluss der Förderung auf die Gesamtwirtschaftlichkeit. Die berechneten Globalkosten von Niedrigenergiehäusern (Klasse B) liegen nun etwa auf dem gleichen Niveau wie bei Gebäuden, die nach den aktuellen Anforderungen (Klasse C) errichtet werden. Bei Passivhäusern ergeben sich aufgrund der etwas höheren Förderung die geringsten Globalkosten. Dies spiegelt den bewusst gewährten finanziellen Anreiz zum Bau von Passivhäusern wider [22].

Tabelle 19: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – Subventionen.



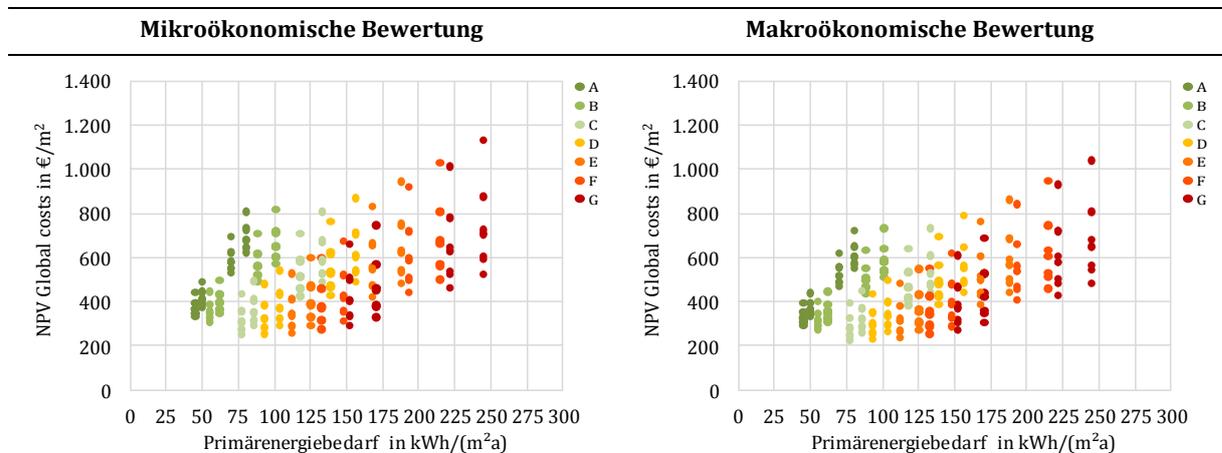
## Einfluss der Entwicklungsszenarien

Je nach den zugrundeliegenden Annahmen bezüglich der wirtschaftlichen Entwicklung und der Energiepreissteigerung ergeben sich unterschiedliche Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit des betrachteten Systems. Folgende Bilder zeigen zunächst eine Übersicht aller analysierten Varianten. Dabei werden die Parameter für Energiepreissteigerung und Kapitalzins für jedes Gebäude und jede Wärmeschutzklasse ausgewertet. Die vertikale Spreizung einer gleichfarbigen Kurvenschar spiegelt den Einfluss der sensiblen Parameter auf die jeweilige Variante des Wärmeschutzes wider.

Auf mikro- und makroökonomischer Ebene zeigt sich in der Tendenz eine größere Spreizung bei Gebäuden mit schlechterem Wärmeschutz (Klassen D bis G) als bei Gebäuden mit hohem Wärmeschutzniveau (Klassen A bis C). Mit besserem Wärmeschutz reduziert sich der Einfluss der sensiblen Parameter auf die Globalkosten.

Da die wirtschaftliche Entwicklung nur schwer vorausgesagt werden kann, bedeutet eine geringere Abhängigkeit eine gewisse finanzielle Planungssicherheit bzw. ein geringeres Risiko.

Tabelle 20: Wohngebäude – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch

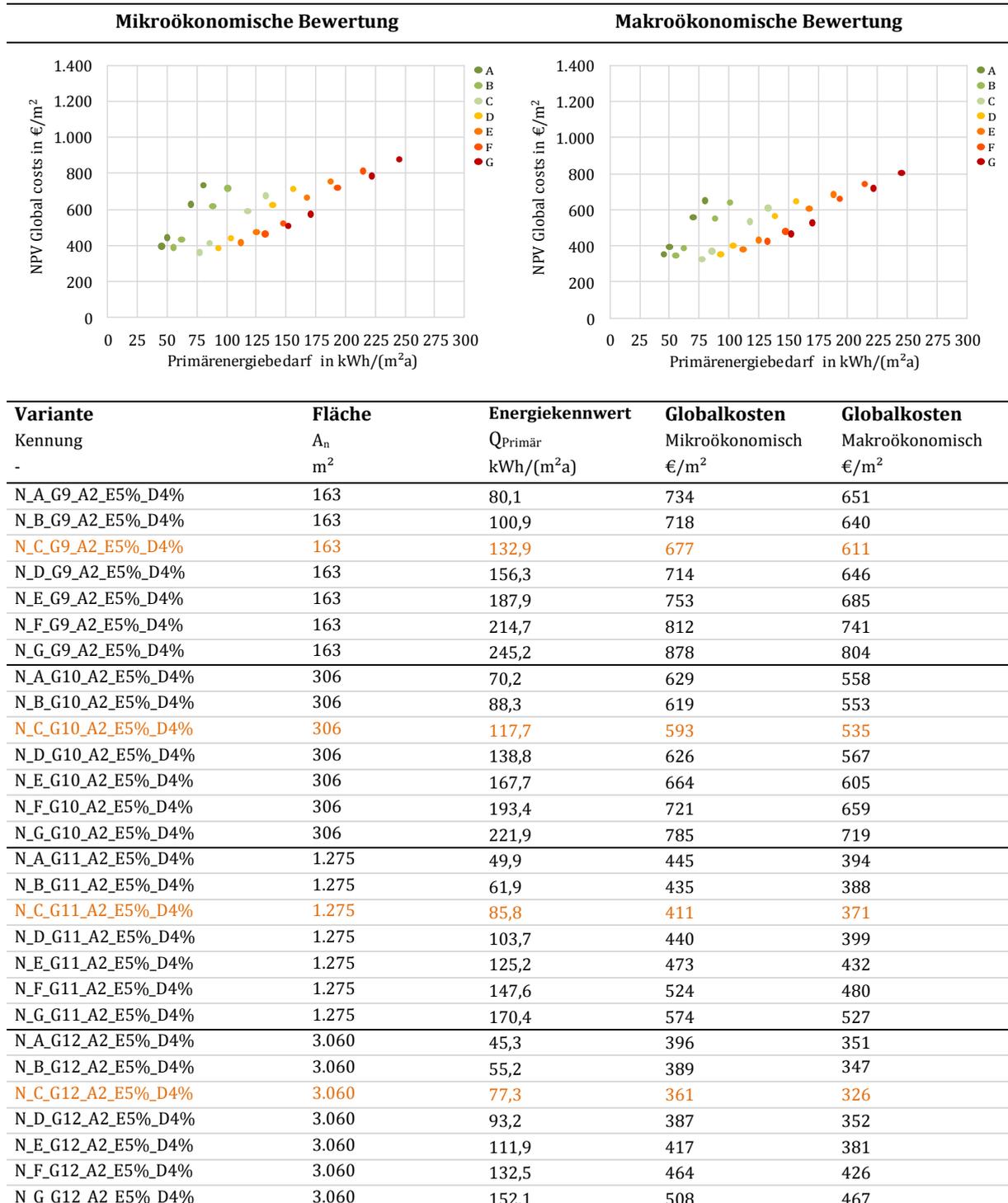


Die kombinierte Bewertung einzelner Szenarien wird in folgendem Abschnitt diskutiert.

## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreissteigerung (5 %/a) bei moderatem Kapitalzins (4 %) ausgegangen (siehe Tabelle 17). Vergleicht man die Ergebnisse mit dem Standardszenario 1, zeigt sich, dass sich bei Gebäuden mit schlechterem Wärmeschutz höhere Globalkosten ergeben, wohingegen sich bei Gebäuden mit einem hohen Wärmeschutzniveau die Globalkosten reduzieren. Eine starke Energiepreissteigerung führt bei Gebäuden mit schlechterem Wärmeschutz allgemein zu höheren Globalkosten. Das kostenoptimale Niveau ändert sich nicht.

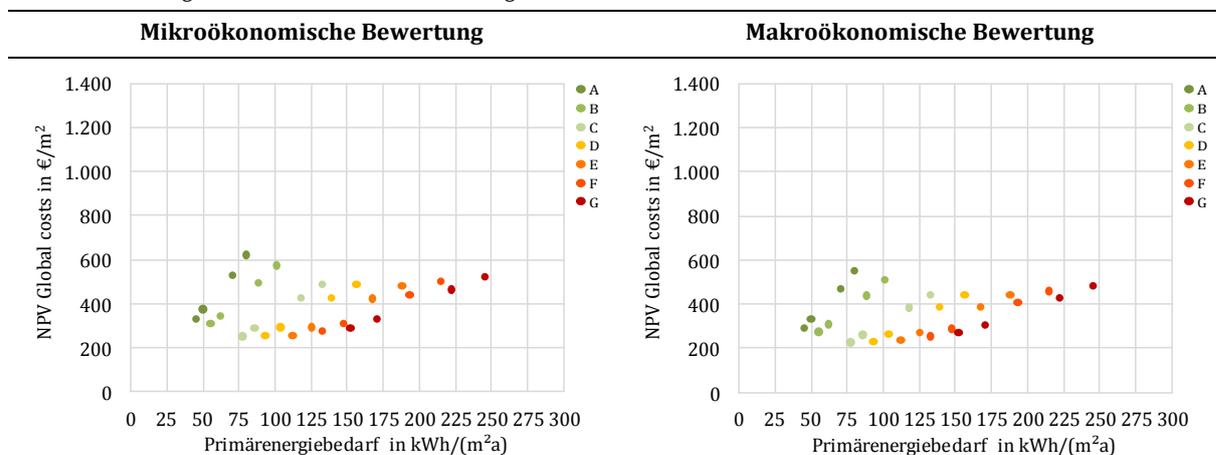
Tabelle 21: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird gemäß Tabelle 17 von einer geringen Energiepreisssteigerung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Dadurch reduziert sich der Einfluss der Energiekosten und die Investitionskosten erreichen eine größere Gewichtung in den Globalkosten. Das Wärmeschutzniveau C entspricht für die Gebäude G11 und G12 dem kostenoptimalen Niveau, bei den Gebäude G9 und G10 tritt eine Verschiebung und in Richtung eines ineffizienteren Standards auf; wobei der Verlauf der Globalkosten sehr flach ist.

Tabelle 22: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.

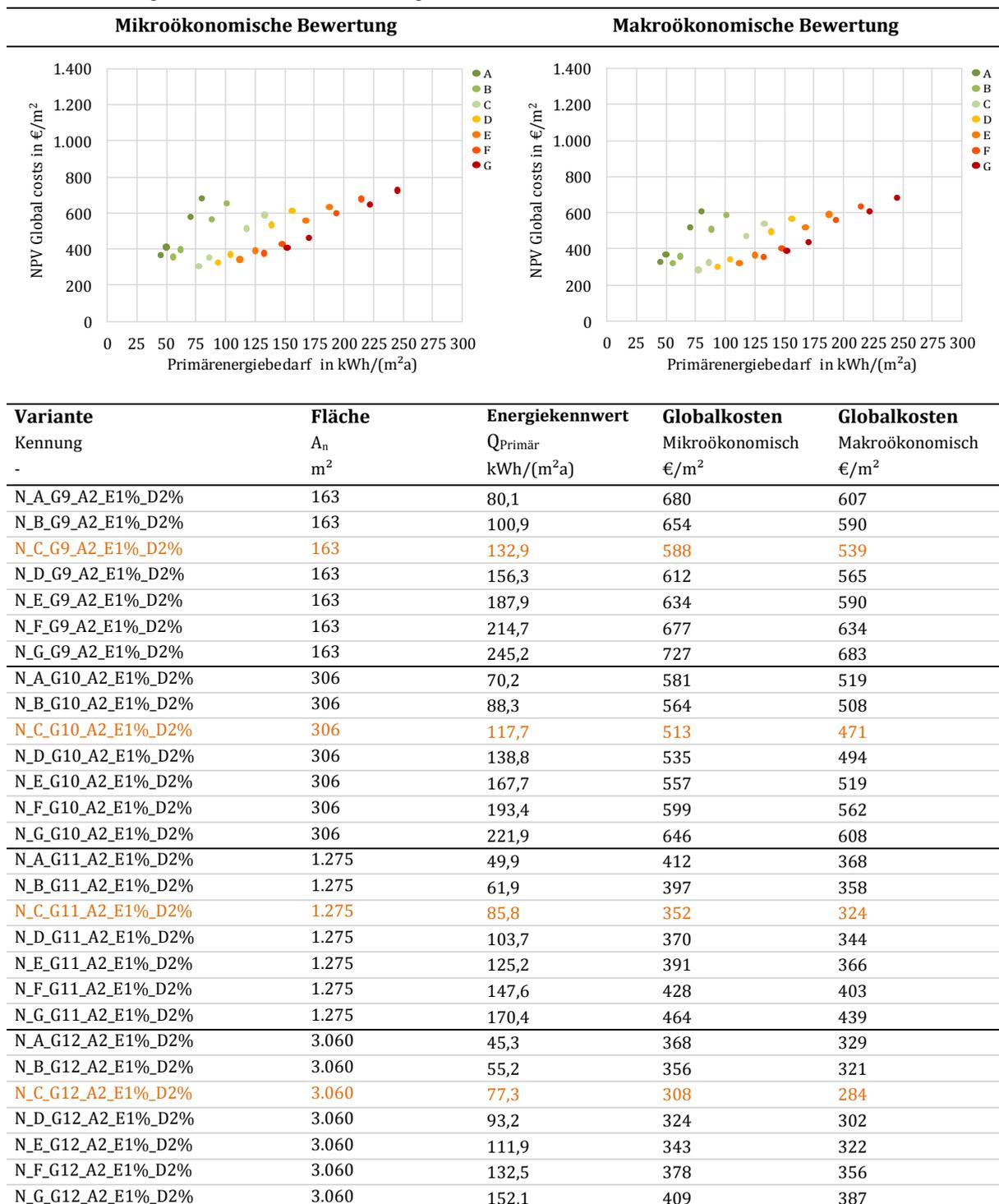


| Variante<br>Kennung       | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|---------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                           |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| N_A_G9_A2_E1%_D6%         | 163  | 80,1   | 622                                 | 550                                 |
| N_B_G9_A2_E1%_D6%         | 163  | 100,9  | 573                                 | 510                                 |
| <b>N_C_G9_A2_E1%_D6%</b>  | <b>163</b>                                 | <b>132,9 (-29,3 %)</b>   | <b>488</b>                          | <b>440</b>                          |
| N_D_G9_A2_E1%_D6%         | 163  | 156,3  | 490                                 | 444                                 |
| N_E_G9_A2_E1%_D6%         | 163  | 187,9  | 481                                 | 440                                 |
| N_F_G9_A2_E1%_D6%         | 163  | 214,7  | 501                                 | 460                                 |
| N_G_G9_A2_E1%_D6%         | 163  | 245,2  | 523                                 | 483                                 |
| N_A_G10_A2_E1%_D6%        | 306  | 70,2   | 531                                 | 469                                 |
| N_B_G10_A2_E1%_D6%        | 306  | 88,3   | 493                                 | 439                                 |
| <b>N_C_G10_A2_E1%_D6%</b> | <b>306</b>                                 | <b>117,7 (-29,8 %)</b>   | <b>425</b>                          | <b>383</b>                          |
| N_D_G10_A2_E1%_D6%        | 306  | 138,8  | 428                                 | 388                                 |
| N_E_G10_A2_E1%_D6%        | 306  | 167,7  | 422                                 | 386                                 |
| N_F_G10_A2_E1%_D6%        | 306  | 193,4  | 442                                 | 407                                 |
| N_G_G10_A2_E1%_D6%        | 306  | 221,9  | 464                                 | 429                                 |
| N_A_G11_A2_E1%_D6%        | 1.275                                      | 49,9   | 375                                 | 331                                 |
| N_B_G11_A2_E1%_D6%        | 1.275                                      | 61,9   | 347                                 | 308                                 |
| <b>N_C_G11_A2_E1%_D6%</b> | <b>1.275</b>                               | <b>85,8</b>  | <b>290</b>                          | <b>262</b>                          |
| N_D_G11_A2_E1%_D6%        | 1.275                                      | 103,7  | 292                                 | 266                                 |
| N_E_G11_A2_E1%_D6%        | 1.275                                      | 125,2  | 294                                 | 270                                 |
| N_F_G11_A2_E1%_D6%        | 1.275                                      | 147,6  | 312                                 | 289                                 |
| N_G_G11_A2_E1%_D6%        | 1.275                                      | 170,4  | 329                                 | 306                                 |
| N_A_G12_A2_E1%_D6%        | 3.060                                      | 45,3   | 332                                 | 294                                 |
| N_B_G12_A2_E1%_D6%        | 3.060                                      | 55,2   | 309                                 | 275                                 |
| <b>N_C_G12_A2_E1%_D6%</b> | <b>3.060</b>                               | <b>77,3</b>  | <b>251</b>                          | <b>227</b>                          |
| N_D_G12_A2_E1%_D6%        | 3.060                                      | 93,2   | 255                                 | 232                                 |
| N_E_G12_A2_E1%_D6%        | 3.060                                      | 111,9  | 257                                 | 236                                 |
| N_F_G12_A2_E1%_D6%        | 3.060                                      | 132,5  | 275                                 | 254                                 |
| N_G_G12_A2_E1%_D6%        | 3.060                                      | 152,1  | 290                                 | 269                                 |

### Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig geringer Energiepreissteigerung (1 %/a). Vergleicht man die Ergebnisse dieses Szenarios mit denen der Basisvariante (S1), entspricht dies am ehesten einer Parallelverschiebung der Trends; wobei Gebäude mit dem Wärmeschutzniveau C auch in etwa dem kostenoptimalen Niveau entsprechen. Bei der makroökonomischen Bewertung zeigt sich eine leichte Abflachung des Trends, da ein Teil der Emissionen als CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten gegengerechnet werden.

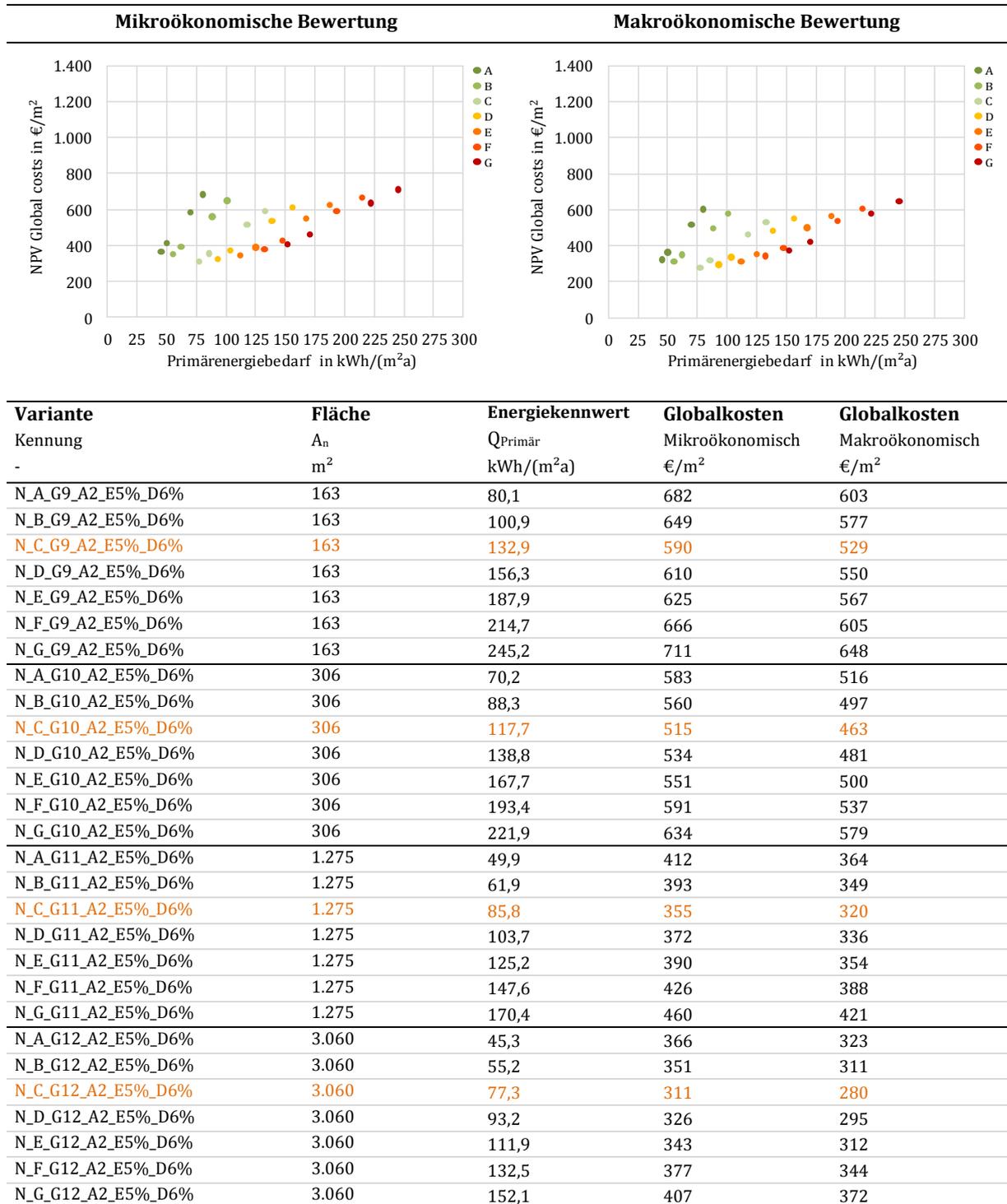
Tabelle 23: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höheren Kapitalzinsen (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum weiterhin bei etwa dem Wärmeschutzniveau C. Allerdings zeigt sich insgesamt der Trend, dass Gebäude mit höherem Wärmeschutzniveau von den Gesamtkosten weniger stark ansteigen als in der Basisvariante (S1).

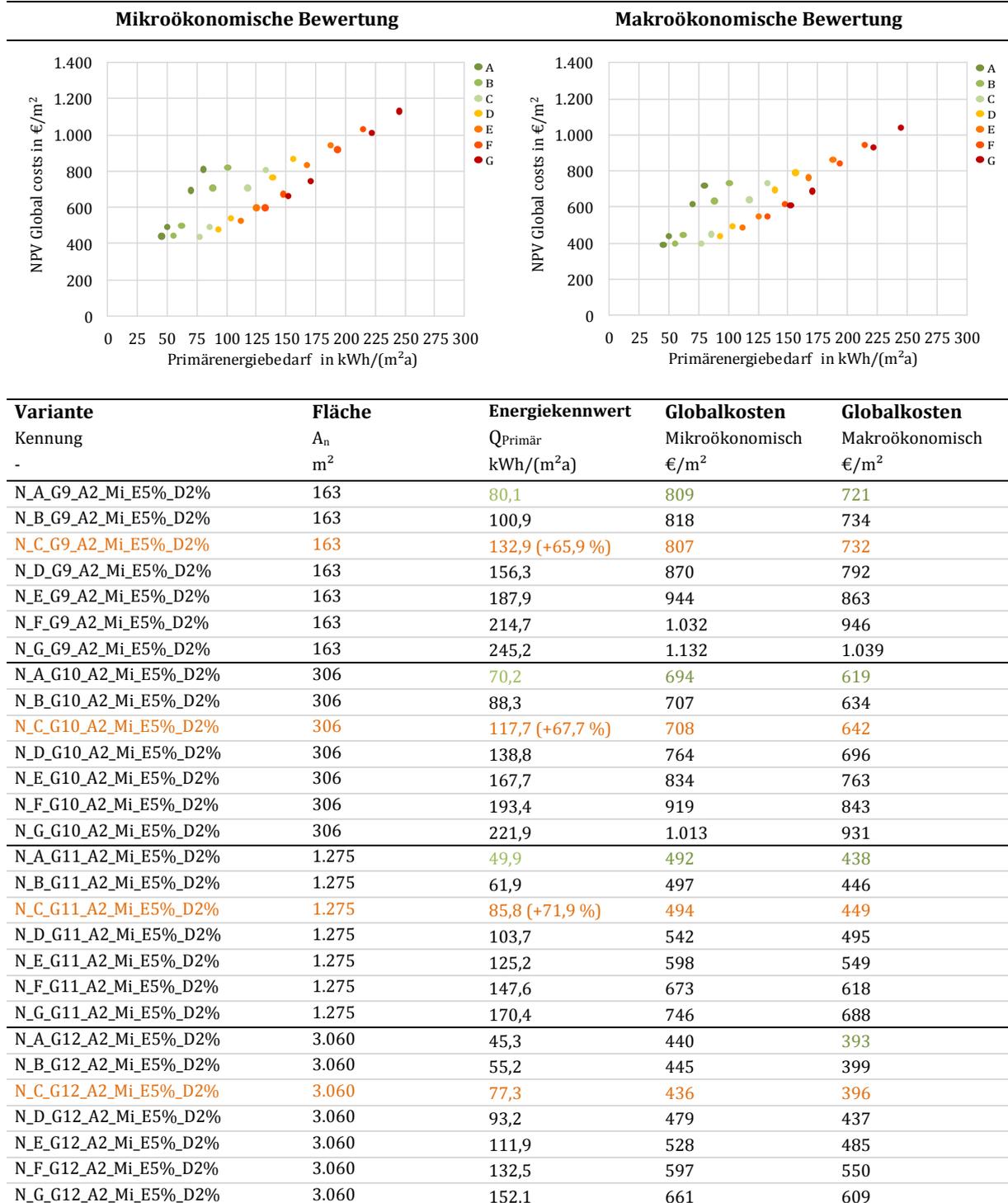
Tabelle 24: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 beschreibt eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigem Kapitalzinsniveau (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). Es zeigt sich, dass die Energiekosten einen großen Einfluss auf die Globalkosten haben. In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum überwiegend beim energieeffizienteren Wärmeschutzniveau A.

Tabelle 25: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.

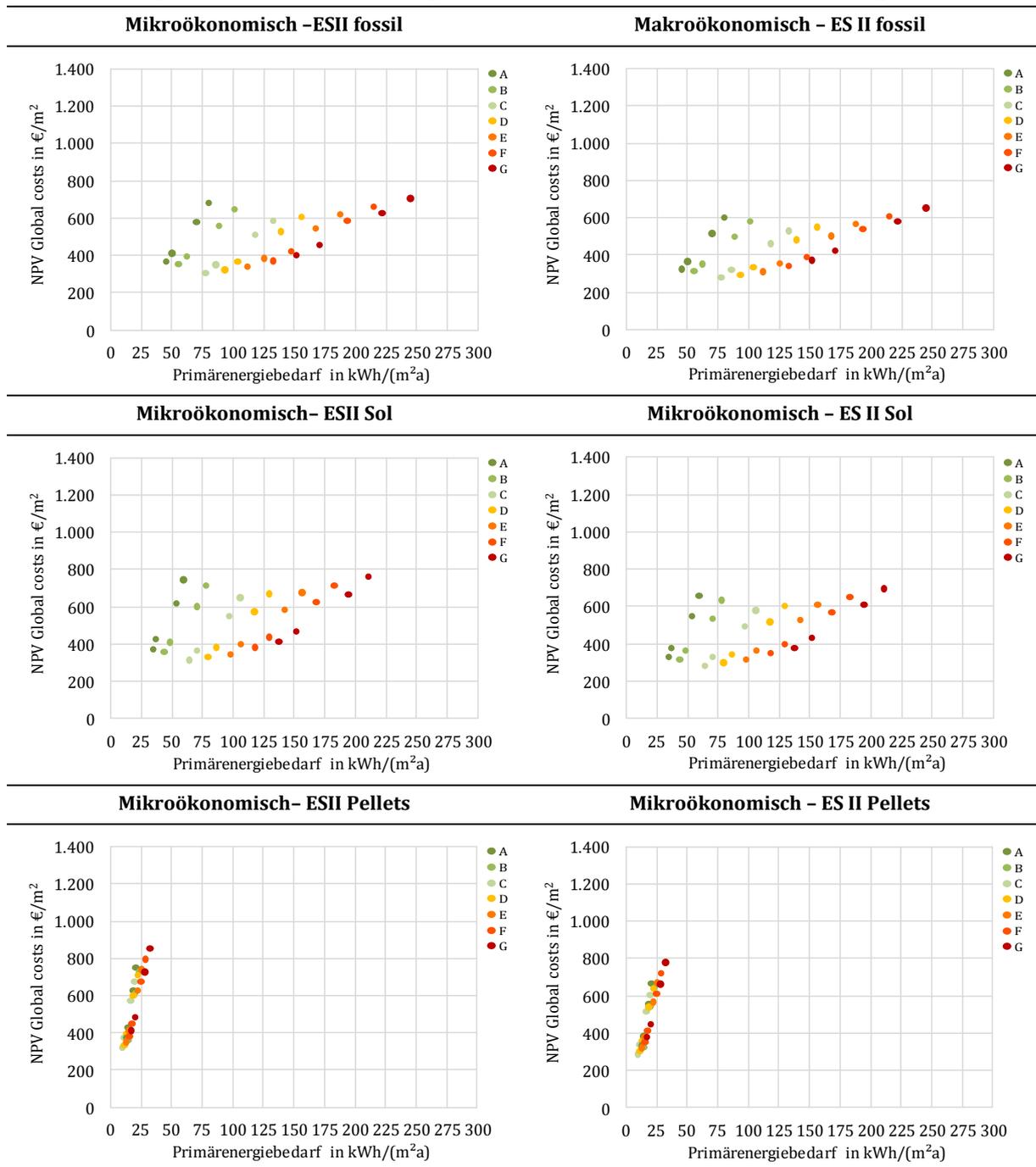


### 4.1.1.2 Anlagentechnik – Stufe II

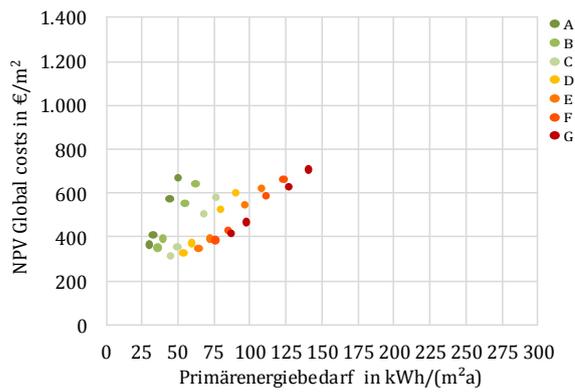
Zur Begrenzung der darzustellenden Varianten wird im ersten Untersuchungsgang der Einfluss des Wärmeschutzes für alle Gebäude und alle Anlagentechniken untersucht. Es zeigt sich, dass in den meisten Fällen auch der Wärmeschutzstandard C bei allen Anlagentechniken im Bereich des wirtschaftlichen Optimums liegt. Aufbauend auf dieser Erkenntnis werden für den direkten Vergleich der Anlagentechniken unter Zugrundelegung der Ausführung des Gebäudes im Wärmeschutzniveau C durchgeführt.

## Anlagenvergleich über alle Wärmeschutzklassen

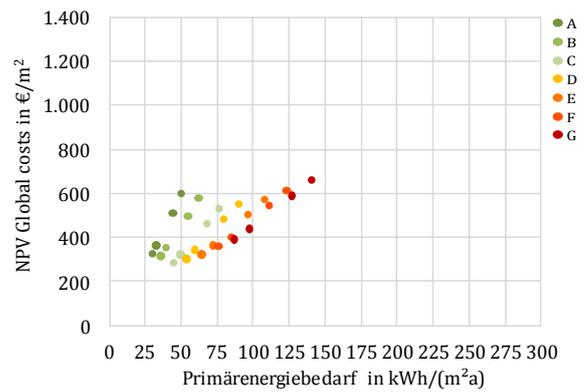
Tabelle 26: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechniken.



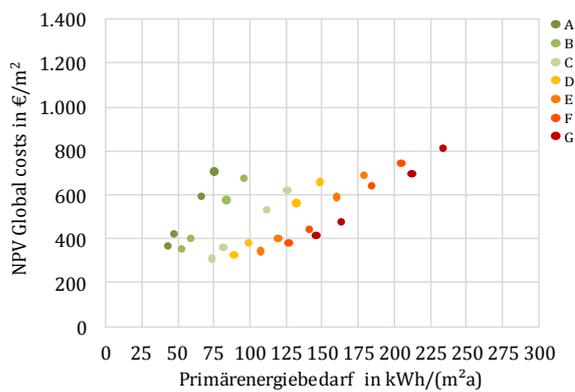
**Mikroökonomisch- ESII FW**



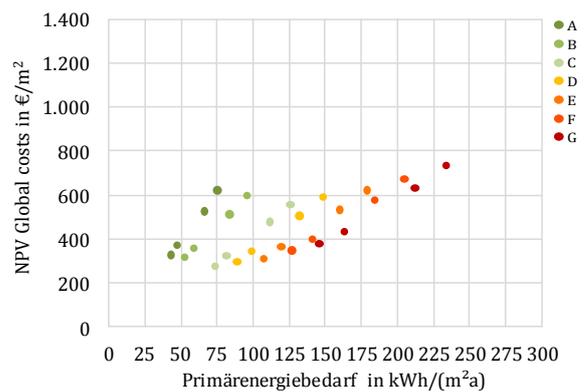
**Mikroökonomisch - ES II FW**



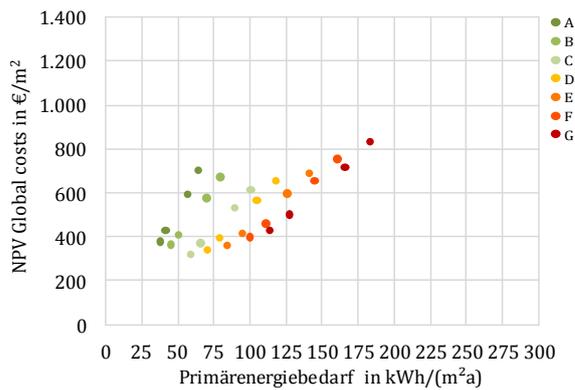
**Mikroökonomisch- ESII LWP**



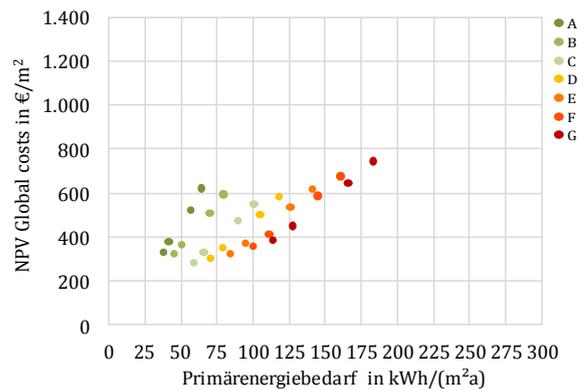
**Mikroökonomisch - ES II LWP**



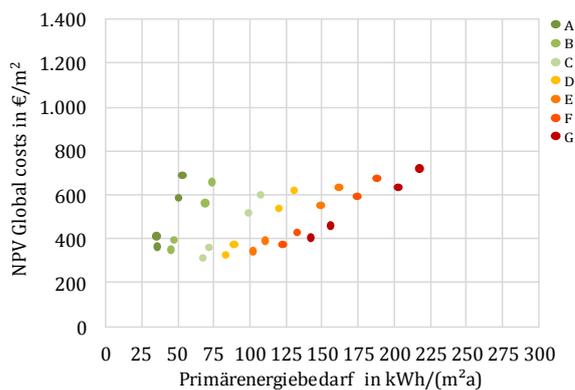
**Mikroökonomisch- ESII Geo**



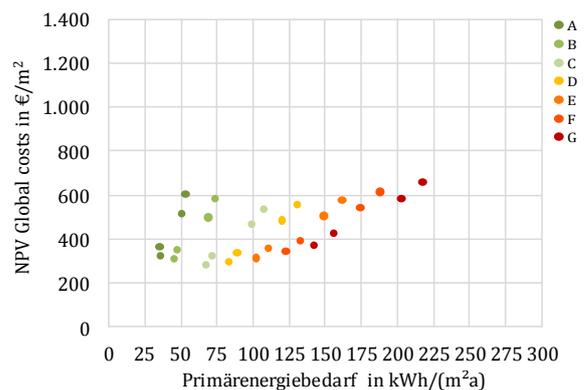
**Mikroökonomisch - ES II Geo**



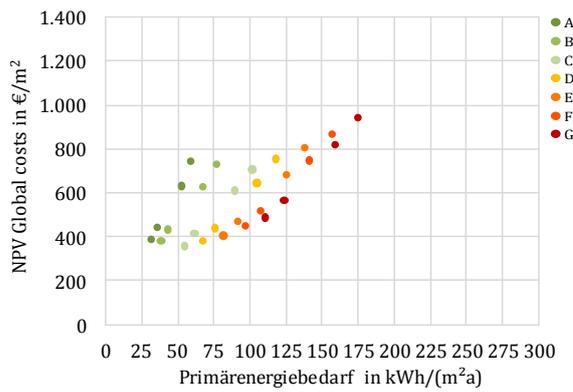
**Mikroökonomisch- ESII PV**



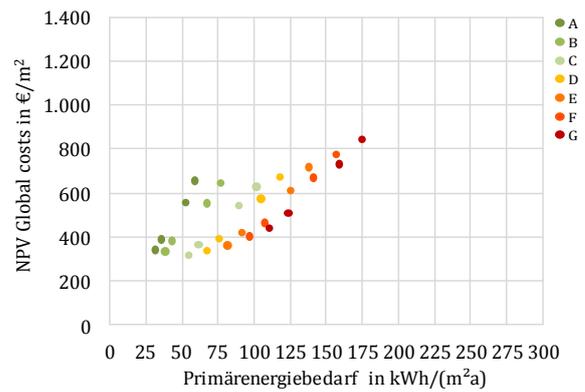
**Mikroökonomisch - ES II PV**



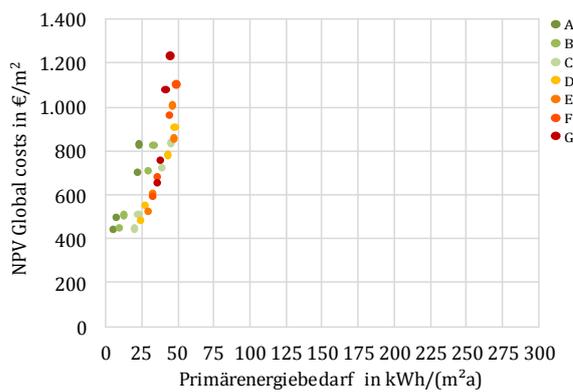
**Mikroökonomisch- ESII KWK**



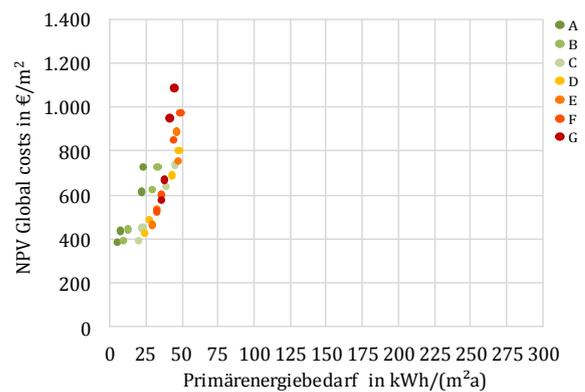
**Mikroökonomisch - ES II KWK**



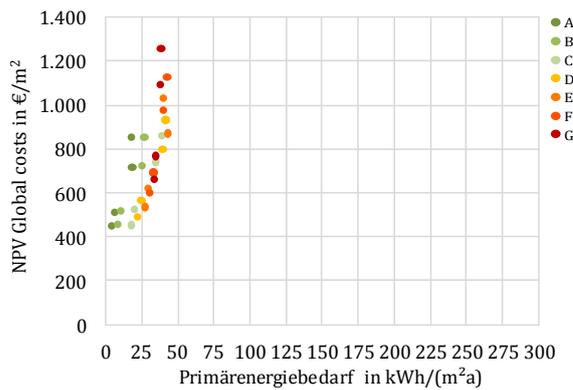
**Mikroökonomisch- ESII KWKBio**



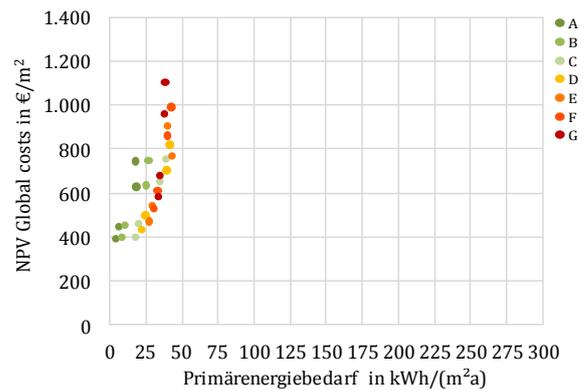
**Mikroökonomisch - ES II KWKBio**



**Mikroökonomisch- ESII KWKBio\_PV**



**Mikroökonomisch - ES II KWKBio\_PV**



### Zwischenfazit

Über alle Technologien, die in jedem Neubau genutzt werden können<sup>45</sup>, ist die Wärmeschutzklasse C i. d. R. kostenoptimal. Zum direkten Vergleich des Einflusses der Anlagentechnik und verschiedener Energieträger wird der Vergleich auf der Basis eines Gebäudes der Wärmeschutzklasse C durchgeführt.

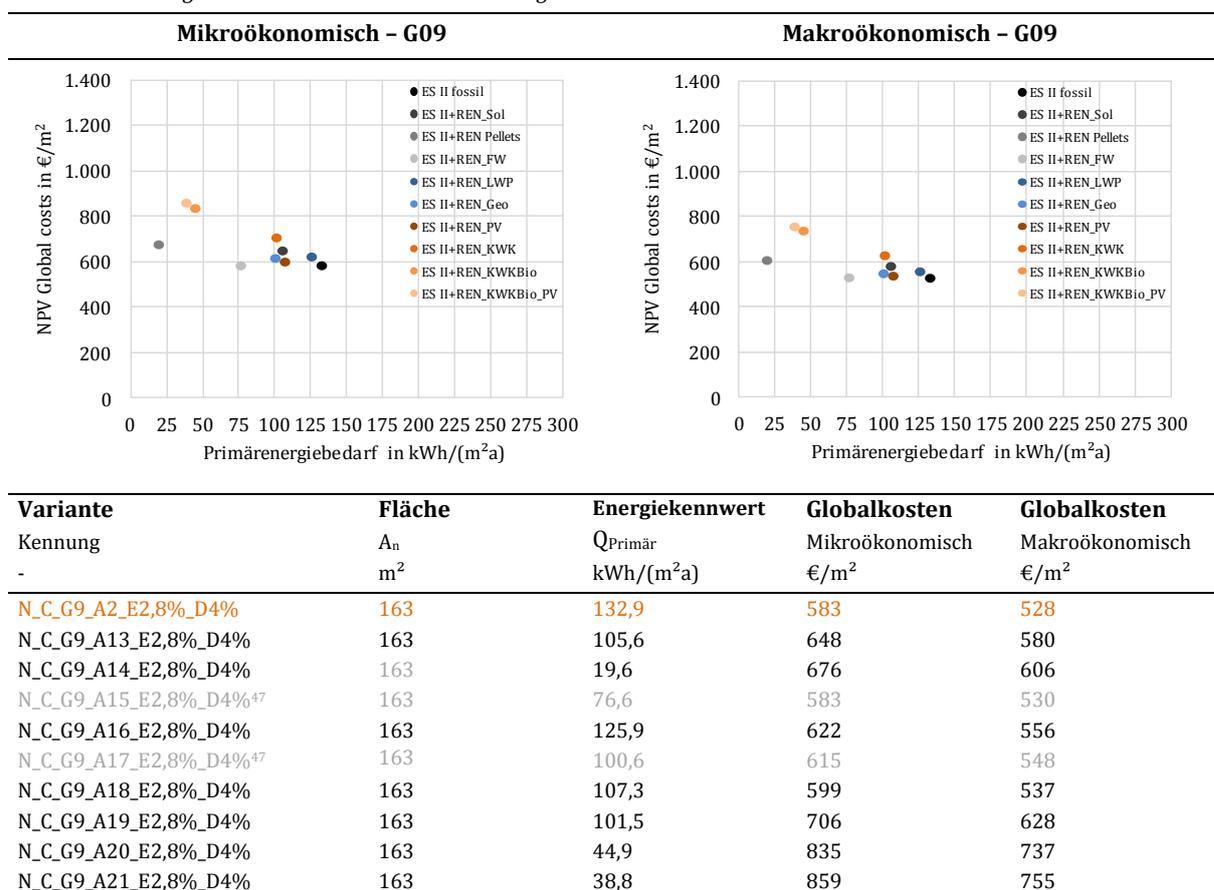
<sup>45</sup> Folgende Technologien sind aus genehmigungsrechtlichen Gründen oder aus Gründen des Nichtvorhandenseins der Technologie/Energieträger an jedem Standort in Luxemburg nicht in die Bewertung einzubeziehen: Fernwärme, Gas, Wärmepumpe auf der Basis von Geothermie, KWK.

## Anlagenvergleich für Wärmeschutzklasse C

Zur besseren Darstellung wird der Einfluss der angesetzten Anlagentechnik für jedes Gebäude separat gezeigt. Es wird unterstellt, dass das Gebäude im Wärmeschutzniveau C ausgeführt ist. Für das Gebäude 9 zeigt sich, dass ein Brennwertkessel basierend auf einem fossilen Energieträger die geringsten Gesamtkosten aufweist. Dieses Heizsystem entspricht den derzeitigen Anforderungen an neue Gebäude. Die Technologien *Fernwärme (FW)* und *Wärmepumpe mit Geothermie (Geo)* sind nicht für jeden Standort verfügbar und müssen bei der Bestimmung der gesetzlichen Anforderungen ausgeklammert werden, denn die Anforderungen an neue Gebäude müssen für jeden Standort realisierbar bleiben. Der Anforderungswert für die kostenoptimale Variante erfolgt nur für die Technologien, die überall umsetzbar sind.

Eine PV-Anlage hat einen moderaten Einfluss auf die Gesamtkosten bei gleichzeitiger signifikanter Reduzierung des Primärenergiebedarfs<sup>46</sup>. Die Ausprägung der Anlagentechnik auf die Gesamtkosten verläuft für alle vier Gebäude ähnlich; jedoch auf unterschiedlich hohem Niveau.

Tabelle 27: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.



<sup>46</sup> Die Anrechnung von PV-Strom in der Gebäudeenergiebilanz erfolgt nach den vorgesehenen Regeln für nearly zero-energy building (nZEB) auf der Basis einer Monatsbilanz in Luxemburg [6]. Der anrechenbare Anteil entspricht maximal dem monatlichen Gebäudebedarf. Es erfolgt das Prinzip der vorrangigen Eigenstromnutzung. Hierbei wird der Anteil der innerhalb des Gebäudes direkt verbraucht wird mit den vermiedenen Strombezugskosten saldiert. Überschüsse werden zum Börsenpreis - d. h. ohne eine staatlich geförderte Einspeisevergütung - bilanziert. In diesem Zusammenhang wird derzeit untersucht, wie die Förderung von Solarstromanlagen in Luxemburg über eine Investitionsbeihilfe erfolgt könnte, die in Abhängigkeit des aktuellen Marktpreises von PV-Anlagen modifiziert werden kann. Über dieses System könnte u. a. gewährleistet werden, dass die Anlagen bedarfsgerechter ausgelegt werden und der saisonale Netzstress in den Sommermonaten nicht weiter ausgebaut wird. Je höher der Anteil der Eigenstrombedarfsdeckung ist, desto wirtschaftlicher ist die PV-Anlage [8]. Eine Bewertung nach dem aktuellen System der Volleinspeisung und Vollvergütung ist im Zuge der Einführung von nearly zero-energy building als methodisch schwierig zu erachten.

Tabelle 28: Wohngebäude 10 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.

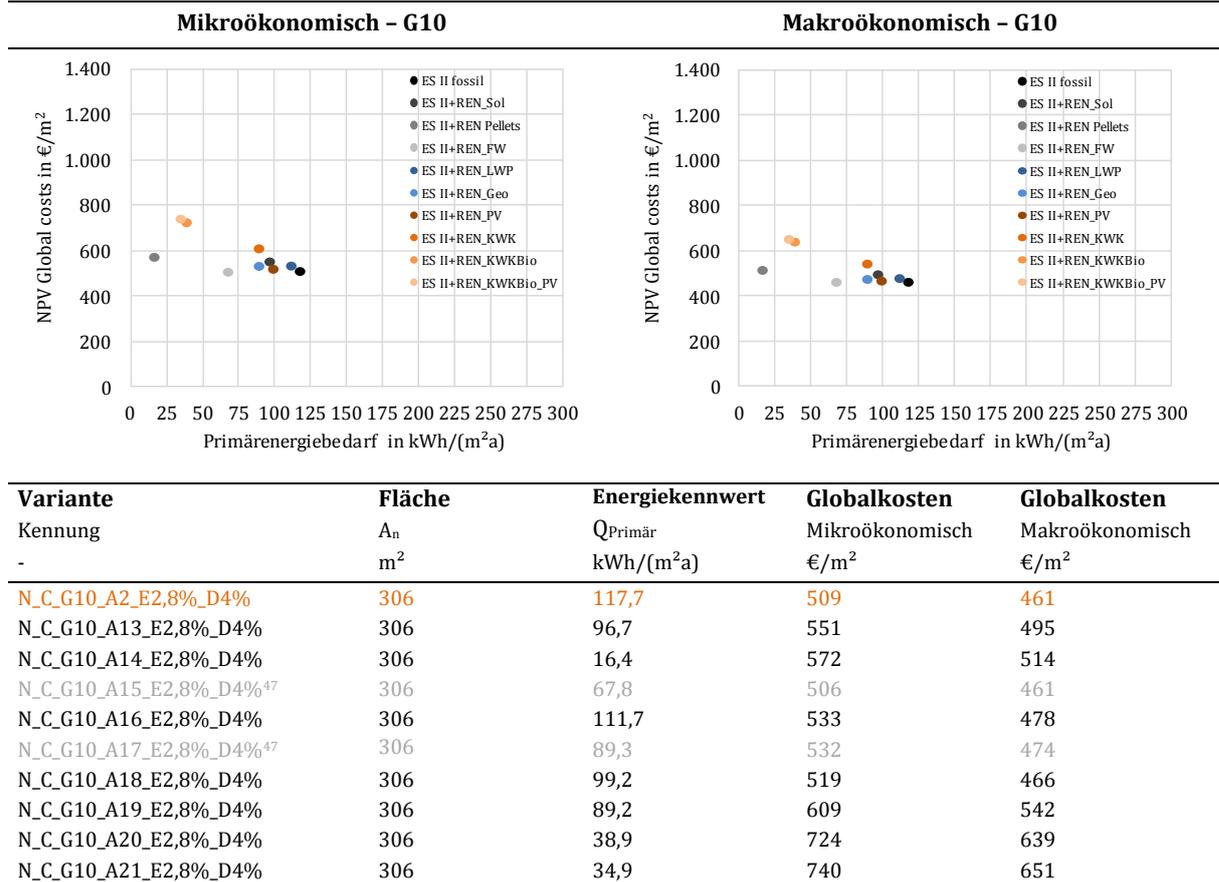


Tabelle 29: Wohngebäude 11 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.

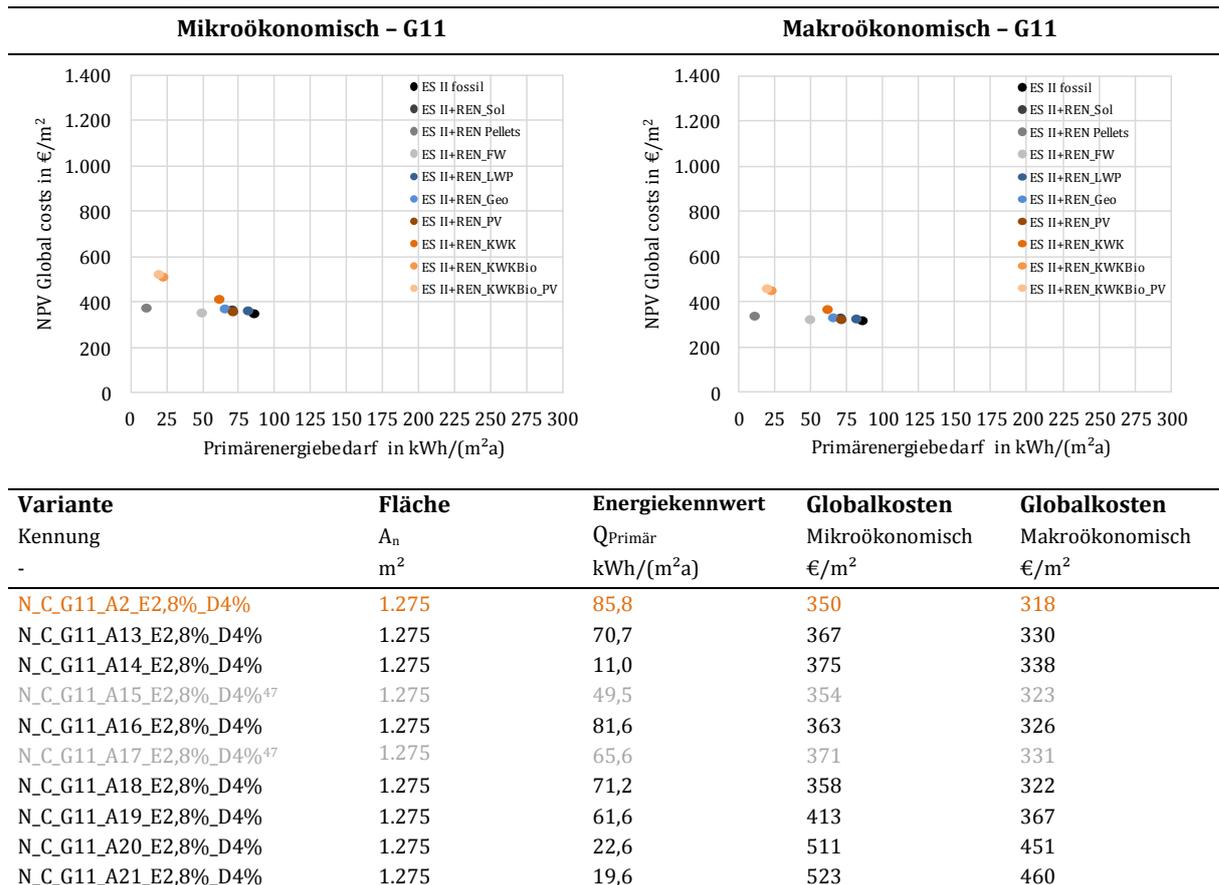
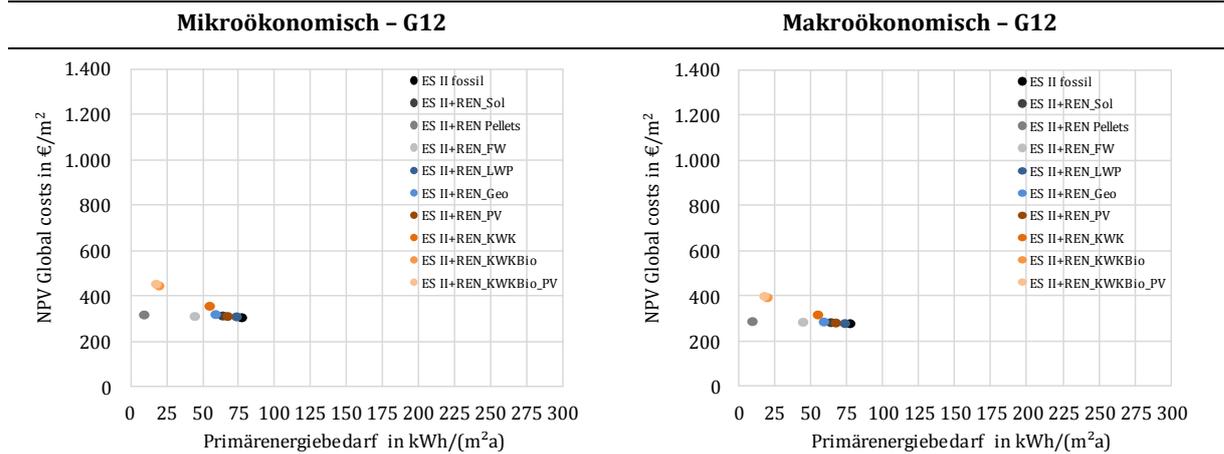


Tabelle 30: Wohngebäude 12 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.



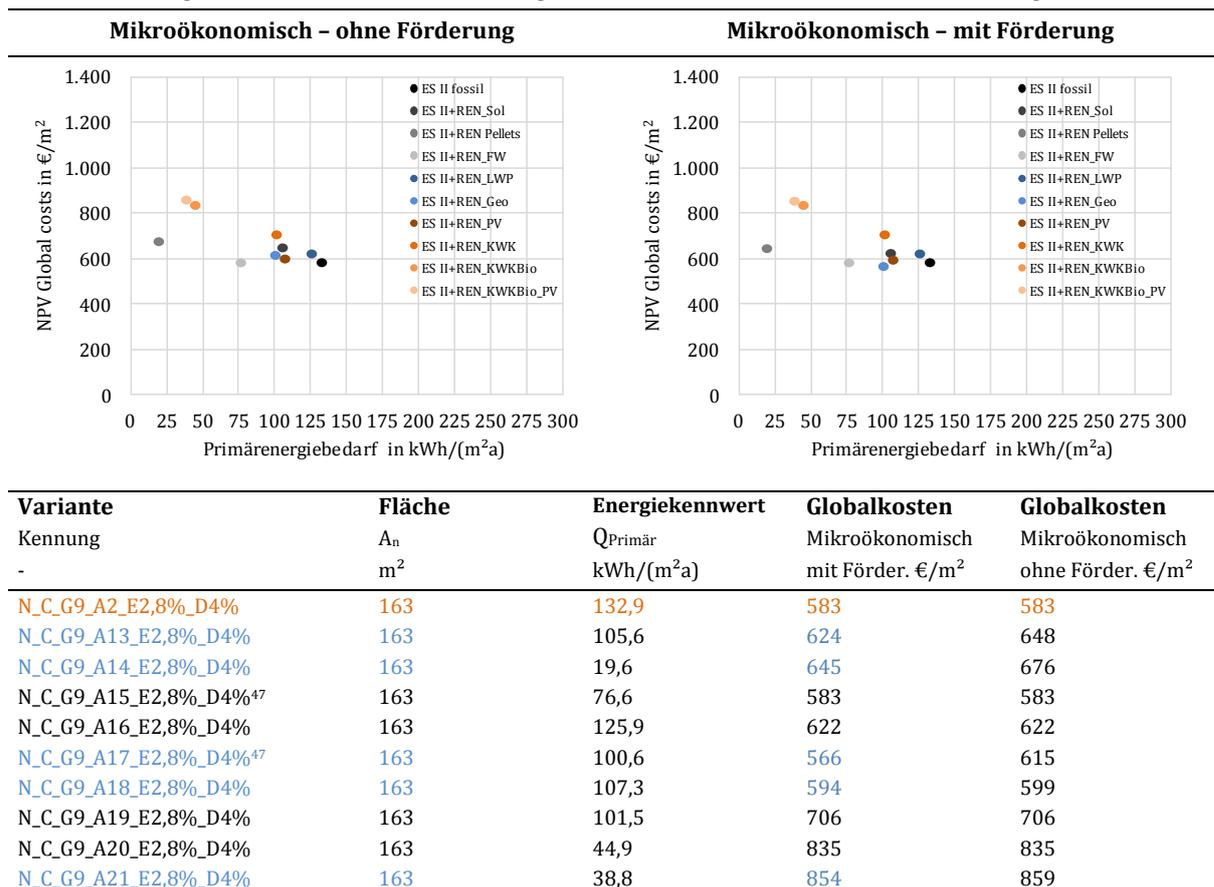
| Variante<br>Kennung                 | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|-------------------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                                     |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| N_C_G12_A2_E2,8%_D4%                | 3.060                                      | 77,3   | 306                                 | 278                                 |
| N_C_G12_A13_E2,8%_D4%               | 3.060                                      | 64,0   | 313                                 | 283                                 |
| N_C_G12_A14_E2,8%_D4%               | 3.060                                      | 9,4  | 318                                 | 287                                 |
| N_C_G12_A15_E2,8%_D4% <sup>47</sup> | 3.060                                      | 44,6   | 311                                 | 284                                 |
| N_C_G12_A16_E2,8%_D4%               | 3.060                                      | 73,7   | 310                                 | 278                                 |
| N_C_G12_A17_E2,8%_D4% <sup>47</sup> | 3.060                                      | 59,1   | 320                                 | 285                                 |
| N_C_G12_A18_E2,8%_D4%               | 3.060                                      | 67,4   | 311                                 | 281                                 |
| N_C_G12_A19_E2,8%_D4%               | 3.060                                      | 55,0   | 356                                 | 317                                 |
| N_C_G12_A20_E2,8%_D4%               | 3.060                                      | 19,8   | 446                                 | 393                                 |
| N_C_G12_A21_E2,8%_D4%               | 3.060                                      | 17,8   | 453                                 | 399                                 |

### Einfluss von Subventionen bei der Anlagentechnik (indikative Auswertung)

Für bestimmte Technologien werden staatliche Subventionen gewährt. Folgende Auswertung zeigt den Einfluss der Anlagenförderung auf die Wirtschaftlichkeit für die betrachteten Gebäude im Wärmeschutzstandard C. Die jeweils blau markierten Varianten entsprechen Anlagentechniken, für die eine Förderung gewährt wird. Für folgende Anlagentechniken wird eine Investitionsförderung gewährt<sup>47</sup>:

- Thermische Solaranlage (A 13)
- Pelletskessel (A 14)
- Wärmepumpe mit Geothermie (A 17)
- Photovoltaikanlage (A 18 und A 21)

Tabelle 31: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung.



<sup>47</sup> Für die Darstellung der kostenoptimalen Variante bleibt die Technologie Fernwärme (FW, A 15) unberücksichtigt. Es werden nur Varianten als kostenoptimal dargestellt, für die auch eine Förderung gewährt wird.

Tabelle 32: Wohngebäude 10 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung.

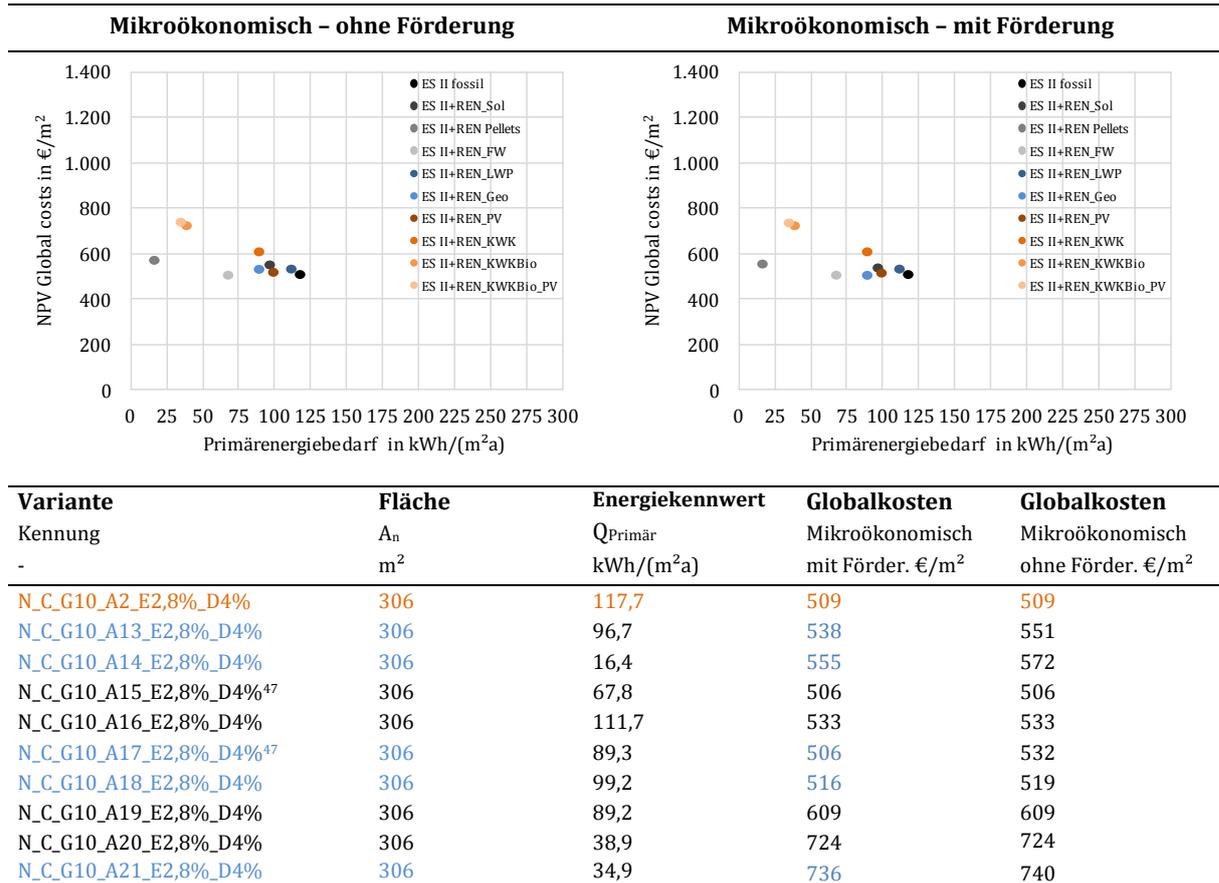


Tabelle 33: Wohngebäude 11 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung.

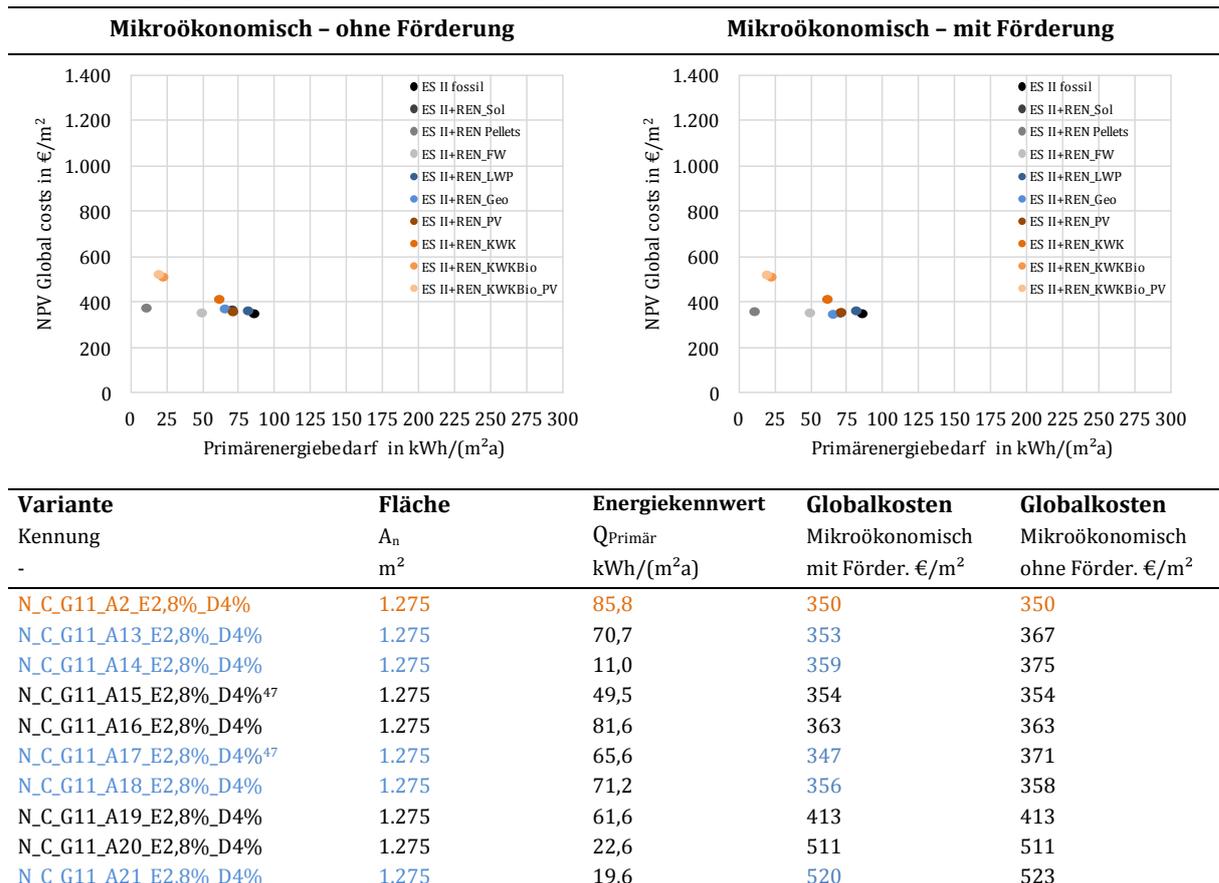
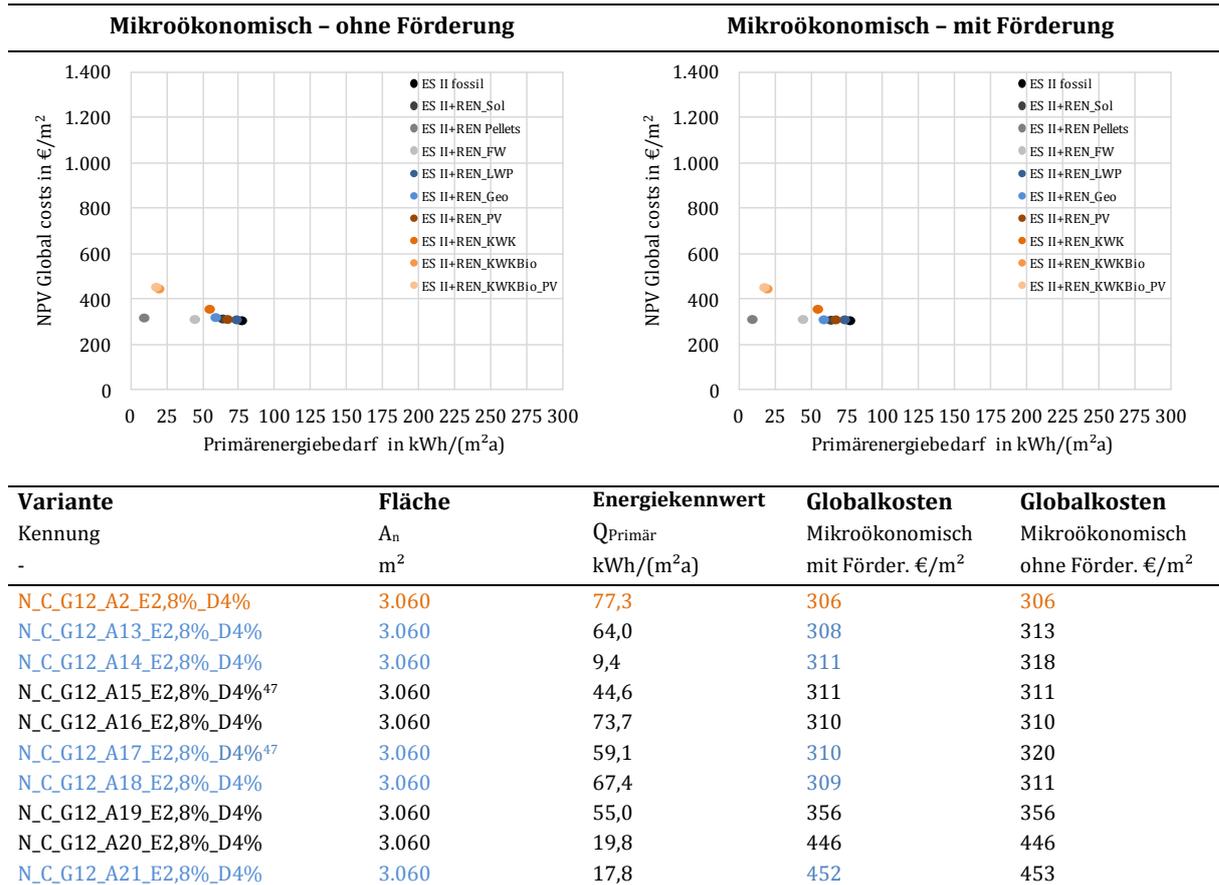


Tabelle 34: Wohngebäude 12 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung.



**Zwischenfazit**

Es zeigt sich, dass die verwendeten Technologien über alle vier betrachteten Gebäude ähnlich ausgeprägt verlaufen. Unterschiede gibt es im jeweiligen Niveau der Globalkosten. Bei kleinen Gebäuden sind die spezifischen Globalkosten höher als bei größeren Gebäuden. Die kostenoptimale Variante entspricht in allen Fällen den derzeit gültigen gesetzlichen Anforderungen und entspricht auch gleichzeitig der Variante mit dem höchsten Primärenergiebedarf.

Hinsichtlich des Einflusses staatlicher Subventionen zeigt sich, dass diese bei mikroökonomischer Betrachtung nicht für alle Fälle ausreichen, um eine vollständige Kompensation der Mehrkosten zu erreichen. Obwohl im Fall einer PV-Anlage, im berücksichtigten Bilanzkostenmodell, keine staatliche Einspeisevergütung gewährt wird (Erläuterung dazu siehe Fußnote 46, Seite 38), wird eine vergleichbar gute Gesamtwirtschaftlichkeit erreicht.

Um die darzustellenden Varianten für die Sensitivitätsanalyse einzugrenzen wird der Vergleich folgend auf das Gebäude G9 bezogen. Die sich dort ergebenden Tendenzen sind auf alle anderen Gebäude übertragbar.

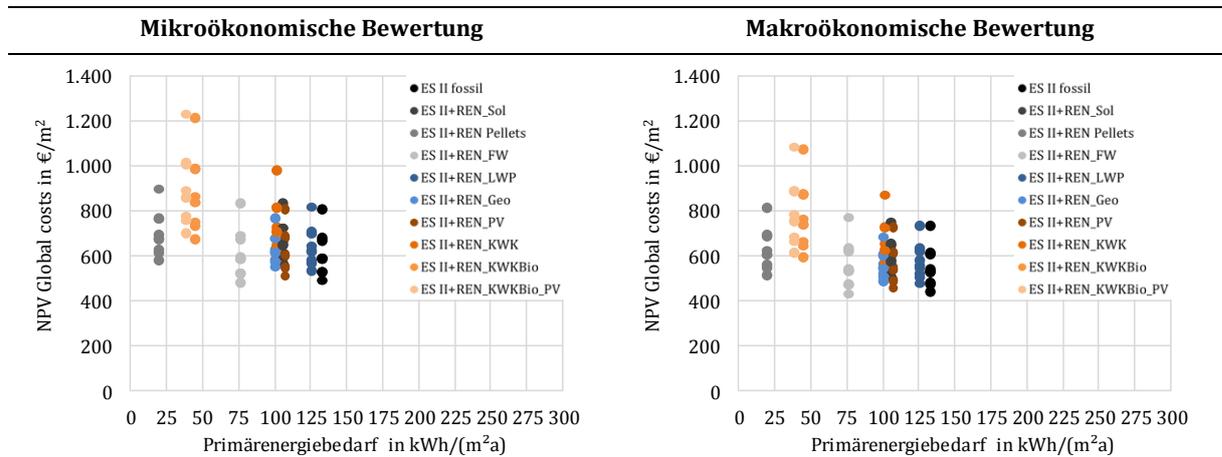
## Einfluss der Entwicklungsszenarien

Je nach den zugrundeliegenden Annahmen bezüglich der wirtschaftlichen Entwicklung und der Energiepreissteigerung ergeben sich unterschiedliche Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit des betrachteten Systems. Folgende Bilder zeigen zunächst eine Übersicht aller analysierten Varianten. Dabei werden die Parameter für Energiepreissteigerung und Kapitalzins für jedes Gebäude und jede Wärmeschutzklasse ausgewertet.

Die vertikale Spreizung einer gleichfarbigen Kurvenschar spiegelt den Einfluss der sensiblen Parameter auf die jeweilige Variante des Wärmeschutzes wider. Auf mikro- und makroökonomischer Ebene zeigt sich in der Tendenz eine größere Spreizung bei Gebäuden mit schlechterem Wärmeschutz (Klassen D - G) als bei Gebäuden mit hohem Wärmeschutzniveau (Klassen A - C).

Mit besserem Wärmeschutz reduziert sich der Einfluss der sensiblen Parameter auf die Globalkosten. Da die wirtschaftliche Entwicklung nur schwer vorausgesagt werden kann, bedeutet eine geringere Abhängigkeit eine gewisse finanzielle Sicherheit bzw. ein geringeres Risiko.

Tabelle 35: Wohngebäude 09 – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik

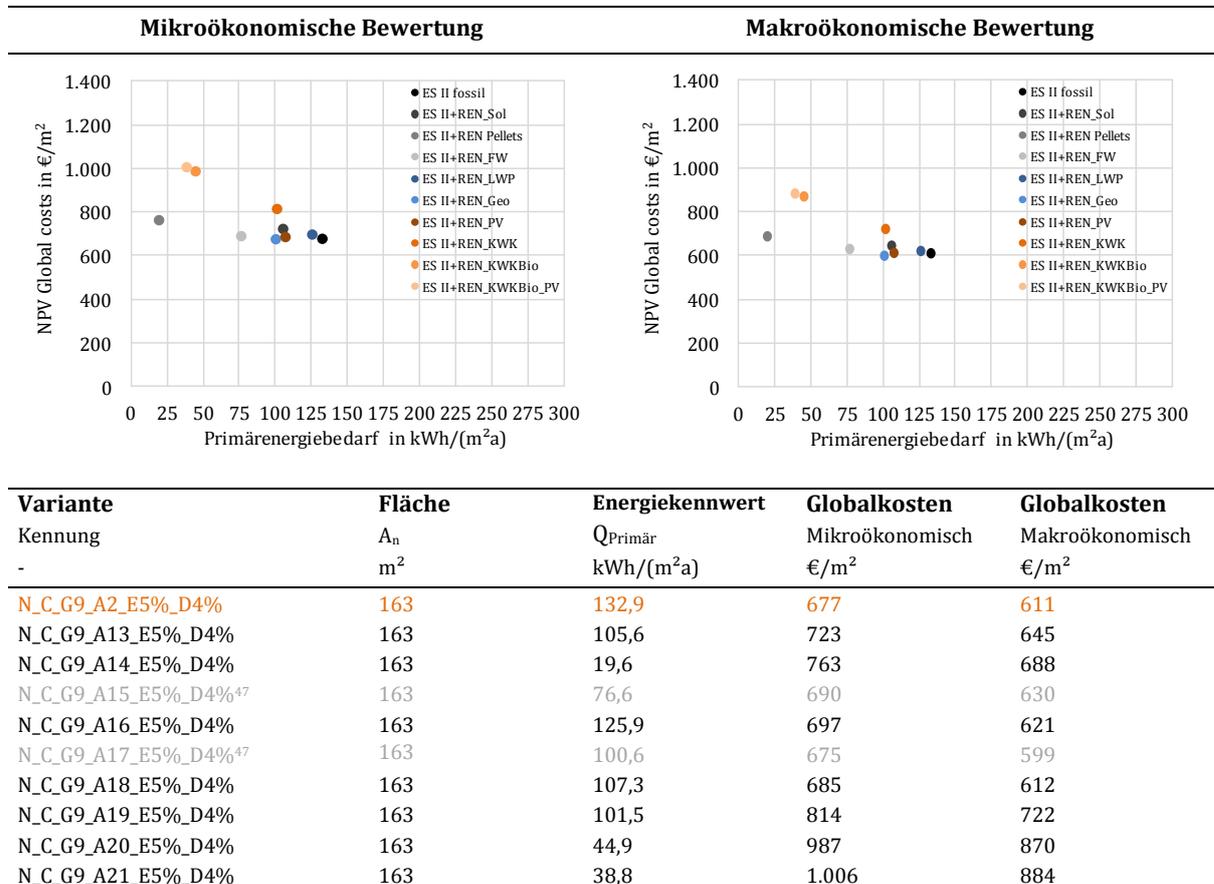


Die kombinierte Bewertung einzelner Szenarien wird in folgendem Abschnitt diskutiert.

## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreissteigerung (5 %/a) bei moderatem Kapitalzins (4 %) ausgegangen (siehe Tabelle 17). Vergleicht man die Ergebnisse mit dem Standardszenario S1, zeigt sich, ein allgemein höheres Niveau der Globalkosten. Varianten, die im Allgemeinen einen geringeren Anteil an den Energiekosten aufweisen, wie z. B. Wärmepumpen und Pelletskessel, weisen keine so stark steigende Globalkosten auf. Eine hohe Energiepreissteigerung führt bei technischen Systemen mit einem hohen Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten zu höheren Globalkosten.

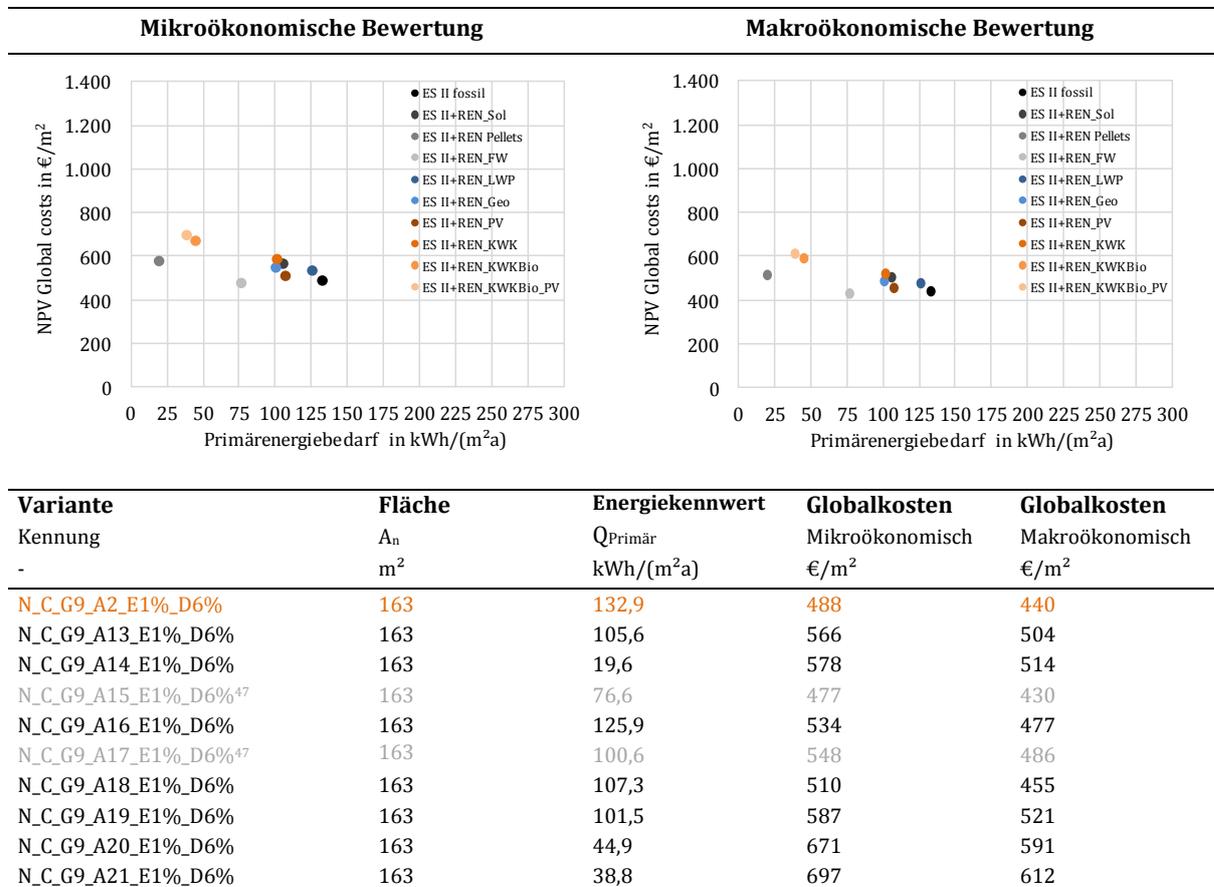
Tabelle 36: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird gemäß Tabelle 17 von einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Dadurch reduziert sich der Einfluss der Energiekosten und die Investitionskosten erreichen eine größere Gewichtung in den Globalkosten. Unter Berücksichtigung der infrage kommenden Technologien liegt die Basisvariante mit einem Kesselsystem auf einem kostenoptimalen Niveau.

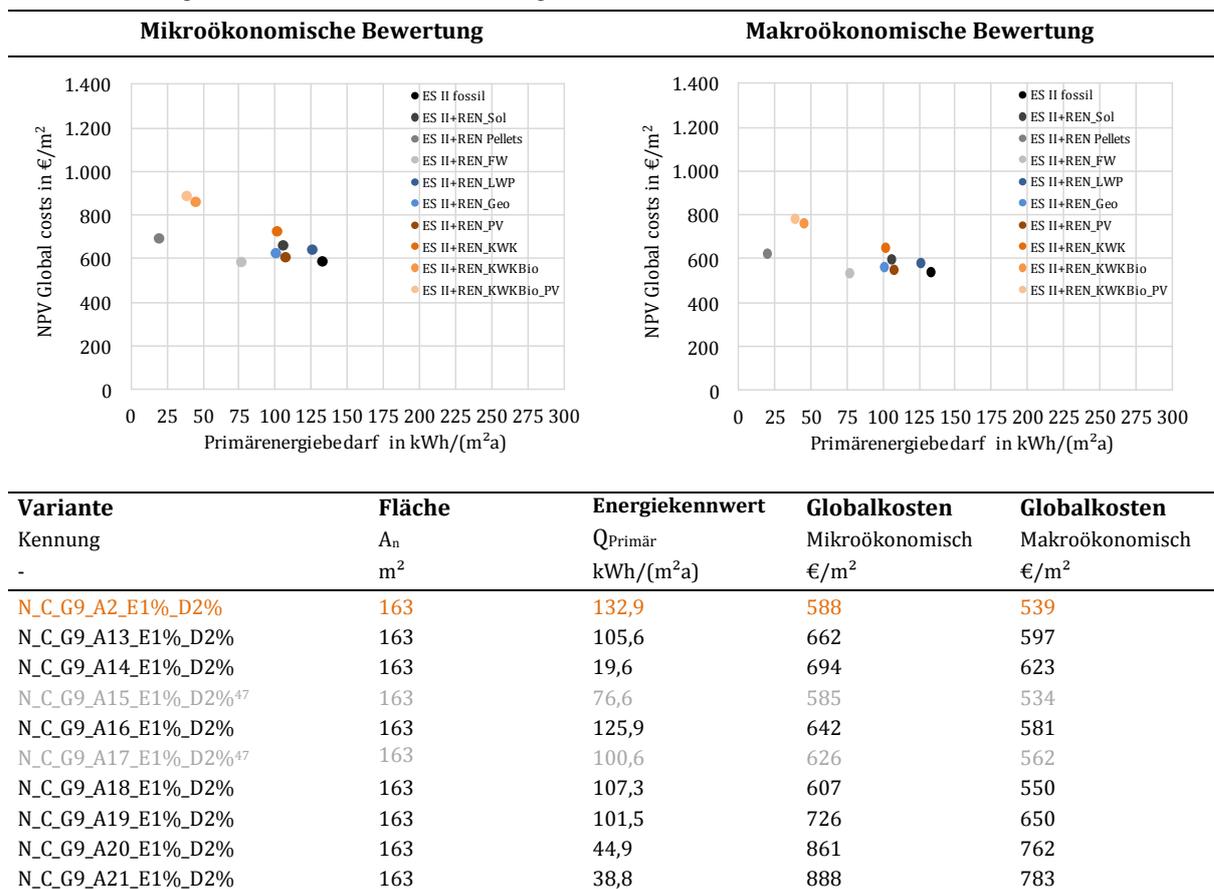
Tabelle 37: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht nach Tabelle 17 einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a). Vergleicht man die Ergebnisse dieses Szenarios mit denen der Basisvariante (S1), entspricht dies am ehesten einer Parallelverschiebung der Trends; wobei auch die Basisvariante in etwa dem kostenoptimalen Niveau entspricht. Bei der makroökonomischen Bewertung zeigt sich eine leichte Abflachung des Trends, da neben dem Steuereinfluss ein Teil der Emissionen als CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten gegengerechnet werden. Der größte Einfluss ist hier beim Pelletskessel auszumachen.

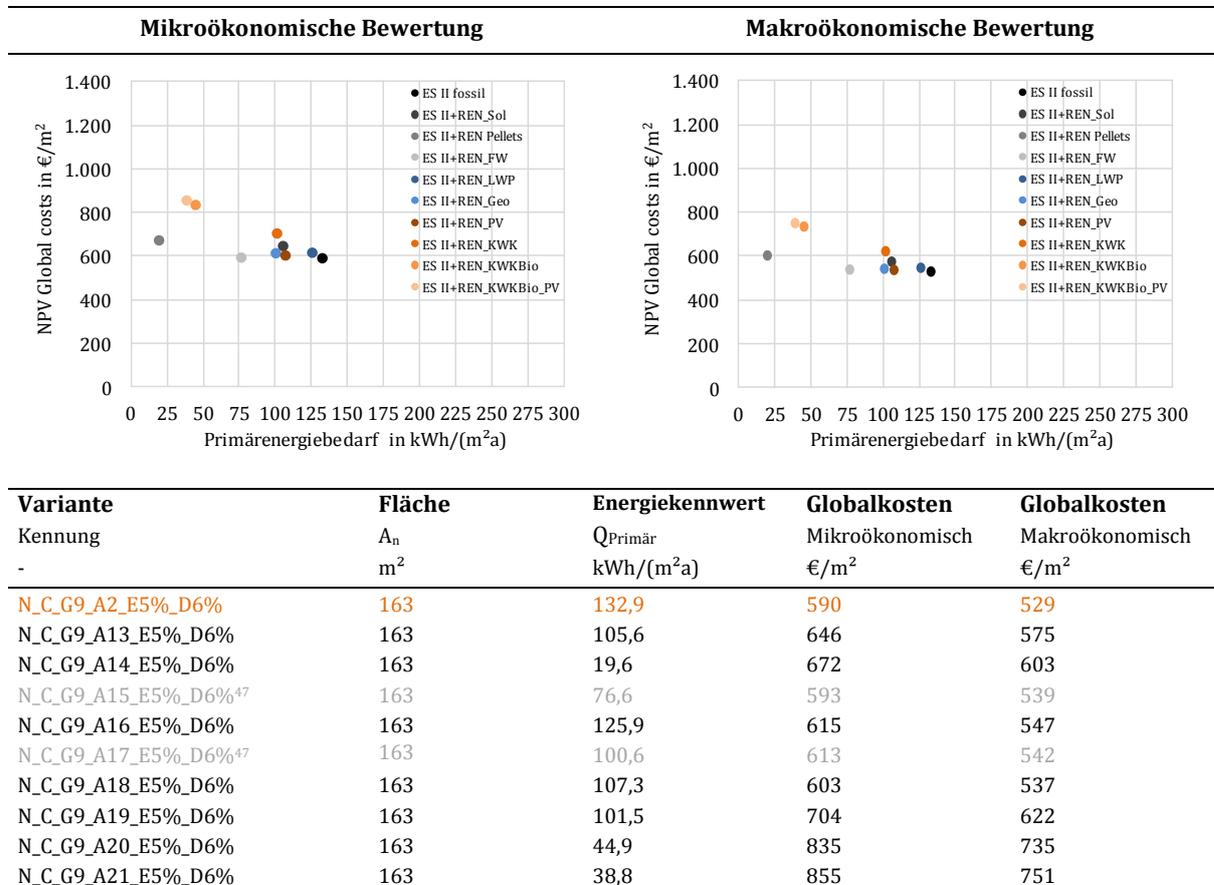
Tabelle 38: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höheren Kapitalzinsen (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum weiterhin beim Basiskesselsystem, wobei die Varianten insgesamt etwas dichter aneinander liegen.

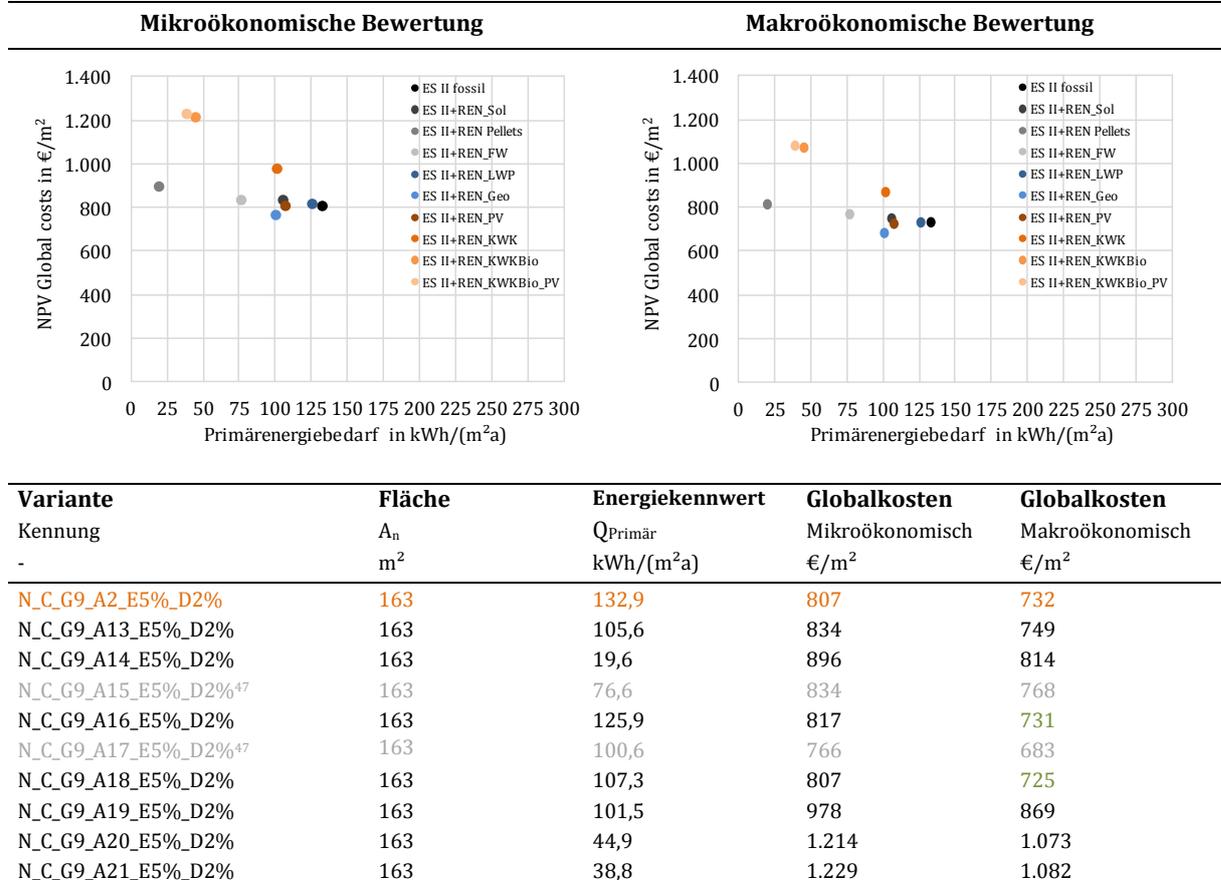
Tabelle 39: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 beschreibt eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigem Kapitalzinsniveau (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). In diesem Szenario verschiebt sich das Kostentoptimum in Richtung der technischen Systeme, die auf der einen Seite energieeffizienter sind und auf der anderen Seite dafür höhere Investitionen bedürfen.

Tabelle 40: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



#### 4.1.1.3 Fazit für neue Wohngebäude

Die Bewertung der Kosteneffizienz und der Überprüfung der energetischen Anforderungsniveaus erfolgt für den Bereich Wärmeschutz (Effizienz) und für die kombinierte Betrachtung aus Wärmeschutz und Anlagentechnik (Effizienz mit erneuerbaren Energien).

Mitte 2012 wurden die energetischen Anforderungen an neue Wohngebäude auf die Wärmeschutzklasse C und die Energieeffizienzklasse B verschärft<sup>48</sup>. Mit der Methode der kostenoptimalen Bewertung zeigt sich, dass dieses Niveau des Wärmeschutzes mit der Klasse C bereits kostenoptimal ist. Über alle Gebäude liegen die Isolationsstärken für Wände, Dach, Boden, Fenster, etc. auf einem kostenoptimalen Niveau. Es ergibt sich demnach keine Abweichung der derzeitigen primärenergetischen Anforderungen vom Anforderungsniveau, welches über die kostenoptimale Methode ermittelt wird.

Bei ganzheitlicher Betrachtung (Wärmeschutz und Anlagentechnik) wird für neue Gebäude nach aktueller Energieeinsparverordnung die Energieeffizienzklasse B eingefordert. Diese kann entweder durch eine verbesserte Dämmung über den Wärmeschutzstandard C hinaus oder über den Einsatz einer effizienteren Anlagentechnik, bzw. über den Einsatz von erneuerbaren Energien erfolgen. Das kostenoptimale Niveau liegt für alle infrage kommenden Anlagentechniken bei Nutzung eines Brennwertkessels mit fossilem Energieträger. Alle anderen für den Vergleich berücksichtigten Technologien führen zu etwas höheren Globalkosten. Da die Gesamtenergieeffizienzklasse B beim Neubau eingefordert wird, liegen die primärenergetischen Anforderungen an neue Einfamilienhäuser etwa 12 % und die für Mehrfamilienhäuser etwa 24 % unterhalb der kostenoptimalen Primärenergieanforderung; wobei die Unterschiede in den Globalkosten für bestimmten Technologien nicht wesentlich sind.

---

<sup>48</sup> Die bis dahin gültigen Anforderungen waren Wärmeschutzklasse D und Gesamtenergieeffizienzklasse D. Streng genommen gibt es keine direkten Anforderungen an eine Effizienzklasse, sondern es werden einzuhaltende Energiekennwerte als Grenzwerte bestimmt, die abhängig von der Gebäudekubatur sind. Für ein Gebäude mit üblichem A/V-Verhältnis stimmen die Klassengrenzen (feste Effizienzklassen- Kennwerte für Ein- und Mehrfamilienhäuser) mit den Anforderungskennwerten überein. Zur besseren Darstellung werden die Energieeffizienzklassen genutzt. Diese sind im Fall der hier untersuchten Gebäude deckungsgleich mit den Kennwerten.

## 4.1.2 Bestand – Wohngebäude

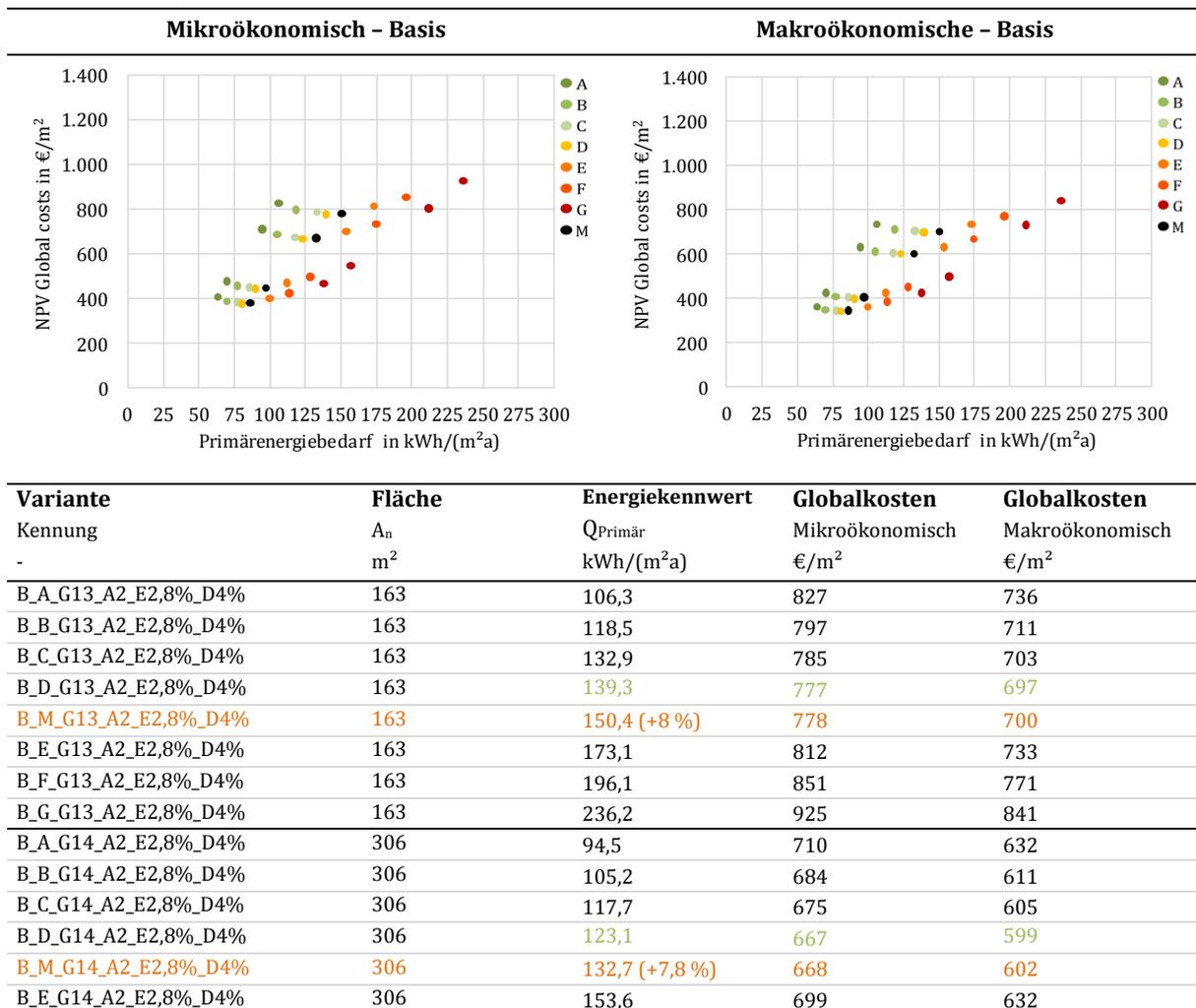
### 4.1.2.1 Wärmeschutz – Stufe I

Der Einfluss unterschiedlicher energetischer Bauweisen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit wird für die vier beschriebenen Wohngebäude angegeben. Im Rahmen der Energieeinsparverordnung werden Anforderungen an geänderte Bauteile gestellt. Derzeit existieren keine Gesamtanforderungen für größere Renovierungen.

Um den Einfluss der Bauteilanforderungen einzubeziehen wird eine weitere Variante für den Wärmeschutz definiert, die den Mindestanforderungen für Bauteile nach Tabelle 14 entspricht. Zur bestmöglichen Freischneidung des energetischen Einflusses der betroffenen Bauteile werden für alle Wärmeschutzvarianten die gleichen Randbedingungen hinsichtlich Luftdichtheit und Wärmebrückeneinfluss angesetzt. Zudem wird immer von einer Fensterlüftung ausgegangen. Dies bezieht sich gleichermaßen auf die Energiebilanz und die Kostenbestimmung.

Die kostenoptimalen Primärenergieanforderungen an zu ändernde Bauteile liegen beim Wärmeschutzniveau D. Auf makro- und mikroökonomischer Ebene weist dieser Wärmedämmstandard bei allen Gebäuden die geringsten Gesamtkosten auf. Für die betrachteten Gebäude liegen die derzeit gestellten Anforderungen (als Klasse M im Diagramm und in den Tabellen markiert) 7,7 % über dem kostenoptimalen Primärenergielevel des Wärmeschutzstandards D. Gemäß der Richtlinie liegt die Überschreitungsgrenze bei maximal 15 %.

Tabelle 41: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.



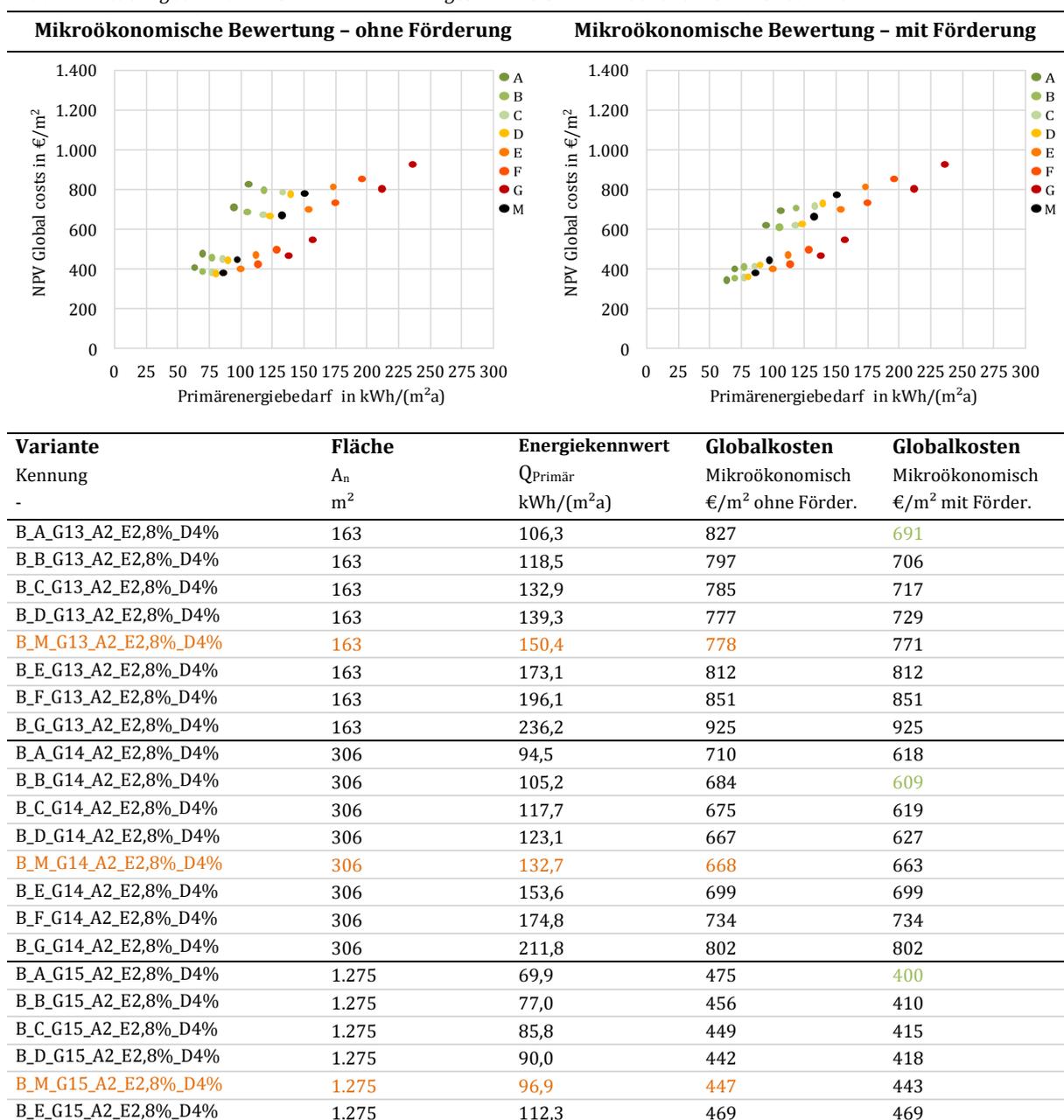
## Bestand – Wohngebäude

|                             |              |                      |            |            |
|-----------------------------|--------------|----------------------|------------|------------|
| B_F_G14_A2_E2,8%_D4%        | 306          | 174,8                | 734        | 666        |
| B_G_G14_A2_E2,8%_D4%        | 306          | 211,8                | 802        | 730        |
| B_A_G15_A2_E2,8%_D4%        | 1.275        | 69,9                 | 475        | 424        |
| B_B_G15_A2_E2,8%_D4%        | 1.275        | 77,0                 | 456        | 408        |
| B_C_G15_A2_E2,8%_D4%        | 1.275        | 85,8                 | 449        | 404        |
| B_D_G15_A2_E2,8%_D4%        | 1.275        | 90,0                 | 442        | 399        |
| <b>B_M_G15_A2_E2,8%_D4%</b> | <b>1.275</b> | <b>96,9 (+7,7 %)</b> | <b>447</b> | <b>404</b> |
| B_E_G15_A2_E2,8%_D4%        | 1.275        | 112,3                | 469        | 426        |
| B_F_G15_A2_E2,8%_D4%        | 1.275        | 128,2                | 495        | 451        |
| B_G_G15_A2_E2,8%_D4%        | 1.275        | 157,1                | 545        | 499        |
| B_A_G16_A2_E2,8%_D4%        | 3.060        | 63,7                 | 404        | 361        |
| B_B_G16_A2_E2,8%_D4%        | 3.060        | 69,8                 | 388        | 348        |
| B_C_G16_A2_E2,8%_D4%        | 3.060        | 77,3                 | 383        | 346        |
| B_D_G16_A2_E2,8%_D4%        | 3.060        | 80,5                 | 377        | 340        |
| <b>B_M_G16_A2_E2,8%_D4%</b> | <b>3.060</b> | <b>86,3 (+7,2 %)</b> | <b>380</b> | <b>344</b> |
| B_E_G16_A2_E2,8%_D4%        | 3.060        | 99,8                 | 400        | 363        |
| B_F_G16_A2_E2,8%_D4%        | 3.060        | 113,5                | 422        | 385        |
| B_G_G16_A2_E2,8%_D4%        | 3.060        | 137,8                | 464        | 426        |

### Einfluss von Subventionen (indikative Angabe)

Für Wohngebäude können nach aktueller Gesetzgebung Förderungen im Fall einer Modernisierung gewährt werden. Folgende Analyse zeigt den Einfluss der Förderung auf die Gesamtwirtschaftlichkeit. Dabei wird für eine Grundförderung eine Mindestdämmstoffdicke vorausgesetzt und die Förderhöhe wird in Abhängigkeit der Dicke der Wärmedämmung angepasst. Wird ein globales Ziel erreicht, z. B. die Gesamtwärmeschutzklasse auf C oder besser, wird ein weiterer Bonus auf die bereits geführte Förderung durch Einzelmaßnahmen gewährt [22]. Der Einfluss der Förderung ist bei allen Gebäuden bereits ab dem Wärmeschutzstandard D erkennbar. Die erweiterte Bauteilförderung führt zu einer tendenziell günstigeren Gesamtwirtschaftlichkeit bei Niedrigenergie- (Wärmeschutzklasse B) und Passivhäusern (Wärmeschutzklasse A). Da die Förderung nicht in der Anforderungsbewertung in Luxemburg berücksichtigt werden soll, wird an dieser Stelle auf die Überprüfung des 15 %-Kriteriums verzichtet. Die Variante mit den geringsten Globalkosten ist in folgender Tabelle grün markiert.

Tabelle 42: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – Subventionen.

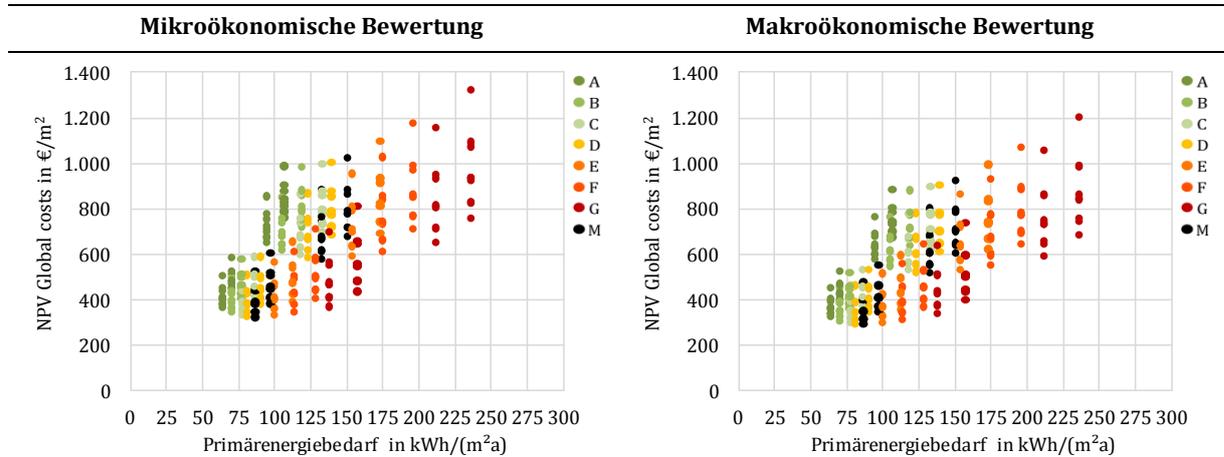


|                      |       |       |     |     |
|----------------------|-------|-------|-----|-----|
| B_F_G15_A2_E2,8%_D4% | 1.275 | 128,2 | 495 | 495 |
| B_G_G15_A2_E2,8%_D4% | 1.275 | 157,1 | 545 | 545 |
| B_A_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 63,7  | 404 | 342 |
| B_B_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 69,8  | 388 | 352 |
| B_C_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 77,3  | 383 | 356 |
| B_D_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 80,5  | 377 | 358 |
| B_M_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 86,3  | 380 | 378 |
| B_E_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 99,8  | 400 | 400 |
| B_F_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 113,5 | 422 | 422 |
| B_G_G16_A2_E2,8%_D4% | 3.060 | 137,8 | 464 | 464 |

### Einfluss der Entwicklungsszenarien

Wie bei neuen Wohngebäuden auch wird der Einfluss verschiedener Entwicklungsszenarien auf die sich ergebenden Globalkosten untersucht. Auf mikro- und makroökonomischer Ebene zeigt sich wie bei neuen Gebäuden auch eine Tendenz eine größere Spreizung bei den Globalkosten bei Gebäuden mit schlechterem Wärmeschutz. Mit höherem Wärmeschutzniveau reduziert sich der Einfluss der sensiblen Parameter auf die Globalkosten.

Tabelle 43: Wohngebäude – Bestand – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch.

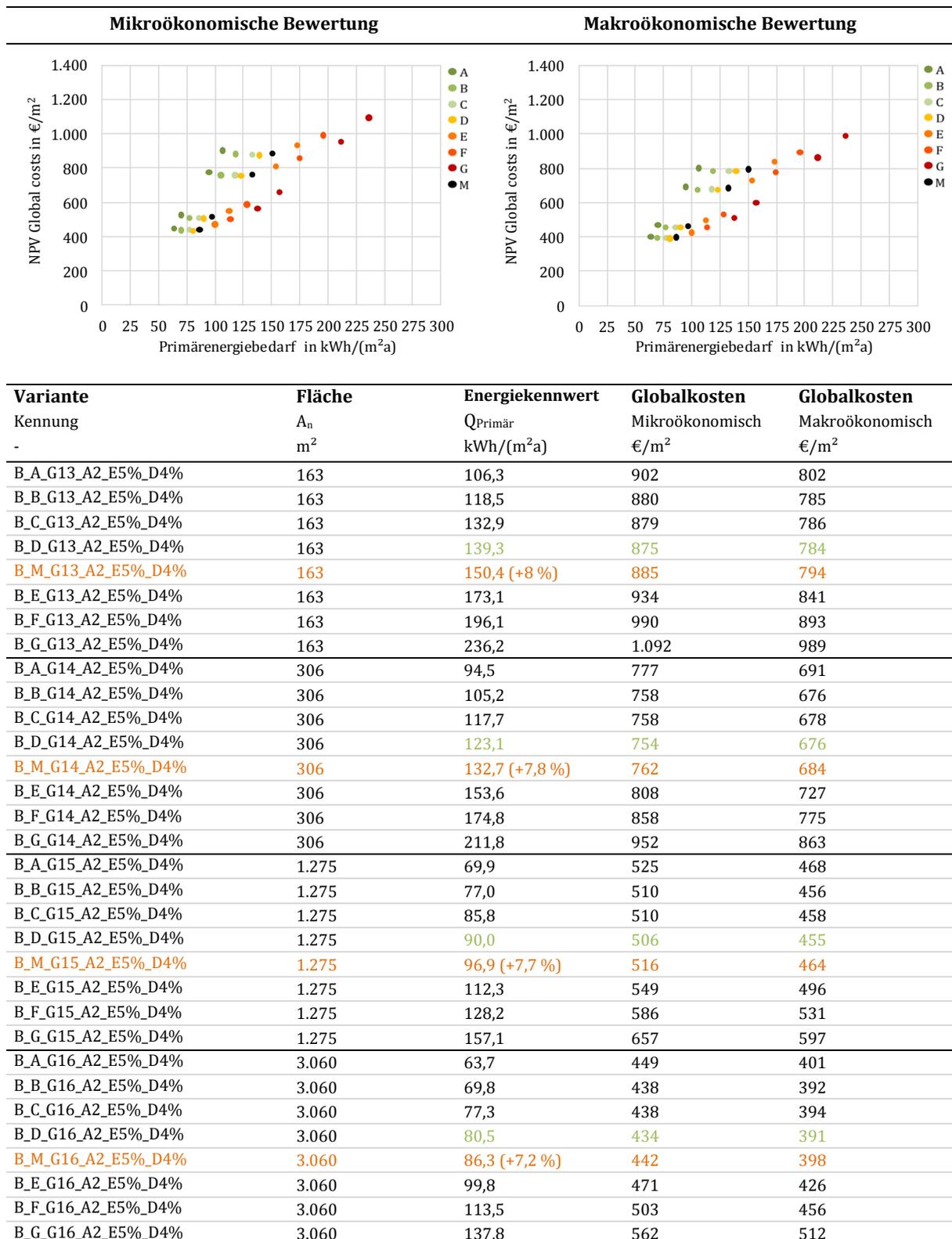


Die kombinierte Bewertung einzelner Szenarien wird in folgendem Abschnitt diskutiert.

## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreisssteigerung (5 %/a) bei moderatem Kapitalzins (4 %) ausgegangen (siehe Tabelle 17). Aufgrund der höheren Energiekostensteigerung flacht die Kurve der Globalkosten mit steigendem Wärmeschutzniveau ab. Im Mittel liegen die primärenergetischen Anforderungen 7,7 % über denen der kostenoptimalen Lösung.

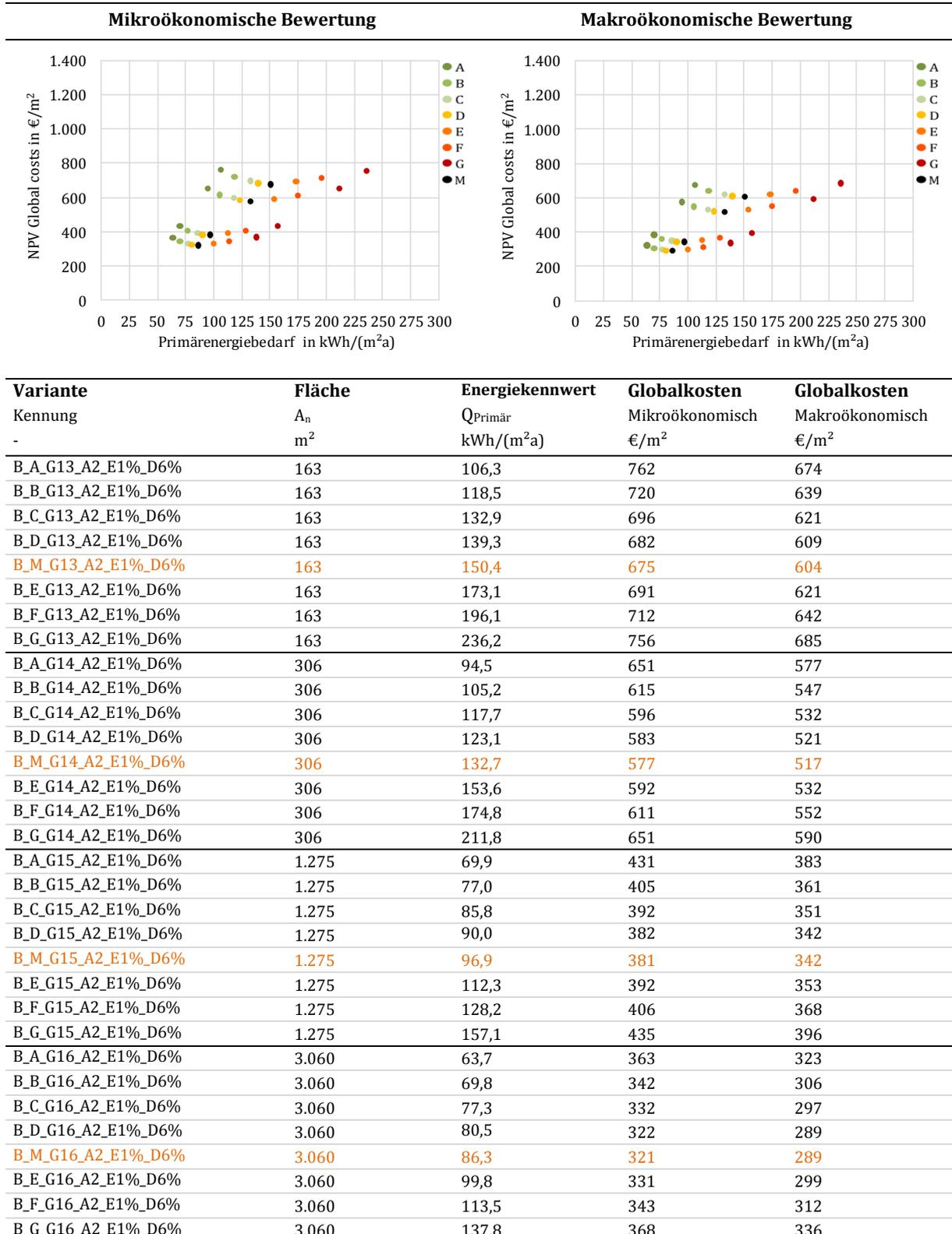
Tabelle 44: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird von einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Dadurch reduziert sich der Einfluss der Energiekosten und die Investitionskosten erreichen eine größere Gewichtung in den Globalkosten. Im Mittel liegen die primärenergetischen Anforderungen dadurch auch auf dem Niveau der kostenoptimalen Variante.

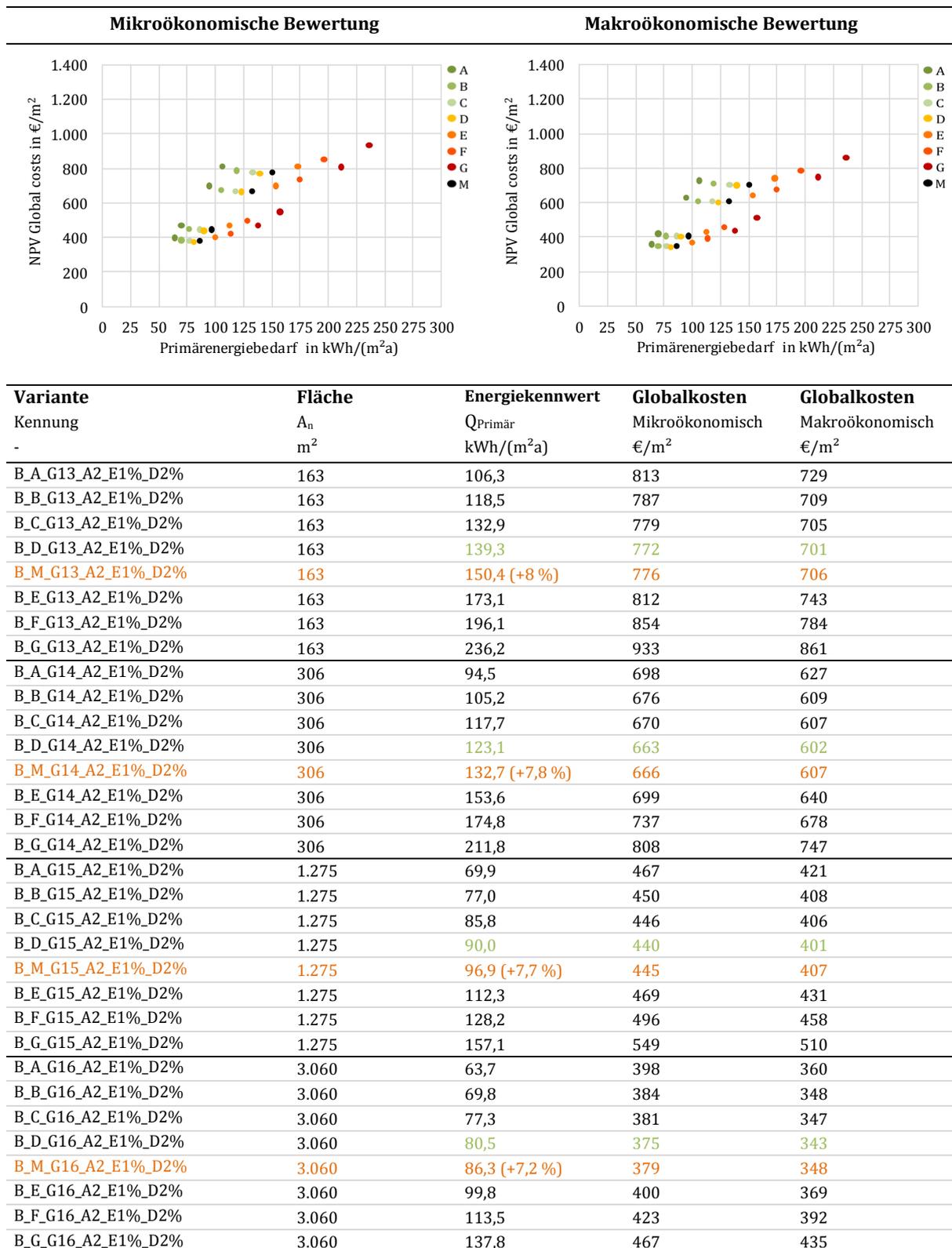
Tabelle 45: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.



## Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a). Gebäude mit dem Wärmeschutzniveau D liegen auch hier beim kostenoptimalen Niveau. Im Mittel liegen die primärenergetischen Anforderungen 7,7 % über denen der kostenoptimalen Lösung.

Tabelle 46: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höherem Kapitalzins (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum weiterhin bei etwa dem Wärmeschutzniveau D. Im Mittel liegen die primär-energetischen Anforderungen 7,7 % über denen der kostenoptimalen Lösung.

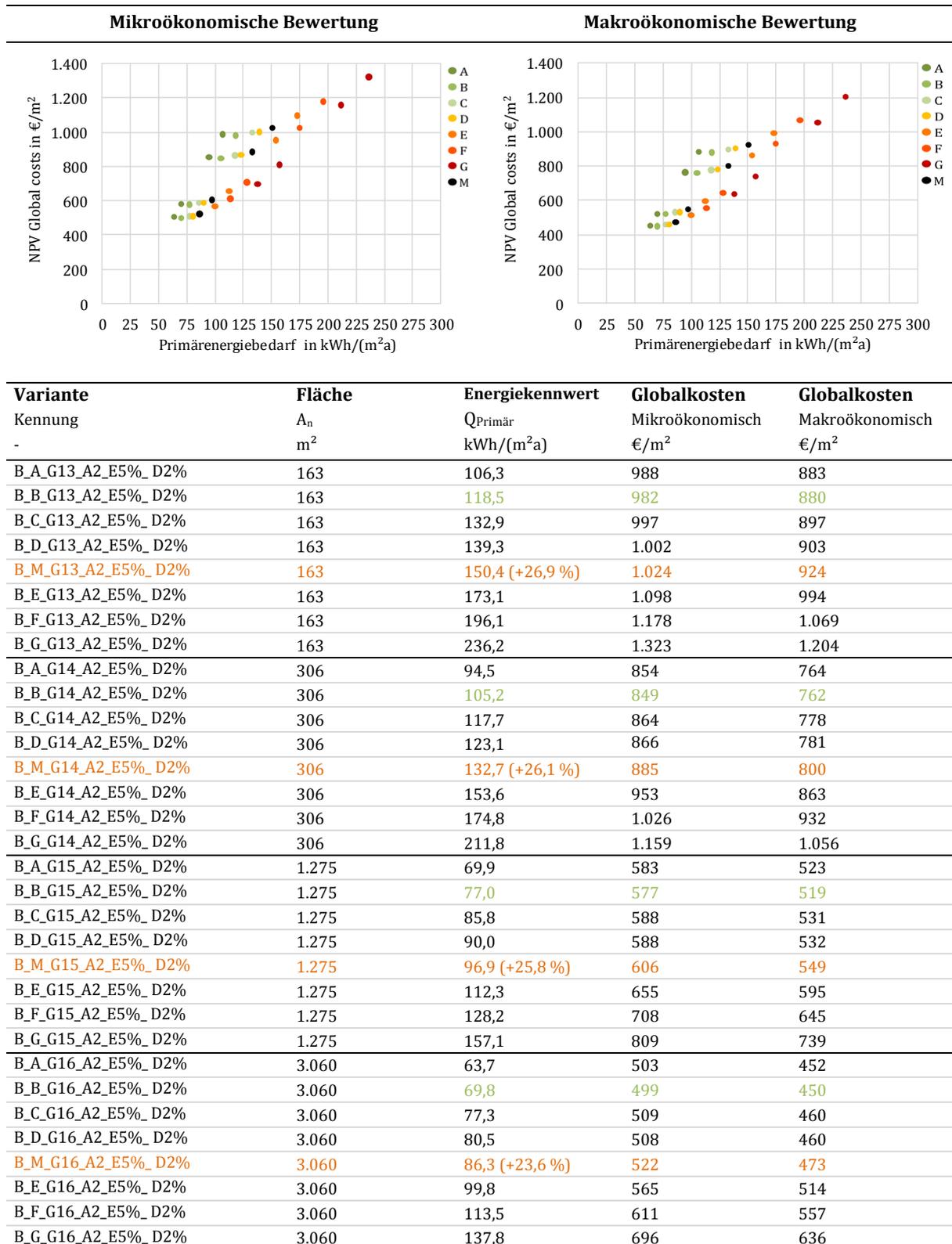
Tabelle 47: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 beschreibt eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigem Kapitalzinsniveau (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum etwa beim Wärmeschutzniveau B. Im Mittel liegen die aktuellen primärenergetischen Anforderungen dann 25,6 % über denen der kostenoptimalen Lösung.

Tabelle 48: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



### **Zwischenfazit**

Der Einfluss unterschiedlicher wirtschaftlicher Entwicklungsszenarien auf die Globalkosten ist je nach Szenario signifikant. Für die meisten der untersuchten Szenarien ergibt sich jedoch keine wesentliche Änderung im Resultat der kostenoptimalen Variante; sie entspricht für alle Gebäude in der mikro- und makroökonomischen Perspektive dem Wärmeschutzstandard D. Dies betrifft die Bauteile Fenster, Dach, Boden und Fassaden. Die Anforderungen an den Wärmeschutz einzelner Bauteile sind in Tabelle 13 angegeben.

Im Fall einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a) und einem gleichzeitig hohen Kapitalzins (6 %) beschreiben die aktuellen Anforderungen auch das kostenoptimale Niveau. Im Fall einer höheren Energiepreissteigerung (5 %/a) bei niedrigem Kapitalzinsniveau (2 %) markieren effizientere Dämmstandards (Klasse B) das kostenoptimale Niveau.

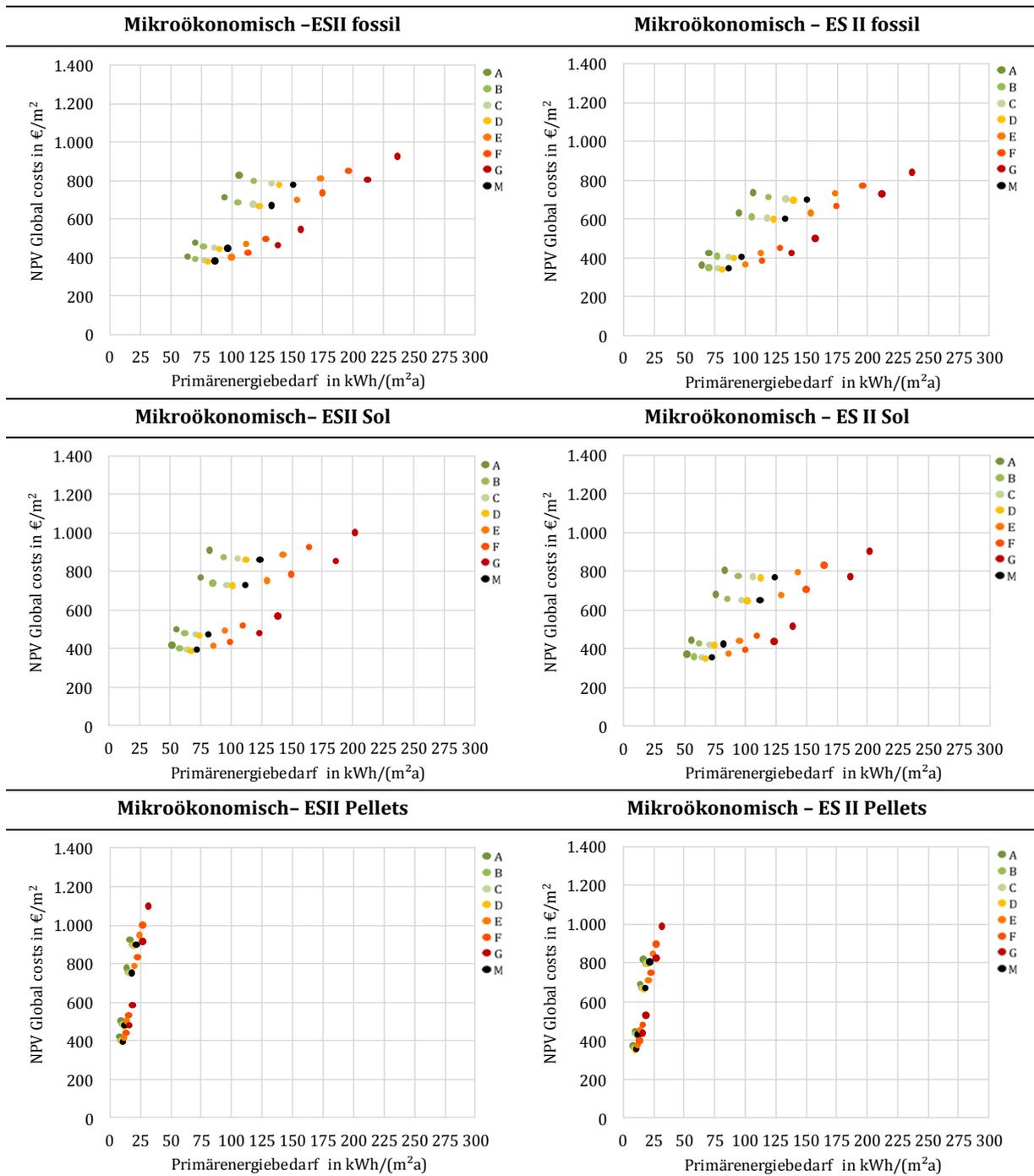
Ein stärker ansteigender Energiepreis als in der Basis mit 2,8 %/a angenommen führt bei allen Varianten zu einer besseren Darstellung von höheren Dämmstandards. Der Einfluss des Kapitalzinses ist in der Betrachtung weniger stark ausgeprägt als der Einfluss der Energiekostenentwicklung.

### 4.1.2.2 Anlagentechnik – Stufe II

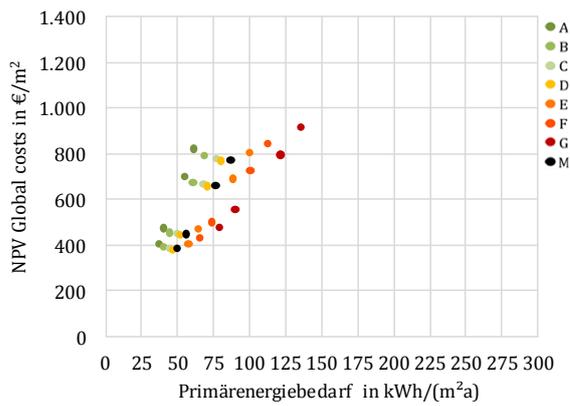
Zur Begrenzung der darzustellenden Varianten wird, analog zur Neubaubetrachtung, zuerst der Einfluss des Wärmeschutzes für alle Gebäude und alle Anlagentechniken untersucht. Es zeigt sich auch hier, dass in den meisten Fällen der Wärmeschutzstandard D bei allen Anlagentechniken im Bereich des wirtschaftlichen Optimums liegt. Aufbauend auf dieser Erkenntnis werden für den direkten Vergleich der Anlagentechniken unter Zugrundelegung der Ausführung des Gebäudes im Wärmeschutzniveau D durchgeführt.

### Anlagenvergleich über alle Wärmeschutzklassen

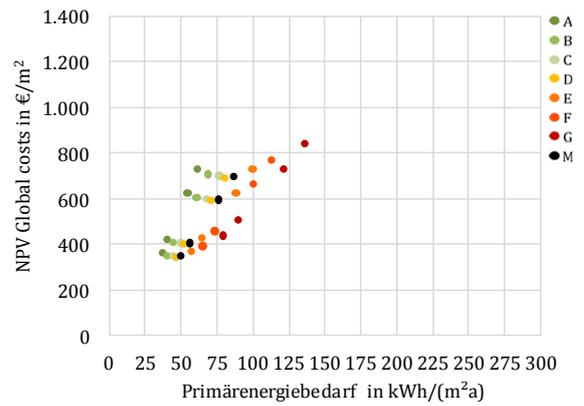
Tabelle 49: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechniken.



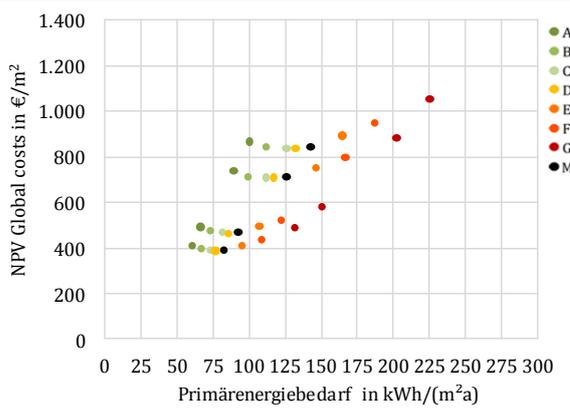
**Mikroökonomisch- ESII FW**



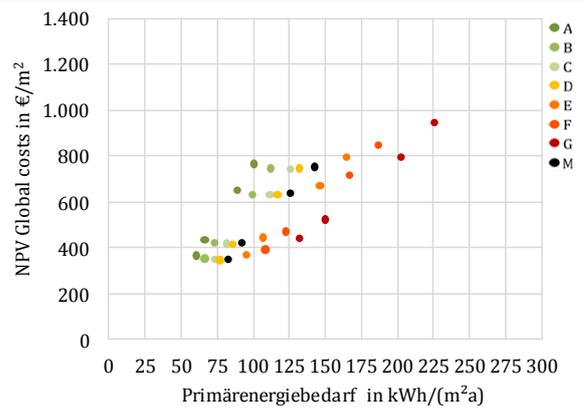
**Mikroökonomisch – ES II FW**



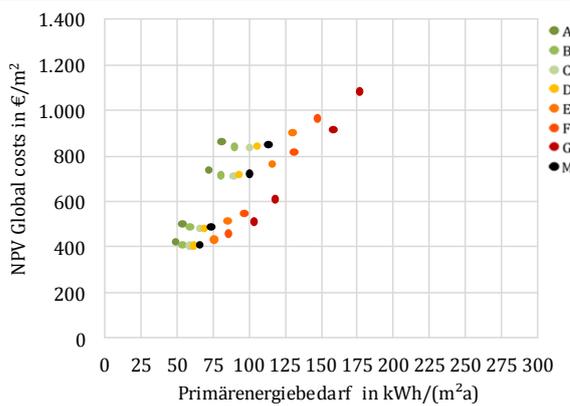
**Mikroökonomisch- ESII LWP**



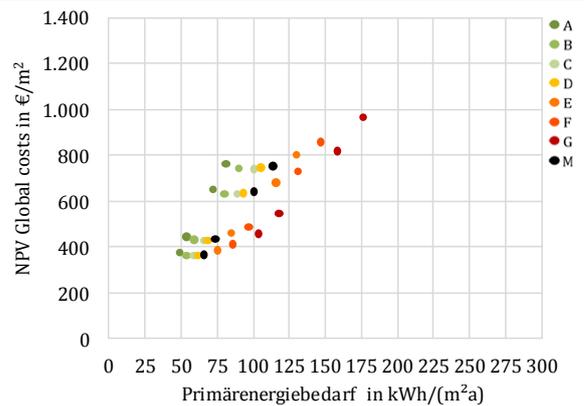
**Mikroökonomisch – ES II LWP**



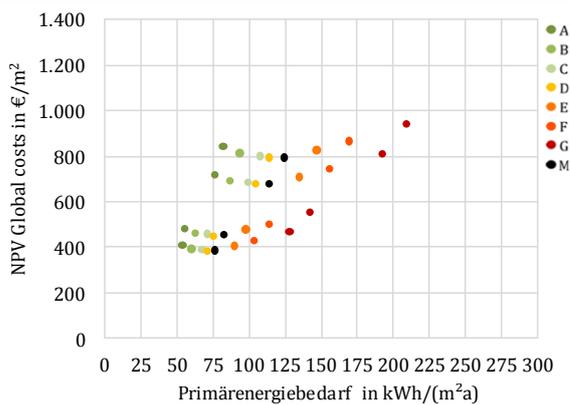
**Mikroökonomisch- ESII Geo**



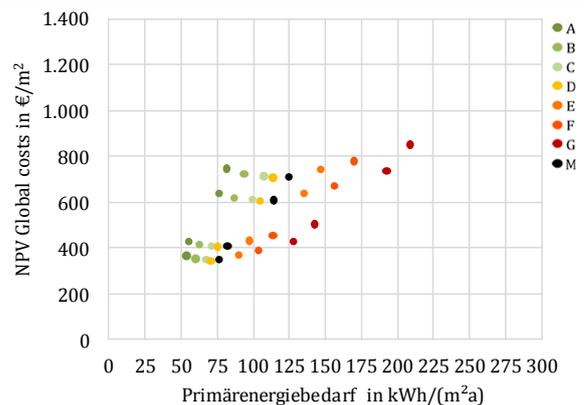
**Mikroökonomisch – ES II Geo**

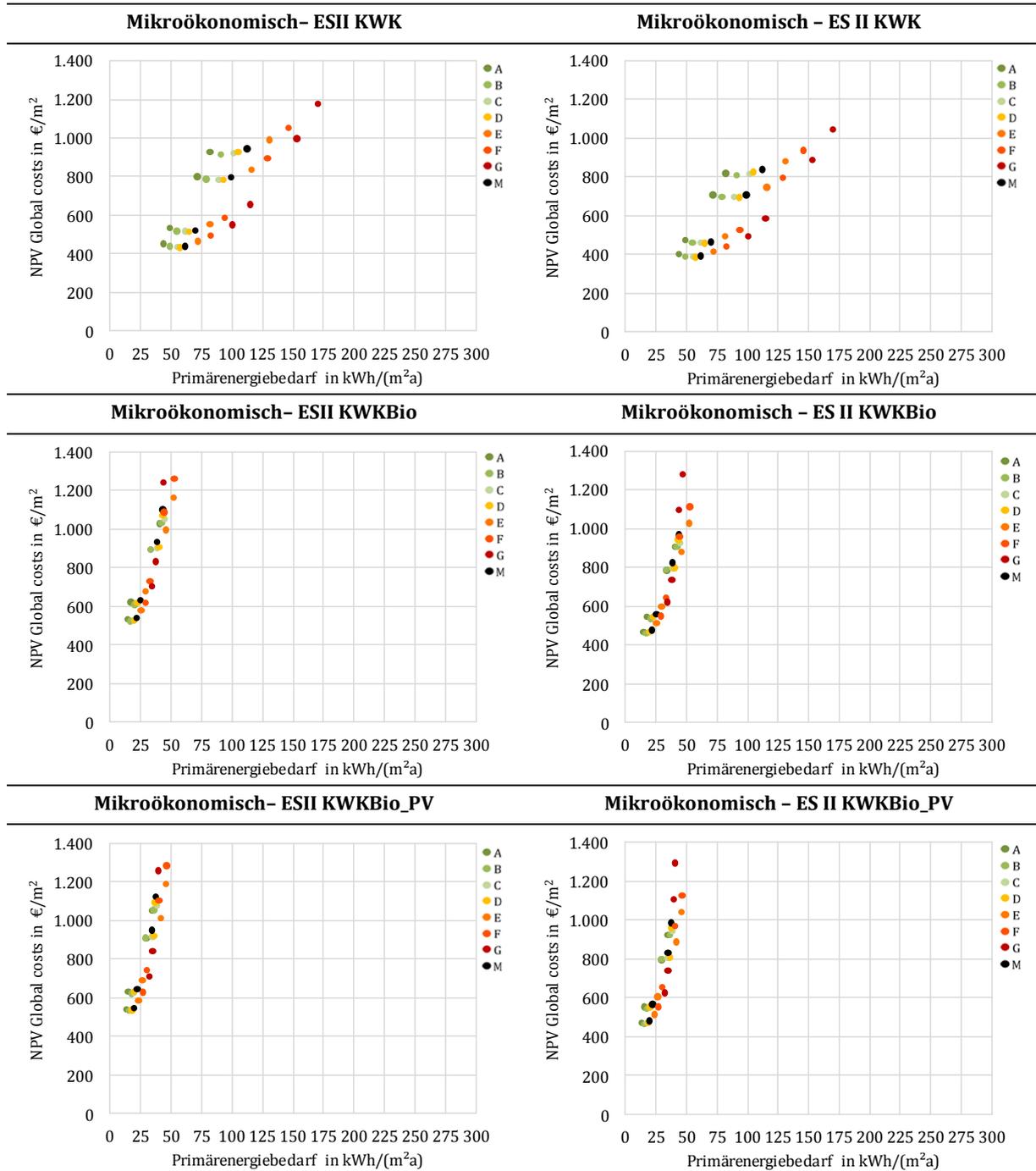


**Mikroökonomisch- ESII PV**



**Mikroökonomisch – ES II PV**





### Zwischenfazit

Über alle Technologien, die in einem bestehenden Gebäude genutzt werden können, ist die Wärmeschutzklasse D i. d. R. kostenoptimal. Beim Einsatz von Wärmepumpen oder Mini-KWK-Anlagen ergibt sich aufgrund der nicht so stark ausgeprägten Kostendegression eine Verbesserung der Globalkostenentwicklung mit dem anvisierten Wärmeschutzstandard – jedoch insgesamt mit einem höheren Globalkostenniveau als bei der Basisvariante. Die Berücksichtigung von produziertem elektrischem Strom in der Gebäudeenergiebilanz, bzw. die Darstellung im Primärenergiekennwert, berücksichtigt nur den Anteil der Strommenge, die dem maximalen monatlichen Gebäudestrombedarf aus der Energiebilanz entspricht. Ist die erzeugte Strommenge in einem Monat größer als der Strombedarf des Gebäudes erfolgt eine Einspeisung in das öffentli-

che Netz. Für diesen Anteil erfolgt im Bilanzmodell keine *subventionierte* Einspeisevergütung und der Börsentarif mit 0,045 €/kWh wird für die Stromeinspeisung angesetzt. Dies erklärt, dass sich bei wärmegeführt betriebenen KWK-Anlagen die Globalkosten mit höherem Wärmeschutzstandard verringern, da der Anteil der Stromverdrängung steigt. In diesem Modell muss berücksichtigt werden, dass gemäß der Energiebilanz nach Energieeinsparverordnung keine sonstigen Stromanwendungen berücksichtigt werden.

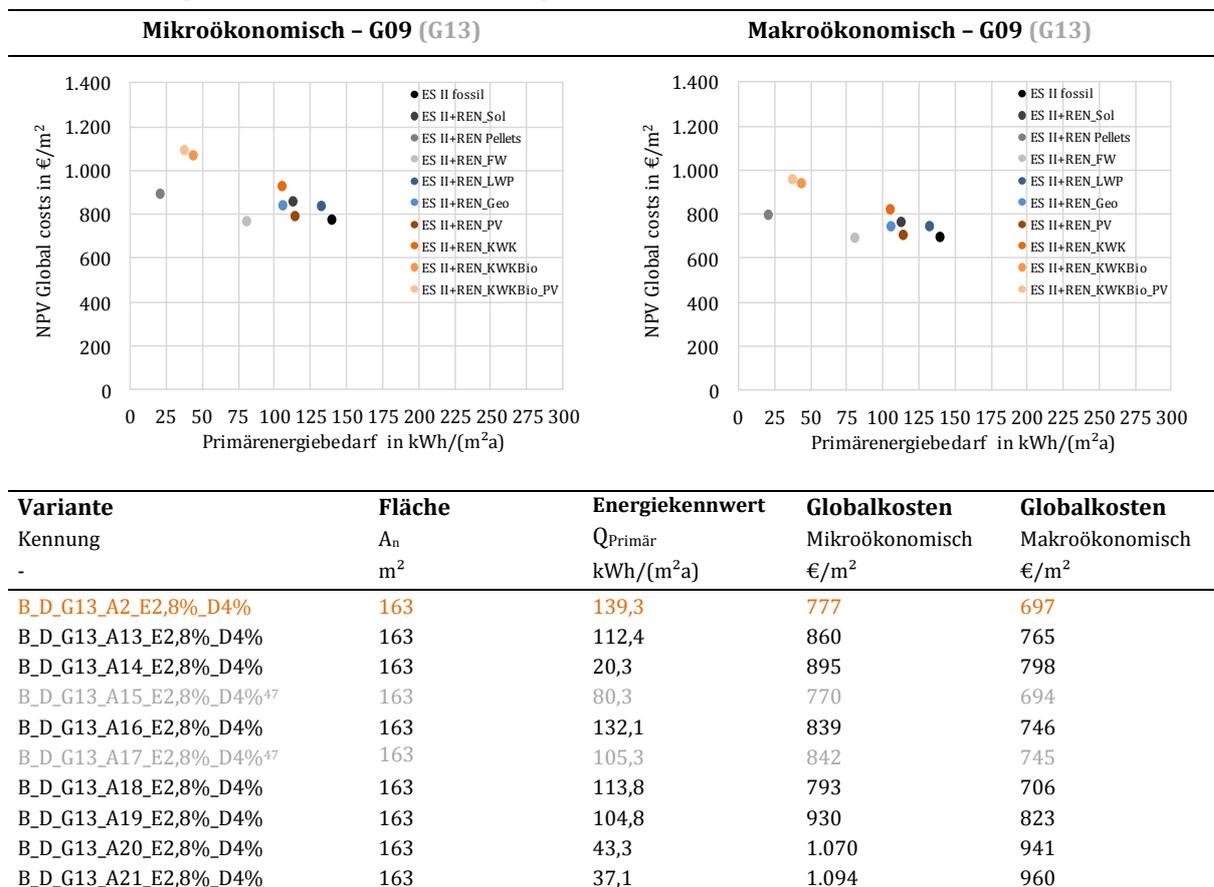
Zum direkten Vergleich des Einflusses der Anlagentechnik und verschiedener Energieträger wird der folgende Vergleich auf der Basis eines Gebäudes der Wärmeschutzklasse D durchgeführt.

### Anlagenvergleich für Wärmeschutzklasse D

Im Fall der Sanierung werden gemäß aktueller Gesetzgebung in Luxemburg nur Bauteil- und keine Gesamtanforderungen gestellt. Für Wärmeerzeuger gibt es ebenso keine direkten Effizienzanforderungen<sup>49</sup>. Im Rahmen der Energieeinsparverordnung werden Anforderungen an Untersysteme wie z. B. an die Isolierstärke von Verteilungen etc. gestellt. Diese Anforderungen werden im Rahmen dieses Berichts nicht einzeln bewertet.

Zur besseren Darstellung wird der Einfluss der angesetzten Anlagentechnik für jedes Gebäude separat gezeigt. Es wird unterstellt, dass das Gebäude im Wärmeschutzniveau D ausgeführt ist. Für Gebäude G9 (G13) zeigt sich, dass ein Brennwertkessel basierend auf einem fossilen Energieträger die geringsten Gesamtkosten aufweist. Die Technologien *Fernwärme (FW)* und *Wärmepumpe mit Geothermie (Geo)* sind auch im Fall einer Modernisierung nicht für jeden Standort verfügbar und müssen bei der Bestimmung der gesetzlichen Anforderungen ausgeklammert werden. Die Ausprägung der Anlagentechnik auf die Gesamtkosten verläuft für alle vier Gebäude ähnlich; jedoch auf unterschiedlich hohem Niveau.

Tabelle 50: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.



<sup>49</sup> Im Fall von staatlich geförderten Technologien (Pelletskessel, Wärmepumpen, etc.) bzw. bei Inanspruchnahme der staatlichen Förderungen werden zusätzliche Anforderungen an die Anlagen- und Systemeffizienz gestellt.

Tabelle 51: Wohngebäude 10 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.

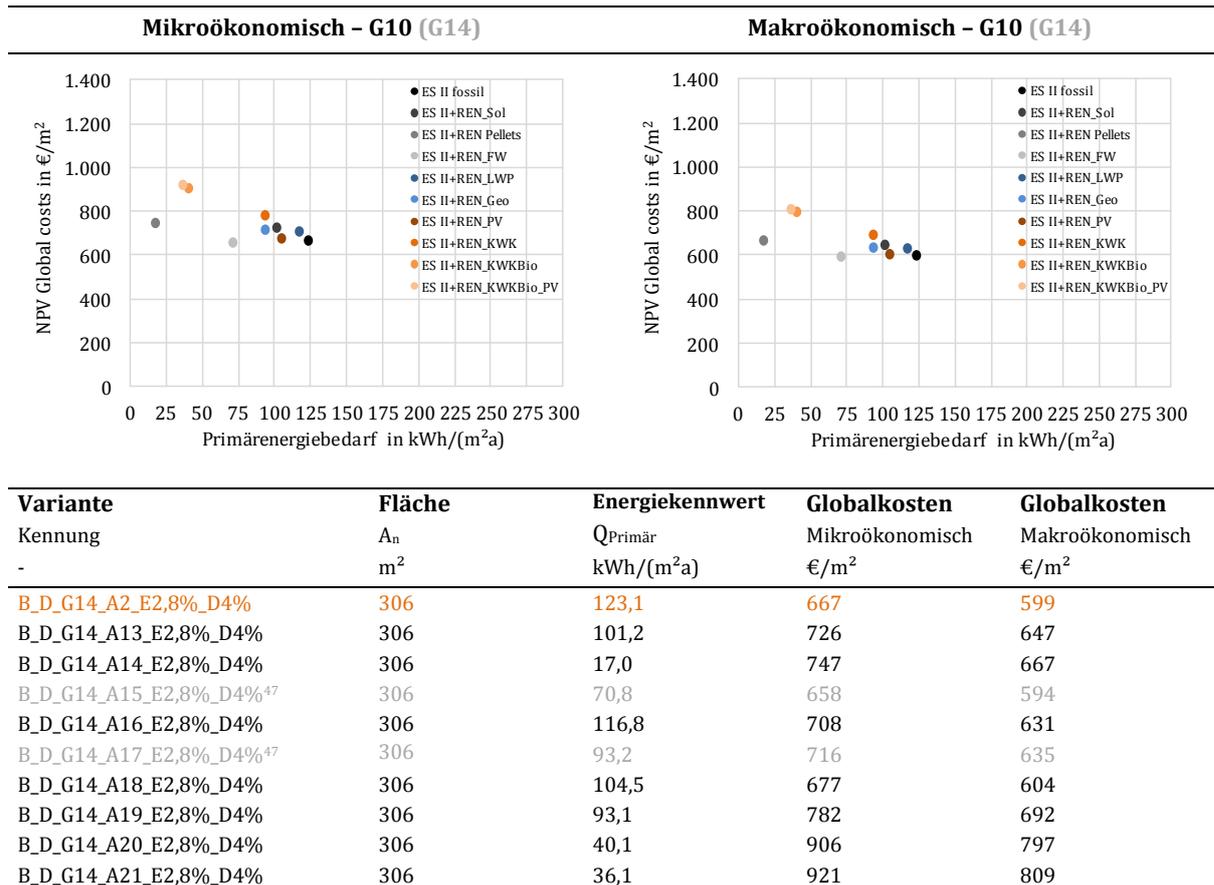


Tabelle 52: Wohngebäude 11 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.

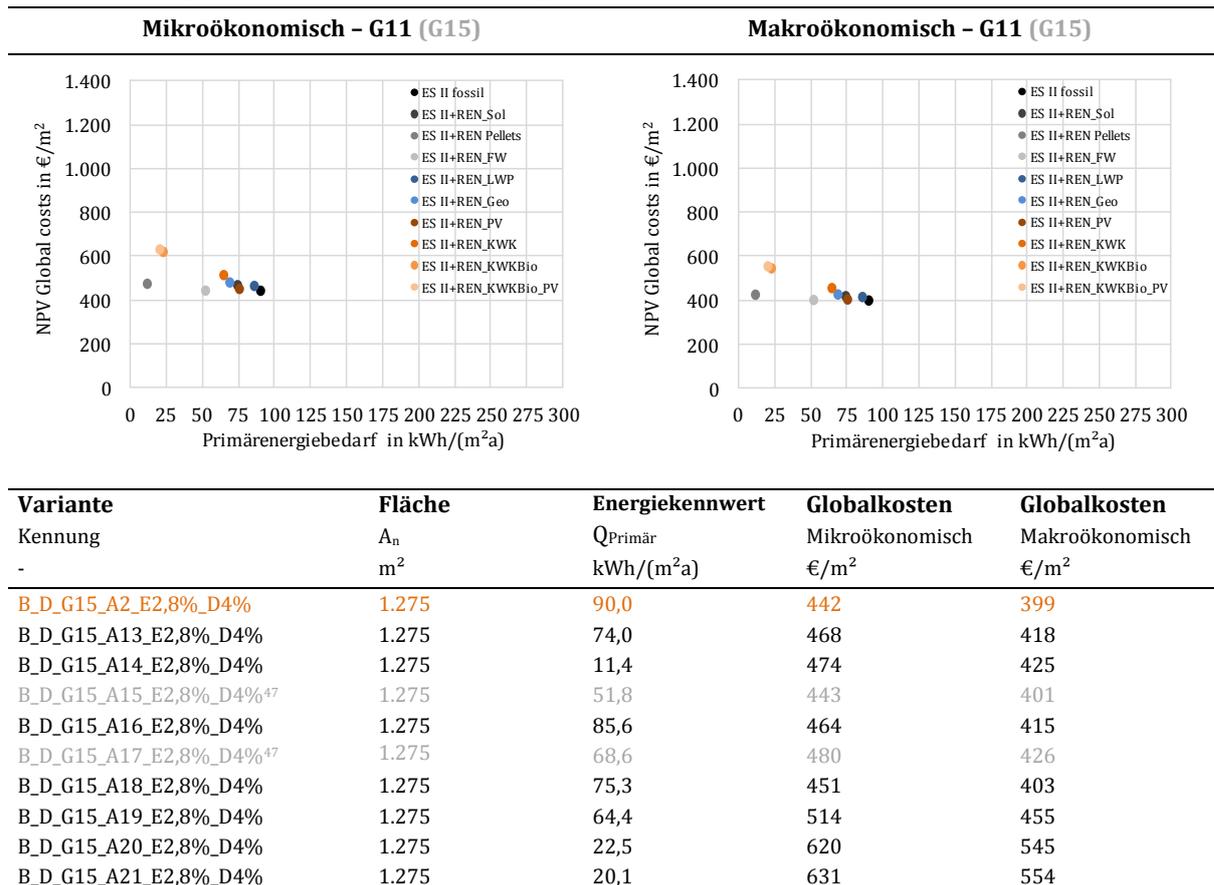
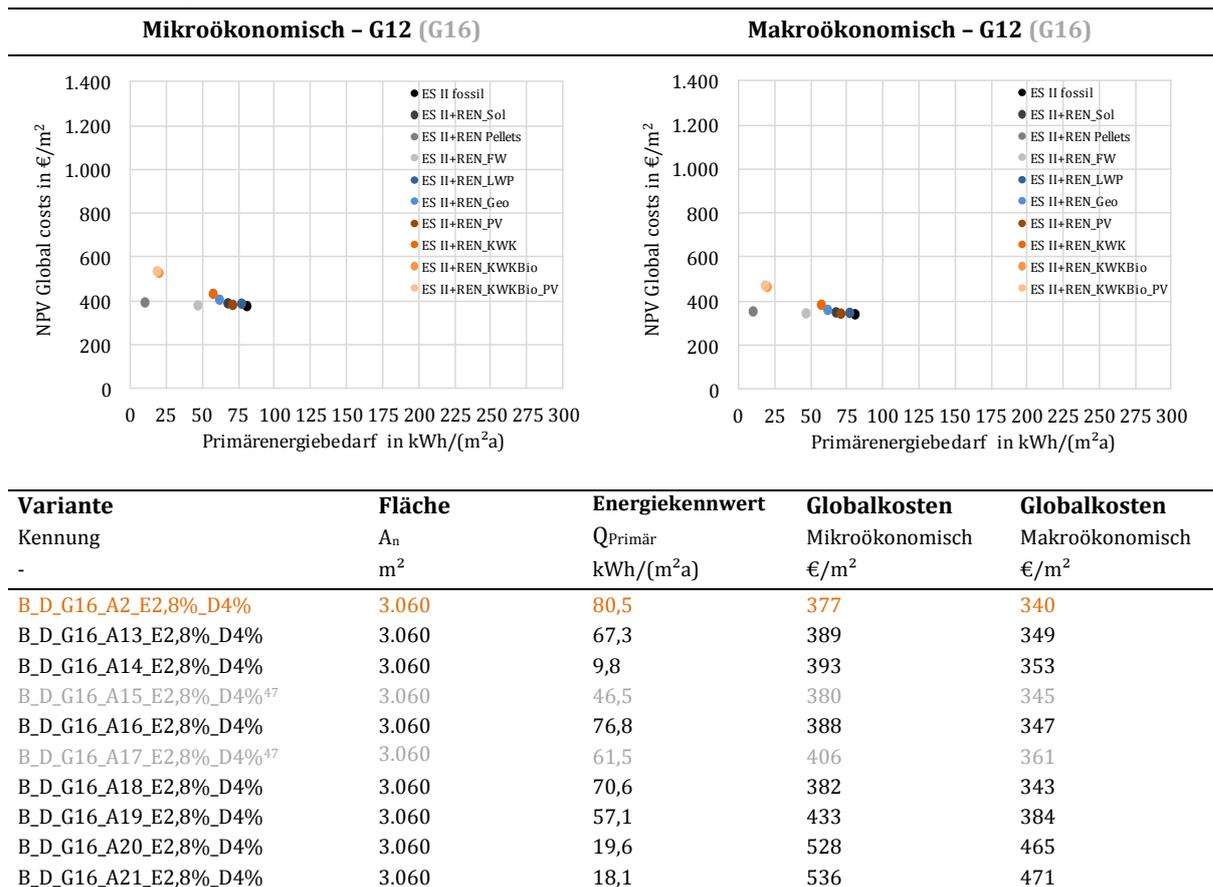


Tabelle 53: Wohngebäude 12 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Zwischenfazit

Es zeigt sich, dass die verwendeten und für die Bestimmung der Globalkosten infrage kommenden Technologien über alle vier betrachteten Gebäude ähnlich ausgeprägt verlaufen. Unterschiede gibt es im jeweiligen Niveau der Globalkosten. Bei Einfamilienhäusern ergeben sich aufgrund der Kostendegression bei größeren Anlagen auch größere Differenzen in den Globalkosten.

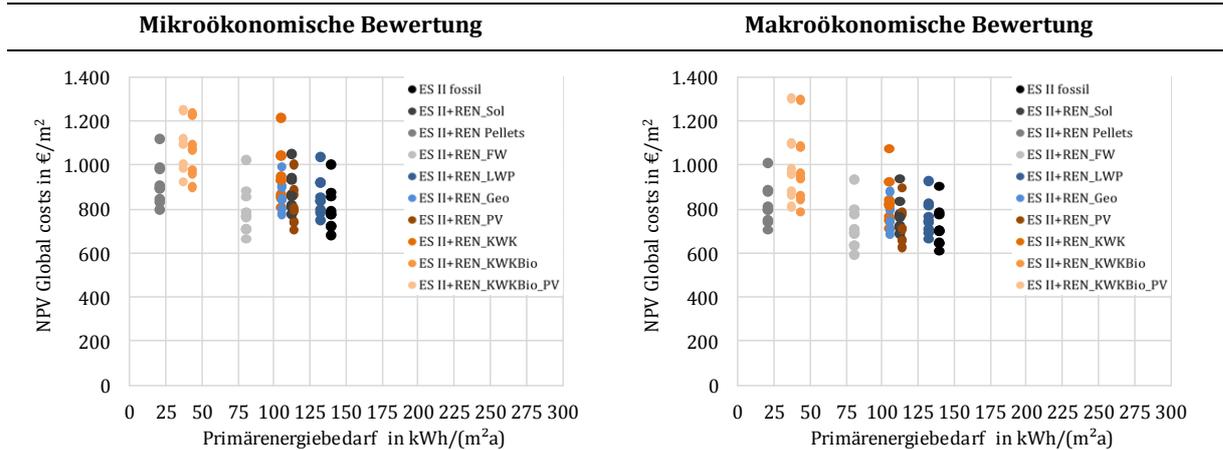
Um die darzustellenden Varianten für die Sensitivitätsanalyse einzugrenzen wird der Vergleich folgend auf das Gebäude G9 (G13) bezogen. Die sich dort ergebenden Tendenzen sind zur Bewertung gemäß der Verordnung auf alle anderen Gebäude übertragbar.

### Einfluss der Entwicklungsszenarien

Folgende Bilder zeigen zunächst alle analysierten Varianten in der Übersicht. Dabei werden die Parameter für Energiepreissteigerung und Kapitalzins für jedes Gebäude und jede Wärmeschutzklasse ausgewertet.

Die vertikale Spreizung einer gleichfarbigen Kurvenschar spiegelt den Einfluss der sensiblen Parameter auf die jeweilige Variante des Wärmeschutzes wider. Auf mikro- und makroökonomischer Ebene werden die größten Spreizungen bei KWK-Anlagen bilanziert, da sich hier aufgrund des erhöhten Endenergiebedarfs (wegen der gekoppelten Wärme- und Stromproduktion) die größte Abhängigkeit von den Energiekosten einstellt.

Tabelle 54: Wohngebäude 09 – Bestand – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik

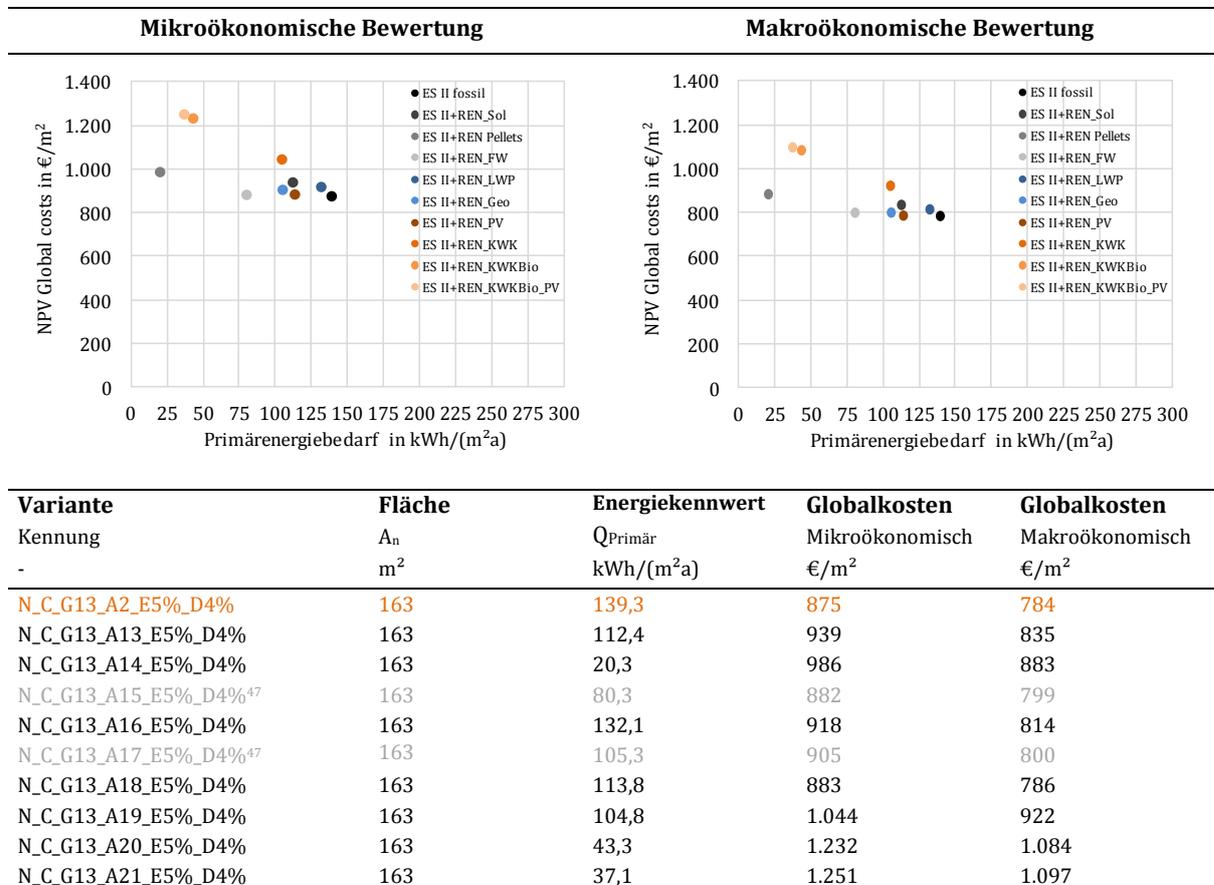


Die kombinierte Bewertung einzelner Szenarien wird in folgendem Abschnitt diskutiert.

## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreissteigerung (5 %/a) bei moderatem Kapitalzins (4 %) ausgegangen (siehe Tabelle 17). Vergleicht man die Ergebnisse mit dem Szenario S1, zeigt sich, ein allgemein höheres Niveau der Globalkosten. Eine hohe Energiepreissteigerung führt bei technischen Systemen mit großem Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten zu tendenziell höheren Globalkosten.

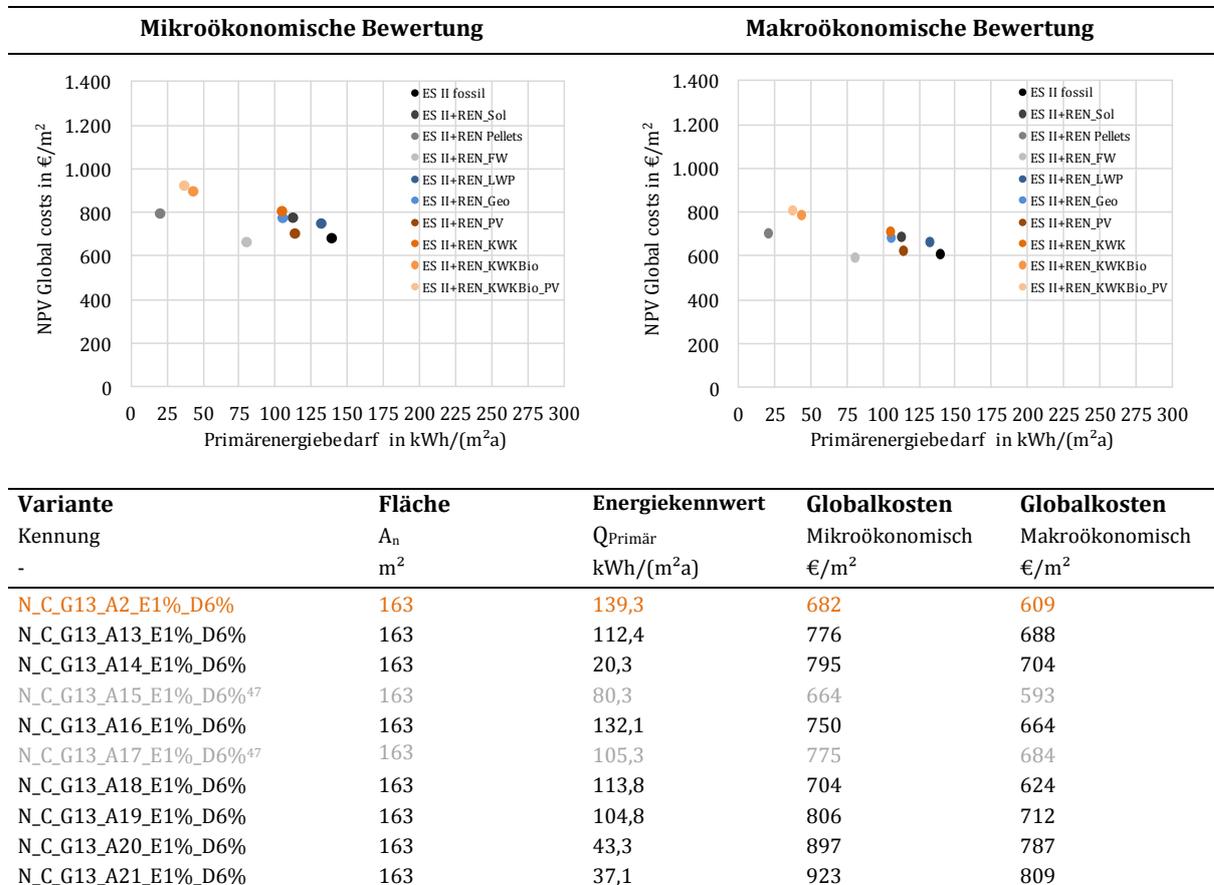
Tabelle 55: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird von einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Dadurch reduziert sich der Einfluss der Energiekosten und die Investitionskosten erreichen eine größere Gewichtung in den Globalkosten. Auch hier liegen die Basisvariante mit einem Kesselsystem und die Fernwärme auf einem kostenoptimalen Niveau.

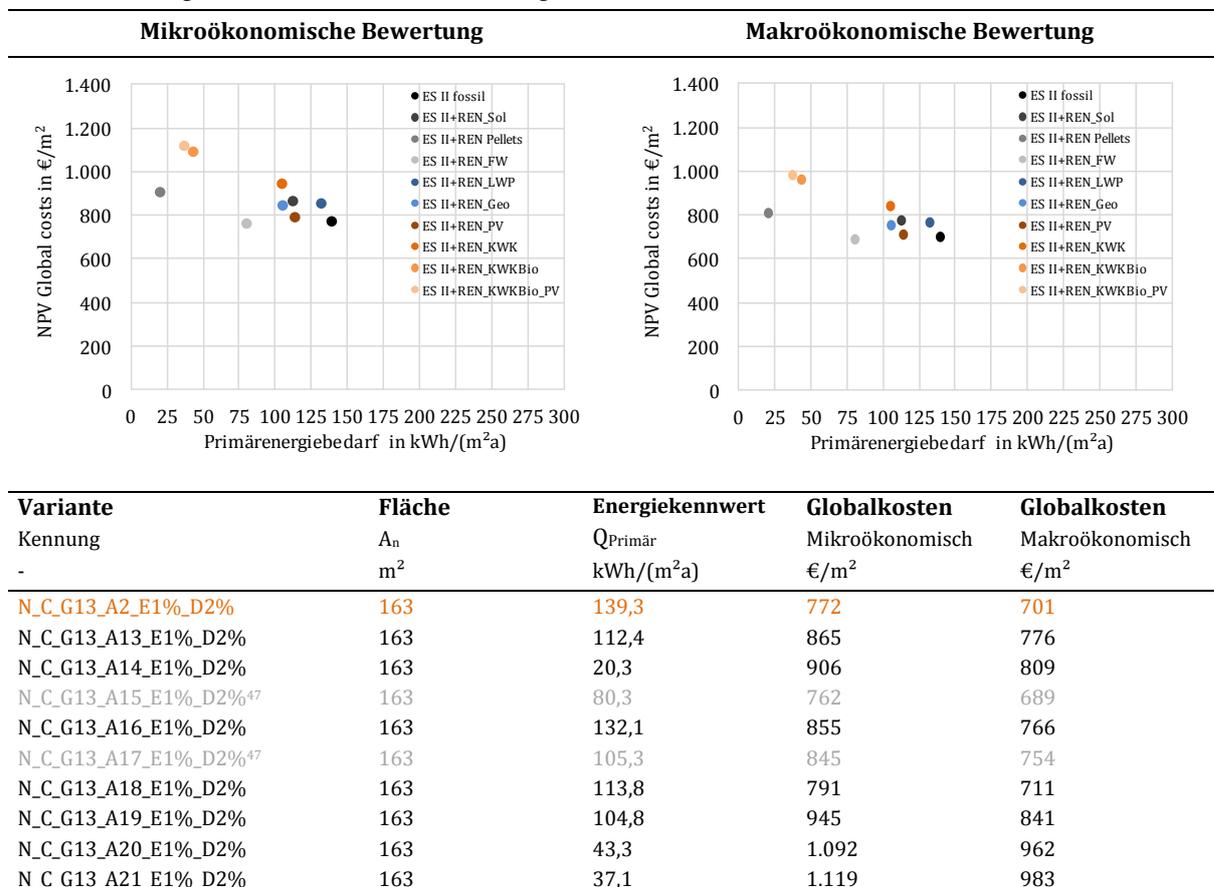
Tabelle 56: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a). Die Varianten mit Brennwertkessel/Fernwärme weisen auch in diesem Szenario die geringsten Globalkosten auf.

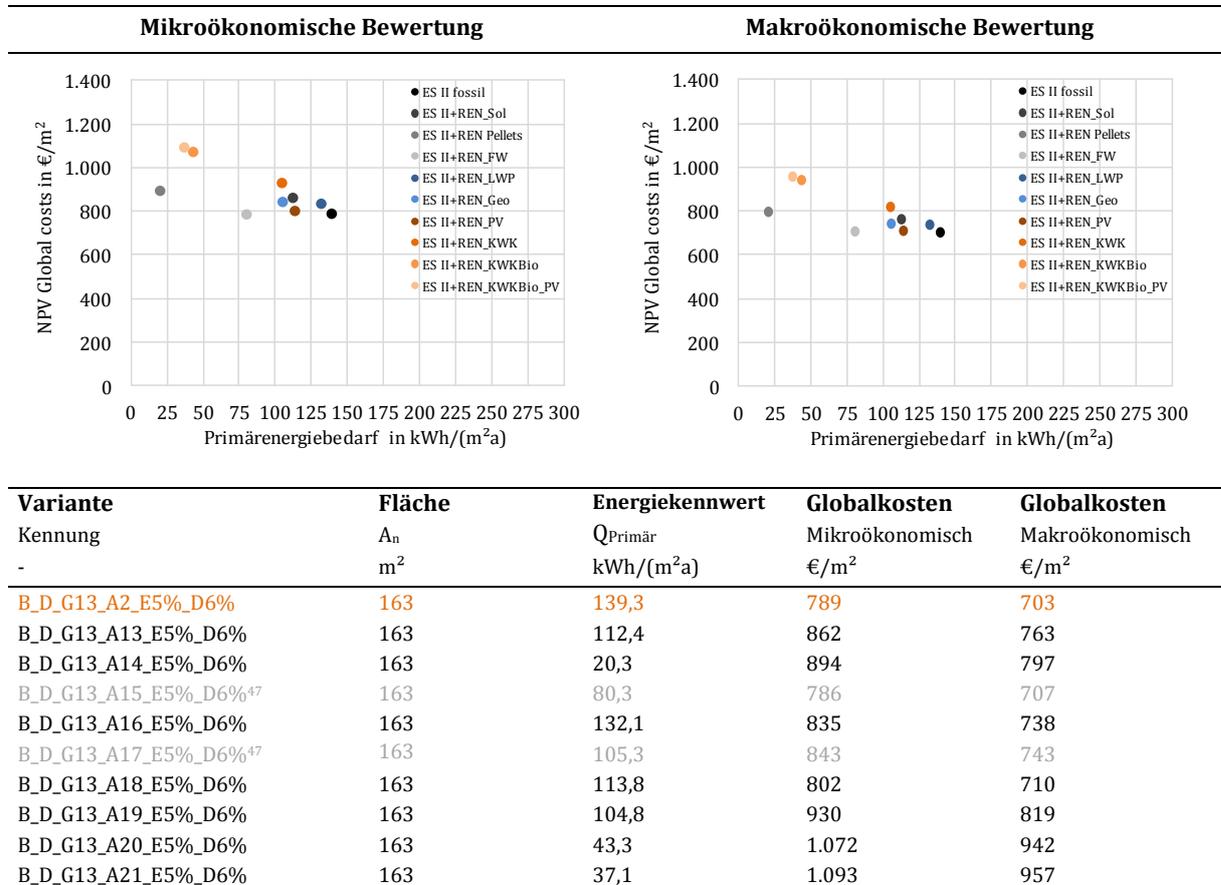
Tabelle 57: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höheren Kapitalzinsen (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum ebenfalls beim Brennwertkessel mit fossilem Energieträger.

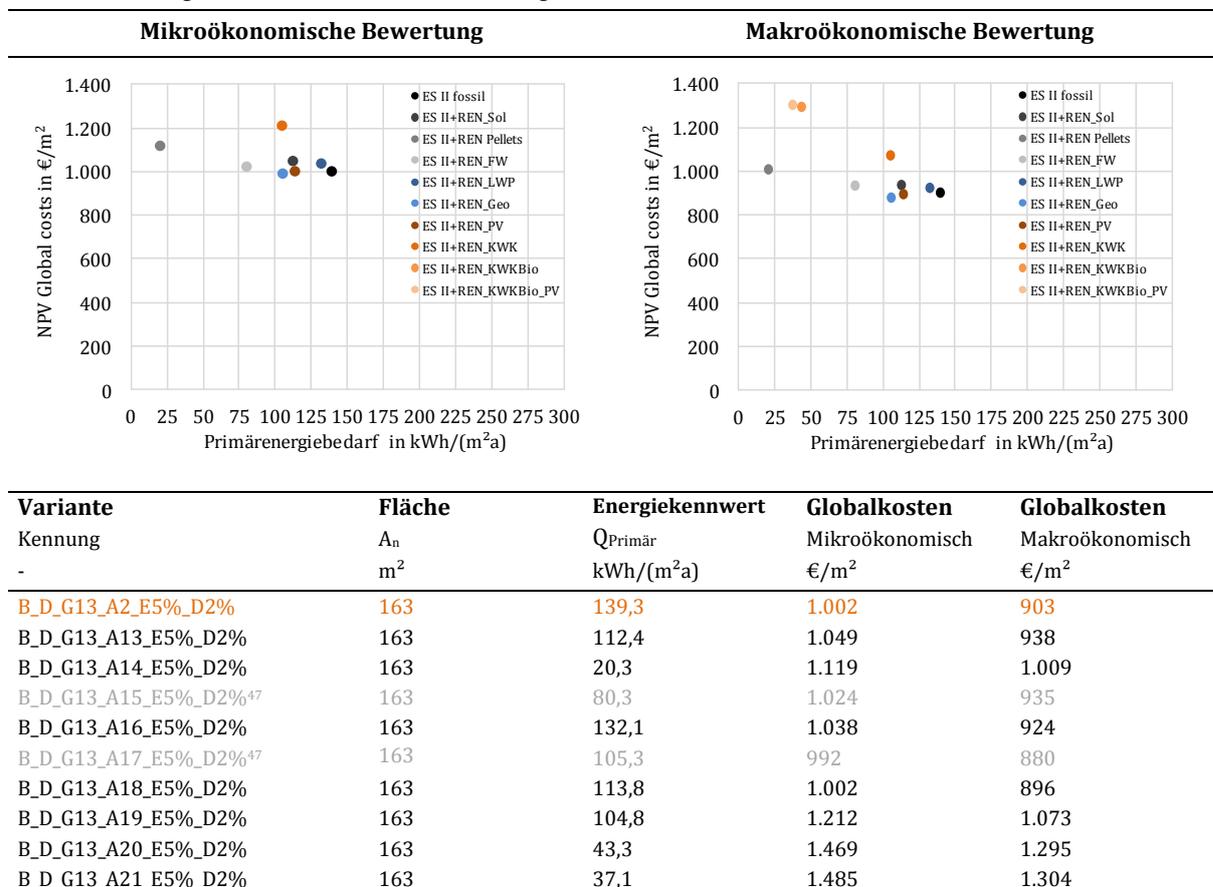
Tabelle 58: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



## Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 beschreibt eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigem Kapitalzinsniveau (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum der Basisvariante gleichauf mit der kombinierten PV-Nutzung.

Tabelle 59: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



### 4.1.2.3 Fazit für bestehende Wohngebäude

Die Bewertung der Kosteneffizienz und der Überprüfung der energetischen Anforderungsniveaus erfolgt für den Bereich Wärmeschutz (Effizienz) und für die kombinierte Betrachtung aus Wärmeschutz und Anlagentechnik (Effizienz mit erneuerbaren Energien).

Mit der Methode der kostenoptimalen Bewertung zeigt sich, dass das aktuelle Niveau der Wärmeschutzanforderungen nicht das kostenoptimale ist. Der Wärmeschutzstandard D weist über alle Varianten die geringsten Globalkosten auf. Mit den aktuellen baulichen Anforderungen an Einzelbauteile ergibt sich ein primärenergetisches Niveau, welches 7,7 % über dem liegt, was sich aus der kostenoptimalen Anforderung ergibt. Die aktuellen Anforderungen liegen demnach im Erwartungsbereich der Richtlinie von kleiner als 15 %.

Derzeit werden keine direkten Anforderungen an das verwendete Energiesystem gestellt. Das kostenoptimale Niveau liegt für alle infrage kommenden Anlagentechniken bei Nutzung eines Brennwerkessels mit fossilem Energieträger. Alle anderen für den Vergleich berücksichtigten Technologien führen zu höheren Globalkosten, bei jedoch gleichzeitig zum Teil deutlich geringem Primärenergiekennwert. Im Zuge der Überarbeitung der Anforderungsniveaus an die Gebäudetechnik im Falle einer Modernisierung können diese Ergebnisse einbezogen werden.

## 4.2 Nichtwohngebäude

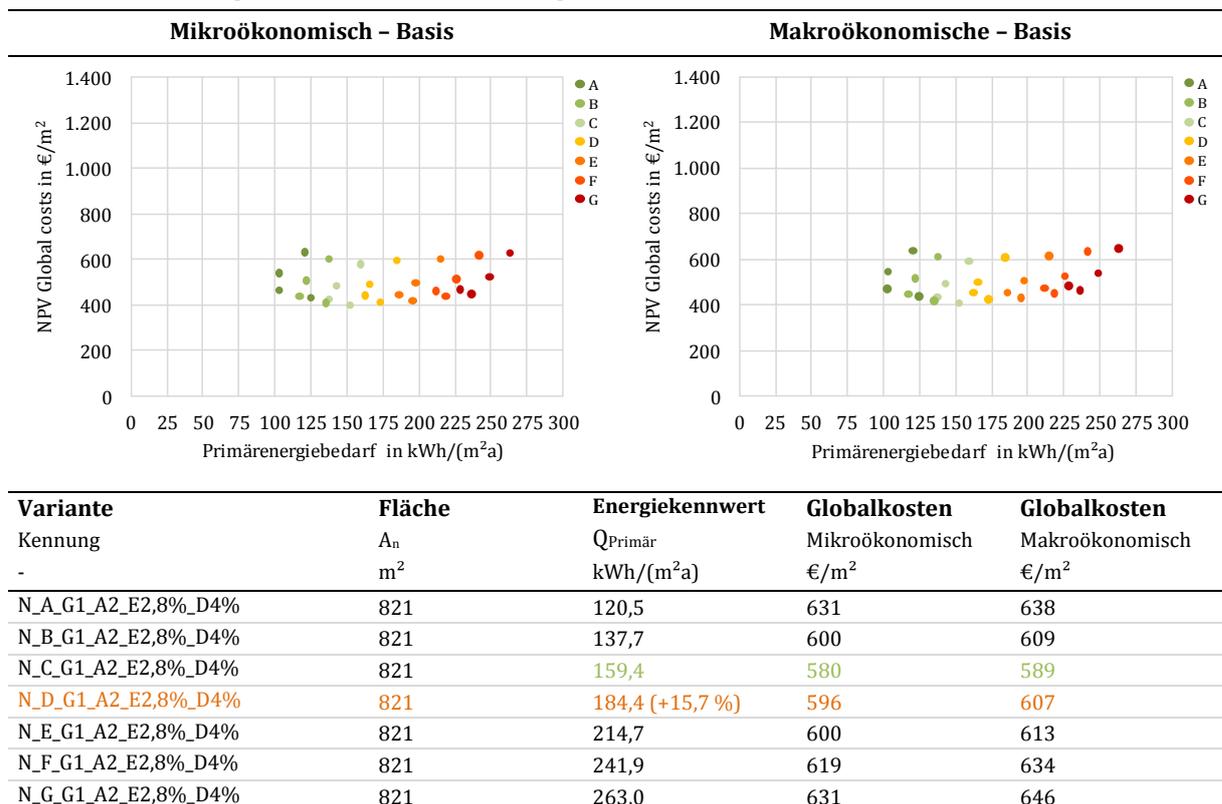
Analog zur Bewertung von neuen Wohngebäuden wird der Einfluss von Wärmeschutzmaßnahmen (bauliche Energieeffizienz) und die kombinierte Bewertung von Wärmeschutz und Anlagentechnik bzw. Energieträger (bauliche und anlagentechnische Energieeffizienz und erneuerbare Energien) durchgeführt. Bei Nichtwohngebäuden werden die Energiegewerke Heizen, Trinkwarmwassererwärmung, Kühlen, Belichten, Be- und Entfeuchten, Lüften und der dafür erforderliche Hilfsenergiebedarf einbezogen. Dadurch ergibt sich in der Gesamtbewertung tendenziell eine geringere Abhängigkeit der Globalkosten und des Primärenergiebedarfs vom Wärmeschutzstandard des Gebäudes.

### 4.2.1 Neubau – Nichtwohngebäude

#### 4.2.1.1 Wärmeschutz – Stufe I

Der Einfluss unterschiedlicher energetischer Bauweisen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit wird für die vier beschriebenen Nichtwohngebäude angegeben. Die aktuellen Anforderungen an neu zu errichtende Gebäude liegen bei der Anforderungsklasse D. Auf makro- und mikroökonomischer Ebene weist dieser Wärmedämmstandard bei allen Gebäuden jedoch nicht die geringsten Gesamtkosten auf. Der kostenoptimale Wärmeschutzstandard liegt wie bei Wohngebäuden auch beim Wärmeschutzniveau der Klasse C. Der derzeit durch die Energieeinsparverordnung geforderte primärenergetische Anforderungswert liegt im Mittel über alle Gebäude 15,9 % über dem Anforderungsniveau, das sich aus der kostenoptimalen Variante – der Klasse C – ergibt. Im Fall der Nichtwohngebäude zeigt sich generell ein wesentlich flacherer Verlauf der Globalkosten, da im Vergleich zu Wohngebäuden mehr Energiegewerke berücksichtigt werden. Der Einfluss des Wärmeschutzes schlägt sich dadurch weniger stark durch als bei Wohngebäuden, wo der Wärmeschutz den wesentlichen Anteil am Gesamtenergiebedarf ausmacht.

Tabelle 60: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.

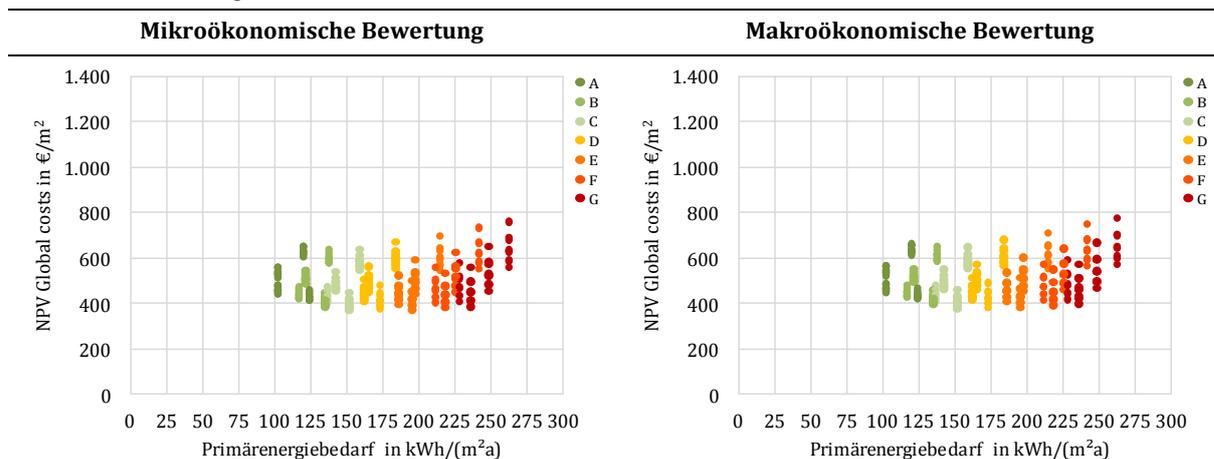


|                     |       |                 |     |     |
|---------------------|-------|-----------------|-----|-----|
| N_A_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 102,7           | 462 | 469 |
| N_B_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 117,2           | 440 | 447 |
| N_C_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 137,2           | 427 | 435 |
| N_D_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 162,3 (+18,3 %) | 442 | 452 |
| N_E_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 186,2           | 443 | 454 |
| N_F_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 211,9           | 461 | 473 |
| N_G_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 228,5           | 468 | 482 |
| N_A_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 124,7           | 430 | 438 |
| N_B_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 135,2           | 409 | 417 |
| N_C_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 152,2           | 397 | 407 |
| N_D_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 173,0 (+13,7 %) | 413 | 423 |
| N_E_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 195,6           | 419 | 431 |
| N_F_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 218,8           | 437 | 450 |
| N_G_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 236,4           | 449 | 463 |
| N_A_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 102,9           | 540 | 547 |
| N_B_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 121,7           | 508 | 515 |
| N_C_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 142,7           | 484 | 492 |
| N_D_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 165,6 (+16,0 %) | 491 | 501 |
| N_E_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 197,7           | 496 | 508 |
| N_F_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 225,9           | 513 | 527 |
| N_G_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 248,9           | 524 | 539 |

### Einfluss der Entwicklungsszenarien

Analog zur Auswertung von Wohngebäuden zeigen die folgenden Bilder zunächst eine Übersicht aller analysierten Varianten. Dabei werden die Parameter für Energiepreissteigerung und Kapitalzins für jedes Gebäude und jede Wärmeschutzklasse ausgewertet. Generell ist die Abhängigkeit des Wärmeschutzstandards geringer ausgeprägt als bei Wohngebäuden. Die mikro- und makroökonomische Bewertung zeigt keine so großen Unterschiede als bei Wohngebäuden. Das begründet sich dadurch, dass bei der mikroökonomischen Bewertung die Mehrwertsteuer bei Nichtwohngebäuden nicht berücksichtigt wird. Dies betrifft die Investitions- und die Energiekosten. Bei der makroökonomischen Betrachtung werden CO<sub>2</sub>-Kosten einbezogen, wodurch die Globalkosten u. U. höher ausfallen können als bei der mikroökonomischen Betrachtung. Es zeigt sich wie bei Wohngebäuden ebenfalls der Trend, dass die vertikale Spreizung einer jeden gleichfarbigen Linienschaar mit ineffizienterem Wärmeschutz abnimmt, was den großen Einfluss der Energiepreisentwicklung auf die Wirtschaftlichkeit widerspiegelt. Die kombinierte Bewertung einzelner Szenarien wird in folgendem Abschnitt diskutiert.

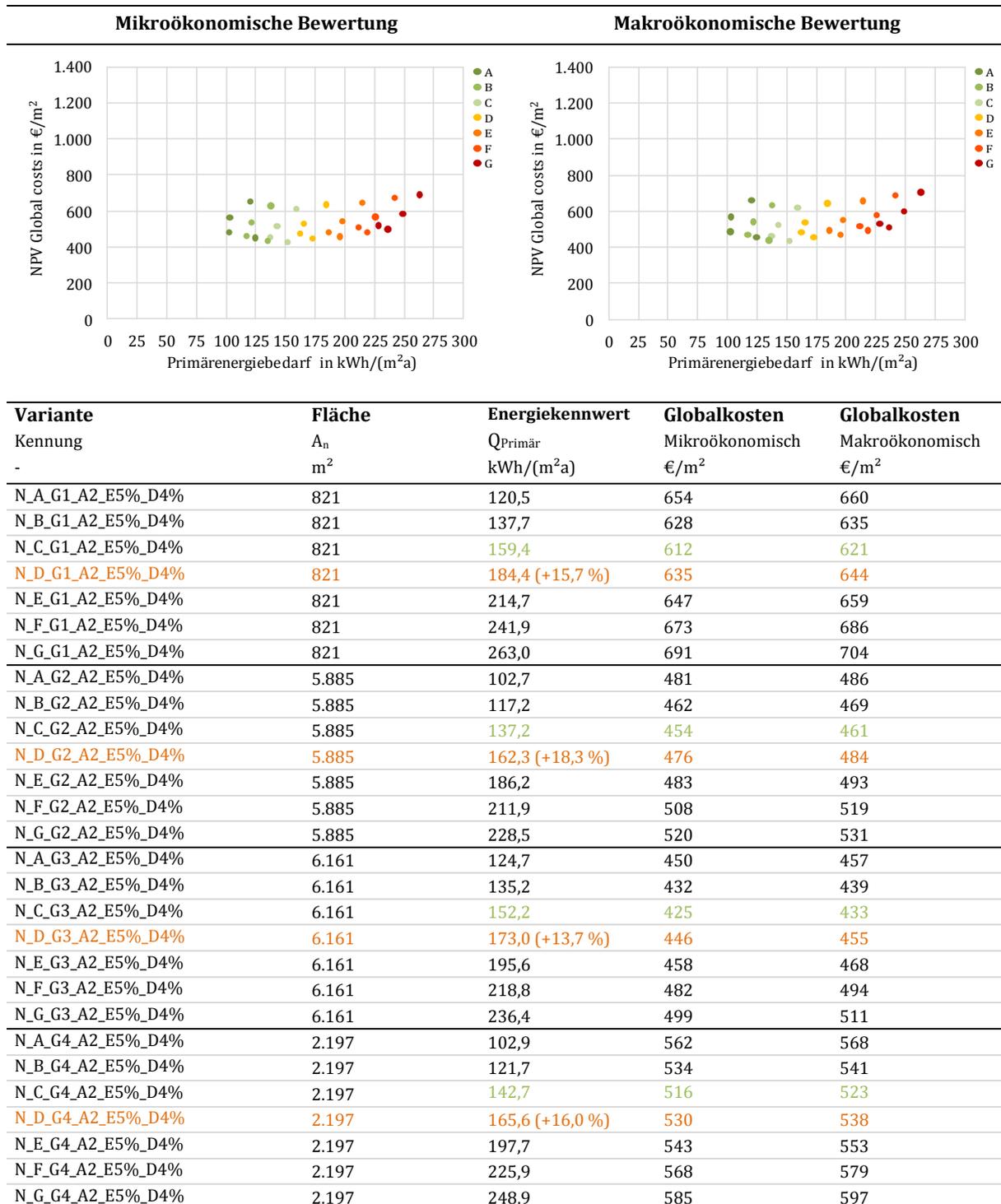
Tabelle 61: Nichtwohngebäude – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch.



## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreissteigerung (5 %/a) bei mittlerem Kapitalzinsniveau (4 %) ausgegangen (siehe Tabelle 17). Die kostenoptimale Variante entspricht dem Wärmeschutzstandard C. Im Mittel liegen die primärenergetischen Anforderungen 15,9 % über der Anforderung die sich aus der kostenoptimalen Lösung ergibt.

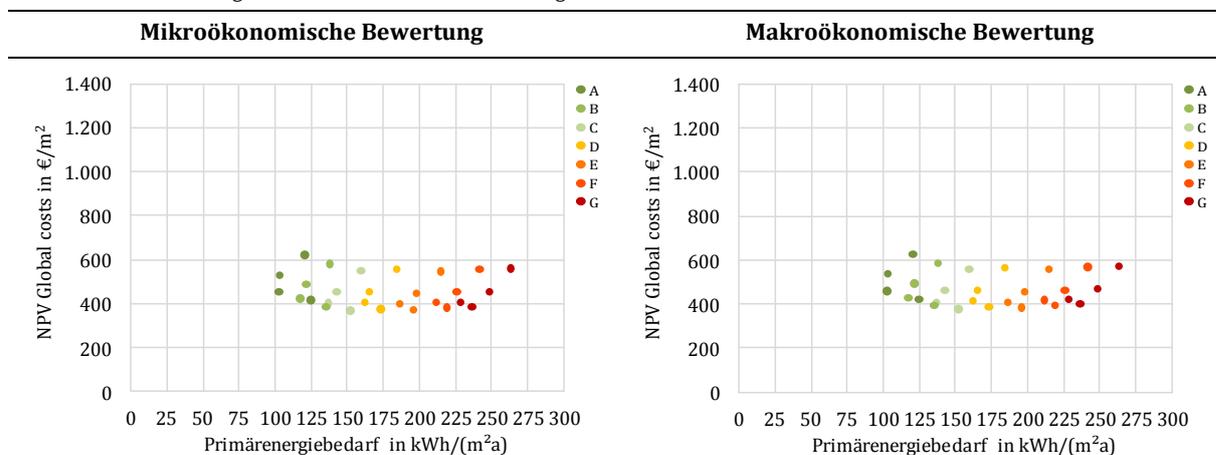
Tabelle 62: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird gemäß Tabelle 17 von einer geringen Energiepreisssteigerung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Dadurch reduziert sich der Einfluss der Energiekosten und die Investitionskosten erreichen eine größere Gewichtung in den Globalkosten. Das Niveau der Globalkosten verringert sich allgemein. Der Wärmeschutzstandard C markiert in diesem Szenario die kostenoptimale Variante. Im Mittel liegen die primärenergetischen Anforderungen -7,4 % unter der Anforderung die sich aus der kostenoptimalen Lösung ergibt.

Tabelle 63: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.

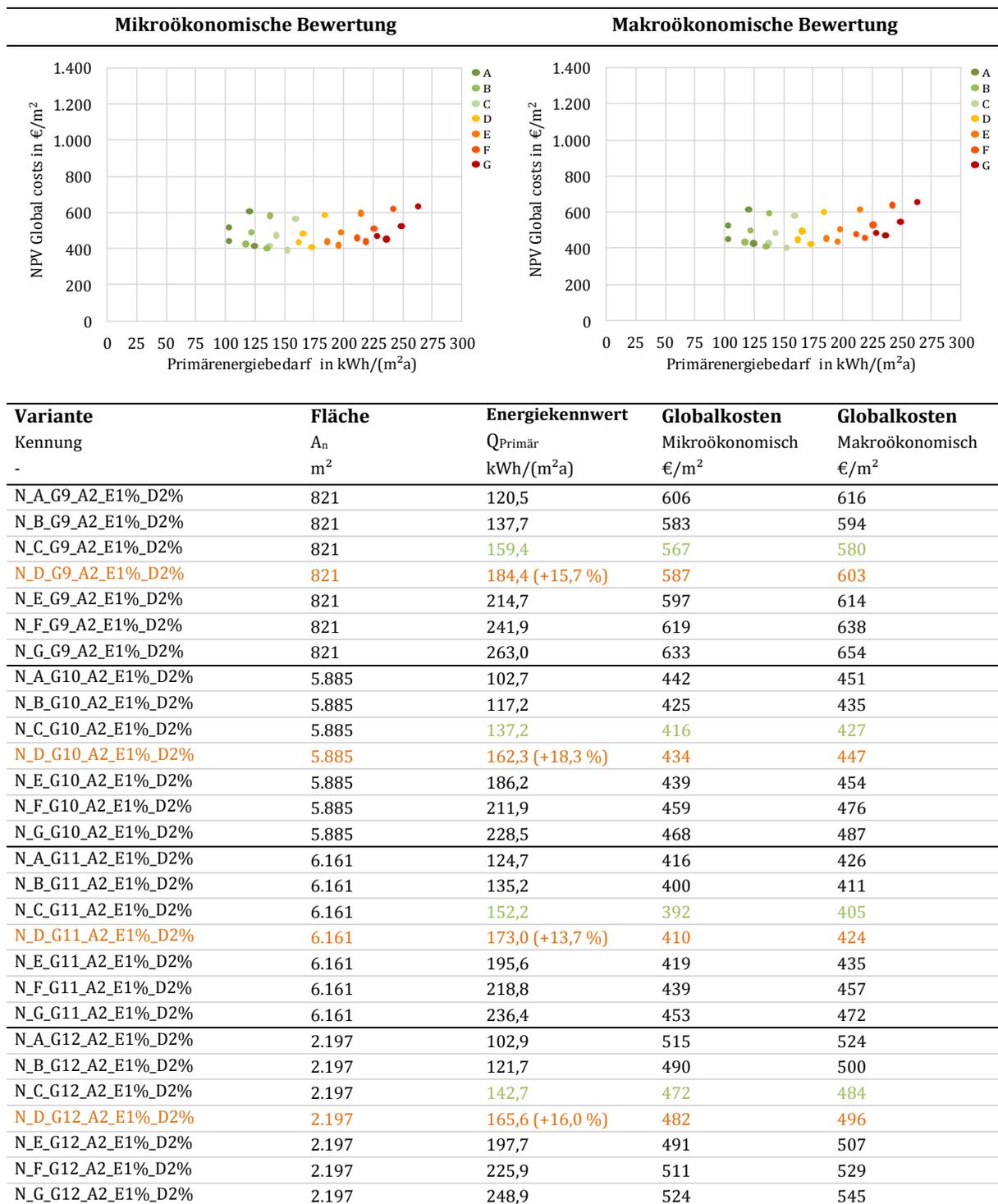


| Variante<br>Kennung | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|---------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                     |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| N_A_G1_A2_E1%_D6%   | 821  | 120,5  | 621                                 | 627                                 |
| N_B_G1_A2_E1%_D6%   | 821  | 137,7  | 580                                 | 587                                 |
| N_C_G1_A2_E1%_D6%   | 821  | 159,4  | 549                                 | 557                                 |
| N_D_G1_A2_E1%_D6%   | 821  | 184,4 (-14,1 %)  | 555                                 | 565                                 |
| N_E_G1_A2_E1%_D6%   | 821  | 214,7  | 547                                 | 558                                 |
| N_F_G1_A2_E1%_D6%   | 821  | 241,9  | 556                                 | 568                                 |
| N_G_G1_A2_E1%_D6%   | 821  | 263,0  | 559                                 | 572                                 |
| N_A_G2_A2_E1%_D6%   | 5.885                                      | 102,7  | 454                                 | 459                                 |
| N_B_G2_A2_E1%_D6%   | 5.885                                      | 117,2  | 423                                 | 429                                 |
| N_C_G2_A2_E1%_D6%   | 5.885                                      | 137,2  | 402                                 | 409                                 |
| N_D_G2_A2_E1%_D6%   | 5.885                                      | 162,3 (-12,8+ %)   | 408                                 | 416                                 |
| N_E_G2_A2_E1%_D6%   | 5.885                                      | 186,2  | 399                                 | 408                                 |
| N_F_G2_A2_E1%_D6%   | 5.885                                      | 211,9  | 407                                 | 418                                 |
| N_G_G2_A2_E1%_D6%   | 5.885                                      | 228,5  | 408                                 | 420                                 |
| N_A_G3_A2_E1%_D6%   | 6.161                                      | 124,7  | 415                                 | 422                                 |
| N_B_G3_A2_E1%_D6%   | 6.161                                      | 135,2  | 387                                 | 395                                 |
| N_C_G3_A2_E1%_D6%   | 6.161                                      | 152,2  | 369                                 | 377                                 |
| N_D_G3_A2_E1%_D6%   | 6.161                                      | 173,0 (+13,7 %)  | 376                                 | 386                                 |
| N_E_G3_A2_E1%_D6%   | 6.161                                      | 195,6  | 373                                 | 383                                 |
| N_F_G3_A2_E1%_D6%   | 6.161                                      | 218,8  | 383                                 | 394                                 |
| N_G_G3_A2_E1%_D6%   | 6.161                                      | 236,4  | 388                                 | 400                                 |
| N_A_G4_A2_E1%_D6%   | 2.197                                      | 102,9  | 531                                 | 537                                 |
| N_B_G4_A2_E1%_D6%   | 2.197                                      | 121,7  | 488                                 | 494                                 |
| N_C_G4_A2_E1%_D6%   | 2.197                                      | 142,7  | 454                                 | 462                                 |
| N_D_G4_A2_E1%_D6%   | 2.197                                      | 165,6 (-16,2 %)  | 453                                 | 462                                 |
| N_E_G4_A2_E1%_D6%   | 2.197                                      | 197,7  | 445                                 | 455                                 |
| N_F_G4_A2_E1%_D6%   | 2.197                                      | 225,9  | 452                                 | 464                                 |
| N_G_G4_A2_E1%_D6%   | 2.197                                      | 248,9  | 454                                 | 467                                 |

### Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a). Das Niveau der Globalkosten ist am geringsten. Es zeigt sich, dass die Wärmeschutzvariante C auch hier die kostenoptimalste ist. Im Mittel liegen die primärenergetischen Anforderungen 15,9 % über der Anforderung die sich aus der kostenoptimalen Lösung ergibt.

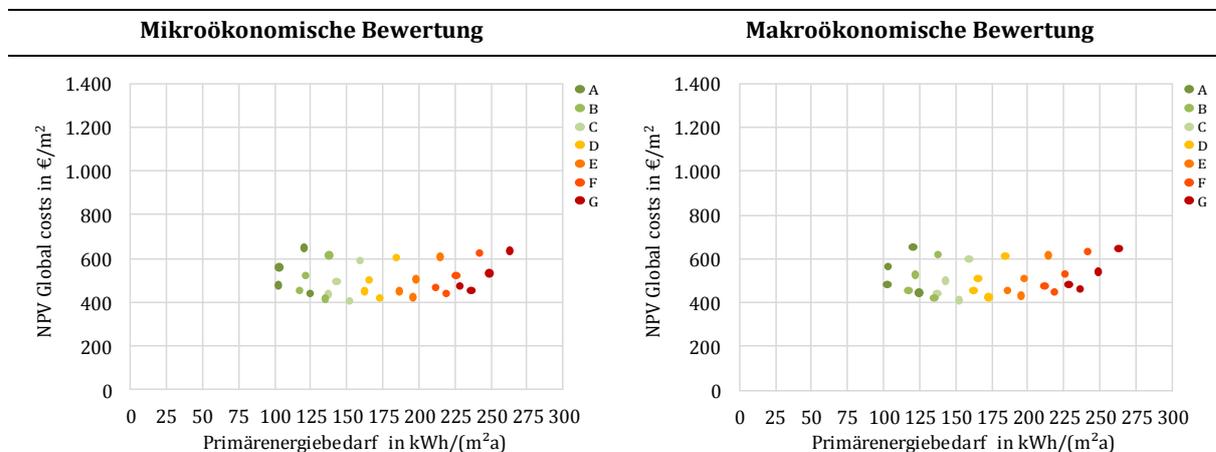
Tabelle 64: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höheren Kapitalzinsen (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. Das Niveau der Globalkosten ist hier am höchsten und die Varianten mit dem Wärmeschutzstandard C ist in diesem Szenario kostenoptimal. Im Mittel liegen die primärenergetischen Anforderungen 15,9 % über der Anforderung die sich aus der kostenoptimalen Lösung ergibt.

Tabelle 65: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



| Variante<br>Kennung | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|---------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                     |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| N_A_G1_A2_E5%_D6%   | 821  | 120,5  | 649                                 | 655                                 |
| N_B_G1_A2_E5%_D6%   | 821  | 137,7  | 615                                 | 620                                 |
| N_C_G1_A2_E5%_D6%   | 821  | 159,4  | 591                                 | 598                                 |
| N_D_G1_A2_E5%_D6%   | 821  | 184,4 (+15,7 %)  | 605                                 | 613                                 |
| N_E_G1_A2_E5%_D6%   | 821  | 214,7  | 607                                 | 616                                 |
| N_F_G1_A2_E5%_D6%   | 821  | 241,9  | 625                                 | 635                                 |
| N_G_G1_A2_E5%_D6%   | 821  | 263,0  | 635                                 | 646                                 |
| N_A_G2_A2_E5%_D6%   | 5.885                                      | 102,7  | 477                                 | 482                                 |
| N_B_G2_A2_E5%_D6%   | 5.885                                      | 117,2  | 452                                 | 457                                 |
| N_C_G2_A2_E5%_D6%   | 5.885                                      | 137,2  | 437                                 | 443                                 |
| N_D_G2_A2_E5%_D6%   | 5.885                                      | 162,3 (+18,3 %)  | 451                                 | 458                                 |
| N_E_G2_A2_E5%_D6%   | 5.885                                      | 186,2  | 450                                 | 458                                 |
| N_F_G2_A2_E5%_D6%   | 5.885                                      | 211,9  | 467                                 | 476                                 |
| N_G_G2_A2_E5%_D6%   | 5.885                                      | 228,5  | 474                                 | 483                                 |
| N_A_G3_A2_E5%_D6%   | 6.161                                      | 124,7  | 441                                 | 446                                 |
| N_B_G3_A2_E5%_D6%   | 6.161                                      | 135,2  | 417                                 | 423                                 |
| N_C_G3_A2_E5%_D6%   | 6.161                                      | 152,2  | 404                                 | 410                                 |
| N_D_G3_A2_E5%_D6%   | 6.161                                      | 173,0 (+13,7 %)  | 418                                 | 426                                 |
| N_E_G3_A2_E5%_D6%   | 6.161                                      | 195,6  | 423                                 | 431                                 |
| N_F_G3_A2_E5%_D6%   | 6.161                                      | 218,8  | 441                                 | 450                                 |
| N_G_G3_A2_E5%_D6%   | 6.161                                      | 236,4  | 452                                 | 462                                 |
| N_A_G4_A2_E5%_D6%   | 2.197                                      | 102,9  | 559                                 | 563                                 |
| N_B_G4_A2_E5%_D6%   | 2.197                                      | 121,7  | 522                                 | 527                                 |
| N_C_G4_A2_E5%_D6%   | 2.197                                      | 142,7  | 495                                 | 501                                 |
| N_D_G4_A2_E5%_D6%   | 2.197                                      | 165,6 (+16,0 %)  | 502                                 | 509                                 |
| N_E_G4_A2_E5%_D6%   | 2.197                                      | 197,7  | 504                                 | 513                                 |
| N_F_G4_A2_E5%_D6%   | 2.197                                      | 225,9  | 521                                 | 531                                 |
| N_G_G4_A2_E5%_D6%   | 2.197                                      | 248,9  | 531                                 | 542                                 |

### Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 beschreibt eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigem Kapitalzinsniveau (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). Das Niveau der Globalkosten ist hier am höchsten und die Varianten mit dem Wärmeschutzstandard C ist in diesem Szenario kostenoptimal. Im Mittel liegen die aktuellen primärenergetischen Anforderungen 24,5 % über der Anforderung die sich aus der kostenoptimalen Lösung ergibt.

Tabelle 66: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



### 4.2.1.2 Anlagentechnik – Stufe II

Bei Nichtwohngebäuden werden zuerst unterschiedliche technische Systempakete bewertet. Darin wird die Effizienz von Beleuchtungsanlagen, Lüftungsanlagen, Heizungs- und Kälteanlagen einbezogen. Die Randbedingungen der drei Standards sind in Tabelle 15 aufgeführt. Damit werden unterschiedliche Effizienzstandards abgebildet. Der Standard II entspricht den in der aktuellen Energieeinsparverordnung definierten Anforderungen. Die Stufe I spiegelt ein ineffizientes System wider, welches i. d. R. auch mit geringen Investitionskosten verbunden ist. Die Stufe II beschreibt ein sinnvolles Maßnahmenpaket mit höherer Energieeffizienz, wie sie durch die Bilanzmethoden der Energieeinsparverordnung abgebildet werden kann.

Tabelle 67: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES I

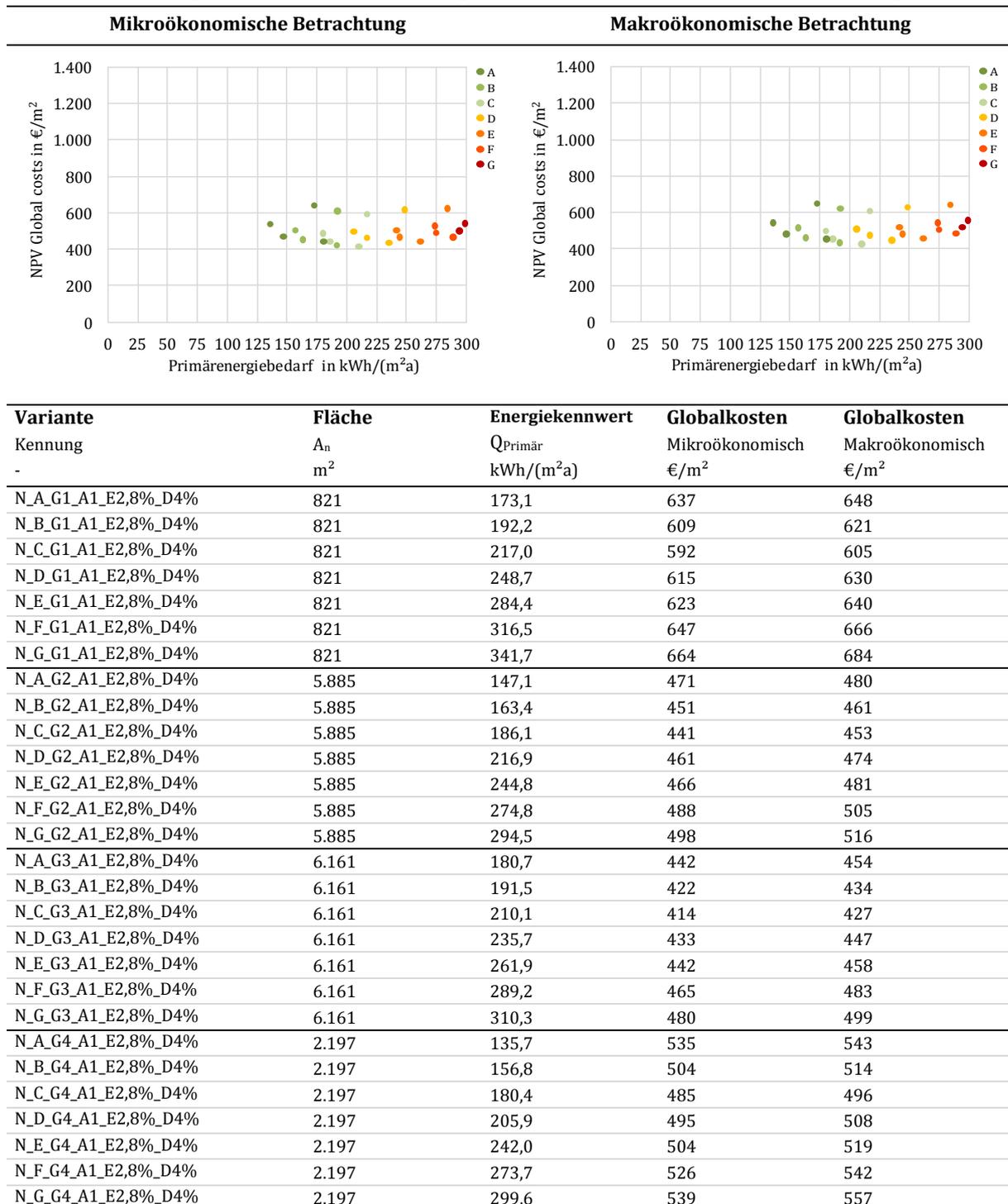
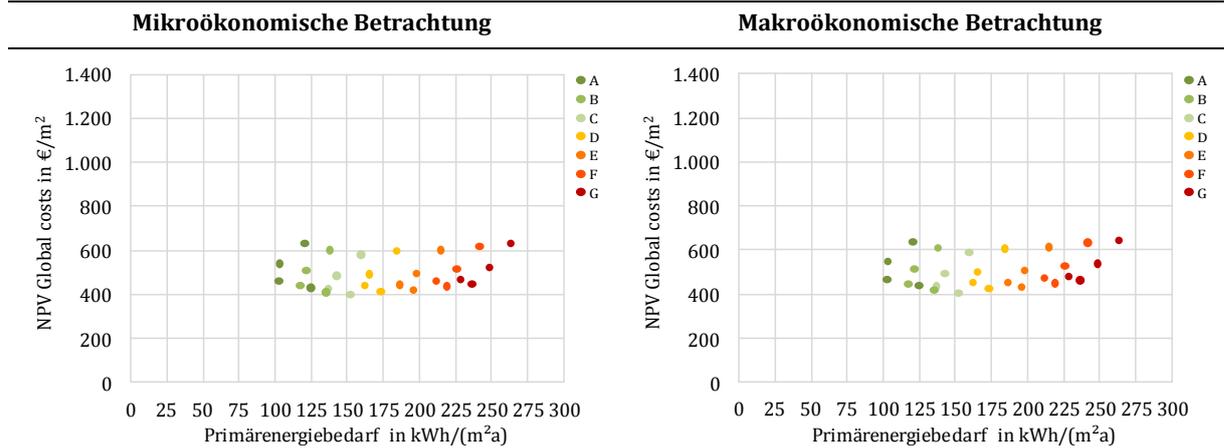
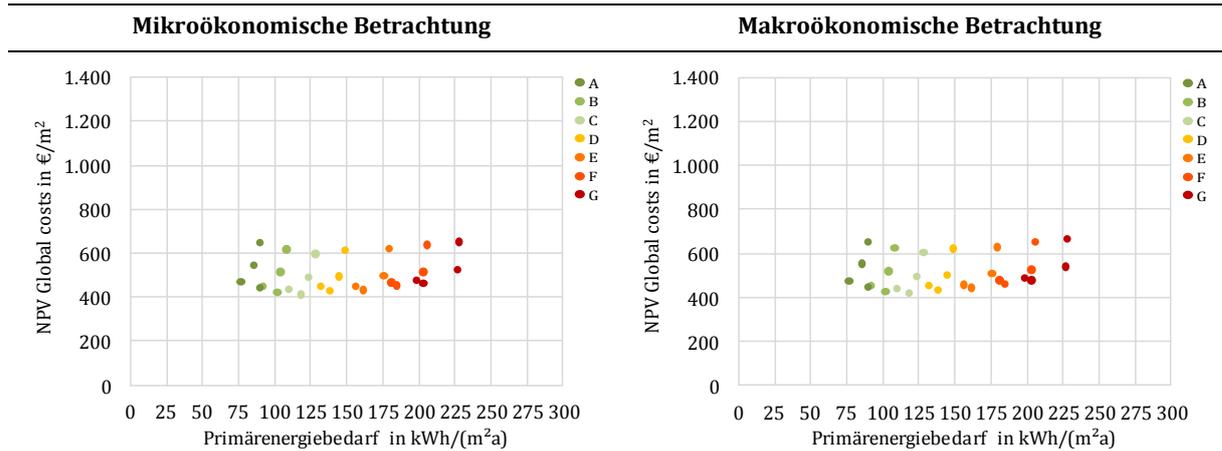


Tabelle 68: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES II



| Variante<br>Kennung | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|---------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                     |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| N_A_G1_A2_E2,8%_D4% | 821  | 120,5  | 631                                 | 638                                 |
| N_B_G1_A2_E2,8%_D4% | 821  | 137,7  | 600                                 | 609                                 |
| N_C_G1_A2_E2,8%_D4% | 821  | 159,4  | 580                                 | 589                                 |
| N_D_G1_A2_E2,8%_D4% | 821  | 184,4 (+15,7 %)  | 596                                 | 607                                 |
| N_E_G1_A2_E2,8%_D4% | 821  | 214,7  | 600                                 | 613                                 |
| N_F_G1_A2_E2,8%_D4% | 821  | 241,9  | 619                                 | 634                                 |
| N_G_G1_A2_E2,8%_D4% | 821  | 263,0  | 631                                 | 646                                 |
| N_A_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 102,7  | 462                                 | 469                                 |
| N_B_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 117,2  | 440                                 | 447                                 |
| N_C_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 137,2  | 427                                 | 435                                 |
| N_D_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 162,3 (+18,3 %)  | 442                                 | 452                                 |
| N_E_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 186,2  | 443                                 | 454                                 |
| N_F_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 211,9  | 461                                 | 473                                 |
| N_G_G2_A2_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 228,5  | 468                                 | 482                                 |
| N_A_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 124,7  | 430                                 | 438                                 |
| N_B_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 135,2  | 409                                 | 417                                 |
| N_C_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 152,2  | 397                                 | 407                                 |
| N_D_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 173,0 (+13,7 %)  | 413                                 | 423                                 |
| N_E_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 195,6  | 419                                 | 431                                 |
| N_F_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 218,8  | 437                                 | 450                                 |
| N_G_G3_A2_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 236,4  | 449                                 | 463                                 |
| N_A_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 102,9  | 540                                 | 547                                 |
| N_B_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 121,7  | 508                                 | 515                                 |
| N_C_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 142,7  | 484                                 | 492                                 |
| N_D_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 165,6 (+16 %)  | 491                                 | 501                                 |
| N_E_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 197,7  | 496                                 | 508                                 |
| N_F_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 225,9  | 513                                 | 527                                 |
| N_G_G4_A2_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 248,9  | 524                                 | 539                                 |

Tabelle 69: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES III



| Variante<br>Kennung | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|---------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                     |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| N_A_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 90,0   | 647                                 | 653                                 |
| N_B_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 108,3  | 618                                 | 624                                 |
| N_C_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 128,1  | 596                                 | 604                                 |
| N_D_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 149,2  | 613                                 | 622                                 |
| N_E_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 179,5  | 618                                 | 629                                 |
| N_F_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 205,9  | 638                                 | 650                                 |
| N_G_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 227,6  | 651                                 | 664                                 |
| N_A_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 76,7   | 471                                 | 475                                 |
| N_B_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 91,6   | 450                                 | 455                                 |
| N_C_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 109,8  | 434                                 | 440                                 |
| N_D_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 132,1  | 448                                 | 456                                 |
| N_E_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 155,9  | 449                                 | 459                                 |
| N_F_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 181,0  | 467                                 | 478                                 |
| N_G_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 198,4  | 475                                 | 487                                 |
| N_A_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 89,7   | 442                                 | 448                                 |
| N_B_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 102,1  | 423                                 | 429                                 |
| N_C_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 118,5  | 412                                 | 419                                 |
| N_D_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 138,2  | 427                                 | 435                                 |
| N_E_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 161,4  | 433                                 | 443                                 |
| N_F_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 184,7  | 452                                 | 463                                 |
| N_G_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 203,0  | 465                                 | 477                                 |
| N_A_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 85,7   | 547                                 | 553                                 |
| N_B_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 103,9  | 514                                 | 520                                 |
| N_C_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 123,8  | 489                                 | 496                                 |
| N_D_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 144,7  | 494                                 | 503                                 |
| N_E_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 175,8  | 498                                 | 508                                 |
| N_F_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 203,2  | 514                                 | 526                                 |
| N_G_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 226,5  | 525                                 | 539                                 |

## Zwischenfazit Anlagentechnik

Folgende Tabelle zeigt den direkten Vergleich der drei technischen Ausstattungspakete. Über alle Gebäude hinweg liegt die kostenoptimale Variante beim technischen Ausstattungsniveau der Stufe II, welches sich an den aktuellen Anforderungen für neue Gebäude orientiert. Es zeigt sich aber auch, dass die Unterschiede zum System mit einer höheren Energieeffizienz relativ gering sind. Das Globalkostenniveau des effizienteren Maßnahmenpaket ES III liegt nur geringfügig höher (im Mittel 2,3 %, **blau**) als das der kostenoptimalen Lösung (**grün**).

Tabelle 70: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES I-III

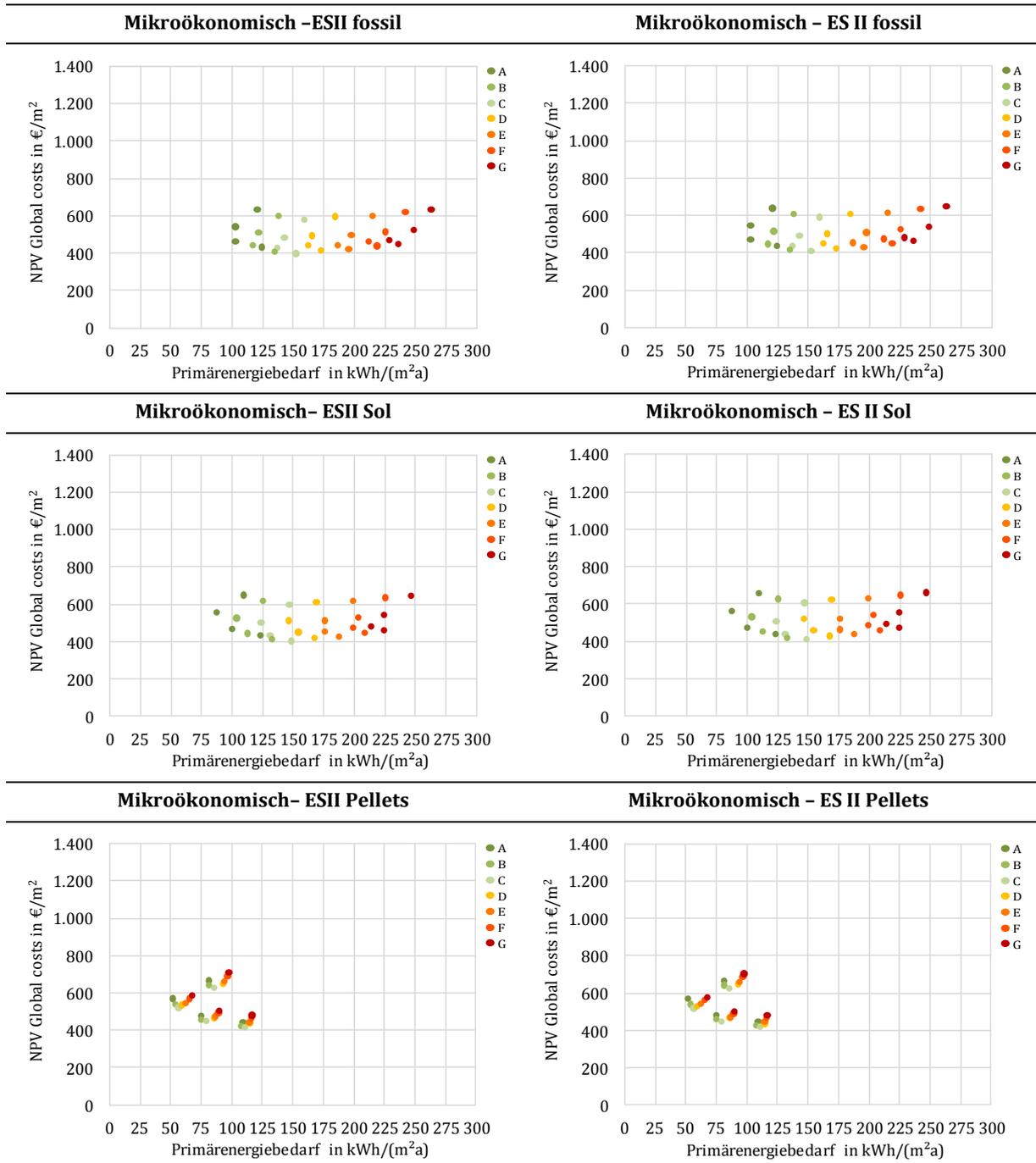
| Variante         | Kennwert                 | Kennwert                  | Kennwert                   | Globalkosten     | Globalkosten   | Globalkosten     |
|------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|----------------|------------------|
| Kennung          | Q <sub>Primär</sub> ES I | Q <sub>Primär</sub> ES II | Q <sub>Primär</sub> ES III | Mikroök. ES I    | Mikroök. ES II | Mikroök. ES III  |
| -                | kWh/(m <sup>2</sup> a)   | kWh/(m <sup>2</sup> a)    | kWh/(m <sup>2</sup> a)     | €/m <sup>2</sup> |                | €/m <sup>2</sup> |
| N_A_G1_E2,8%_D4% | 173,1                    | 120,5                     | 90,0                       | 637              | 631            | 647              |
| N_B_G1_E2,8%_D4% | 192,2                    | 137,7                     | 108,3                      | 609              | 600            | 618              |
| N_C_G1_E2,8%_D4% | 217,0                    | 159,4                     | 128,1                      | 592              | 580            | 596 (+2,8 %)     |
| N_D_G1_E2,8%_D4% | 248,7                    | 184,4 (+15,7 %)           | 149,2                      | 615              | 596            | 613              |
| N_E_G1_E2,8%_D4% | 284,4                    | 214,7                     | 179,5                      | 623              | 600            | 618              |
| N_F_G1_E2,8%_D4% | 316,5                    | 241,9                     | 205,9                      | 647              | 619            | 638              |
| N_G_G1_E2,8%_D4% | 341,7                    | 263,0                     | 227,6                      | 664              | 631            | 651              |
| N_A_G2_E2,8%_D4% | 147,1                    | 102,7                     | 76,7                       | 471              | 462            | 471              |
| N_B_G2_E2,8%_D4% | 163,4                    | 117,2                     | 91,6                       | 451              | 440            | 450              |
| N_C_G2_E2,8%_D4% | 186,1                    | 137,2                     | 109,8                      | 441              | 427            | 434 (+1,6 %)     |
| N_D_G2_E2,8%_D4% | 216,9                    | 162,3 (+18,3 %)           | 132,1                      | 461              | 442            | 448              |
| N_E_G2_E2,8%_D4% | 244,8                    | 186,2                     | 155,9                      | 466              | 443            | 449              |
| N_F_G2_E2,8%_D4% | 274,8                    | 211,9                     | 181,0                      | 488              | 461            | 467              |
| N_G_G2_E2,8%_D4% | 294,5                    | 228,5                     | 198,4                      | 498              | 468            | 475              |
| N_A_G3_E2,8%_D4% | 180,7                    | 124,7                     | 89,7                       | 442              | 430            | 442              |
| N_B_G3_E2,8%_D4% | 191,5                    | 135,2                     | 102,1                      | 422              | 409            | 423              |
| N_C_G3_E2,8%_D4% | 210,1                    | 152,2                     | 118,5                      | 414              | 397            | 412 (+3,8 %)     |
| N_D_G3_E2,8%_D4% | 235,7                    | 173,0 (+13,7 %)           | 138,2                      | 433              | 413            | 427              |
| N_E_G3_E2,8%_D4% | 261,9                    | 195,6                     | 161,4                      | 442              | 419            | 433              |
| N_F_G3_E2,8%_D4% | 289,2                    | 218,8                     | 184,7                      | 465              | 437            | 452              |
| N_G_G3_E2,8%_D4% | 310,3                    | 236,4                     | 203,0                      | 480              | 449            | 465              |
| N_A_G4_E2,8%_D4% | 135,7                    | 102,9                     | 85,7                       | 535              | 540            | 547              |
| N_B_G4_E2,8%_D4% | 156,8                    | 121,7                     | 103,9                      | 504              | 508            | 514              |
| N_C_G4_E2,8%_D4% | 180,4                    | 142,7                     | 123,8                      | 485              | 484            | 489 (+1,0 %)     |
| N_D_G4_E2,8%_D4% | 205,9                    | 165,6 (+16 %)             | 144,7                      | 495              | 491            | 494              |
| N_E_G4_E2,8%_D4% | 242,0                    | 197,7                     | 175,8                      | 504              | 496            | 498              |
| N_F_G4_E2,8%_D4% | 273,7                    | 225,9                     | 203,2                      | 526              | 513            | 514              |
| N_G_G4_E2,8%_D4% | 299,6                    | 248,9                     | 226,5                      | 539              | 524            | 525              |

Für die folgenden Analysen wird, neben der Wärmeschutzklasse D, der Anlageneffizienzstandard ES II als Grundlage herangezogen.

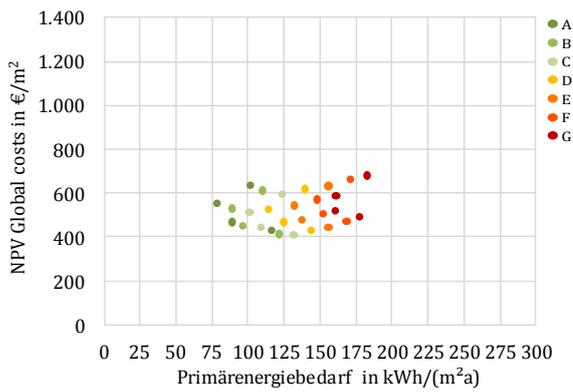
## Anlagenvergleich über alle Wärmeschutzklassen

Um den Einfluss verschiedener Wärmeerzeuger, bzw. den Einfluss des Einsatzes von erneuerbaren Energien auf die Wirtschaftlichkeit zu überprüfen, werden für alle Wärmeschutzklassen die möglichen Anlagenvarianten bewertet. Die Einbeziehung aller Wärmeschutzklassen in die Auswertung hat zum Ziel, Tendenzen erkennbar zu machen, ob eine bestimmte Technologie ggf. einen höheren Einfluss auf den Wärmeschutzstandard hat. Dies wird in den Diagrammen über einen ausgeprägten kurvigen Verlauf dargestellt. Z. B. ist dies bei Pelletsanlagen, Wärmepumpen und KWK-Systemen der Fall. Unabhängig von diesen Verläufen liegt der Tiefpunkt einer jeden Kurvenschar überwiegend beim Wärmeschutzstandard C. Diese kann demnach technologieneutral als kostenoptimal identifiziert werden.

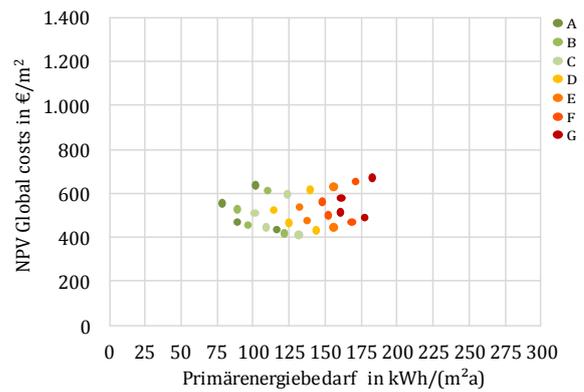
Tabelle 71: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik.



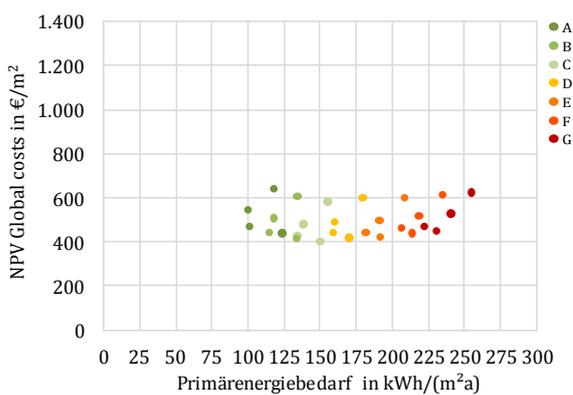
**Mikroökonomisch- ESII FW**



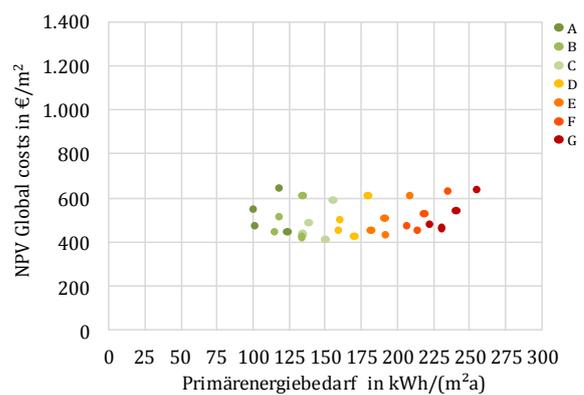
**Mikroökonomisch - ES II FW**



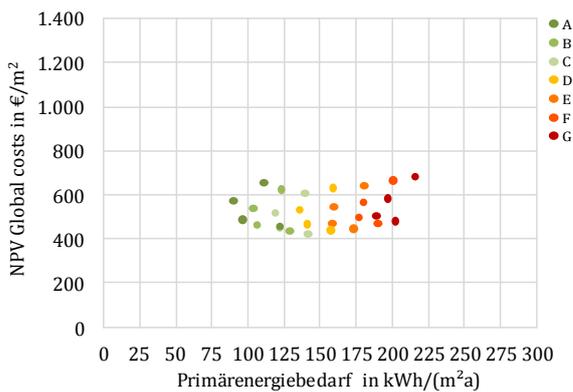
**Mikroökonomisch- ESII LWP**



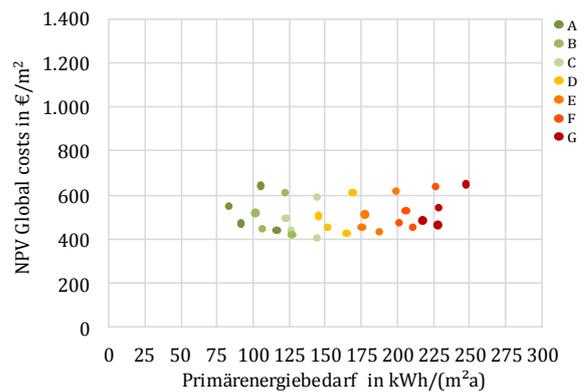
**Mikroökonomisch - ES II LWP**



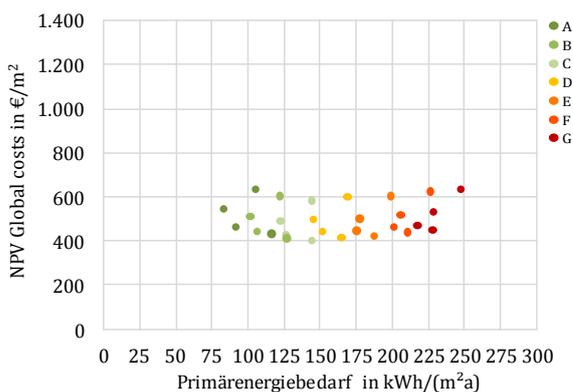
**Mikroökonomisch- ESII Geo**



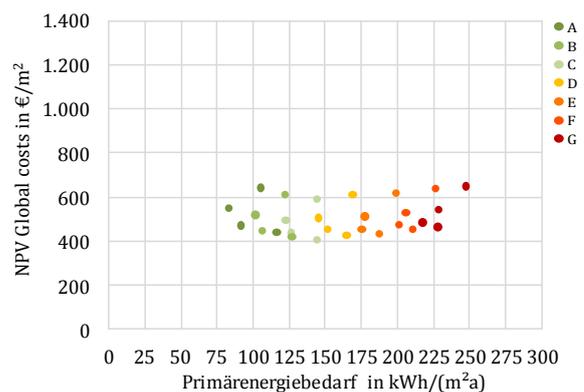
**Mikroökonomisch - ES II Geo**



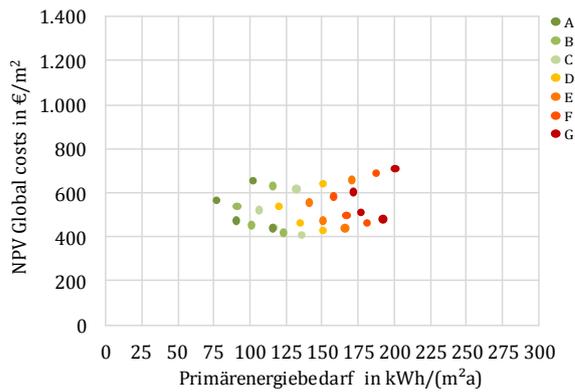
**Mikroökonomisch- ESII PV**



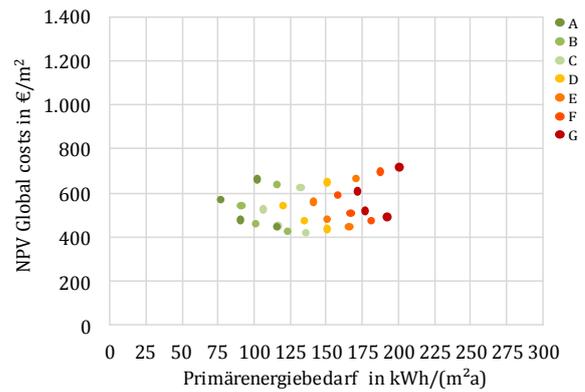
**Mikroökonomisch - ES II PV**



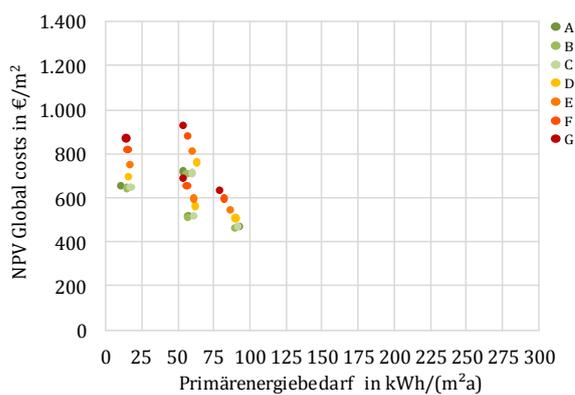
**Mikroökonomisch- ESII KWK**



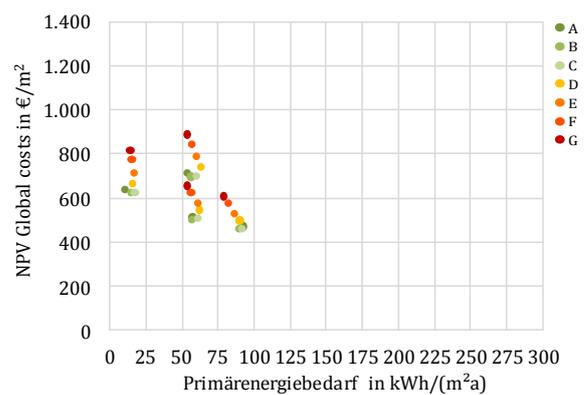
**Mikroökonomisch - ES II KWK**



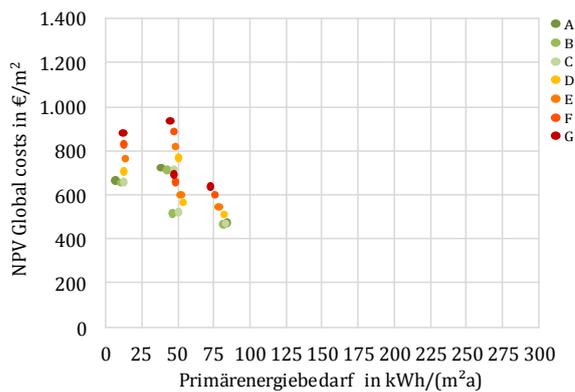
**Mikroökonomisch- ESII KWKBio**



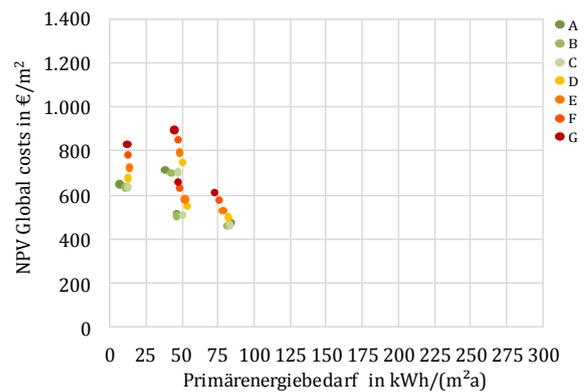
**Mikroökonomisch - ES II KWKBio**



**Mikroökonomisch- ESII KWKBio\_PV**



**Mikroökonomisch - ES II KWKBio\_PV**



**Zwischenfazit**

Über alle in jedem Gebäude nutzbaren Technologien ist die Wärmeschutzklasse C i. d. R. die kostenoptimale. Zum direkten Vergleich des Einflusses der Anlagentechnik und verschiedener Energieträger untereinander wird der folgende Vergleich auf der Basis eines Gebäudes der Wärmeschutzklasse C durchgeführt.

## Direkter Anlagenvergleich für die Wärmeschutzklasse C

Der Einfluss der angesetzten Anlagentechnik wird für jedes Gebäude separat dargestellt. Wie vorstehend beschrieben, wird unterstellt, dass jedes Gebäude im Wärmeschutzniveau C ausgeführt ist. Der Einfluss der variierten Anlagentechnik ist im Vergleich zu Wohngebäuden geringer, weshalb der Verlauf der Globalkosten geringer ausgeprägt ist. Energieeffizientere Erzeuger (Geothermie, Fernwärme, Pellets, etc.) führen meist jedoch nur zu einem moderaten Anstieg der Globalkosten.

Tabelle 72: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.

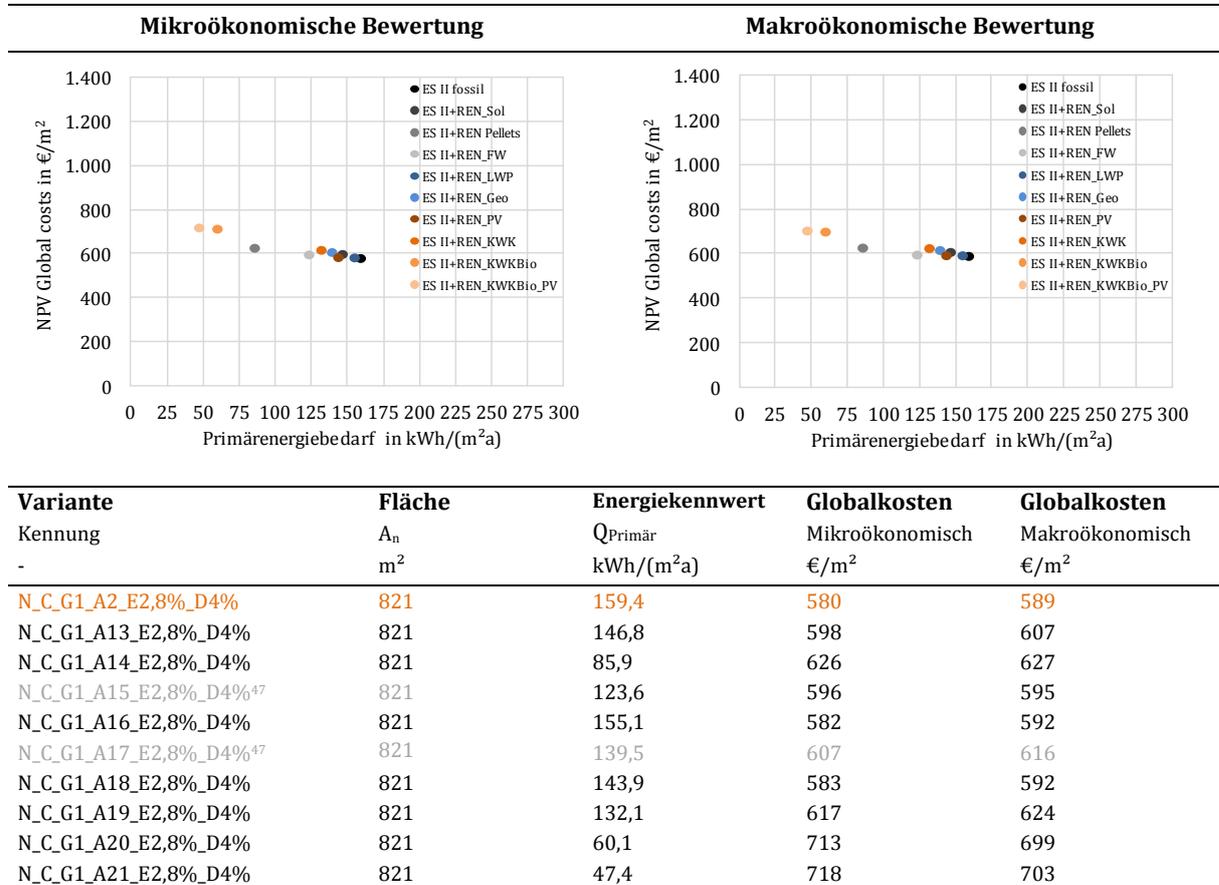


Tabelle 73: Nichtwohngebäude 02 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.

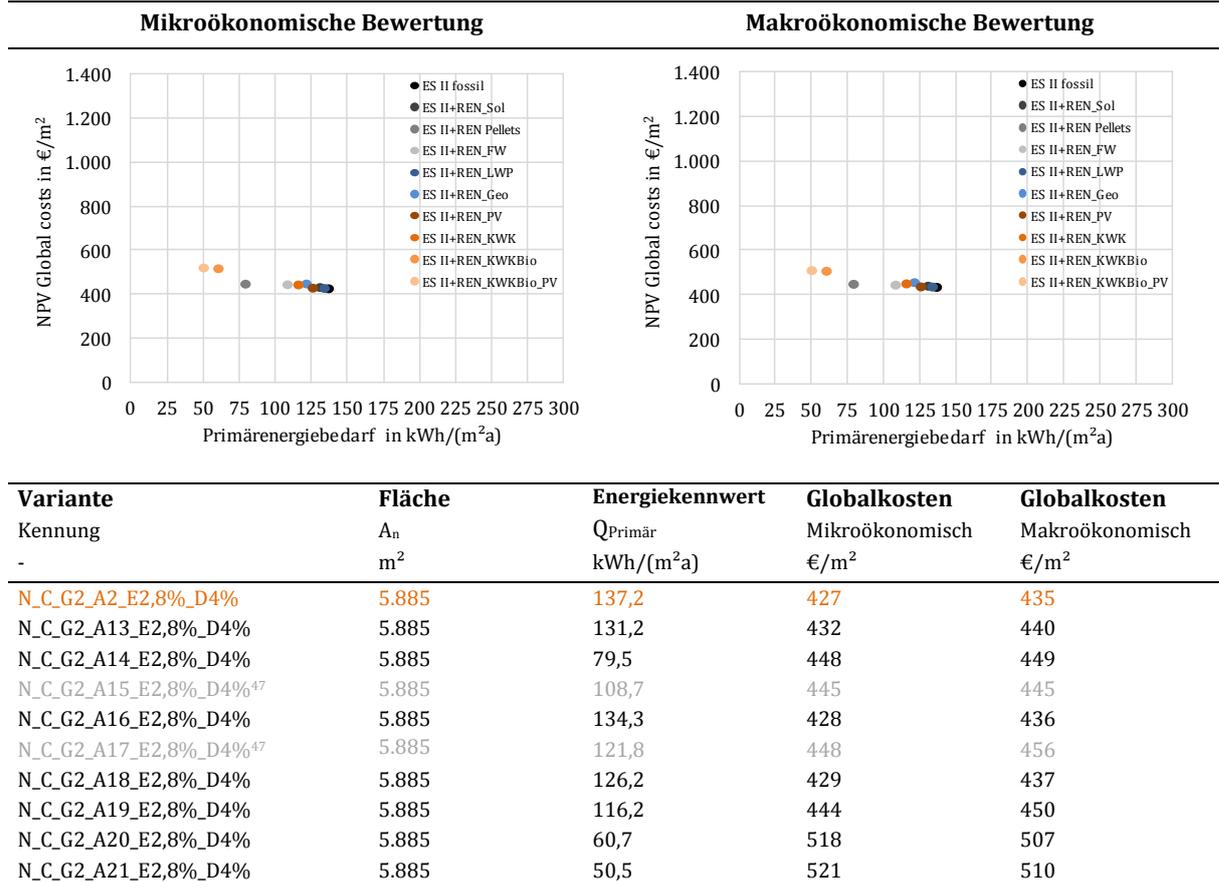


Tabelle 74: Nichtwohngebäude 03 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.

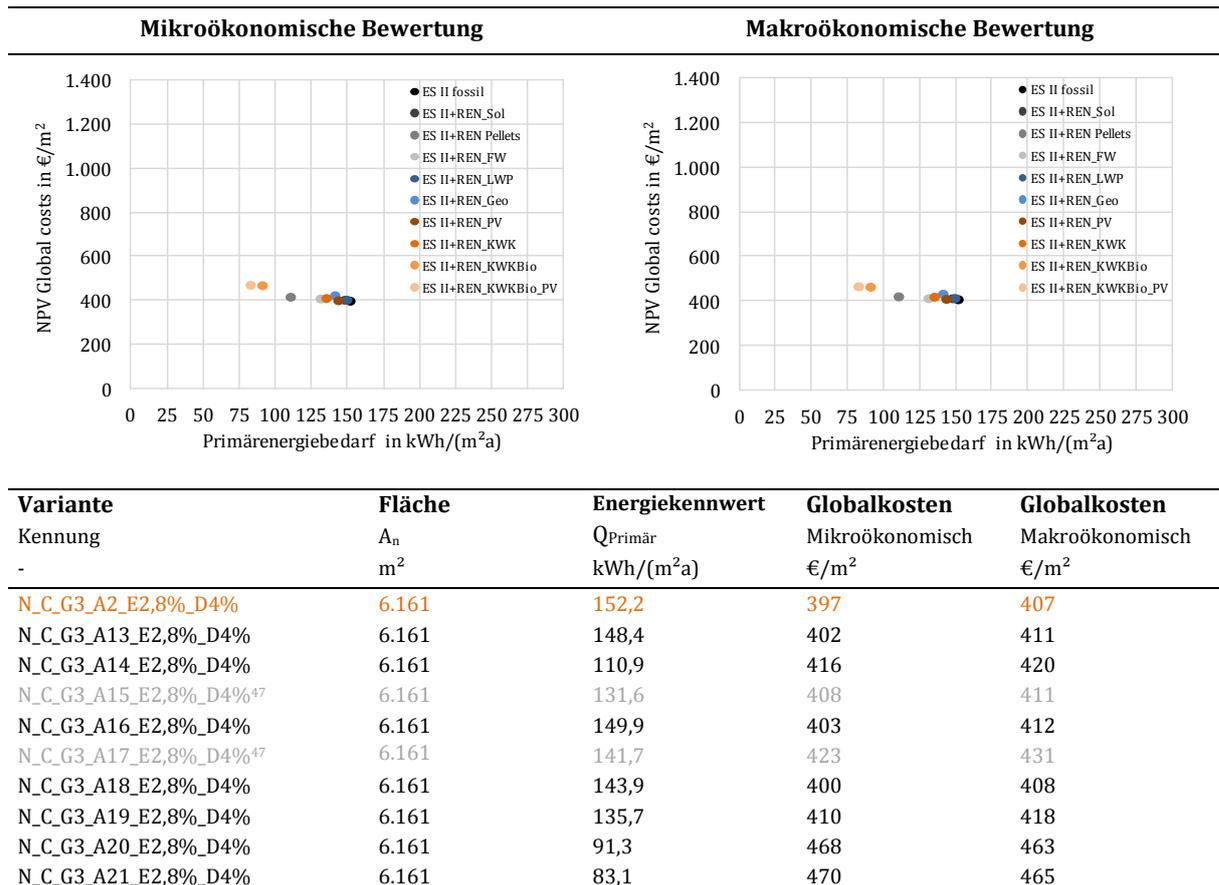
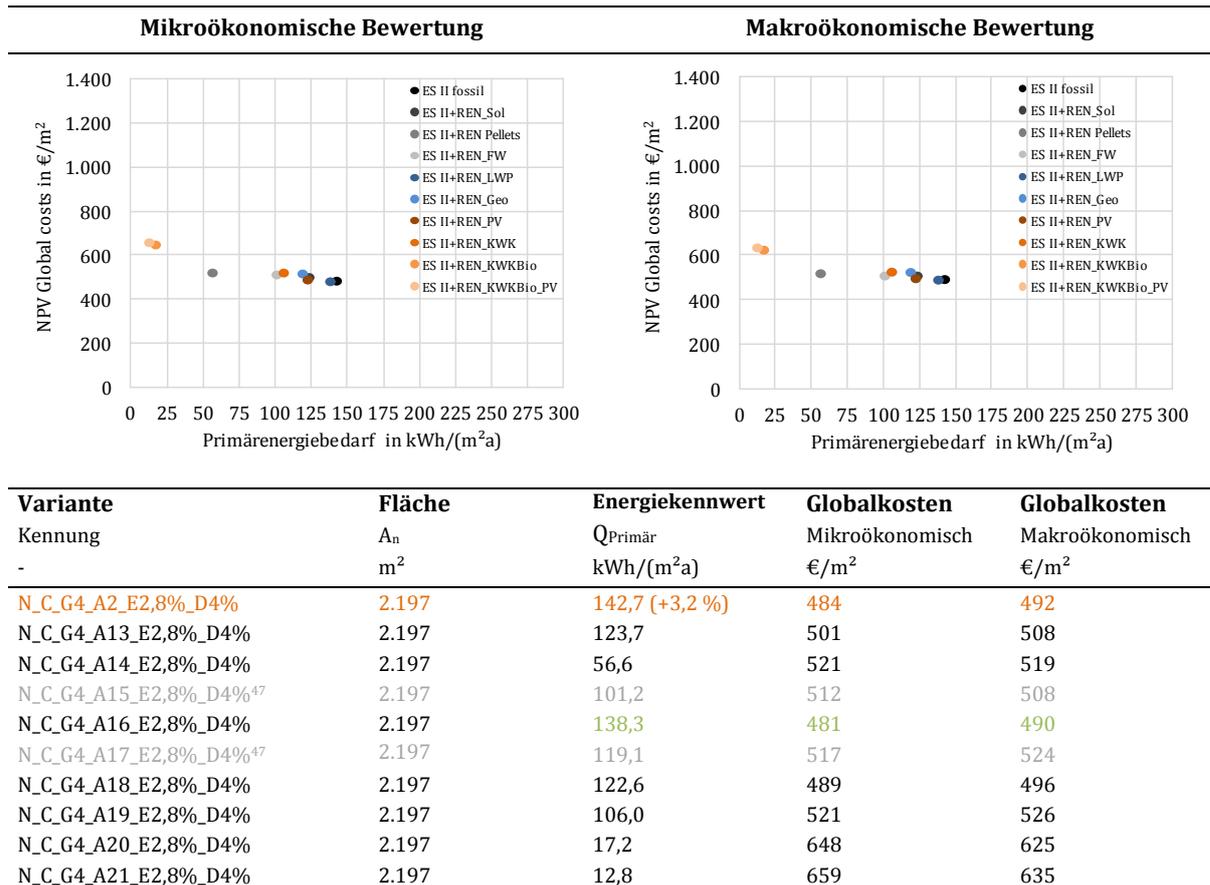


Tabelle 75: Nichtwohngebäude 04 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.



### Zwischenfazit

Die kostenoptimale Variante entspricht einem Brennwertkessel mit fossilem Energieträger. Lediglich bei Gebäude 4 markiert die Luftwärmepumpe die kostenoptimale Lösung. Im Vergleich zu den anderen beiden Gebäuden ist dies auf die hohe Geschoszahl und die Anordnung der Heizzentrale im Keller zurückzuführen. Dadurch ergeben sich anteilig höhere Kosten für Kamin und Abgasanlage. Eine Platzierung im Dachgeschoss relativiert das Ergebnis.

Die aktuelle Anforderung an die Energieeffizienz bezogen auf die Anlagentechnik bei verbessertem Wärmeschutz auf Klasse C liegt im kostenoptimalen Niveau. Allerdings muss beachtet werden, dass die Unterschiede in den Globalkosten der Varianten alle sehr gering sind, wodurch es im Einzelfall zu anderen Ergebnissen führen kann.

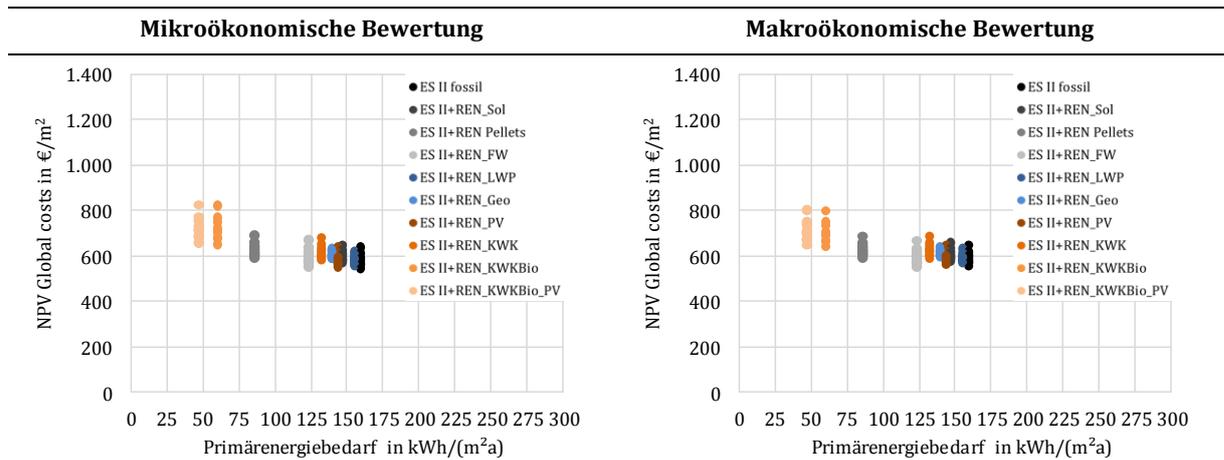
Eine mögliche Anpassung der energetischen Anforderungen auf der Seite der Anlagentechnik führt in jedem Fall der hier untersuchten Technologien (Systemeffizienz III: Beleuchtung, Lüftungsanlagen, Kälteanlagen, etc. und bei der Wahl der Erzeuger bzw. des Energieträgers für die Wärmeerzeugung) zu einer Verringerung des Primärenergiebedarfs.

Um die darzustellenden Varianten für die Sensitivitätsanalyse einzugrenzen wird der Vergleich folgend nur auf das Gebäude G1 bezogen. Die sich dort ergebenden Tendenzen sind auf alle anderen Gebäude übertragbar.

### Einfluss der Entwicklungsszenarien

Folgende Bilder zeigen zunächst eine Übersicht aller analysierten Varianten. Dabei werden die Parameter für Energiepreissteigerung und Kapitalzins für jede Technologie ausgewertet. Die vertikale Spreizung einer gleichfarbigen Kurvenschar spiegelt den Einfluss der sensiblen Parameter auf die jeweilige Variante wider. Wie auch bei der Bewertung des Wärmeschutzniveaus liegen die Globalkosten bei der makroökonomischen Bewertung etwas höher als bei der mikroökonomischen, was sich in der Gleichbehandlung der Mehrwertsteuer und den angerechneten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei der makroökonomischen Betrachtung ergibt. Die kombinierte Bewertung einzelner Szenarien wird in folgendem Abschnitt diskutiert.

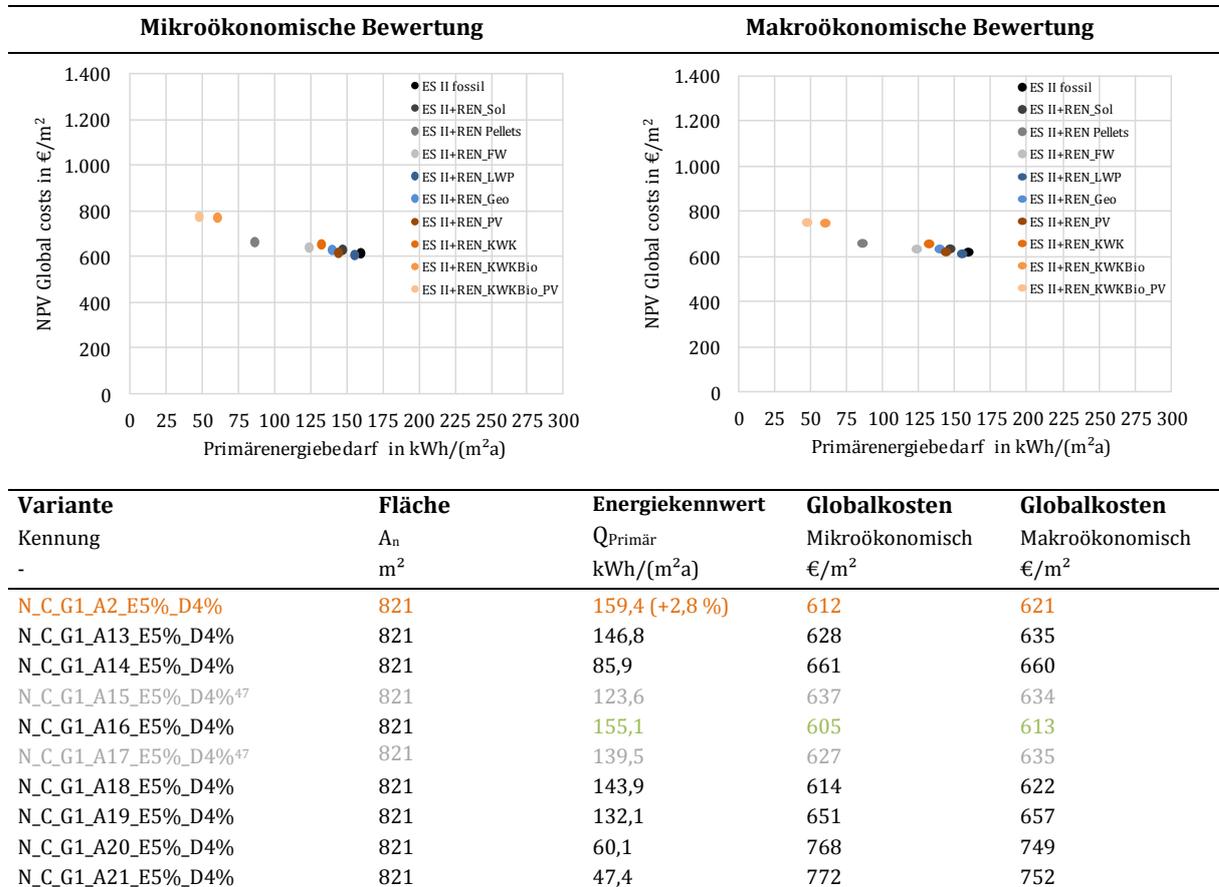
Tabelle 76: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik



## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreissteigerung (5 %) bei moderatem Kapitalzins (4 %) ausgegangen (siehe Tabelle 17). Im Szenario mit einem höheren Energiepreisniveau markieren die Versorgungsvarianten mit Wärmepumpen das kostenoptimale Niveau.

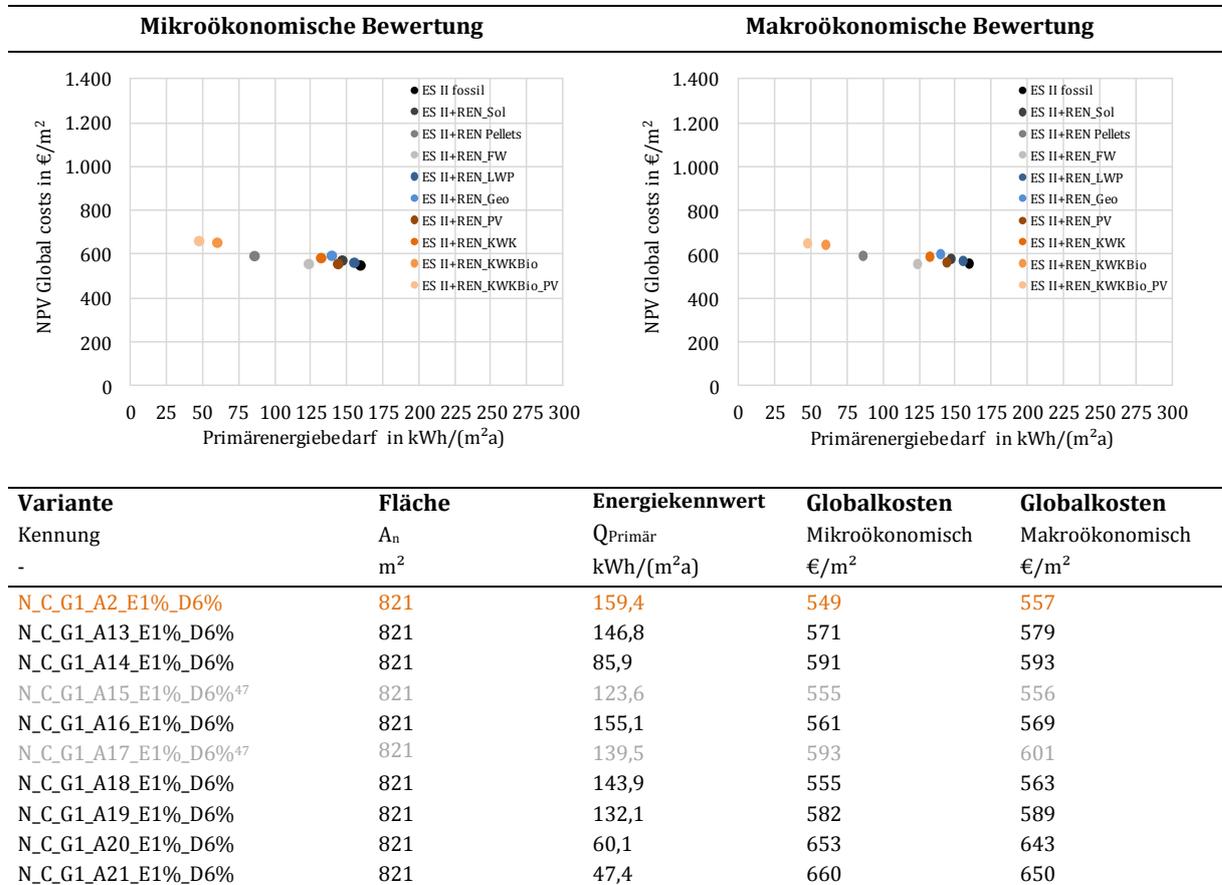
Tabelle 77: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird gemäß Tabelle 17 von einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Dadurch reduziert sich der Einfluss der Energiekosten und die Investitionskosten erreichen eine größere Gewichtung in den Globalkosten, was sich insbesondere bei der Wärmepumpe mit Geothermienutzung durch ein höheres Globalkostenniveau zeigt.

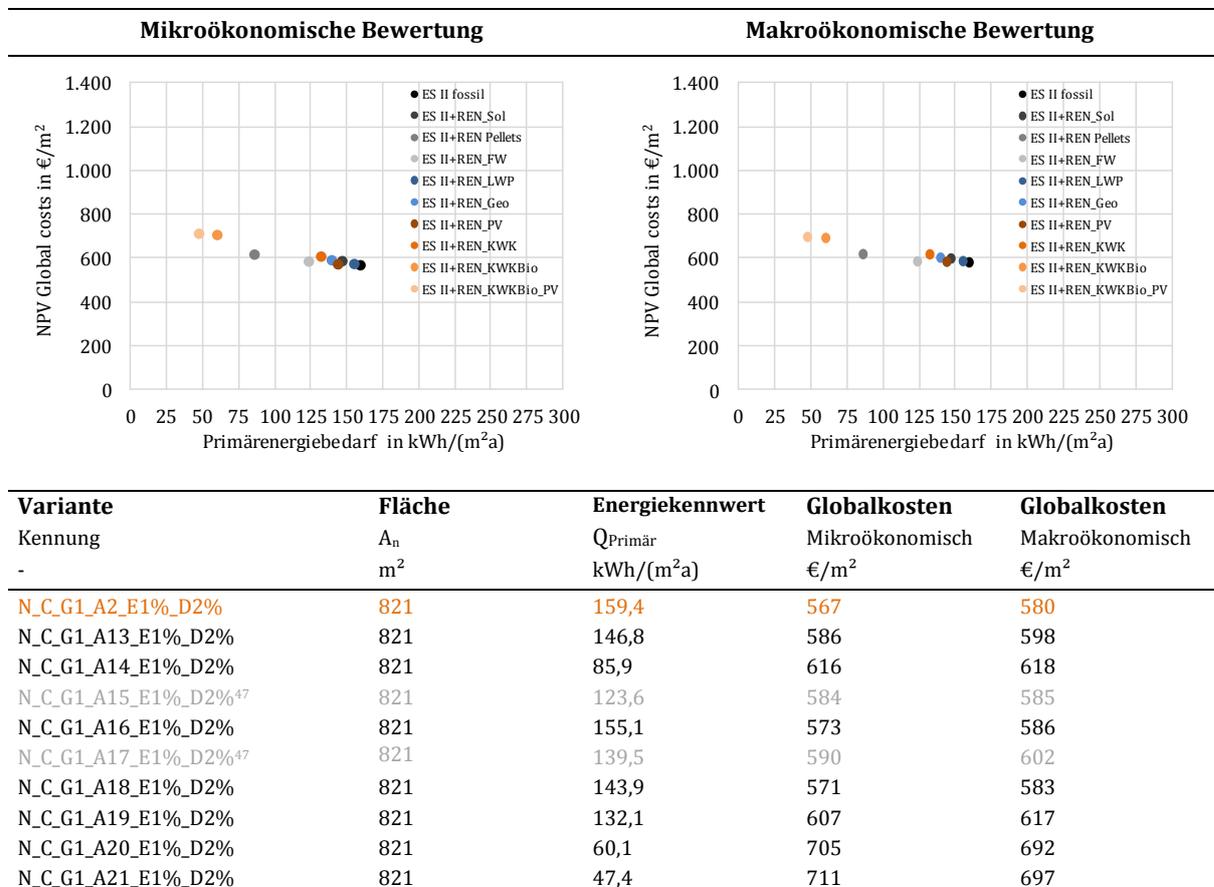
Tabelle 78: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.



### Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht nach Tabelle 17 einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a). In diesem Szenario markiert auch der Brennwertkessel mit fossilem Energieträger das kostenoptimale System.

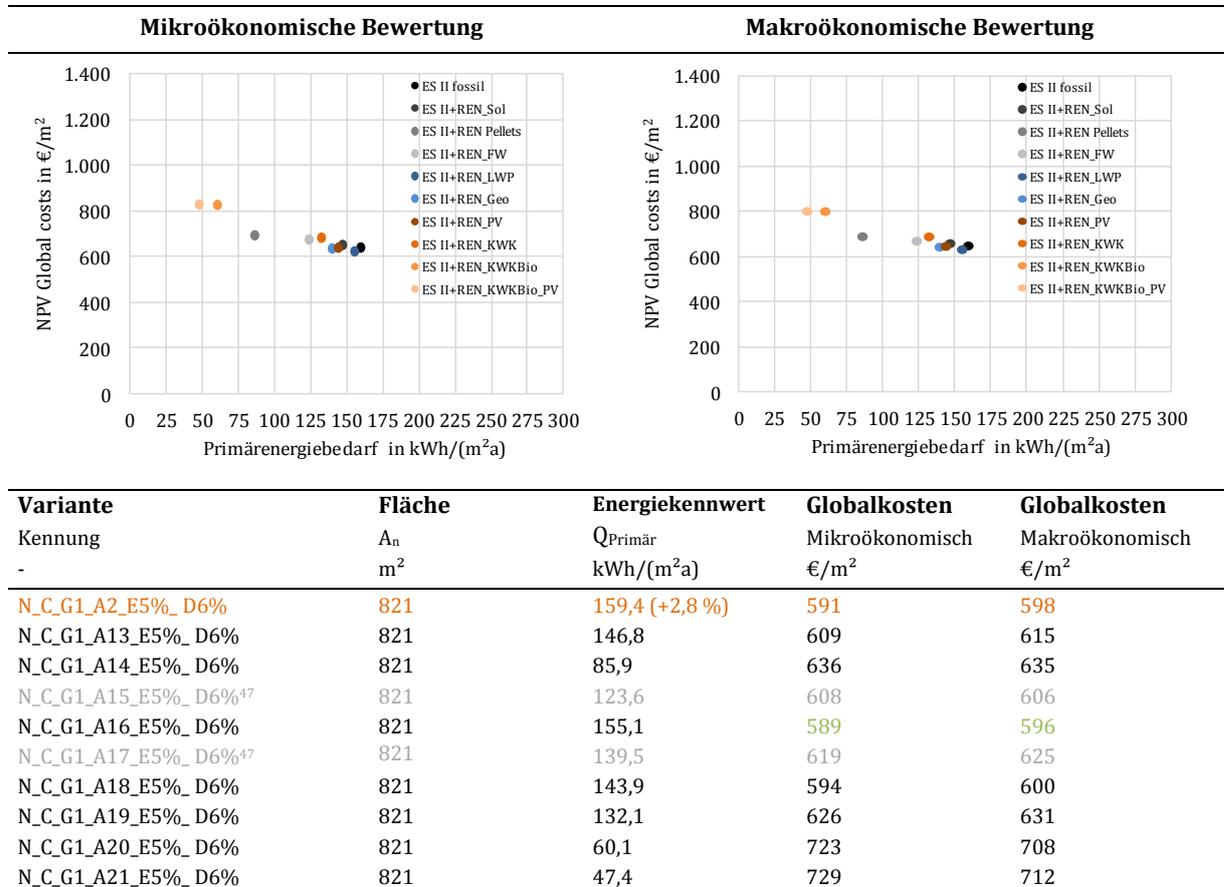
Tabelle 79: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.



### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höheren Kapitalzinsen (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum aufgrund des niedrigen Basis-Strompreises bei den Wärmepumpen.

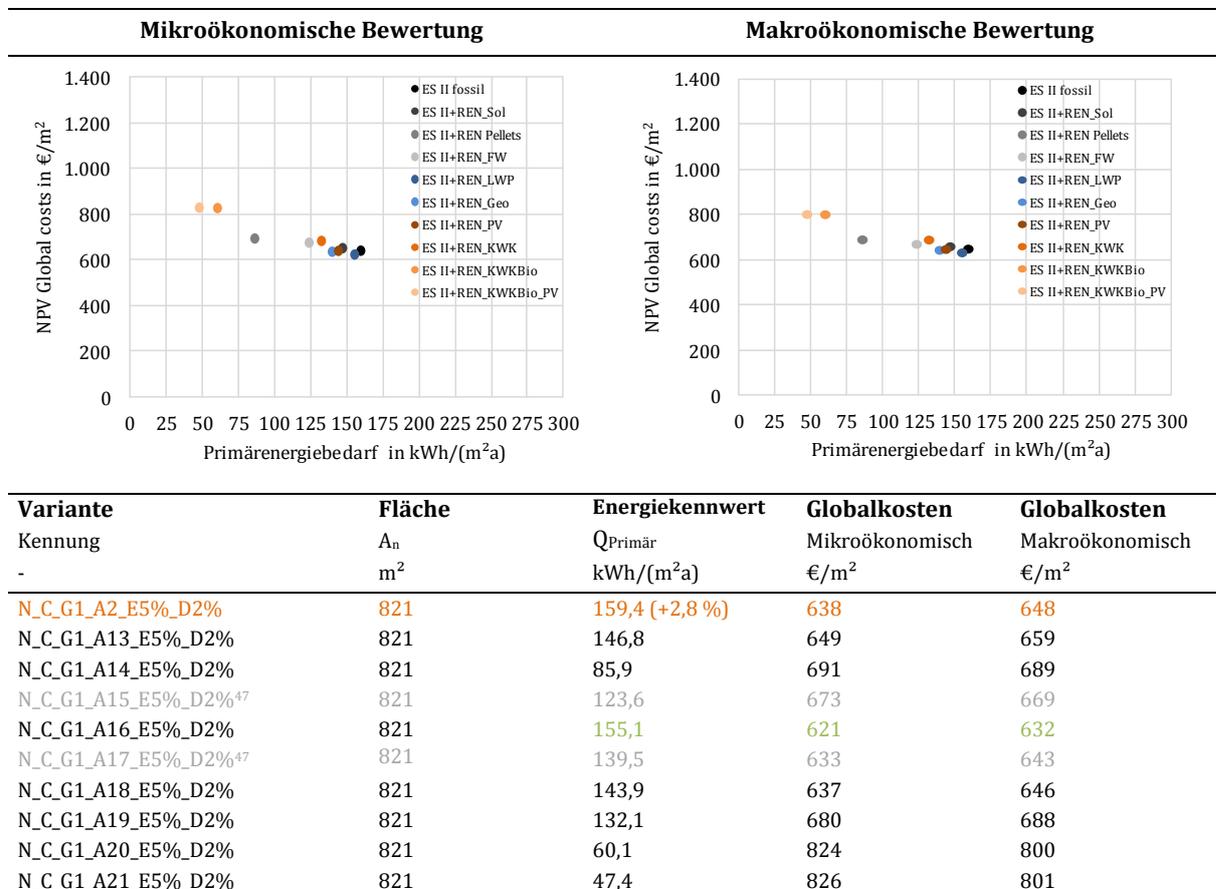
Tabelle 80: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.



### Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 beschreibt wird eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigen Kapitalzinsen (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum nicht mehr beim Kesselsystem. Effizientere Technologien auf der Basis von Strom als Energieträger (Wärmepumpen, PV-Anlagen) weisen hier geringere Globalkosten auf.

Tabelle 81: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.



#### 4.2.2 Zwischenfazit für neue Nichtwohngebäude

Für Nichtwohngebäude zeichnet sich ein ähnliches Bild ab wie auch bei Wohngebäuden. Beim Wärmeschutz liegen die Globalkosten bei allen betrachteten Gebäuden beim Wärmeschutzstandard C. Die Anforderungen an neue Nichtwohngebäude entsprechen dem Wärmeschutzstandard D. Der primärenergetische Anforderungswert liegt im Schnitt 15,9 % über dem Anforderungswert, der sich aus der kostenoptimalen Variante entspricht. Die Differenz zur kostenoptimalen Variante darf gemäß der Richtlinie nicht mehr als 15 % betragen. Bei Wohngebäuden wurden die energetischen Anforderungen an neue Gebäude Mitte 2012 auf das Wärmeschutzniveau C angehoben. Für Nichtwohngebäude ist ebenfalls in Bälde eine Verschärfung geplant, wobei hier mindestens das Wärmeschutzniveau C das Ziel sein wird.

Hinsichtlich der Anlagentechnik markieren die aktuellen Anforderungen für die technischen Bereiche Beleuchtung, Lüftung, Kühlung allgemein das kostenoptimale Niveau. Im Rahmen der ohnehin geplanten Verschärfung der energetischen Anforderungen könnte für einige Anlagentechnologien ein höherer Effizienzstandard (z. B. ES III) in Betracht gezogen werden, da sich nur eine moderate Erhöhung der Globalkosten von im Mittel 2,3 % ergibt, bei einer z. T. deutlichen Primärenergieeinsparung.

Unter Annahme des kostenoptimalen Wärmeschutzniveaus der Klasse C liegt im Bereich der Wärmeerzeuger der Brennwertkessel für drei von vier Gebäuden auf kostenoptimalem Niveau. Bei der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere bei einer Verallgemeinerung auf den Einzelfall, ist zu beachten, dass die Unterschiede in den Globalkosten für die unterschiedlichen Wärmeerzeuger zum Teil gering sind und leichte Änderungen bei den Parametern Investitionskosten, Energiepreis, etc., zu einer deutlichen Verschiebung der kostenoptimalen Lösung führen können. Dies lässt sich nicht zuletzt auch aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse ablesen.

## 4.2.3 Bestand – Nichtwohngebäude

### 4.2.3.1 Wärmeschutz – Stufe I

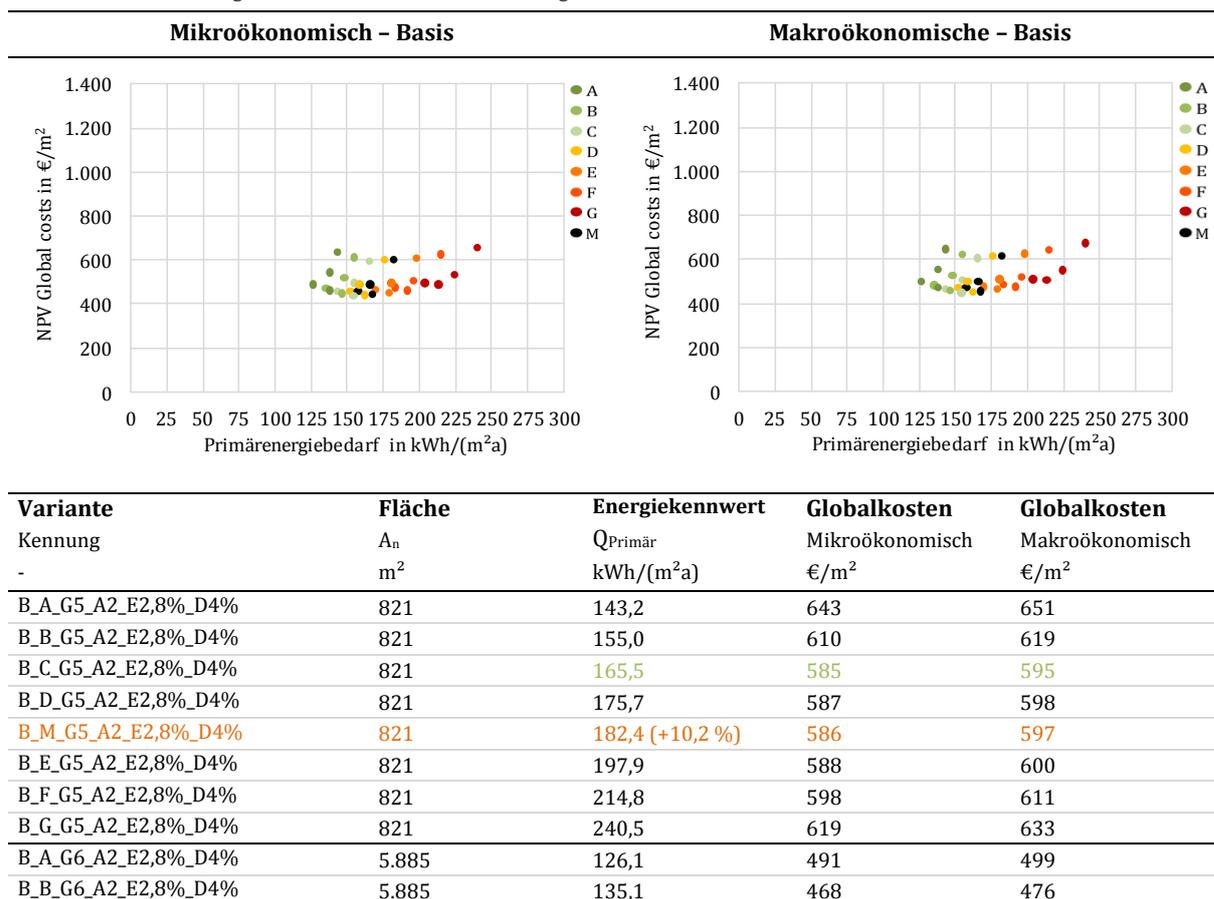
Der Einfluss unterschiedlicher energetischer Bauweisen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit wird für die vier beschriebenen Gebäude angegeben. Im Rahmen der Energieeinsparverordnung werden Anforderungen an geänderte Bauteile gestellt. Derzeit existieren keine Gesamtanforderungen für größere Renovierungen.

Um den Einfluss der Bauteilanforderungen einzubeziehen wird eine weitere Variante für den Wärmeschutz definiert, die den Mindestanforderungen für Bauteile nach Tabelle 14 entspricht. Zur bestmöglichen Freischneidung des energetischen Einflusses der betroffenen Bauteile werden für alle Wärmeschutzvarianten die gleichen Randbedingungen hinsichtlich Luftdichtheit und Wärmebrückeneinfluss angesetzt. Zudem wird immer von einer Fensterlüftung ausgegangen. Dies bezieht sich gleichermaßen auf die Energiebilanz und die Kostenbestimmung.

Die kostenoptimalen Primärenergieanforderungen an zu ändernde Bauteile liegen beim Wärmeschutzniveau für 2 Gebäude bei C und für 2 Gebäude bei den aktuellen Mindestanforderungen M. Auf makro- und mikroökonomischer Ebene weisen diese Wärmedämmstandards die geringsten Gesamtkosten auf. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss man beachten, dass der Verlauf der Globalkosten in dem Bereich äußerst flach ist.

Für die betrachteten Gebäude liegen die derzeit gestellten Anforderungen (als Klasse M im Diagramm und in den Tabellen markiert) im Mittel etwa 4,6 % über dem kostenoptimalen Primärenergielevel des Wärmeschutzstandards D. Gemäß der Richtlinie liegt die Überschreitungsgrenze bei maximal 15 %.

Tabelle 82: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.



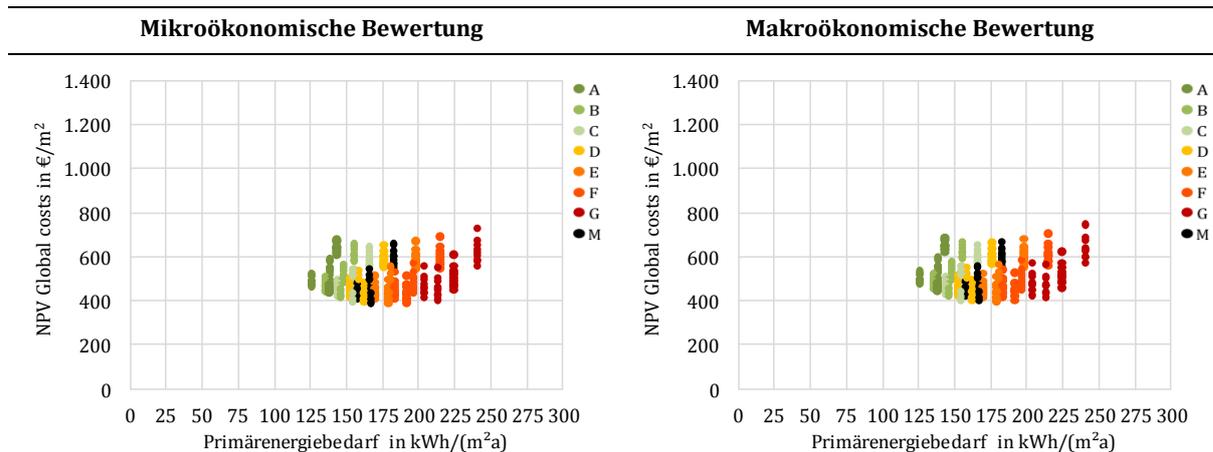
## Bestand – Nichtwohngebäude

|                     |       |                |     |     |
|---------------------|-------|----------------|-----|-----|
| B_C_G6_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 143,4          | 447 | 456 |
| B_D_G6_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 152,1          | 446 | 455 |
| B_M_G6_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 157,3          | 443 | 453 |
| B_E_G6_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 169,6          | 444 | 454 |
| B_F_G6_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 183,1          | 450 | 461 |
| B_G_G6_A2_E2,8%_D4% | 5.885 | 203,6          | 464 | 476 |
| B_A_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 137,7          | 458 | 466 |
| B_B_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 146,0          | 438 | 447 |
| B_C_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 154,3          | 423 | 432 |
| B_D_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 162,0          | 424 | 434 |
| B_M_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 167,1 (+8,3 %) | 424 | 434 |
| B_E_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 178,8          | 426 | 437 |
| B_F_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 191,7          | 435 | 446 |
| B_G_G7_A2_E2,8%_D4% | 6.161 | 213,3          | 455 | 468 |
| B_A_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 138,1          | 552 | 560 |
| B_B_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 147,8          | 516 | 525 |
| B_C_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 154,6          | 489 | 498 |
| B_D_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 158,6          | 478 | 487 |
| B_M_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 165,7          | 476 | 486 |
| B_E_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 180,5          | 477 | 487 |
| B_F_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 196,1          | 483 | 494 |
| B_G_G8_A2_E2,8%_D4% | 2.197 | 224,1          | 503 | 516 |

## Einfluss der Entwicklungsszenarien

Folgende Bilder zeigen zunächst eine Übersicht aller analysierten Varianten. Dabei werden die Parameter für Energiepreissteigerung und Kapitalzins für jedes Gebäude und jede Wärmeschutzklasse ausgewertet. Für die makro- und mikroökonomische Bewertung zeigt sich ein ähnliches Bild wie auch beim Neubau. Die volkswirtschaftliche Betrachtungsweise führt zu leicht höheren Globalkosten mit jedoch ähnlich ausgeprägten Trends.

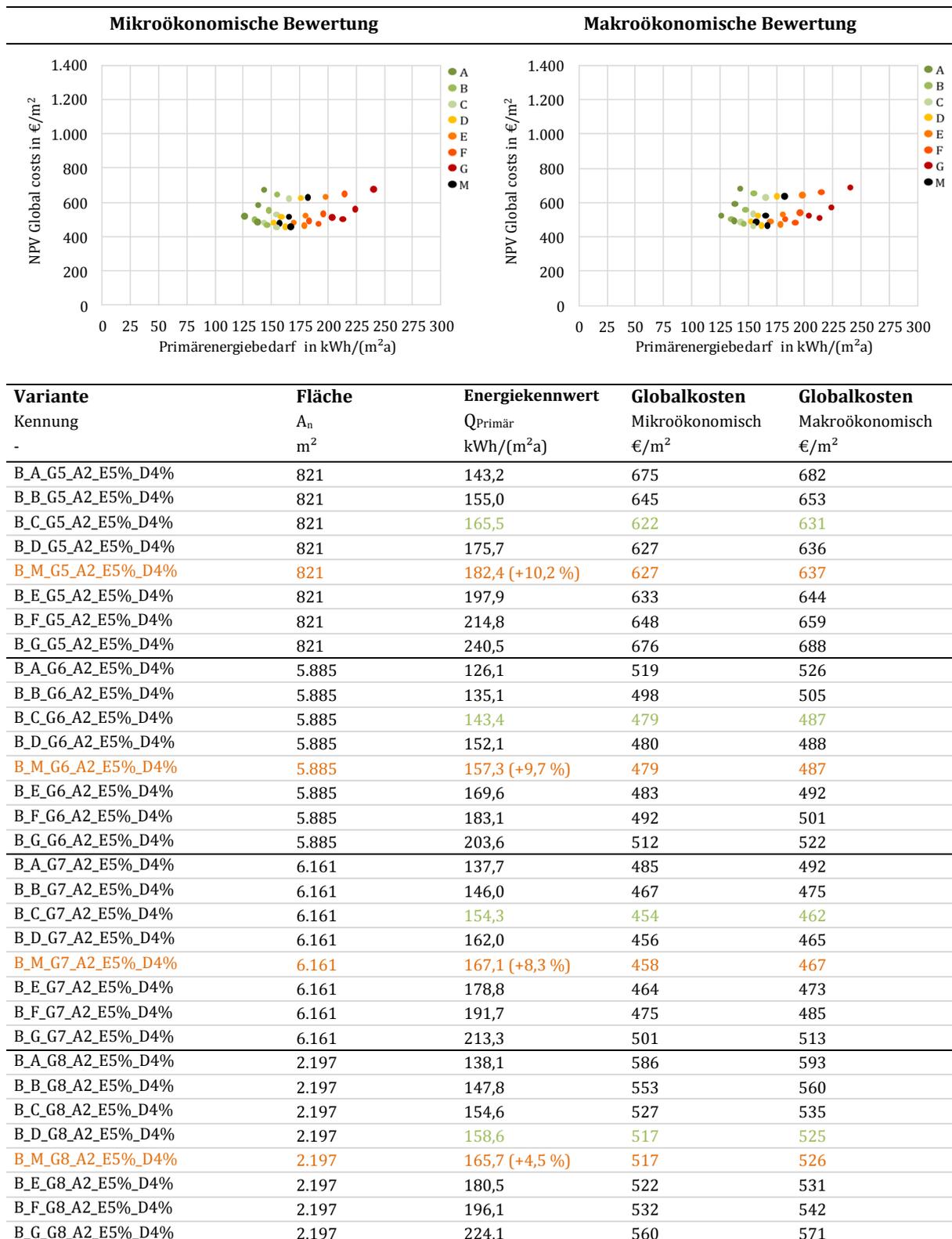
Tabelle 83: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.



## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreisssteigerung (5 %/a) bei moderatem Kapitalzins (4 %) ausgegangen. Aufgrund des steigenden Einflusses der Energiekosten liegt die kostenoptimale Variante nun für 3 von 4 Gebäuden beim Wärmeschutzstandard C. Es ergibt sich eine Differenz von 8,2 % zum derzeitigen Anforderungswert.

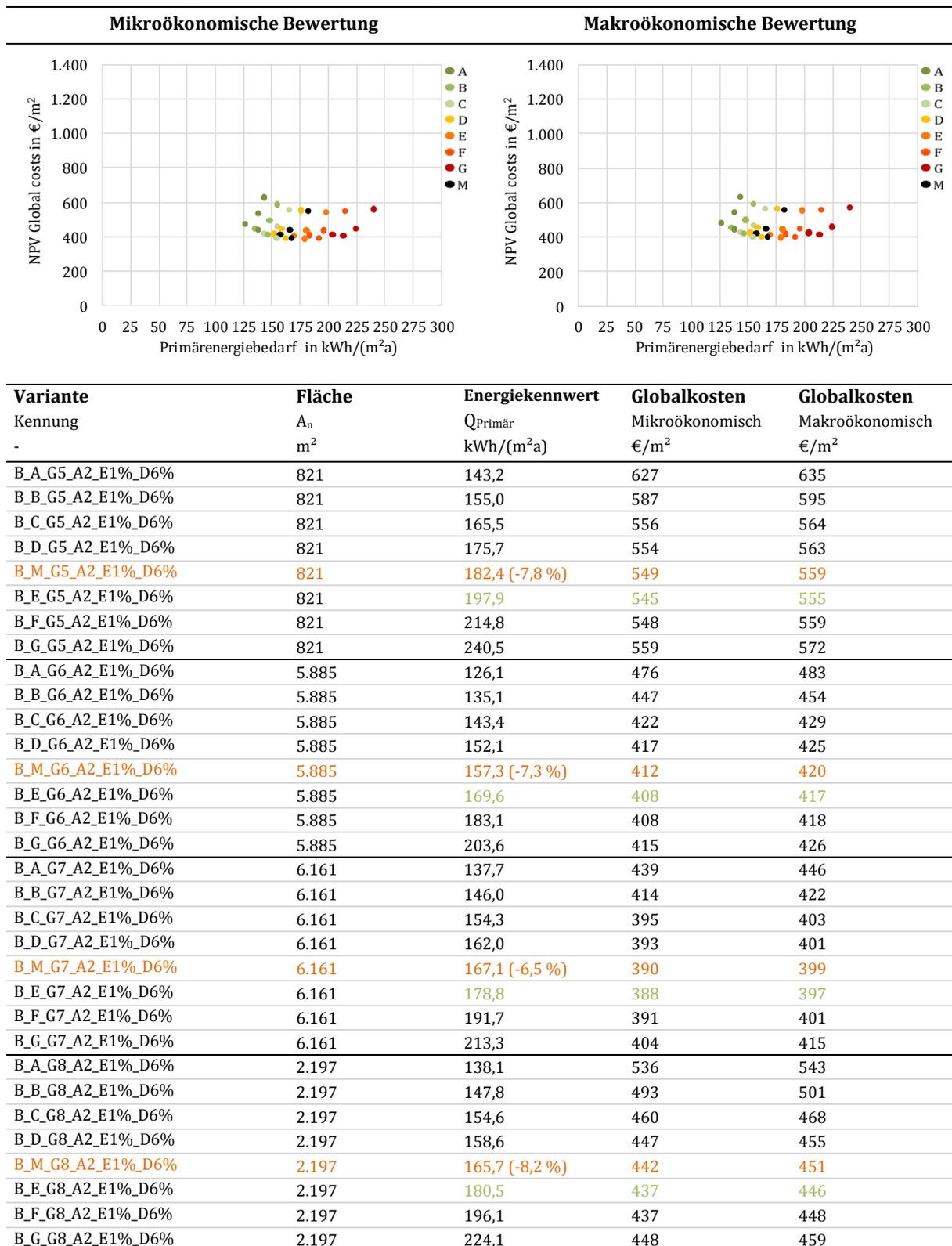
Tabelle 84: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird gemäß Tabelle 17 von einer geringen Energiepreisssteigerung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Dadurch reduziert sich der Einfluss der Energiekosten und die Investitionskosten erreichen eine größere Gewichtung. In diesem Szenario der durch die kostenoptimale Variante bestimmte Anforderungswert im Mittel um 7,5 % unterschritten.

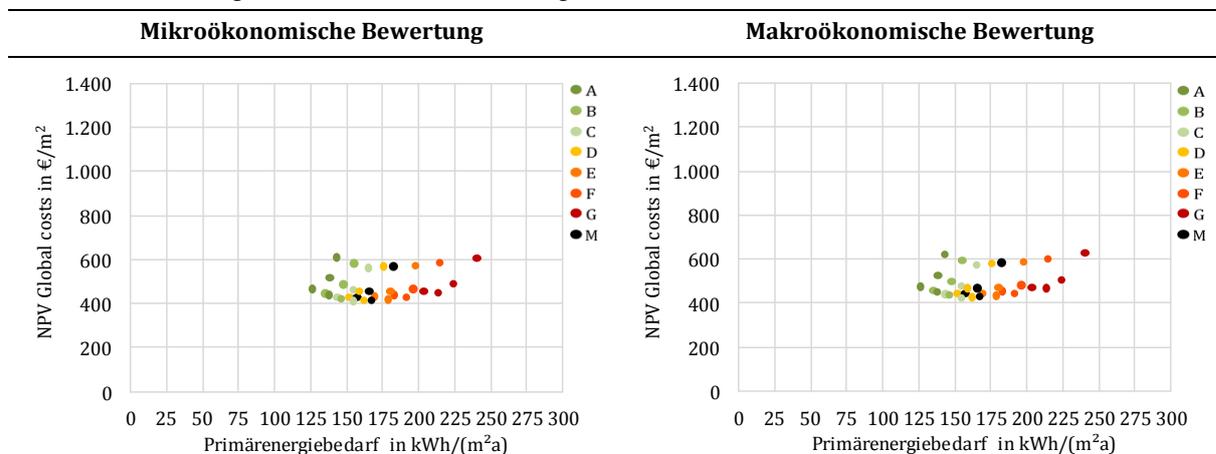
Tabelle 85: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.



### Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht nach Tabelle 17 einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a). Es ergibt sich eine Differenz von 8,2 % zum derzeitigen Anforderungswert.

Tabelle 86: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.

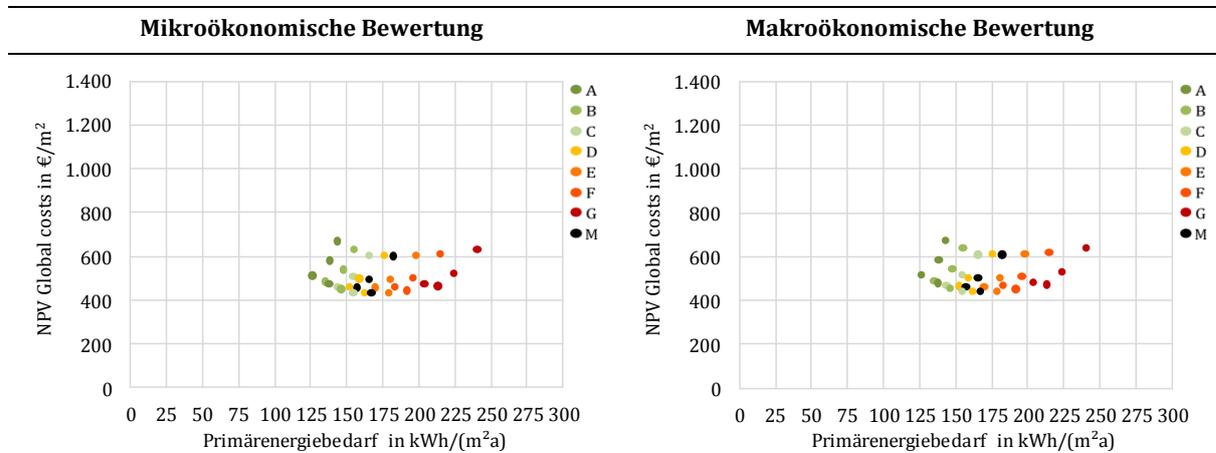


| Variante<br>Kennung | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|---------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                     |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| B_A_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 143,2  | 609                                 | 621                                 |
| B_B_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 155,0  | 583                                 | 595                                 |
| B_C_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 165,5  | 562                                 | 576                                 |
| B_D_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 175,7  | 568                                 | 583                                 |
| B_M_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 182,4 (+10,2 %)  | 568                                 | 583                                 |
| B_E_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 197,9  | 573                                 | 589                                 |
| B_F_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 214,8  | 585                                 | 603                                 |
| B_G_G5_A2_E1%_D2%   | 821  | 240,5  | 608                                 | 628                                 |
| B_A_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 126,1  | 465                                 | 476                                 |
| B_B_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 135,1  | 446                                 | 458                                 |
| B_C_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 143,4  | 429                                 | 441                                 |
| B_D_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 152,1  | 431                                 | 443                                 |
| B_M_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 157,3 (+9,7 %)   | 429                                 | 442                                 |
| B_E_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 169,6  | 432                                 | 446                                 |
| B_F_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 183,1  | 439                                 | 454                                 |
| B_G_G6_A2_E1%_D2%   | 5.885                                      | 203,6  | 455                                 | 472                                 |
| B_A_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 137,7  | 439                                 | 450                                 |
| B_B_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 146,0  | 423                                 | 435                                 |
| B_C_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 154,3  | 411                                 | 423                                 |
| B_D_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 162,0  | 413                                 | 427                                 |
| B_M_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 167,1 (+8,3 %)   | 414                                 | 428                                 |
| B_E_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 178,8  | 419                                 | 433                                 |
| B_F_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 191,7  | 428                                 | 444                                 |
| B_G_G7_A2_E1%_D2%   | 6.161                                      | 213,3  | 450                                 | 468                                 |
| B_A_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 138,1  | 516                                 | 528                                 |
| B_B_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 147,8  | 487                                 | 499                                 |
| B_C_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 154,6  | 464                                 | 477                                 |
| B_D_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 158,6  | 455                                 | 468                                 |
| B_M_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 165,7 (+4,5 %)   | 455                                 | 468                                 |
| B_E_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 180,5  | 458                                 | 472                                 |
| B_F_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 196,1  | 466                                 | 482                                 |
| B_G_G8_A2_E1%_D2%   | 2.197                                      | 224,1  | 488                                 | 506                                 |

### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höheren Kapitalzinsen (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. Die gleichzeitige Erhöhung von Kapitalzins und Energiekosten führt zu keiner Verschiebung der kostenoptimalen Primärenergieniveaus.

Tabelle 87: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



| Variante<br>Kennung      | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|--------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                          |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| B_A_G5_A2_E5%_D6%        | 821  | 143,2  | 668                                 | 674                                 |
| B_B_G5_A2_E5%_D6%        | 821  | 155,0  | 632                                 | 638                                 |
| B_C_G5_A2_E5%_D6%        | 821  | 165,5  | 604                                 | 611                                 |
| B_D_G5_A2_E5%_D6%        | 821  | 175,7  | 604                                 | 612                                 |
| <b>B_M_G5_A2_E5%_D6%</b> | <b>821</b>                                 | <b>182,4</b>   | <b>602</b>                          | <b>610</b>                          |
| B_E_G5_A2_E5%_D6%        | 821  | 197,9  | 603                                 | 611                                 |
| B_F_G5_A2_E5%_D6%        | 821  | 214,8  | 612                                 | 621                                 |
| B_G_G5_A2_E5%_D6%        | 821  | 240,5  | 632                                 | 642                                 |
| B_A_G6_A2_E5%_D6%        | 5.885                                      | 126,1  | 512                                 | 517                                 |
| B_B_G6_A2_E5%_D6%        | 5.885                                      | 135,1  | 485                                 | 491                                 |
| B_C_G6_A2_E5%_D6%        | 5.885                                      | 143,4  | 463                                 | 469                                 |
| B_D_G6_A2_E5%_D6%        | 5.885                                      | 152,1  | 460                                 | 467                                 |
| <b>B_M_G6_A2_E5%_D6%</b> | <b>5.885</b>                               | <b>157,3</b>   | <b>457</b>                          | <b>464</b>                          |
| B_E_G6_A2_E5%_D6%        | 5.885                                      | 169,6  | 457                                 | 464                                 |
| B_F_G6_A2_E5%_D6%        | 5.885                                      | 183,1  | 462                                 | 470                                 |
| B_G_G6_A2_E5%_D6%        | 5.885                                      | 203,6  | 476                                 | 484                                 |
| B_A_G7_A2_E5%_D6%        | 6.161                                      | 137,7  | 474                                 | 480                                 |
| B_B_G7_A2_E5%_D6%        | 6.161                                      | 146,0  | 451                                 | 458                                 |
| B_C_G7_A2_E5%_D6%        | 6.161                                      | 154,3  | 434                                 | 441                                 |
| B_D_G7_A2_E5%_D6%        | 6.161                                      | 162,0  | 434                                 | 441                                 |
| <b>B_M_G7_A2_E5%_D6%</b> | <b>6.161</b>                               | <b>167,1</b>   | <b>434</b>                          | <b>441</b>                          |
| B_E_G7_A2_E5%_D6%        | 6.161                                      | 178,8  | 435                                 | 443                                 |
| B_F_G7_A2_E5%_D6%        | 6.161                                      | 191,7  | 443                                 | 451                                 |
| B_G_G7_A2_E5%_D6%        | 6.161                                      | 213,3  | 463                                 | 472                                 |
| B_A_G8_A2_E5%_D6%        | 2.197                                      | 138,1  | 579                                 | 585                                 |
| B_B_G8_A2_E5%_D6%        | 2.197                                      | 147,8  | 540                                 | 546                                 |
| B_C_G8_A2_E5%_D6%        | 2.197                                      | 154,6  | 509                                 | 516                                 |
| B_D_G8_A2_E5%_D6%        | 2.197                                      | 158,6  | 498                                 | 504                                 |
| <b>B_M_G8_A2_E5%_D6%</b> | <b>2.197</b>                               | <b>165,7</b>   | <b>495</b>                          | <b>502</b>                          |
| B_E_G8_A2_E5%_D6%        | 2.197                                      | 180,5  | 495                                 | 502                                 |
| B_F_G8_A2_E5%_D6%        | 2.197                                      | 196,1  | 500                                 | 509                                 |
| B_G_G8_A2_E5%_D6%        | 2.197                                      | 224,1  | 520                                 | 530                                 |

### Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 skizziert eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigem Kapitalzins (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). Aufgrund des steigenden Einflusses der Energiekosten liegt die kostenoptimale Variante nun für 3 von 4 Gebäuden beim Wärmeschutzstandard C. Es ergibt sich eine Differenz von 8,2 % zum derzeitigen Anforderungswert.

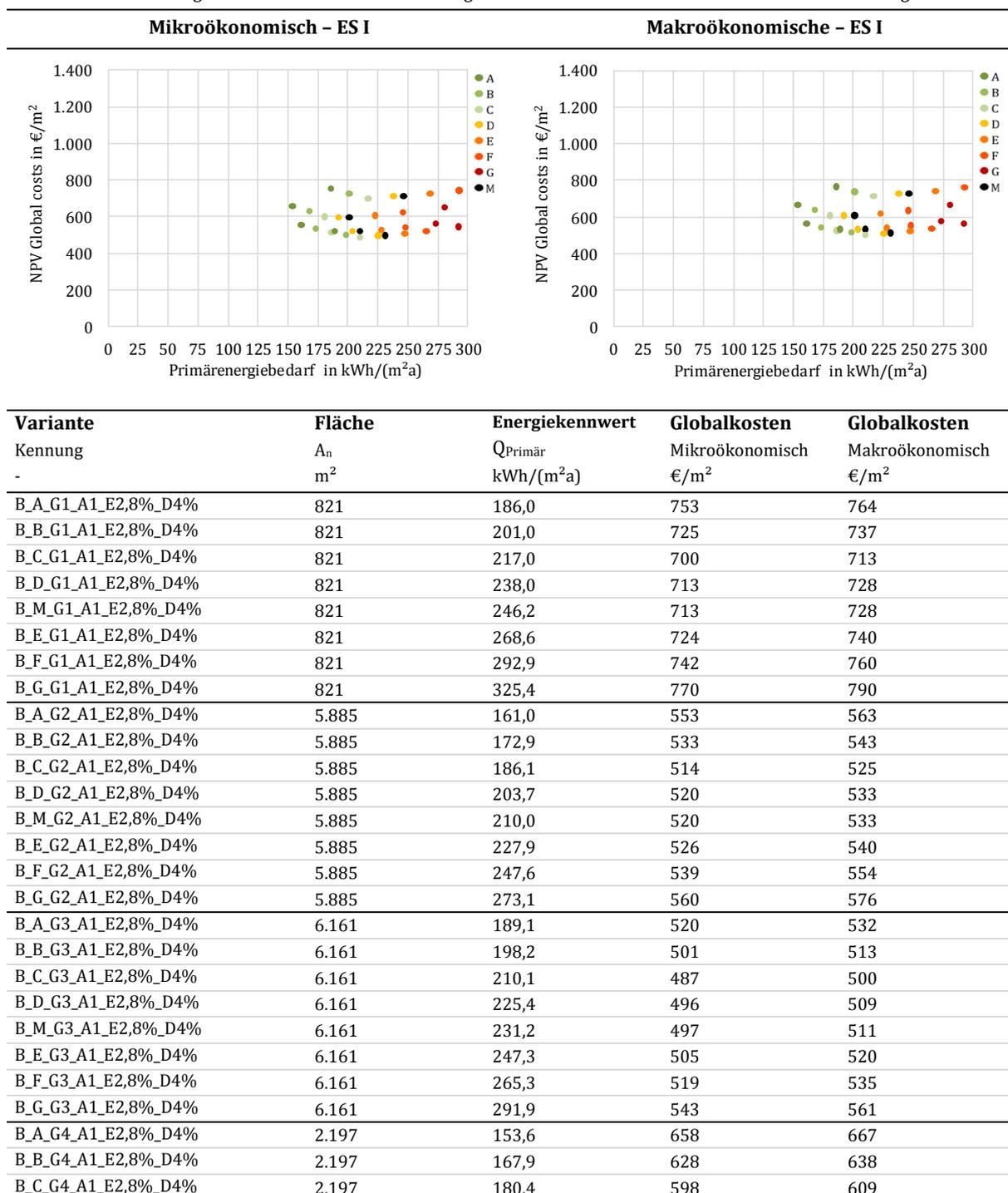
Tabelle 88: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.



### 4.2.3.2 Anlagentechnik – Stufe II

Zur Begrenzung der darzustellenden Varianten wird in einer ersten Phase der Einfluss des Wärmeschutzes für alle Gebäude und alle Anlagentechniken untersucht. Es zeigt sich, dass in den meisten Fällen auch der Wärmeschutzstandard D bei allen Anlagentechniken im Bereich des wirtschaftlichen Optimums liegt. Aufbauend auf dieser Erkenntnis werden für den direkten Vergleich der Anlagentechniken unter Zugrundelegung der Ausführung des Gebäudes im Wärmeschutzniveau D durchgeführt. Im Gegensatz zu den Wohngebäuden wird der Einfluss von RLT-Anlagen hier mit berücksichtigt, da von einem Einsatz in Nichtwohngebäuden ausgegangen werden kann, und in den Anlageneffizienzstandard Lüftungstechnik einbezogen wird (G1 - G4).

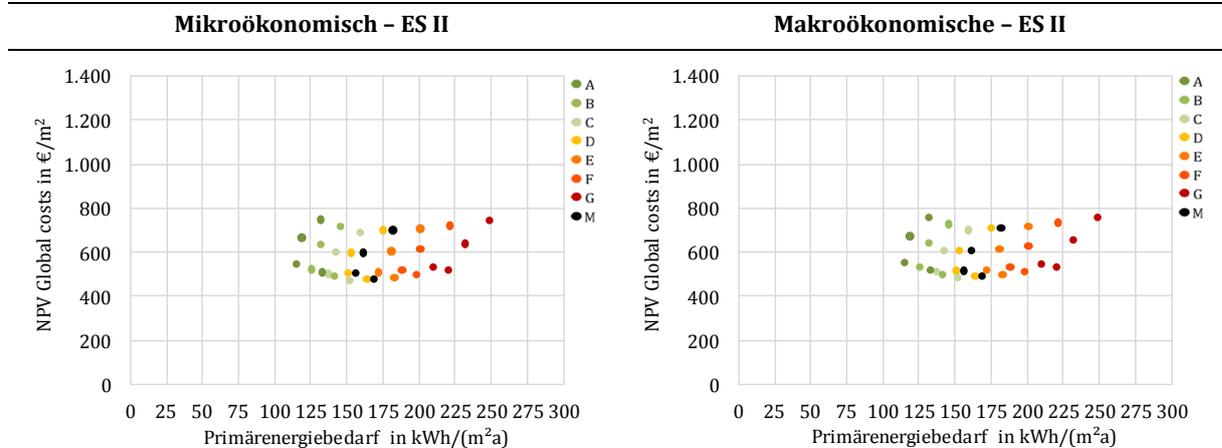
Tabelle 89: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlage ES I



## Bestand – Nichtwohngebäude

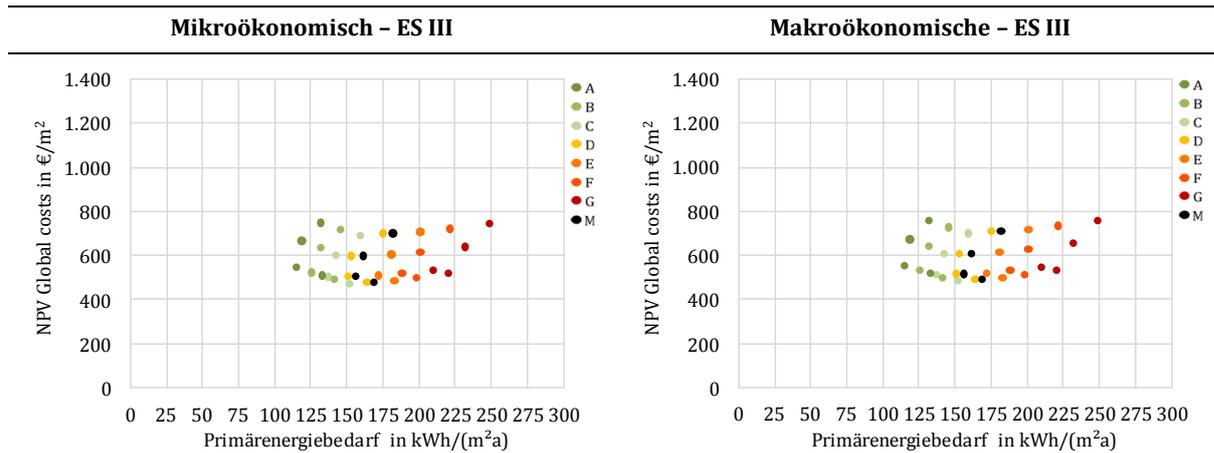
|                     |       |       |     |     |
|---------------------|-------|-------|-----|-----|
| B_D_G4_A1_E2,8%_D4% | 2.197 | 192,0 | 597 | 608 |
| B_M_G4_A1_E2,8%_D4% | 2.197 | 200,9 | 597 | 609 |
| B_E_G4_A1_E2,8%_D4% | 2.197 | 222,9 | 606 | 619 |
| B_F_G4_A1_E2,8%_D4% | 2.197 | 245,7 | 621 | 635 |
| B_G_G4_A1_E2,8%_D4% | 2.197 | 280,6 | 648 | 665 |

Tabelle 90: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlage ES II



| Variante<br>Kennung        | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|----------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                            |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| B_A_G1_A2_E2,8%_D4%        | 821  | 132,2  | 748                                 | 757                                 |
| B_B_G1_A2_E2,8%_D4%        | 821  | 145,5  | 718                                 | 727                                 |
| B_C_G1_A2_E2,8%_D4%        | 821  | 159,4  | 691                                 | 700                                 |
| B_D_G1_A2_E2,8%_D4%        | 821  | 175,0  | 701                                 | 711                                 |
| <b>B_M_G1_A2_E2,8%_D4%</b> | <b>821</b>                                 | <b>182,1</b>   | <b>700</b>                          | <b>711</b>                          |
| B_E_G1_A2_E2,8%_D4%        | 821  | 200,9  | 707                                 | 719                                 |
| B_F_G1_A2_E2,8%_D4%        | 821  | 221,3  | 721                                 | 734                                 |
| B_G_G1_A2_E2,8%_D4%        | 821  | 248,8  | 744                                 | 759                                 |
| B_A_G2_A2_E2,8%_D4%        | 5.885                                      | 115,1  | 545                                 | 552                                 |
| B_B_G2_A2_E2,8%_D4%        | 5.885                                      | 125,6  | 524                                 | 531                                 |
| B_C_G2_A2_E2,8%_D4%        | 5.885                                      | 137,2  | 502                                 | 510                                 |
| B_D_G2_A2_E2,8%_D4%        | 5.885                                      | 150,9  | 507                                 | 516                                 |
| <b>B_M_G2_A2_E2,8%_D4%</b> | <b>5.885</b>                               | <b>156,3</b>   | <b>504</b>                          | <b>514</b>                          |
| B_E_G2_A2_E2,8%_D4%        | 5.885                                      | 171,6  | 509                                 | 520                                 |
| B_F_G2_A2_E2,8%_D4%        | 5.885                                      | 188,2  | 519                                 | 530                                 |
| B_G_G2_A2_E2,8%_D4%        | 5.885                                      | 210,0  | 535                                 | 547                                 |
| B_A_G3_A2_E2,8%_D4%        | 6.161                                      | 132,9  | 509                                 | 517                                 |
| B_B_G3_A2_E2,8%_D4%        | 6.161                                      | 141,5  | 490                                 | 499                                 |
| B_C_G3_A2_E2,8%_D4%        | 6.161                                      | 152,2  | 473                                 | 482                                 |
| B_D_G3_A2_E2,8%_D4%        | 6.161                                      | 164,1  | 480                                 | 490                                 |
| <b>B_M_G3_A2_E2,8%_D4%</b> | <b>6.161</b>                               | <b>169,1</b>   | <b>480</b>                          | <b>490</b>                          |
| B_E_G3_A2_E2,8%_D4%        | 6.161                                      | 182,9  | 486                                 | 497                                 |
| B_F_G3_A2_E2,8%_D4%        | 6.161                                      | 198,1  | 497                                 | 509                                 |
| B_G_G3_A2_E2,8%_D4%        | 6.161                                      | 220,5  | 519                                 | 532                                 |
| B_A_G4_A2_E2,8%_D4%        | 2.197                                      | 118,8  | 665                                 | 673                                 |
| B_B_G4_A2_E2,8%_D4%        | 2.197                                      | 131,6  | 634                                 | 641                                 |
| B_C_G4_A2_E2,8%_D4%        | 2.197                                      | 142,7  | 601                                 | 609                                 |
| B_D_G4_A2_E2,8%_D4%        | 2.197                                      | 153,3  | 598                                 | 608                                 |
| <b>B_M_G4_A2_E2,8%_D4%</b> | <b>2.197</b>                               | <b>161,2</b>   | <b>597</b>                          | <b>607</b>                          |
| B_E_G4_A2_E2,8%_D4%        | 2.197                                      | 180,8  | 604                                 | 615                                 |
| B_F_G4_A2_E2,8%_D4%        | 2.197                                      | 201,1  | 616                                 | 628                                 |
| B_G_G4_A2_E2,8%_D4%        | 2.197                                      | 232,1  | 639                                 | 653                                 |

Tabelle 91: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES III



| Variante<br>Kennung | Fläche<br>A <sub>n</sub><br>m <sup>2</sup> | Energiekennwert<br>Q <sub>Primär</sub><br>kWh/(m <sup>2</sup> a) | Globalkosten                        |                                     |
|---------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                     |  |  | Mikroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> | Makroökonomisch<br>€/m <sup>2</sup> |
| B_A_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 102,8  | 772                                 | 778                                 |
| B_B_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 116,5  | 741                                 | 748                                 |
| B_C_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 128,1  | 712                                 | 720                                 |
| B_D_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 139,3  | 723                                 | 732                                 |
| B_M_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 146,7  | 721                                 | 730                                 |
| B_E_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 165,2  | 731                                 | 740                                 |
| B_F_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 184,6  | 744                                 | 755                                 |
| B_G_G1_A3_E2,8%_D4% | 821  | 213,0  | 771                                 | 783                                 |
| B_A_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 89,9   | 557                                 | 563                                 |
| B_B_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 100,4  | 536                                 | 542                                 |
| B_C_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 109,8  | 512                                 | 519                                 |
| B_D_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 120,0  | 517                                 | 524                                 |
| B_M_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 125,7  | 515                                 | 522                                 |
| B_E_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 140,6  | 519                                 | 527                                 |
| B_F_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 156,4  | 528                                 | 538                                 |
| B_G_G2_A3_E2,8%_D4% | 5.885                                      | 179,2  | 545                                 | 556                                 |
| B_A_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 99,8   | 529                                 | 535                                 |
| B_B_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 109,1  | 510                                 | 516                                 |
| B_C_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 118,5  | 493                                 | 500                                 |
| B_D_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 128,4  | 500                                 | 508                                 |
| B_M_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 133,8  | 499                                 | 507                                 |
| B_E_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 147,8  | 507                                 | 516                                 |
| B_F_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 162,9  | 518                                 | 528                                 |
| B_G_G3_A3_E2,8%_D4% | 6.161                                      | 186,4  | 540                                 | 551                                 |
| B_A_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 101,7  | 675                                 | 681                                 |
| B_B_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 113,8  | 642                                 | 649                                 |
| B_C_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 123,8  | 609                                 | 616                                 |
| B_D_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 132,4  | 604                                 | 612                                 |
| B_M_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 140,3  | 602                                 | 611                                 |
| B_E_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 158,8  | 608                                 | 617                                 |
| B_F_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 178,1  | 619                                 | 629                                 |
| B_G_G4_A3_E2,8%_D4% | 2.197                                      | 209,5  | 643                                 | 655                                 |

### Zwischenfazit Anlagentechnik

Folgende Tabelle zeigt den direkten Vergleich der drei technischen Ausstattungspakete. Über alle Gebäude hinweg liegt die kostenoptimale Variante beim technischen Ausstattungsniveau der Stufe II, welches sich an den aktuellen Anforderungen für neue Gebäude orientiert. Es zeigt sich aber auch, dass die Unterschiede zum System mit einer höheren Energieeffizienz moderat sind. Das Globalkostenniveau des effizienteren Maßnahmenpaket ES III liegt geringfügig höher (im Mittel 2,8 %, blau) als das der kostenoptimalen Lösung (grün).

Unterschiede zu der Analyse der reinen baulichen Anforderungen aus Abschnitt 4.2.3.1 hinsichtlich der Globalkosten und Primärenergiekennwerte ergeben sich durch die Berücksichtigung einer RLT-Anlage in allen Varianten.

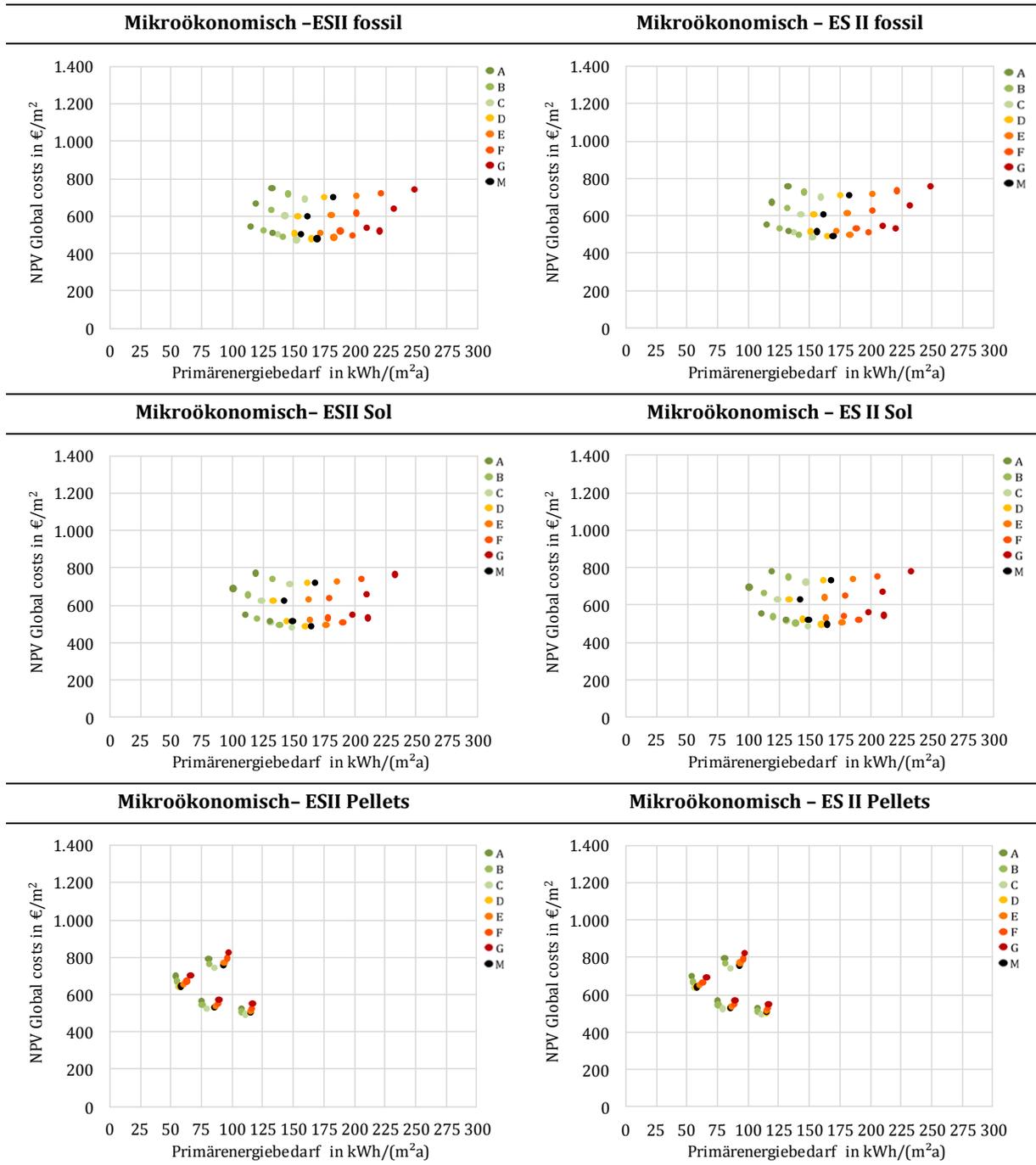
Tabelle 92: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlage ES I-III

| Variante         | Kennwert                | Kennwert                 | Kennwert                  | Globalkosten     | Globalkosten  | Globalkosten     |
|------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|---------------|------------------|
| Kennung          | Q <sub>Primär</sub> ESI | Q <sub>Primär</sub> ESII | Q <sub>Primär</sub> ESIII | Mikroök. ESI     | Mikroök. ESII | Mikroök. ESIII   |
| -                | kWh/(m <sup>2</sup> a)  | kWh/(m <sup>2</sup> a)   | kWh/(m <sup>2</sup> a)    | €/m <sup>2</sup> |               | €/m <sup>2</sup> |
| B_A_G1_E2,8%_D4% | 186,0                   | 132,2                    | 102,8                     | 753              | 748           | 772              |
| B_B_G1_E2,8%_D4% | 201,0                   | 145,5                    | 116,5                     | 725              | 718           | 741              |
| B_C_G1_E2,8%_D4% | 217,0                   | 159,4                    | 128,1                     | 700              | 691           | 712 (+3,0 %)     |
| B_D_G1_E2,8%_D4% | 238,0                   | 175,0                    | 139,3                     | 713              | 701           | 723              |
| B_M_G1_E2,8%_D4% | 246,2                   | 182,1 (+14,2 %)          | 146,7                     | 713              | 700           | 721              |
| B_E_G1_E2,8%_D4% | 268,6                   | 200,9                    | 165,2                     | 724              | 707           | 731              |
| B_F_G1_E2,8%_D4% | 292,9                   | 221,3                    | 184,6                     | 742              | 721           | 744              |
| B_G_G1_E2,8%_D4% | 325,4                   | 248,8                    | 213,0                     | 770              | 744           | 771              |
| B_A_G2_E2,8%_D4% | 161,0                   | 115,1                    | 89,9                      | 553              | 545           | 557              |
| B_B_G2_E2,8%_D4% | 172,9                   | 125,6                    | 100,4                     | 533              | 524           | 536              |
| B_C_G2_E2,8%_D4% | 186,1                   | 137,2                    | 109,8                     | 514              | 502           | 512 (+2,0 %)     |
| B_D_G2_E2,8%_D4% | 203,7                   | 150,9                    | 120,0                     | 520              | 507           | 517              |
| B_M_G2_E2,8%_D4% | 210,0                   | 156,3 (+13,9 %)          | 125,7                     | 520              | 504           | 515              |
| B_E_G2_E2,8%_D4% | 227,9                   | 171,6                    | 140,6                     | 526              | 509           | 519              |
| B_F_G2_E2,8%_D4% | 247,6                   | 188,2                    | 156,4                     | 539              | 519           | 528              |
| B_G_G2_E2,8%_D4% | 273,1                   | 210,0                    | 179,2                     | 560              | 535           | 545              |
| B_A_G3_E2,8%_D4% | 189,1                   | 132,9                    | 99,8                      | 520              | 509           | 529              |
| B_B_G3_E2,8%_D4% | 198,2                   | 141,5                    | 109,1                     | 501              | 490           | 510              |
| B_C_G3_E2,8%_D4% | 210,1                   | 152,2                    | 118,5                     | 487              | 473           | 493 (+4,2 %)     |
| B_D_G3_E2,8%_D4% | 225,4                   | 164,1                    | 128,4                     | 496              | 480           | 500              |
| B_M_G3_E2,8%_D4% | 231,2                   | 169,1 (+11,1 %)          | 133,8                     | 497              | 480           | 499              |
| B_E_G3_E2,8%_D4% | 247,3                   | 182,9                    | 147,8                     | 505              | 486           | 507              |
| B_F_G3_E2,8%_D4% | 265,3                   | 198,1                    | 162,9                     | 519              | 497           | 518              |
| B_G_G3_E2,8%_D4% | 291,9                   | 220,5                    | 186,4                     | 543              | 519           | 540              |
| B_A_G4_E2,8%_D4% | 153,6                   | 118,8                    | 101,7                     | 658              | 665           | 675              |
| B_B_G4_E2,8%_D4% | 167,9                   | 131,6                    | 113,8                     | 628              | 634           | 642              |
| B_C_G4_E2,8%_D4% | 180,4                   | 142,7                    | 123,8                     | 598              | 601           | 609 (+2,0 %)     |
| B_D_G4_E2,8%_D4% | 192,0                   | 153,3                    | 132,4                     | 597              | 598           | 604              |
| B_M_G4_E2,8%_D4% | 200,9                   | 161,2                    | 140,3                     | 597              | 597           | 602              |
| B_E_G4_E2,8%_D4% | 222,9                   | 180,8                    | 158,8                     | 606              | 604           | 608              |
| B_F_G4_E2,8%_D4% | 245,7                   | 201,1                    | 178,1                     | 621              | 616           | 619              |
| B_G_G4_E2,8%_D4% | 280,6                   | 232,1                    | 209,5                     | 648              | 639           | 643              |

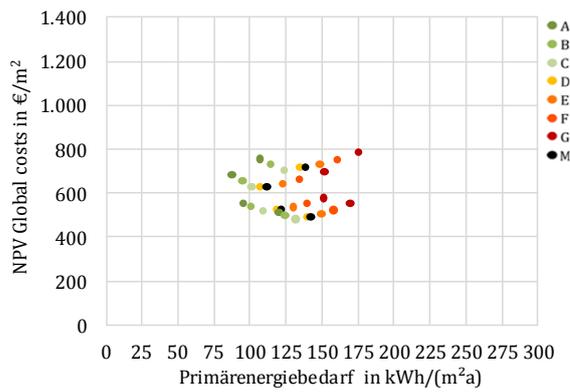
## Anlagenvergleich über alle Wärmeschutzklassen

Um den Einfluss verschiedener Wärmeerzeuger, bzw. den Einfluss des Einsatzes von erneuerbaren Energien auf die Wirtschaftlichkeit zu überprüfen, werden für alle Wärmeschutzklassen die möglichen Anlagenvarianten bewertet. Die Einbeziehung aller Wärmeschutzklassen in die Auswertung hat zum Ziel, Tendenzen erkennbar zu machen, ob bestimmte Technologien ggf. einen höheren Einfluss auf den kostenoptimalen Wärmeschutzstandard haben. Dies wird in den Diagrammen über einen ausgeprägten kurvigen Verlauf dargestellt. Z. B. ist dies für Pelletsanlagen, Wärmepumpen und KWK-Systemen der Fall. Unabhängig von diesen Verläufen liegt der Tiefpunkt einer jeden Kurvenschar in der Regel beim Wärmeschutzstandard C bis D. Diese kann demnach technologieneutral als kostenoptimal identifiziert werden.

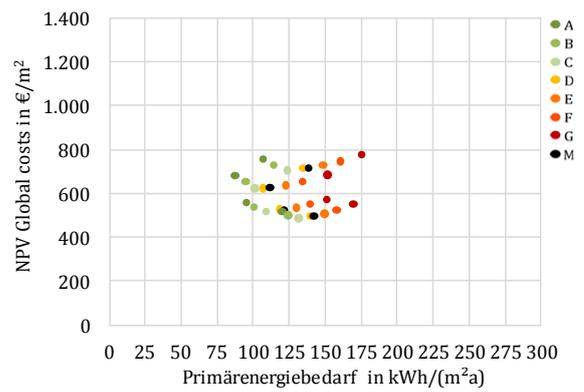
Tabelle 93: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik.



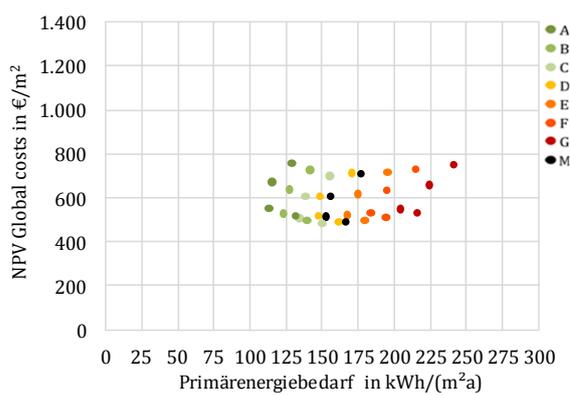
**Mikroökonomisch- ESII FW**



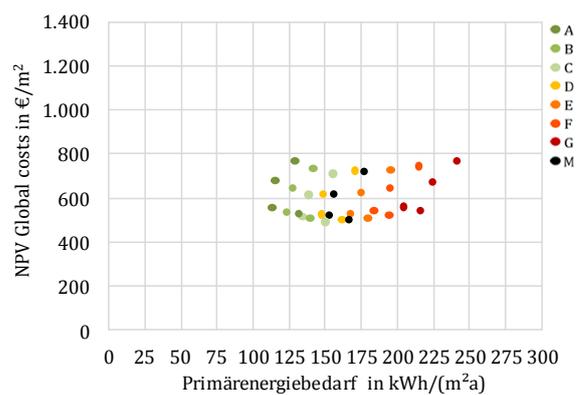
**Mikroökonomisch - ES II FW**



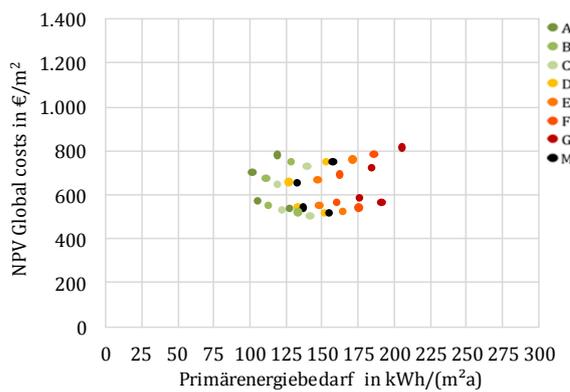
**Mikroökonomisch- ESII LWP**



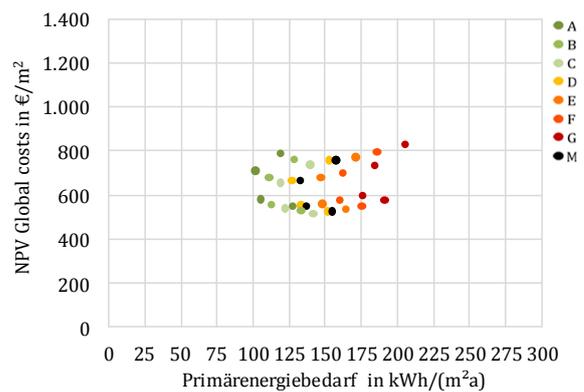
**Mikroökonomisch - ES II LWP**



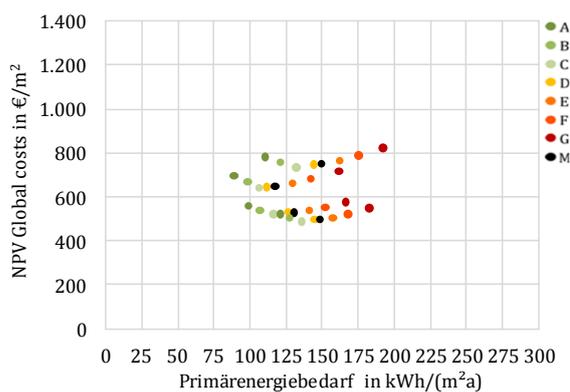
**Mikroökonomisch- ESII Geo**



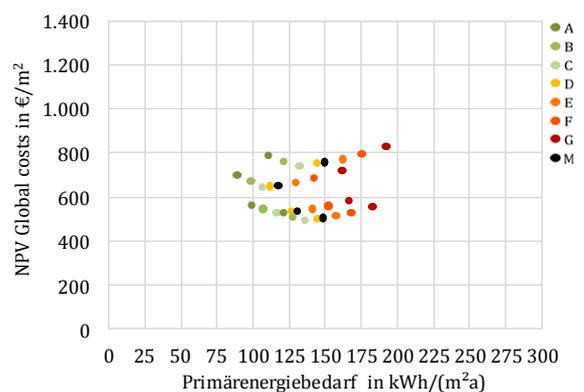
**Mikroökonomisch - ES II Geo**

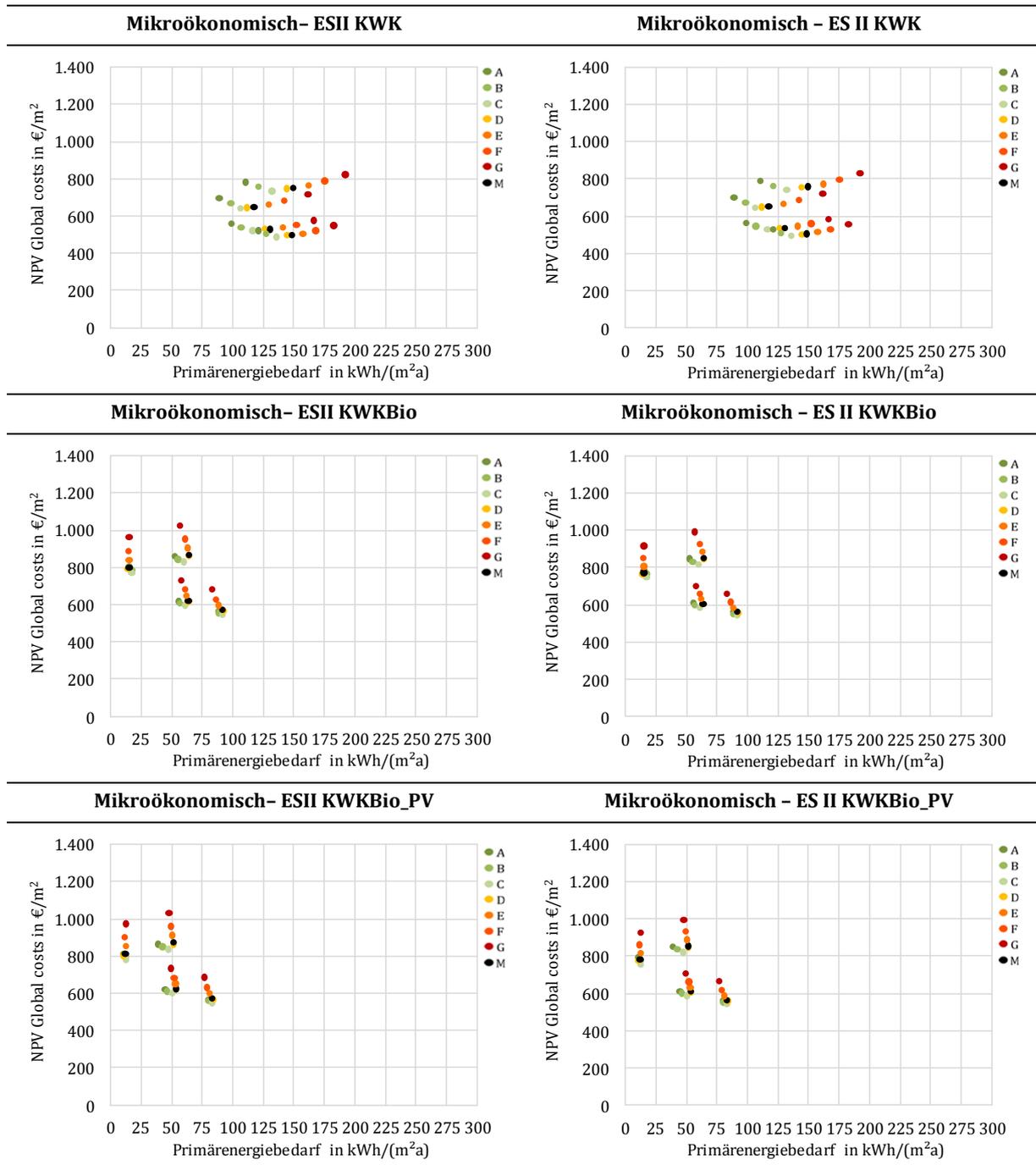


**Mikroökonomisch- ESII PV**



**Mikroökonomisch - ES II PV**





### Zwischenfazit

Über alle anwendbaren Technologien ist die Wärmeschutzklasse C bis D i.d.R. kostenoptimal. Zum direkten Vergleich des Einflusses der Anlagentechnik und verschiedener Energieträger wird der Vergleich auf der Basis eines Gebäudes der Wärmeschutzklasse D durchgeführt.

## Anlagenvergleich für Wärmeschutzklasse D

Im Fall der Sanierung werden nur Bauteil- und keine Gesamtanforderungen gestellt. Für Wärmeerzeuger gibt es ebenso keine direkten Effizienzanforderungen. Im Rahmen der Energieeinsparverordnung werden Anforderungen an Untersysteme wie z.B. an die Isolierstärke von Verteilungen etc. gestellt. Diese Anforderungen werden im Rahmen dieses Berichts nicht einzeln bewertet.

Zur besseren Darstellung wird der Einfluss der angesetzten Anlagentechnik für jedes Gebäude separat gezeigt. Es wird unterstellt, dass das Gebäude im Wärmeschutzniveau D ausgeführt ist. Für das Gebäude 1 zeigt sich, dass ein Brennwertkessel basierend auf einem fossilen Energieträger die geringsten Gesamtkosten aufweist. Die Technologien *Fernwärme (FW)* und *Wärmepumpe mit Geothermie (Geo)* sind auch im Fall einer Modernisierung nicht für jeden Standort verfügbar und müssen bei der Bestimmung der gesetzlichen Anforderungen ausgeklammert werden. Die Ausprägung der Anlagentechnik auf die Gesamtkosten verläuft für alle vier Gebäude ähnlich; jedoch auf unterschiedlich hohem Niveau.

Tabelle 94: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.

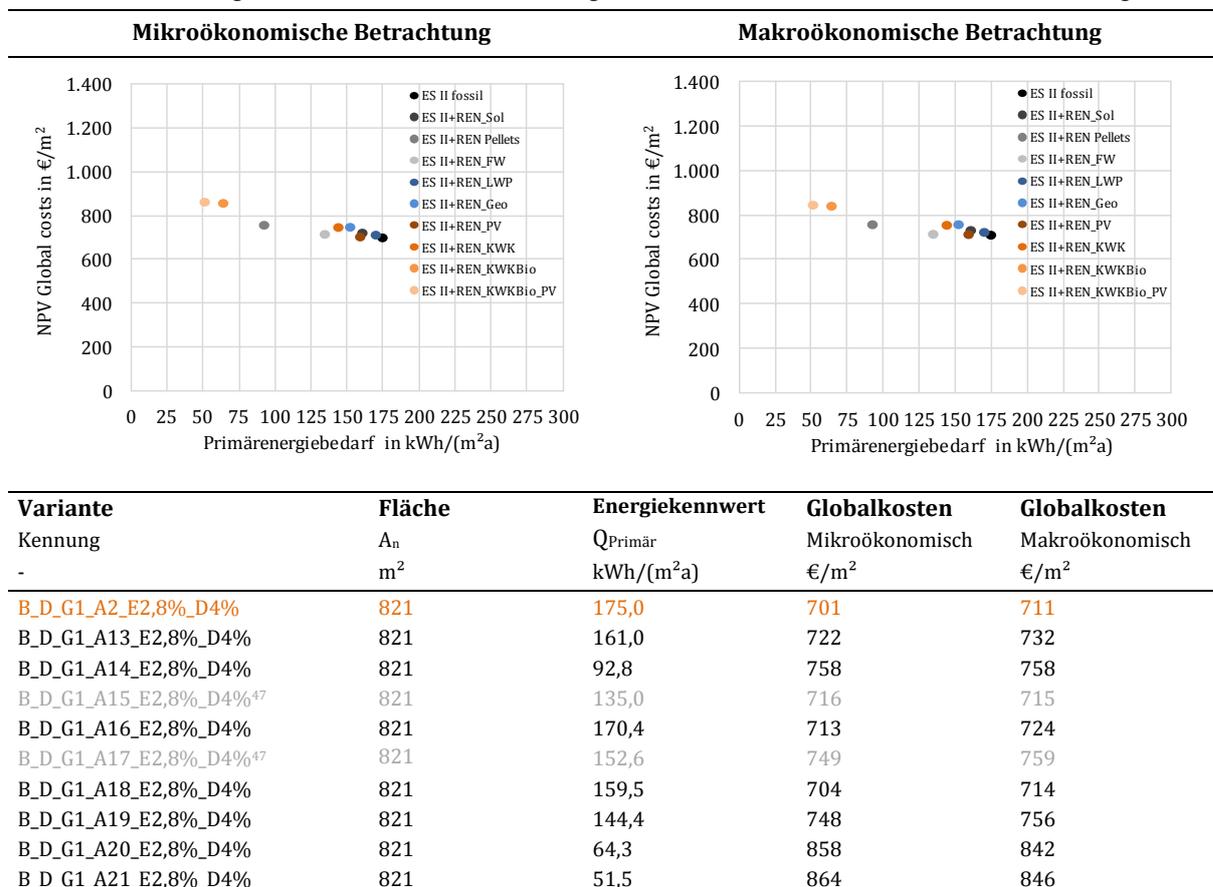


Tabelle 95: Nichtwohngebäude 02 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.

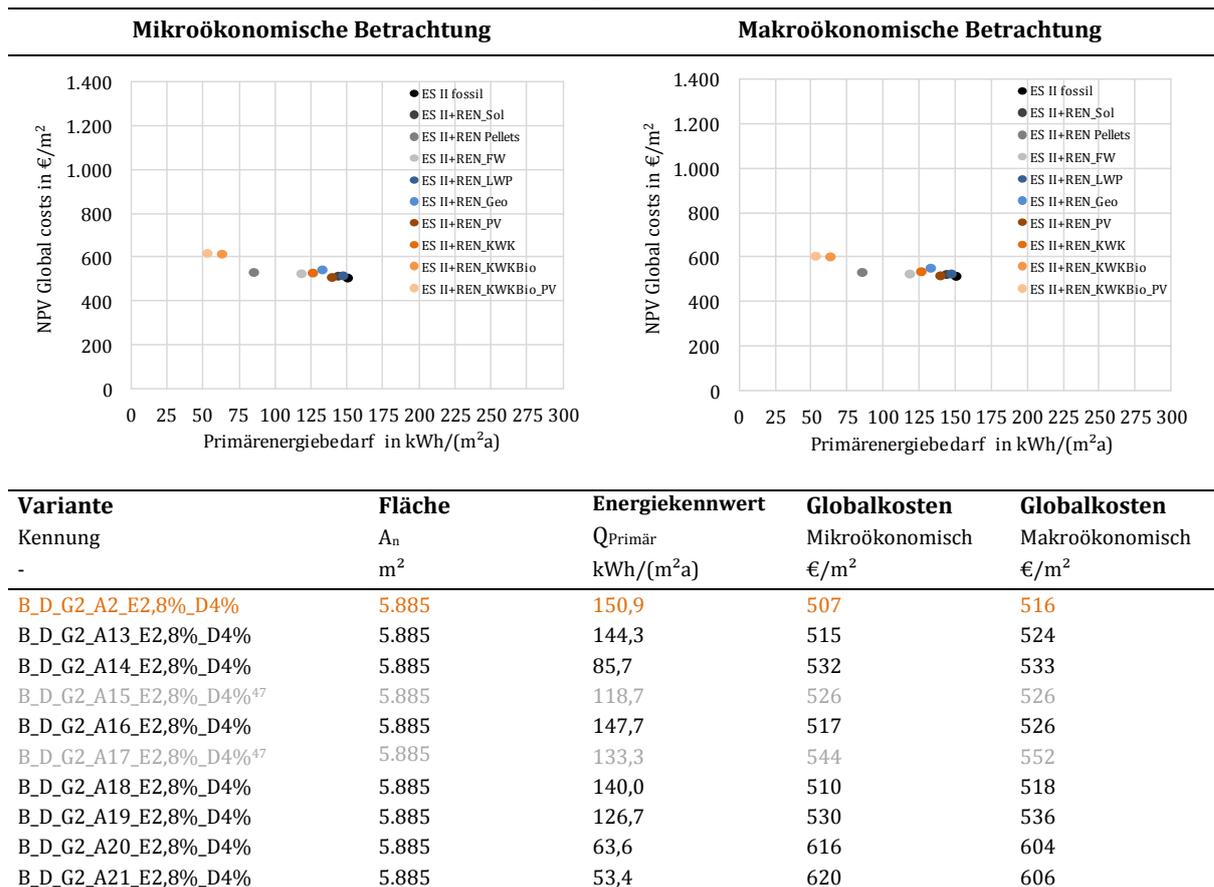


Tabelle 96: Nichtwohngebäude 03 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.

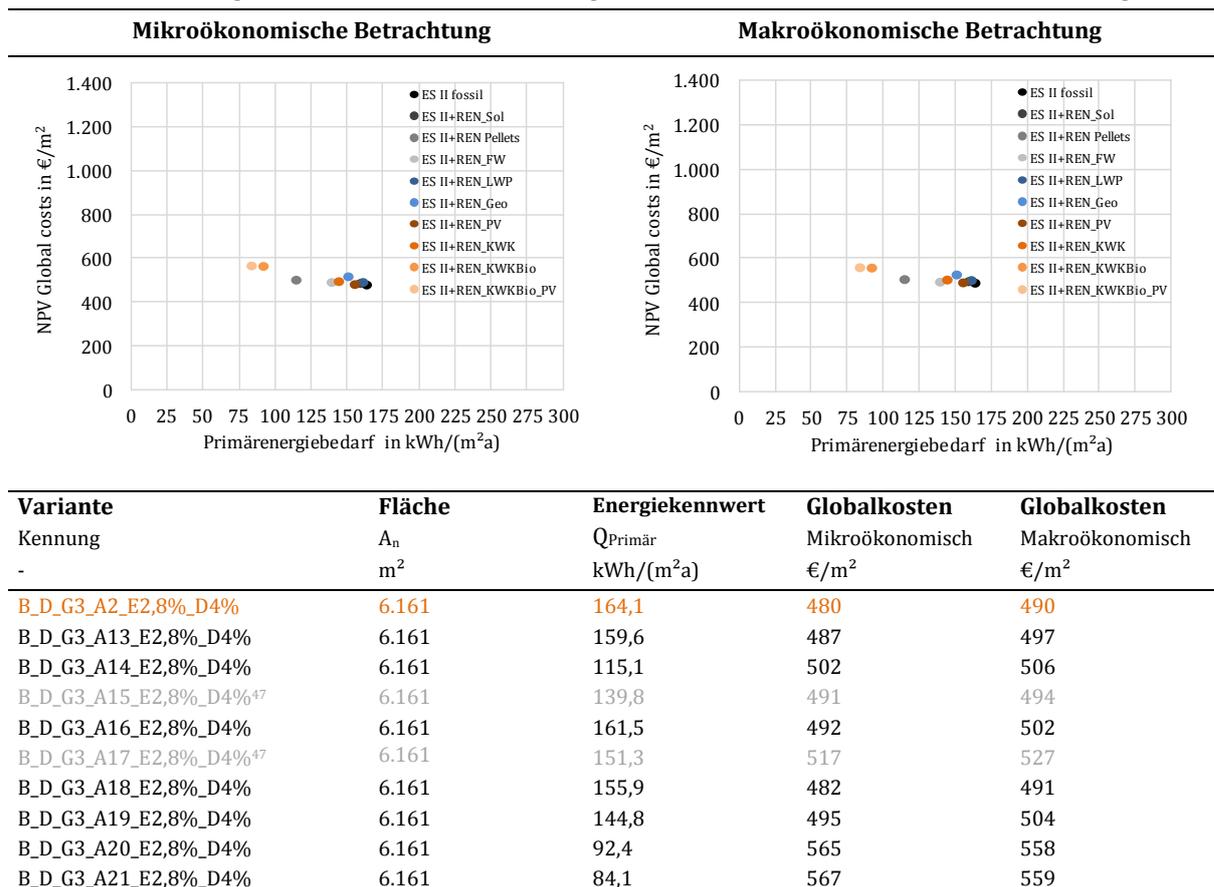
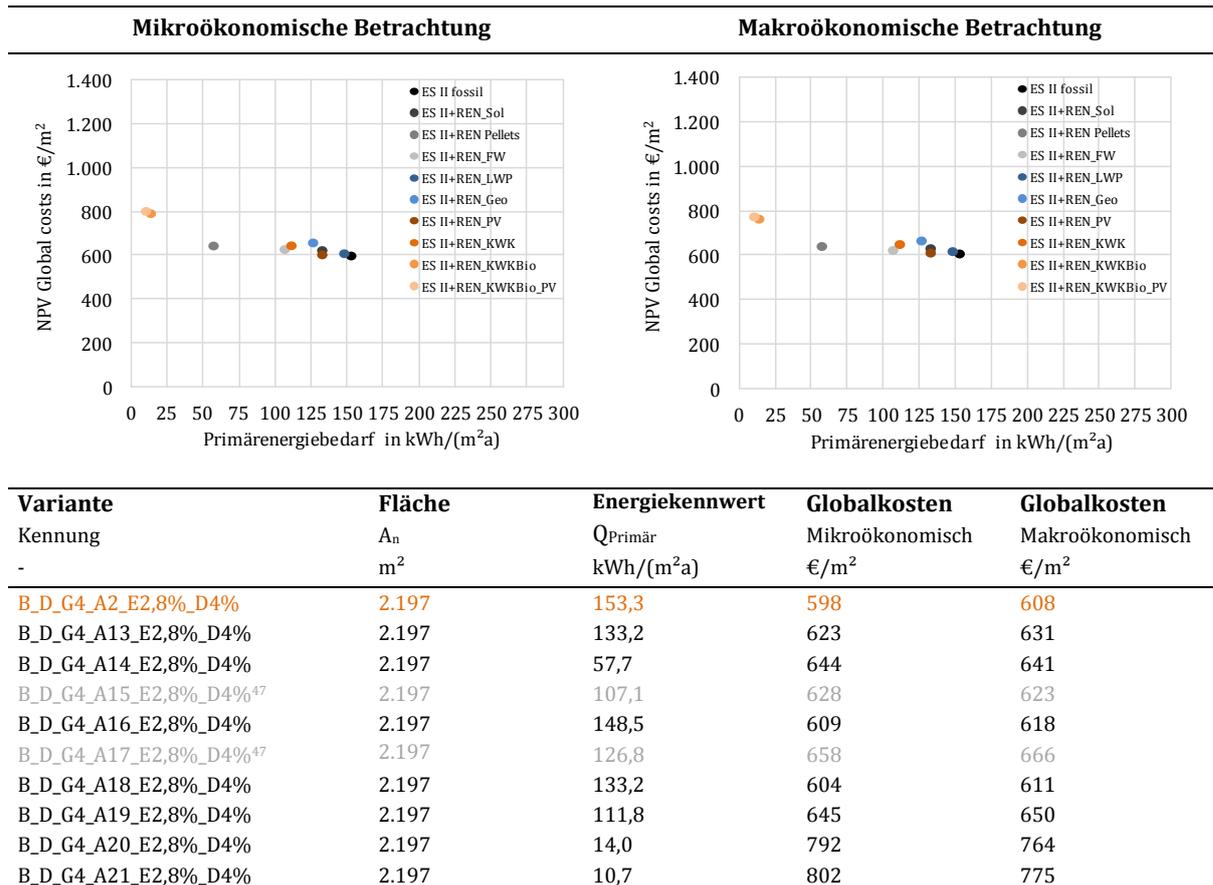


Tabelle 97: Nichtwohngebäude 04 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.



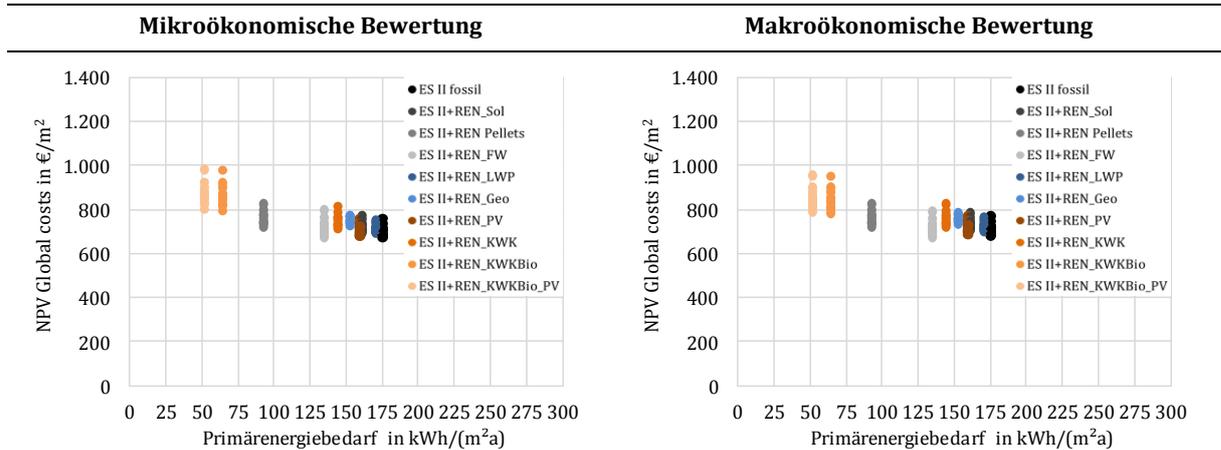
### Zwischenfazit

Die Basisvariante mit einem Brennwertkessel und einem fossilem Energieträger weist über alle Gebäude die geringsten Globalkosten, bei gleichzeitig auch höchstem Primärenergiekennwert auf. Um die darzustellenden Varianten für die Sensitivitätsanalyse einzugrenzen wird der Vergleich folgend auf das Gebäude 1 bezogen. Die sich dort ergebenden Tendenzen sind auf alle anderen Gebäude übertragbar.

## Einfluss der Entwicklungsszenarien

Folgende Bilder zeigen zunächst alle analysierten Varianten in der Übersicht. Dabei werden die Parameter für Energiepreissteigerung und Kapitalzins für jedes Gebäude und jede Wärmeschutzklasse ausgewertet. Die vertikale Spreizung einer gleichfarbigen Kurvenschar spiegelt den Einfluss der sensiblen Parameter auf die jeweilige Variante des Wärmeschutzes wider. Auf mikro- und makroökonomischer Ebene werden die größten Spreizungen bei KWK-Anlagen bilanziert, da sich hier aufgrund des erhöhten Endenergiebedarfs (wegen der gekoppelten Wärme- und Stromproduktion) die größte Abhängigkeit von den Energiekosten einstellt. Die kombinierte Bewertung einzelner Szenarien wird in folgendem Abschnitt diskutiert.

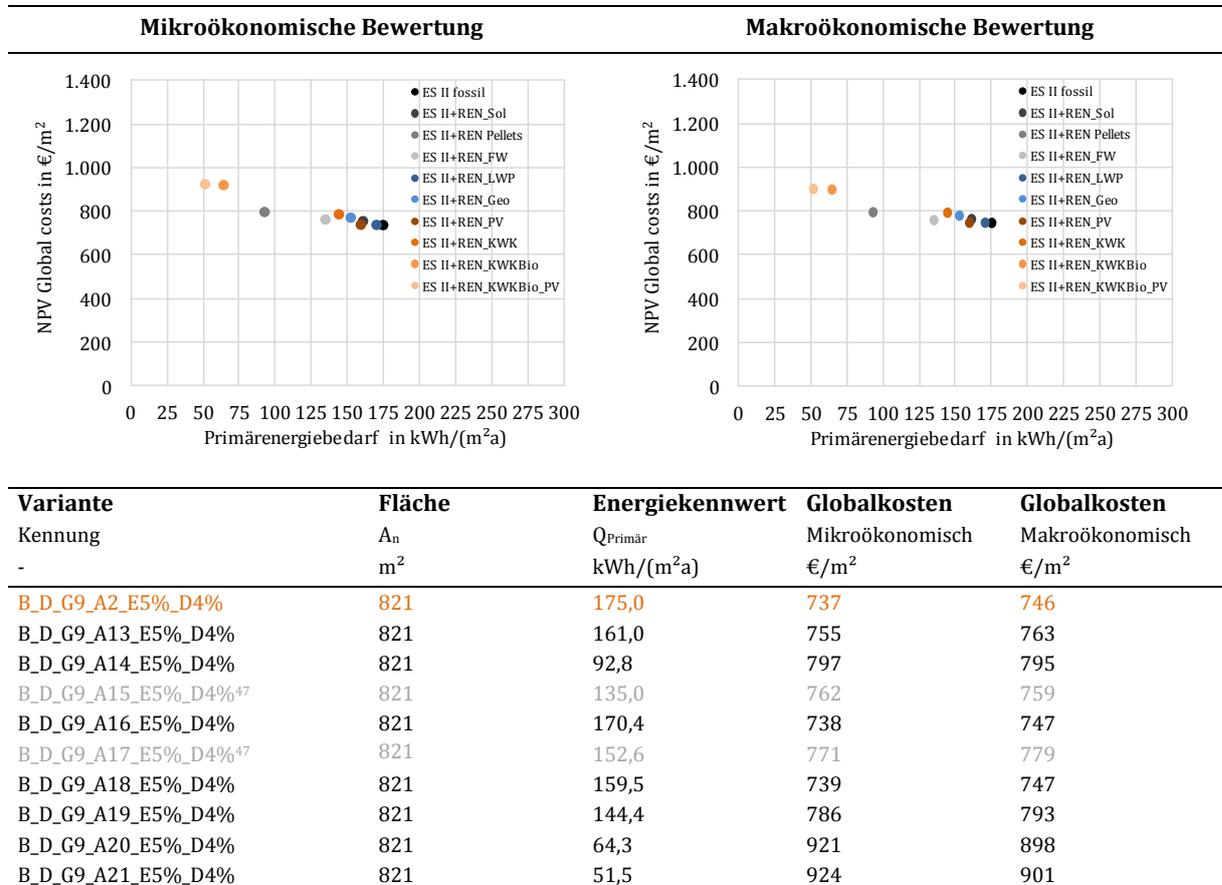
Tabelle 98: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – alle Entwicklungsszenarien – Mikro- und Makroökonomisch.



## Entwicklungsszenario 2

In diesem Szenario wird von einer höheren Energiepreisssteigerung (5 %/a) bei moderatem Kapitalzins (4 %) ausgegangen (siehe Tabelle 17). Die Variante mit Brennwertkessel und fossilem Energieträger ist in dem Szenario die kostenoptimale Variante.

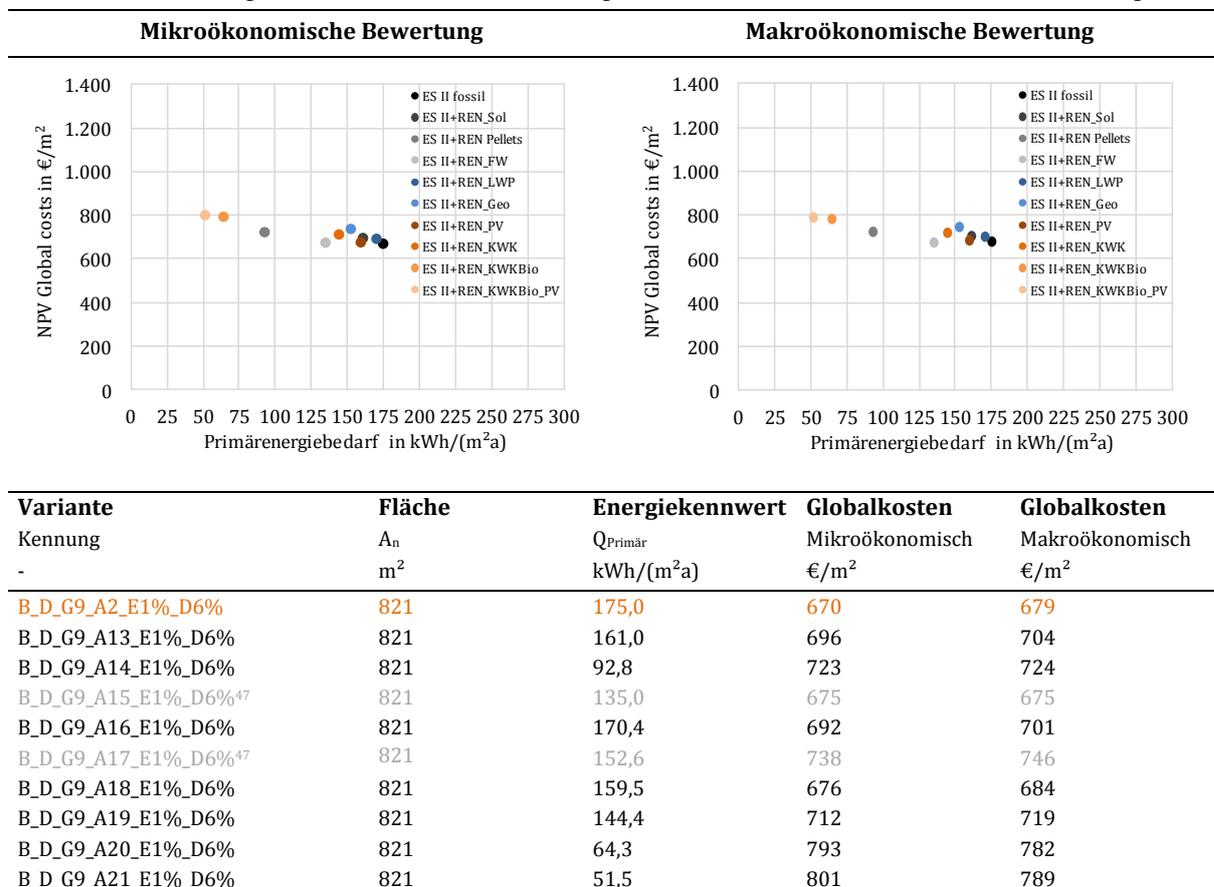
Tabelle 99: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.



### Entwicklungsszenario 3

In Szenario 3 wird von einer geringen Energiepreiserhöhung (1 %/a) und höheren Kapitalzinsen (6 %) ausgegangen. Die Basisvariante mit einem Brennwertkessel markiert mit 670 €/m<sup>2</sup> das kostenoptimale Niveau.

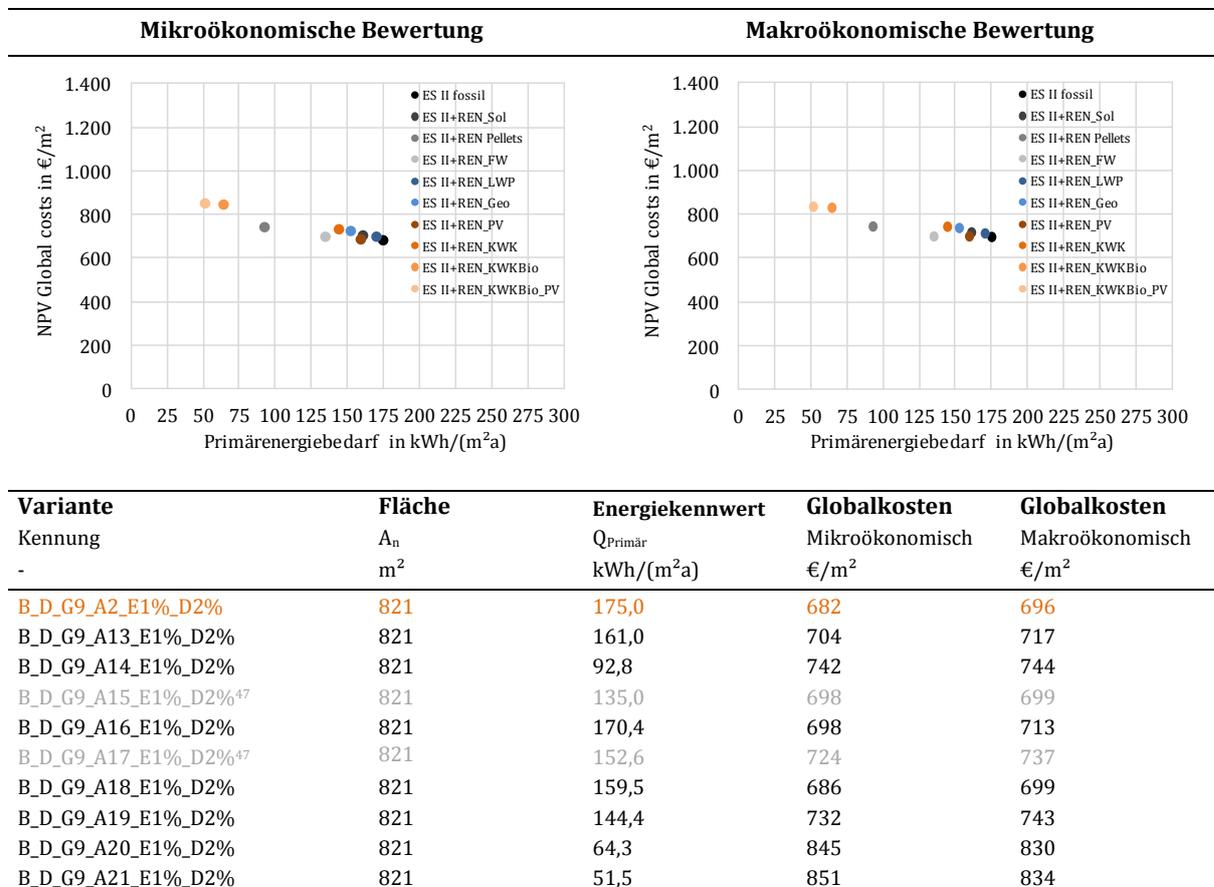
Tabelle 100: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen .



### Entwicklungsszenario 4

Das Szenario 4 entspricht einer moderaten wirtschaftlichen Entwicklung mit geringem Kapitalzins (2 %) und gleichzeitig einer geringen Energiepreissteigerung (1 %/a). Die Variante mit einem Brennwertkessel auf Basis eines fossilen Energieträgers definiert die kostenoptimale Variante.

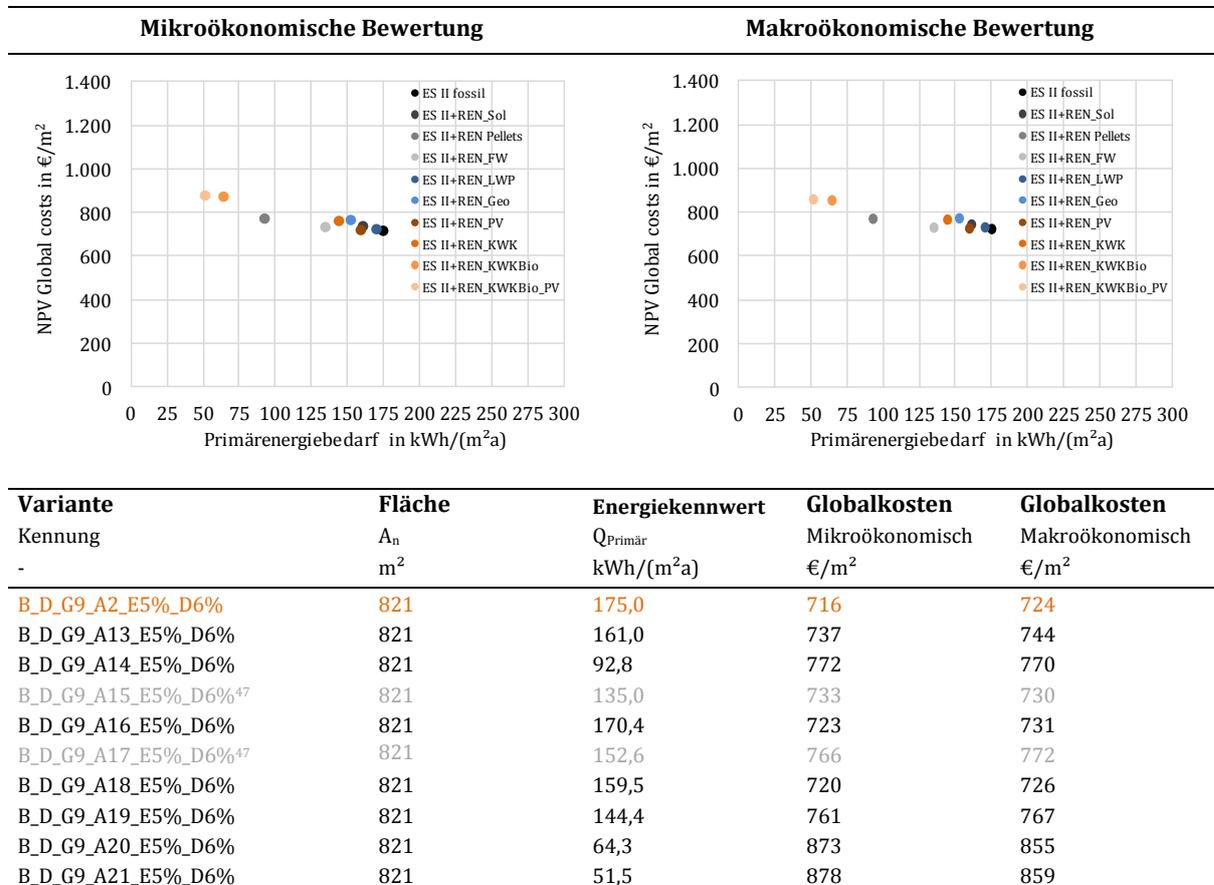
Tabelle 101: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.



### Entwicklungsszenario 5

Im 5<sup>ten</sup> Szenario wird eine gute wirtschaftliche Entwicklung mit höheren Kapitalzinsen (6 %) und eine ebenfalls höhere Energiepreissteigerung (5 %/a) angesetzt. In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum weiterhin beim Brennwertkessel, wobei die Varianten insgesamt etwas dichter aneinander liegen.

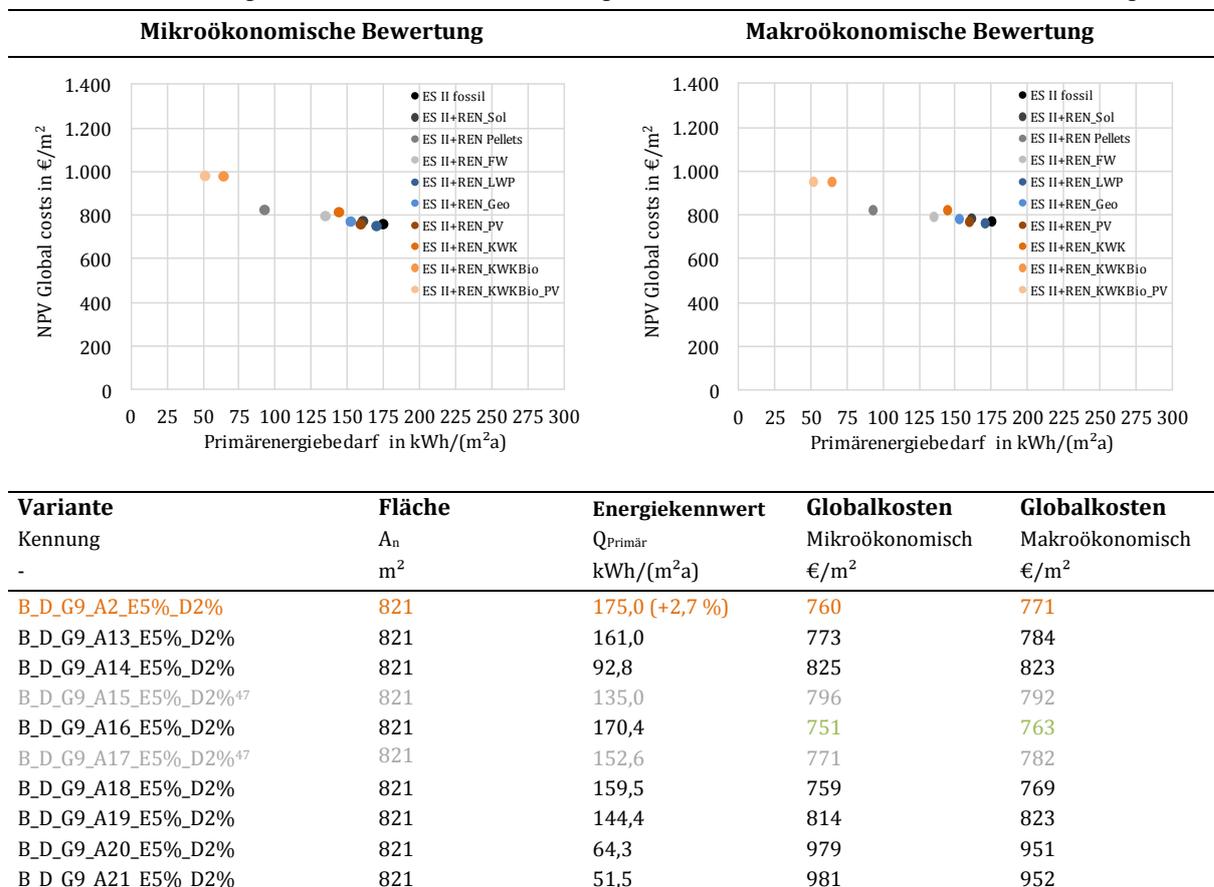
Tabelle 102: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.



### Entwicklungsszenario 6

Szenario 6 beschreibt wird eine wirtschaftliche Entwicklung mit niedrigem Kapitalzinsniveau (2 %) und eine höhere Energiepreissteigerung (5 %/a). In diesem Szenario liegt das Kostenoptimum bei den Wärmepumpen.

Tabelle 103: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.



#### 4.2.4 Fazit für bestehende Nichtwohngebäude

Für bestehende Nichtwohngebäude werden, wie bei Wohngebäuden auch, im Falle einer Modernisierung keine direkten Anforderungen an die Gesamtenergieeffizienz gestellt. Dennoch gibt es Mindestanforderungen an Bauteile und teilweise auch an technische Systeme. Die Auswertung der Kostenoptimalität bezogen auf den baulichen Wärmeschutz zeigt, dass die Mindestanforderungen an Einzelbauteile mit einer Überschreitung von 4,6 % innerhalb der 15 %-Grenze der Richtlinie liegen.

Für technische Systeme markiert das Ausstattungsniveau ES II die kostenoptimale Variante. Es zeigt sich, wie bei neuen Gebäude auch, dass der Effizienzstandard III (höhere Energieeffizienz), in einigen Fällen nur zu geringen höheren Globalkosten führt. Diesbezüglich könnten sich die Anforderungen an neu einzubauende Technik an diesen Technologien orientieren.

## 5 Zusammenfassung

Bei der Interpretation der Ergebnisse der vorliegenden Studie gilt es unterschiedliche Aspekte einzubeziehen, die im Folgenden angemerkt werden:

- Zur Festlegung kostenoptimaler energetischer Anforderungsniveaus wird der mikroökonomische, also die privatwirtschaftliche Perspektive als Bewertungsmaßstab angesetzt. Die makroökonomische Bewertung kann aus der Sicht eines Investors zu höheren Investitionen führen.
- Die makroökonomische Betrachtungsweise berücksichtigt lediglich eine Internalisierung externer Kosten mittels eines festgelegten Preises für die klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Potenzielle externe Kosten für die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit sowie die Monetarisierung der Abhängigkeitsrisiken für die fossile Energieversorgung sind nicht berücksichtigt. Eine Einbeziehung dieser Einflüsse ist nicht trivial, aber in der Tendenz würde sich dadurch die Kostenoptimalität überwiegend in Richtung effizienterer Energiestandards verschieben.
- Die Ergebnisse gelten nur für die in der Untersuchung angegebenen Energie- und Investitionskosten, sowie für die sonstigen unterstellten Randbedingungen. Für die betrachteten Gebäudetypen und -konfigurationen lässt sich überwiegend ein relativ flacher Verlauf der Globalkosten im Bereich der kostenoptimalen Varianten feststellen, sodass bereits marginale Änderungen der Randbedingungen (Investitionskosten, Kostenentwicklung und Effizienzsteigerung verschiedener Technologien, Zinssatz, Energiepreisentwicklung, etc.) zu deutlichen Veränderungen bei den Globalkosten und beim Primärenergiebedarf führen können, der sich als Anforderungswert aus der kostenoptimalen Variante definiert. Insbesondere bei den Maßnahmen zur energetischen Verbesserung der Gebäudehülle zeigt sich, dass hier in der Praxis große Preisspannen vorhanden sind.
- Die verwendeten Kostenfunktionen und Kostenentwicklungen berücksichtigen keinen möglichen technologischen Fortschritt. Im Bereich des energieeffizienten Bauens kann allerdings mit weiteren Innovationssprüngen gerechnet werden, die auch ein erhebliches Kostensenkungspotenzial beinhalten können – nicht zuletzt auch aufgrund der politischen Priorisierung. Dies gilt sowohl für die Produkte und Technologien im Bereich der Gebäudehülle als auch für die technische Gebäudeausrüstung und die Anlagentechnik.
- Für Wohngebäude ist aufgrund der Struktur der energetischen Anforderungen in der Luxemburger Gesetzgebung für die Einhaltung der Wärmeschutzklasse C (entspricht der kostenoptimalen Variante) keine kontrollierte Lüftung (z. B. Abluftanlage) vorgesehen, welche aus lufthygienischen und bauphysikalischen Gesichtspunkten, insbesondere bei einer forcierten luftdichten Bauweise, zu empfehlen ist. Eine Berücksichtigung der dadurch entstehenden Kosten führt zu einer Verschiebung der Kostenoptimalität in Richtung energieeffizienterer Baustandards, bzw. zu einer geringeren Differenz in den Globalkosten.

Folgend werden die wesentlichen Erkenntnisse mit Bezug auf die kostenoptimal-Bewertung für Wohn- und Nichtwohngebäude gemäß der Richtlinie 2010/31/EU [2] und der Verordnung N° 244/2012 [1] geordnet für Neubauten und Bestandsgebäude aufgelistet.

## Wohngebäude Neubau

- Die aktuelle Wärmeschutzklasse C (vgl. Tabelle 13) ist bereits kostenoptimal. Über die untersuchten Entwicklungsszenarien S1 bis S5 hinweg ergeben sich keine wesentlichen Verschiebungen der kostenoptimalen Niveaus. Im Szenario S6 (höhere Energiepreiserhöhung) verschiebt sich das kostenoptimale Niveau in der Tendenz zu effizienteren Standards.
- Die Einbeziehung des bautechnischen Förderprogramms für Niedrigenergie- und Passivhäuser führt im Vergleich zu den aktuellen gesetzlichen Anforderungen zu geringeren Globalkosten. Tendenz: mit steigendem Wärmeschutz verringern sich die Globalkosten. Bei Einbeziehung staatlicher Subventionen liegen die Unterschiede in den Globalkosten zur kostenoptimalen Variante über alle Gebäude bei Niedrigenergiehäusern im Mittel bei +4,4 % und bei Passivhäusern im Mittel bei -4,5 %.
- Die aktuellen Anforderungen an die Anlagentechnik sind bereits kostenoptimal. Dadurch, dass seit Mitte 2012 bereits die Klasse B im Bereich der Gesamtenergieeffizienz gefordert wird, liegen die primärenergetischen Anforderungen bei Einfamilienhäusern etwa 24 %, bei Mehrfamilienhäusern etwa 12 % unterhalb des Kennwerts, der aus der kostenoptimalen Berechnung als Mindestanforderung bestimmt werden kann. Mit den Anforderungen der Wärmeschutzklasse C und dem alleinigen Einsatz eines Brennwertkessels basierend auf einem fossilen Energieträger (entspricht der kostenoptimalen Lösung) kann die Gesamtenergieeffizienzklasse B i. d. R. nicht erreicht werden.
- Technische Systeme mit höheren spezifischen Investitionskosten und mit weniger stark ausgeprägter Kostendegression (z. B. Wärmepumpen mit Geothermie), werden systembezogen in Gebäuden mit höherem Wärmeschutz vergleichsweise wirtschaftlicher. Vergleicht man die Globalkosten verschiedener Anlagentechniken mit denen der kostenoptimalen Lösung ergeben sich im Mittel über alle Gebäude betrachtet folgende Unterschiede: Solaranlage +6,6 %, Pelletskessel 9,8 %, Fernwärme +0,5 %, Luftwärmepumpe +4,1 %, Wärmepumpe mit Geothermie +5,1 %, PV-Anlage +2,2 %, KWK auf Basis eines fossilen Brennstoffs +18,8 %.
- Hinsichtlich des Einflusses staatlicher Subventionen auf die Anlagentechnik zeigt sich, dass diese bei mikroökonomischer Betrachtung nicht für alle Gebäude und Technologien ausreichen, um eine vollständige Kompensation der Mehrkosten zu erreichen, die Differenzen sind jedoch relativ gering. Im Vergleich zur kostenoptimalen Varianten liegen die Unterschiede in den Globalkosten im Mittel über alle Gebäude inklusive der Berücksichtigung von Förderung im Bereich von +3,6 % für Solaranlagen, +6 % für Pelletskessel, -0,8 % für Wärmepumpen mit Geothermie und +1,5 % für PV-Anlagen. PV-Anlagen werden nach dem Prinzip der vorrangigen Eigenstromnutzung in einem modifizierten Vergütungsmodell bilanziert (siehe Fußnote 46, Seite 38). Im Rahmen der Berücksichtigung von Subventionen wird nur die derzeitige Investitionsbeihilfe gewährt. Unter dieser Annahme ergeben sich etwas höhere Globalkosten von im Mittel +1,5 %; eine hoher Eigenstromdeckungsanteil durch keine zu großen Anlagen vorausgesetzt. Je nach Marktentwicklung könnte die Investitionsbeihilfe ggf. etwas angehoben werden, wenn dieses Modell für die Einbeziehung von produziertem PV-Strom in der Gebäudeenergiebilanz von Niedrigstenergiegebäuden (nearly zero-energy buildings) umgesetzt wird.

### **Wohngebäude Bestand**

- Die primärenergetischen Mindestanforderungen der Klasse M liegen 7,7 % über den primärenergetischen Anforderungen, die sich aus dem kostenoptimalen Punkt berechnen; gemäß der Richtlinie sind maximal 15 % Abweichung erlaubt. Ein stärker ansteigender Energiepreis als in der Basis mit 2,8 %/a angenommen, führt bei allen Varianten zu einer besseren Darstellung von höheren Dämmstandards. Hier kann eine Verschärfung auf die U-Werte der Wärmeschutzklasse D hinsichtlich der kostenoptimalen Lösung im Falle einer Modernisierung in Betracht gezogen werden.
- Das aktuelle Förderprogramm zeigt, dass die Maßnahmen in allen Effizienzstandards wirtschaftlich sind, bzw. geringere Globalkosten aufweisen. Im Vergleich zu den Globalkosten der jeweils kostenoptimalen Varianten liegen die Unterschiede in den Globalkosten, unter Berücksichtigung der Bauteilförderung, über alle Gebäude im Mittel auf folgenden Niveaus: Wärmeschutzniveau A -9,3 %, Wärmeschutzniveau B -7,9 %, Wärmeschutzniveau C -6,6 % und Wärmeschutzniveau -5,7 %. Tendenz bei der Modernisierung auf ein bestimmtes Wärmeschutzniveau: bessere Wirtschaftlichkeit, bzw. geringere Globalkosten mit steigendem Wärmeschutzniveau.
- Derzeit existieren direkte Anforderungen an die Effizienz von Wärmeerzeugern bei deren Erneuerung nur bei Inanspruchnahme von staatlichen Subventionen. Die Analysen zeigen, dass ein Brennwertkessel mit fossilem Energieträger das wirtschaftliche Optimum darstellt, jedoch alle anderen Technologien zu niedrigeren Primärenergiebedarfen führen. Es könnte über verbindliche Mindestanforderungen für verschiedene Anlagentechniken (insbesondere Wärmeerzeuger) im Falle einer Modernisierung nachgedacht werden. Hinsichtlich der Unterschiede in den Globalkosten verschiedener technischer Systeme ergeben sich ähnliche Tendenzen wie beim Neubau.

### **Nichtwohngebäude Neubau**

- Das aktuelle Anforderungsniveau der Wärmeschutzklasse D ist nicht kostenoptimal und die Anforderungen liegen im Mittel über alle Gebäude etwa 15,9 % über dem Primärenergiebedarf, der sich durch die kostenoptimale Lösung bestimmen lässt und außerhalb der Toleranzgrenze der Richtlinie (>15 %). Die Sensitivitätsuntersuchungen bestätigen diese Einschätzung in fast allen Entwicklungsszenarien. Die vorgesehene Verschärfung der Anforderungen auf die Wärmeschutzklasse C entspricht der kostenoptimalen Lösung.
- Die Effizienzstufe II ist kostenoptimal, jedoch liegen die Globalkostenniveaus des verbesserten Maßnahmenpaketes ES III mit im Mittel 2,3 % nur geringfügig über denen der Effizienzstufe II, bei jedoch deutlicher Reduktion des Primärenergiebedarfs (im Mittel -18,7 %). Hier könnte eine Verschärfung der energetischen Anforderungen im Bereich von Lüftungs- und Kälteanlagen und bei den Beleuchtungssystemen in Betracht gezogen werden.
- Die aktuellen energetischen Anforderungen an die Anlagentechnik sind kostenoptimal. Im Bereich der Wärmeerzeugung wird der kostenoptimale Primärenergiekennwert durch einen Brennwertkessel mit fossilem Brennstoff markiert. Diese Lösung weist für alle betrachteten Varianten den höchsten Primärenergiebedarf auf. Mit allen anderen Technologien zur Wärmeerzeugung werden niedrigere Primärenergiekennwerte er-

reicht. Vergleicht man die Globalkosten unter Berücksichtigung der technischen Systeme mit den Globalkosten der jeweils kostenoptimalen Varianten ergeben sich folgende Unterschiede: Solaranlage +2,3 %, Pelletskessel +6,3 %, Fernwärme +3,9 %, Luftwärmepumpe +0,4 %, Wärmepumpe mit Geothermie +5,7 %, PV-Anlage +0,7 % und KWK auf Basis eines fossilen Brennstoffs +5,3 %.

### **Nichtwohngebäude Bestand**

- Die kostenoptimalen Anforderungen an den Wärmeschutz von Bauteilen schwanken je nach betrachtetem Gebäude von den aktuellen Mindestanforderungen M bis zum Wärmeschutzstandard C. Der Verlauf der Globalkosten in diesem Bereich ist sehr flach, was zu geringen Unterschieden in den Globalkosten führt. Das über alle Gebäude ermittelte durchschnittliche kostenoptimale Niveau liegt beim Wärmeschutzstandard D. Im Mittel über die betrachteten Gebäude liegt der primärenergetische Anforderungswert, der sich durch die aktuellen Anforderungen ergibt, etwa 4,6 % über dem der kostenoptimalen Lösung, was innerhalb der Toleranz gemäß der Richtlinie (<15 %) liegt.
- Im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchung zeigt sich eine Verschiebung der kostenoptimalen Lösung in Abhängigkeit der angenommenen wirtschaftlichen Entwicklung. Steigen die Energiepreise stärker an, werden höhere Dämmstandards kostenoptimal. Steigt hingegen nur der Kapitalzins an, verschiebt sich die kostenoptimale Lösung in die andere Richtung. Aufgrund des generell flachen Verlaufs der Globalkosten kann über eine Orientierung an Standards mit der höheren Energieeffizienz nachgedacht werden.
- Für die Anlagentechnik sind die Randbedingungen des Maßnahmenpakets II für alle Varianten kostenoptimal. Wie bei neuen Nichtwohngebäuden auch, liegen die Globalkosten beim effizienteren Standard ES III mit 2,8 % nur geringfügig über denen der kostenoptimalen Lösung. Im Falle einer Anlagenerneuerung könnte die Einführung von Anforderungen an einzelne Systeme im Bereich der Beleuchtungssysteme sowie bei Kälte- und Lüftungsanlage in Betracht gezogen werden.
- Der Brennwertkessel mit fossilem Energieträger markiert auch bei bestehenden Gebäuden die kostenoptimale Lösung. Alle anderen Technologien bedingen jedoch einen geringeren Primärenergiebedarf. Hinsichtlich der Unterschiede in den Globalkosten verschiedener technischer Systeme ergeben sich ähnliche Tendenzen wie beim Neubau.

Zudem kann aufgrund der in diesem Bericht ermittelten Tendenzen festgehalten werden, dass die Einführung weitergehender Energieeffizienzstandards maßgeblich von der Entwicklung der Energiepreise sowie von den Mehrkosten der Effizienztechnologien bestimmt werden. Darüber hinaus ist aber auch die Bewertung und Wichtigkeit der langfristigen Versorgungssicherheit sowie die Abhängigkeit von Energieimporten von außerordentlicher Bedeutung. Die Einschätzungen über diese Abhängigkeit sowie die damit verbundenen monetären Auswirkungen werden letztlich bei der Bestimmung der Geschwindigkeit bei der Einführung und bei der Ausgestaltung zukünftiger Effizienzstandards ausschlaggebend sein.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] European Commission, „Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings,“ Official Journal of the European Union, EU, 2012.
- [2] European Commission, „Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on energy performance of buildings,“ European Commission, EU, 2010.
- [3] Le gouvernement du grand-duché de Luxembourg, “Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation (14.12.2007),“ Service central de législation, Luxembourg, 2007.
- [4] Le gouvernement du grand-duché de Luxembourg, „Règlement grand-ducal du 5 mai 2012 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation et fonctionnels (11.05.2012),“ Service central de législation, Luxembourg, 2012.
- [5] T. Boermans, K. Bettgenhäuser, A. Hermelink und S. Schimschar, „Cost optimal building performance requirements, Calculation methodology for reporting on national energy performance requirements on the basis of cost optimality within the framework of the EPBD,“ European Council for an Energy Efficient Economy, Sweden, 2011.
- [6] I. Nolte, O. Rapf, D. Staniazek und M. Faber, „Implementing the cost-optimal methodology in EU countries,“ Buildings Performance Institute Europe (BPIE), EU, 2013.
- [7] European Commission, „EU energy trends to 2030 — Update 2009,“ European Union, Publications Office of the European Union, 2010.
- [8] A. Enseling und T. Loga, „Implementing the cost-optimal methodology in EU countries,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, BPIE Buildings Performance Institute Europe, Darmstadt.
- [9] European Commission, „Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings,“ European Commission, EU, 2012.
- [10] T. Boermans, A. Hermelink, M. Bosquet, K. Bettgenhäuser und J. Grözinger, „Workshop on cost optimal levels within the EPBD: Supplement for the implementation,“ Ecofys, EU, 2012.
- [11] M. Sunikka-Blank und R. Galvin, Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual consumption, U. o. C. Department of Architecture, Hrsg., Building Research & Information, 40(3), 260-273, 2012.
- [12] M. Lichtmeß, „Das Problem mit der neutralen Bewertung der Gebäudeenergieeffizienz von Wohngebäuden,“ Cahier Scientifique, Revue Technique Luxembourgeoise, Luxembourg, 2013.
- [13] E. Union, „EU Energy Trends to 2030; update 2009,“ 2010.
- [14] D. Thiel und M. Ehrlich, „Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012,“ BMVBS-Online-Publikation 08/2012, Berlin, 2012.
- [15] A. Maas, H. Erhorn, J. de Boer, B. Oschatz und H. Schiller, „Untersuchung zur erweiterten Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude mit der EnEV 2012 - Anforderungsmethodik, Regelwerk und Wirtschaftlichkeit,“ BMVBS-Online-Publikation 05/2012, Berlin, 2012.

- [16] E. Hinz, „Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden,“ BMVBS-Online-Publikation 07/2012, DE, 2012.
- [17] A. Maas, H. Erhorn, B. Oschatz und H. Schiller, „Ergänzungsuntersuchungen zum Wirtschaftlichkeitsgutachten für die Fortschreibung der Energieeinsparverordnung,“ BMVBS-Online-Publikation 30/2012, Berlin, 2012.
- [18] O. Langniß, T. Kohberg, H.-F. Wülbeck, M. Nast, M. Peht, S. Frick, H. Drück und E. Streicher, „Evaluierung des Marktanzreizprogramms für erneuerbare Energien: Ergebnisse der Förderung für das Jahr 2010,“ Ausarbeitung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart, 2011.
- [19] N. Krüger, W. Kirchhof, S. Klauß und K. Höttges, „Leitfaden für abgestimmte Modernisierungsempfehlungen bei Nichtwohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Fassade,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013.
- [20] „TGA-KO, Kostenermittlung Technische Gebäudeausrüstung, Orientierungswerte für die Planung,“ Baden Württemberg, Finanzministerium, 3.Auflage, Baden Württemberg, 2008.
- [21] E. Hinz, „Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012, Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2010.
- [22] M. Lichtmeß and J. Knissel, „Überarbeitung des Förderprogramms für energieeffiziente Neu- und Altbauten aus dem Jahre 2009,“ Wirtschaftsministerium, Luxemburg, 2013.
- [23] CEN Europäisches Komitee für Normung, „EN 15459 Energieeffizienz von Gebäuden - Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Energieanlagen in Gebäuden,“ CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 2007.
- [24] VDI 2067, „Economic efficiency of building installations, Energy demand for heating, cooling, humidification and dehumidification,“ Verein Deutscher Ingenieure, DE, 2013.
- [25] Le gouvernement du grand-duché de Luxembourg, „Règlement grand-ducal du 12 décembre 2012 instituant un régime d'aides pour la promotion de l'utilisation rationnelle de l'énergie et la mise en valeur des énergies renouvelables dans le domaine du logement,“ Service central de législation, Luxemburg, 2013.
- [26] M. G. u. J. K. T. Loga, „Deutsche Gebäudetypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden,“ IWU Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2011.
- [27] Wirtschaftsministerium-LU, M. Lichtmeß und J. Knissel, „Nationaler Plan Luxemburgs zur Erhöhung der Zahl der Niedrigstenergiegebäude,“ Wirtschaftsministerium Luxemburg, Luxemburg, 2013.
- [28] M. Lichtmeß, „Diskussionspapier, Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen bei Eigenbedarfsdeckung ohne Einspeisevergütung,“ Goblet Lavandier & Associés, Luxemburg, 2014.

## 7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Diskontierungsrate.....  | 7  |
| Tabelle 2: Jährliche Energiepreissteigerung .....   | 7  |
| Tabelle 3: Kostenfunktionen und Kostenkennwerte für bauliche Maßnahmen .....  | 10 |
| Tabelle 4: Kostenfunktionen und Kostenkennwerte für heizungstechnische Installationen und Erneuerbare Energien..... | 10 |
| Tabelle 5: Kostenfunktionen und Kostenkennwerte für Kälteanlagen.....   | 11 |
| Tabelle 6: Kostenfunktionen für Lüftungstechnische Anlagen .....  | 11 |
| Tabelle 7: Kostenkennwerte für Beleuchtungsanlagen.....   | 12 |
| Tabelle 8: Lebensdauer der baulichen und technischen Maßnahmen.....   | 13 |
| Tabelle 9: Energiepreise zu Beginn des Betrachtungszeitraumes .....   | 14 |
| Tabelle 10: Ansatz für Wartungskosten.....  | 14 |
| Tabelle 11: Berücksichtigte Kosten zur CO <sub>2</sub> -Vermeidung .....  | 15 |
| Tabelle 12: Verwendete Primärenergie- und Umweltfaktoren gemäß aktueller Gesetzgebung [3], [4]. .....               | 16 |
| Tabelle 13: Typische Bauausführungen in den unterschiedlichen Effizienzklassen.....                                 | 18 |
| Tabelle 14: Typische anlagentechnische Bauausführungen in den unterschiedlichen Effizienzstandards .....            | 19 |
| Tabelle 15: Anlagentechnische Ausstattungsmerkmale als Subsystem.....   | 20 |
| Tabelle 16: Verwendete Gebäudegeometrien und -charakteristika.....  | 21 |
| Tabelle 17: Entwicklungsszenarien (S1–6) für Energiepreise und wirtschaftliche Situation.....                       | 23 |
| Tabelle 18: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                        | 27 |
| Tabelle 19: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – Subventionen.....                    | 28 |
| Tabelle 20: Wohngebäude – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch .....                                | 29 |
| Tabelle 21: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.....                        | 30 |
| Tabelle 22: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.....                        | 31 |
| Tabelle 23: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.....                        | 32 |
| Tabelle 24: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                        | 33 |
| Tabelle 25: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                        | 34 |
| Tabelle 26: Wohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechniken.....     | 35 |
| Tabelle 27: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 38 |
| Tabelle 28: Wohngebäude 10 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 39 |
| Tabelle 29: Wohngebäude 11 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 39 |
| Tabelle 30: Wohngebäude 12 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 40 |
| Tabelle 31: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung .....               | 41 |
| Tabelle 32: Wohngebäude 10 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung .....               | 42 |
| Tabelle 33: Wohngebäude 11 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung .....               | 42 |
| Tabelle 34: Wohngebäude 12 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – mit Förderung .....               | 43 |
| Tabelle 35: Wohngebäude 09 – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik.....             | 44 |
| Tabelle 36: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 45 |
| Tabelle 37: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 46 |
| Tabelle 38: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 47 |
| Tabelle 39: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 48 |
| Tabelle 40: Wohngebäude 09 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                     | 49 |
| Tabelle 41: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                       | 51 |
| Tabelle 42: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikroökonomisch – Subventionen.....                   | 53 |
| Tabelle 43: Wohngebäude – Bestand – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch.....                                | 54 |
| Tabelle 44: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.....                       | 55 |
| Tabelle 45: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.....                       | 56 |
| Tabelle 46: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.....                       | 57 |
| Tabelle 47: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                       | 58 |
| Tabelle 48: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                       | 59 |
| Tabelle 49: Wohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechniken.....    | 61 |
| Tabelle 50: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 65 |
| Tabelle 51: Wohngebäude 10 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 66 |
| Tabelle 52: Wohngebäude 11 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 66 |
| Tabelle 53: Wohngebäude 12 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 67 |
| Tabelle 54: Wohngebäude 09 – Bestand – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik .....           | 68 |
| Tabelle 55: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 69 |
| Tabelle 56: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 70 |
| Tabelle 57: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 71 |
| Tabelle 58: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 72 |
| Tabelle 59: Wohngebäude 09 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....                    | 73 |
| Tabelle 60: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....                   | 74 |
| Tabelle 61: Nichtwohngebäude – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch .....                           | 75 |
| Tabelle 62: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.....                   | 76 |

## Fazit für bestehende Nichtwohngebäude

---

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 63: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.....  | 77  |
| Tabelle 64: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.....  | 78  |
| Tabelle 65: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....  | 79  |
| Tabelle 66: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....  | 80  |
| Tabelle 67: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES I.....   | 81  |
| Tabelle 68: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES II.....  | 82  |
| Tabelle 69: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES III.....   | 83  |
| Tabelle 70: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES I-III.....   | 84  |
| Tabelle 71: Nichtwohngebäude – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik.....   | 85  |
| Tabelle 72: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....   | 88  |
| Tabelle 73: Nichtwohngebäude 02 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....   | 89  |
| Tabelle 74: Nichtwohngebäude 03 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....   | 89  |
| Tabelle 75: Nichtwohngebäude 04 – Neubau – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....   | 90  |
| Tabelle 76: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – alle Szenarien – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik.....   | 91  |
| Tabelle 77: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....   | 92  |
| Tabelle 78: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.....  | 93  |
| Tabelle 79: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.....  | 94  |
| Tabelle 80: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.....  | 95  |
| Tabelle 81: Nichtwohngebäude 01 – Neubau – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.....  | 96  |
| Tabelle 82: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 98  |
| Tabelle 83: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 99  |
| Tabelle 84: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 100 |
| Tabelle 85: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 101 |
| Tabelle 86: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 102 |
| Tabelle 87: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 103 |
| Tabelle 88: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 104 |
| Tabelle 89: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES I.....  | 105 |
| Tabelle 90: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES II.....   | 106 |
| Tabelle 91: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES III.....  | 107 |
| Tabelle 92: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch –Anlage ES I-III.....  | 108 |
| Tabelle 93: Nichtwohngebäude – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagentechnik.....  | 109 |
| Tabelle 94: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....  | 112 |
| Tabelle 95: Nichtwohngebäude 02 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....  | 113 |
| Tabelle 96: Nichtwohngebäude 03 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....  | 113 |
| Tabelle 97: Nichtwohngebäude 04 – Bestand – Entwicklungsszenario S1 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....  | 114 |
| Tabelle 98: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – alle Entwicklungsszenarien – Mikro- und Makroökonomisch.....   | 115 |
| Tabelle 99: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S2 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....  | 116 |
| Tabelle 100: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S3 – Mikro- und Makroökonomisch – Anlagen.....   | 117 |
| Tabelle 101: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S4 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.....  | 118 |
| Tabelle 102: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.....  | 119 |
| Tabelle 103: Nichtwohngebäude 01 – Bestand – Entwicklungsszenario S5 – Mikro- und Makroökonomisch– Anlagen.....  | 120 |
| Abbildung 1: Grafische Darstellung der Festlegung der kostenoptimalen Anforderungswerte gemäß [1] und [2]......  | 5   |
| Abbildung 2: Grafische Darstellung der NPV-Methode.....  | 6   |
| Abbildung 3: Ablaufschema-Bestimmung der Investitionskosten.....   | 12  |
| Abbildung 4: Vergleich der Berechnungsergebnisse im Heizwärmebedarf zwischen der nationalen Verordnung mit dem LuxEeB-Tool und dem verwendeten modifizierten Ansatz in EnerCalC..... | 17  |
| Abbildung 5: Nutzenergiebedarfe für die berechneten Gebäude in Abhängigkeit des Wärmeschutzstandards.....  | 22  |
| Abbildung 6: schematische Darstellung der Variantenanalyse. Die eingefärbten Felder zeigen eine mögliche Variante im Schema. ....  | 24  |
| Abbildung 7: Schema der Ergebnisdarstellung. Die eingefärbten Felder zeigen eine mögliche Variante im Schema. ....   | 25  |